

GEODETSKI VESTNIK

UDK 528=863
ISSN 0351-0271
EISSN 1581-1328



Letnik 65, št. 2, str. 177–348, Ljubljana, junij 2021. Izidejo štiri številke na leto.
Naklada te številke: 1200 izvodov.

Prosto dostopno na spletnem naslovu: <http://www.geodetski-vestnik.com>.

Vol. 65, No. 2 pp. 177–348, Ljubljana, Slovenia, Jun 2021. Issued four times a year.
Circulation: 1,200 copies.

Free on-line access at <http://www.geodetski-vestnik.com>.

IF JCR (2019): 0,469

IF SNIP (2019): 0,476



Geodetski vestnik je odprtodostopna revija.
Recenzirani objavljeni članki so indeksirani in povzeti v:

Social Sciences Citation Index (SSCI)
Social Scisearch (SSS),
Journal Citation Reports/Social Sciences Edition (JCR/SSE),
Source Normalized Impact per paper (SNIP/SE)

Geodetski vestnik je indeksiran in povzet tudi v bibliografskih zbirkah:

GEOBASE(TM), ICONDA – International Construction Database, DOAJ – Directory of Open Access Journals, SCOPUS, COBISS, Civil Engineering Abstracts, GeoRef, CSA Aerospace & High Technology Database, Electronics and Communications Abstracts, Materials Business File, Solid State and Superconductivity Abstracts, Computer and Information Systems, Mechanical & Transportation Engineering Abstracts, Water Resources Abstracts, Environmental Sciences

Izdajanje Geodetskega vestnika sofinancira:
Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Geodetski vestnik je vpisan v razvid medijev na Ministrstvu za kulturo Republike Slovenije pod zaporedno številko 526.

Geodetski vestnik is an open access journal.
The reviewed papers are indexed and abstracted in:

Social Sciences Citation Index (SSCI)
Social Scisearch (SSS),
Journal Citation Reports/ Social Sciences Edition (JCR/SSE),
Source Normalized Impact per paper (SNIP/SE)

Indexed and abstracted is also in those bibliographic data bases:

GEOBASE(TM), ICONDA – International Construction Database, DOAJ – Directory of Open Access Journals, SCOPUS, COBISS, Civil Engineering Abstracts, GeoRef, CSA Aerospace & High Technology Database, Electronics and Communications Abstracts, Materials Business File, Solid State and Superconductivity Abstracts, Computer and Information Systems, Mechanical & Transportation Engineering Abstracts, Water Resources Abstracts, Environmental Sciences

Geodetski vestnik is partly subsidized by the Slovenian Research Agency.

Geodetski vestnik is entered in the mass media register at the Ministry of Culture of the Republic of Slovenia under No. 526.

GLAVNA IN ODGOVORNA UREDNICA

dr. Anka Lisec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Slovenija

Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana

Tel.: +386 1 4768 560

e-naslov: urednik@geodetski-vestnik.com

PODROČNI UREDNIKI

Sandi Berk, urednik rubrike *strokovne razprave*

dr. Božo Koler, področni urednik za *inženirsko geodezijo*

dr. Mojca Kosmatin Fras, področna urednica za *fotogrametrijo*

dr. Klemen Kregar, področni urednik za *geodezijo*

dr. Božena Lipej, področna urednica za *upravljanje in evidentiranje nepremičnin*

dr. Krištof Oštir, področni urednik za *daljinsko zaznavanje in geoinformatiko*

dr. Bojan Stopar, področni urednik za *satelitsko geodezijo in geofiziko*

dr. Alma Zavodnik Lamovšek, področna urednica za *načrtovanje in urejanje prostora*

MEDNARODNI UREDNIŠKI ODBOR

dr. Ivan R. Aleksić (Univerza v Beogradu, Gradbena fakulteta, Beograd, Srbija)

dr. Janja Avbelj (Eumetsat, Darmstadt, Nemčija)

dr. Branislav Bajat (Univerza v Beogradu, Gradbena fakulteta, Beograd, Srbija)

dr. Tomislav Bašić (Univerza v Zagrebu, Fakulteta za geodezijo, Zagreb, Hrvaška)

dr. Giuseppe Borruso (Univerza v Trstu, DEAMS, Trst, Italija)

Miran Brumec (Inženirska zbornica Slovenije)

dr. Raffaella Cefalo (Univerza v Trstu, Oddelek za inženirstvo in arhitekturo, Trst, Italija)

dr. Vlado Cetl (EK, Skupno raziskovalno središče, Ispra, Italija)

dr. Joep Crompvoets (KU Leuven, Public Governance Institute, Leuven, Belgija)

dr. Marjan Čeh (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Slovenija)

dr. Walter Timo de Vries (Tehniška univerza München, München, Nemčija)

dr. Urška Demšar (Univerza St. Andrews, Velika Britanija)

dr. Samo Drobne (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Slovenija)

mag. Erna Flogie Dolinar (Geodetska uprava RS, Ljubljana, Slovenija)

dr. Thomas Kalbro (Kraljevi inštitut KTH, Stockholm, Švedska)

dr. Dušan Kogoj (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Slovenija)

dr. Žiga Kokalj (ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije, Ljubljana, Slovenija)

dr. Miran Kuhar (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Slovenija)

dr. Reinfried Mansberger (Univerza za naravoslovne in biotehniške vede, IVFL, Dunaj, Avstrija)

dr. Leiv Bjarte Mjøs (Visoka šola v Bergnu, Bergen, Norveška)

dr. Gerhard Navratil (Tehniška univerza na Dunaju, Dunaj, Avstrija)

Tomaž Petek (Geodetska uprava RS, Ljubljana, Slovenija)

dr. Dušan Petrovič (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Slovenija)

dr. Alenka Poplin (Iowa State University, College of Design, Ames, Iowa, ZDA)

dr. Andrea Pödör (Univerza Óbuda, Székesfehérvár, Madžarska)

dr. Anton Prosen (Ljubljana, Slovenija)

dr. Dalibor Radovan (Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, Slovenija)

dr. Fabio Remondino (Fondazione Bruno Kessler, 3DOM, Trento, Italija)

dr. Miodrag Roić (Univerza v Zagrebu, Fakulteta za geodezijo, Zagreb, Hrvaška)

dr. Balázs Székely (Univerza Eötvösa Loránd, Budimpešta, Madžarska)

dr. Bojan Šavrič (ESRI Ltd, Redlands, Kalifornija, ZDA)

dr. Maruška Šubic Kovač (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Slovenija)

dr. Joc Triglav (Geodetska uprava RS, Murska Sobota, Slovenija)

dr. Mihaela Triglav Čekada (Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, Slovenija)

dr. Arvo Vitikainen (Univerza, Aalto, Finska)

dr. John C. Weber (Grand Valley State College, Department of Geology, Allendale, Michigan, ZDA)

dr. Klemen Zakšek (Rosen Group, Lingen, Nemčija)

EDITOR-IN-CHIEF

Anka Lisec, Ph.D.

University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Slovenia
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
Phone: +386 1 4768 560
E-mail: editor@geodetski-vestnik.com

FIELD AND SUB-FIELD EDITORS

Sandi Berk, editor for the section Professional Discussions
Božo Koler, Ph.D., field editor for Engineering Geodesy
Mojca Kosmatin Fras, Ph.D., field editor for Photogrammetry
Klemen Kregar, Ph.D., field editor for Surveying
Božena Lipej, Ph.D., field editor for Real Estate Management and Recording
Krištof Oštir, Ph.D., field editor for Remote Sensing and Geoinformatics
Bojan Stopar, Ph.D., field editor for Satellite Geodesy and Geophysics
Alma Zavodnik Lamovšek, Ph.D., field editor for Spatial Planning

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Ivan R. Aleksić, Ph.D. (University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia)
Janja Avblej, Ph.D. (Eumetsat, Darmstadt, Germany)
Branislav Bajat, Ph.D. (University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia)
Tomislav Bašič, Ph.D. (University of Zagreb, Faculty of Geodesy, Zagreb, Croatia)
Giuseppe Borruso, Ph.D. (University of Trieste, DEAMS, Trieste, Italy)
Miran Brumec (Slovenian Chamber of Engineers)
Raffaella Cefalo, Ph.D. (University of Trieste, Department of Engineering and Architecture, Trieste, Italy)
Vlado Cetl, Ph.D. (EC, Joint Research Centre, Ispra, Italy)
dr. Joep Crompvoets (KU Leuven, Public Governance Institute, Leuven, Belgium)
Marjan Čeh, Ph.D. (University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia)
Walter Timo de Vries, Ph.D. (Technical University of Munich, München, Germany)
Urška Demšar, Ph.D. (University of St. Andrews, St. Andrews, Scotland, United Kingdom)
Samo Drobne, Ph.D. (University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia)
Erna Flogie Dolinar, M.Sc. (Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, Ljubljana, Slovenia)
Thomas Kalbro, Ph.D. (Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden)
Dušan Kogoj, Ph.D. (University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia)
Žiga Kokalj, Ph.D. (ZRC SAZU, Institute of Anthropological and Spatial Studies, Slovenia)
Miran Kuhar, Ph.D. (University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia)
Reinfried Mansberger, Ph.D. (University of Natural Resources and Life Sciences, IVFL, Vienna, Austria)
Leiv Bjarte Mjøs, Ph.D. (Bergen University College, Bergen, Norway)
Gerhard Navratil, Ph.D. (Vienna Technical University, Vienna, Austria)
Tomaž Petek (Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia)
Dušan Petrovič, Ph.D. (University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia)
Alenka Poplin, Ph.D. (Iowa State University, College of Design, Ames, Iowa, USA)
Andrea Pödör, Ph.D. (Óbuda University, Székesfehérvár, Hungary)
Anton Prosen, Ph.D. (Ljubljana, Slovenia)
Dalibor Radovan, Ph.D. (Geodetic Institute of Slovenia, Ljubljana, Slovenia)
Fabio Remondino, Ph.D. (Fondazione Bruno Kessler, 3DOM, Trento, Italy)
Miodrag Roić, Ph.D. (University of Zagreb, Faculty of Geodesy, Zagreb, Croatia)
Balázs Székely, Ph.D. (Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary)
Bojan Šavrič, Ph.D. (ESRI Ltd, Redlands, California, USA)
Maruška Šubic Kovač, Ph.D. (University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia)
Joc Triglav, Ph.D. (Surveying and Mapping Authority, Murska Sobota, Slovenia)
Mihaela Triglav Čekada, Ph.D. (Geodetic Institute of Slovenia, Ljubljana, Slovenia)
Arvo Vitikainen, Ph.D. (Alto University, Finland)
John C. Weber, Ph.D. (Grand Valley State College, Department of Geology, Allendale, Michigan, USA)
Klemen Zakšek, Ph.D. (Rosen Group, Lingen, Nemčija)

IZDAJATELJ

Zveza geodetov Slovenije

Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

e-naslov: info@geodetski-vestnik.com

IZDAJATELJSKI SVET

mag. Gregor Klemenčič, predsednik *Zveze geodetov Slovenije*

mag. Erna Flogie Dolinar, *Zveza geodetov Slovenije*

dr. Anka Lisec, *glavna in odgovorna urednica*

Sandi Berk, *urejanje rubrike Strokovne razprave*

dr. Mojca Foški, *tehnično urejanje in oblikovanje*

TEHNIČNO UREJANJE IN OBLIKOVANJE

dr. Mojca Foški, e-naslov: mojca.foski@fgg.uni-lj.si

Barbara Trobec, e-naslov: barbara.trobec@fgg.uni-lj.si

dr. Teja Koler Povh, e-naslov: teja.povh@fgg.uni-lj.si

LEKTORIRANJE

Manica Baša

UREJANJE SPLETNIH STRANI

dr. Klemen Kozmus Trajkovski

e-naslov: web@geodetski-vestnik.com

TISK

SIMPRO d.o.o., Brezovica

DISTRIBUCIJA

mag. Janez Goršič, e-naslov: janez.gorsic@fgg.uni-lj.si

TRŽENJE (OGLASNO TRŽENJE)

Zveza geodetov Slovenije

Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana

e-naslov: zveza.geodetov.slovenije@gmail.com

NAVODILA AVTORJEM

<http://www.geodetski-vestnik.com>

PUBLISHER

Association of Surveyors of Slovenia

Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

e-mail: info@geodetski-vestnik.com

PUBLISHING COUNCIL

Gregor Klemenčič M.Sc., president and Erna Flogie Dolinar,

M.Sc., *the Association of Surveyors of Slovenia*

Anka Lisec, Ph.D., *editor-in-chief*

Sandi Berk, *editor of the section Professional Discussions*

Mojca Foški, Ph.D., *technical editor and design*

TECHNICAL EDITOR AND DESIGN

Mojca Foški, Ph.D., e-mail: mojca.foski@fgg.uni-lj.si

Barbara Trobec, e-mail: barbara.trobec@fgg.uni-lj.si

Teja Koler Povh, Ph.D., e-mail: teja.povh@fgg.uni-lj.si

SLOVENE PROOFREADING

Manica Baša

WEB PAGE EDITING

Klemen Kozmus Trajkovski, Ph.D.

e-mail: web@geodetski-vestnik.com

PRINT

SIMPRO d.o.o., Brezovica

DISTRIBUTION

Janez Goršič, M.Sc., e-mail: janez.gorsic@fgg.uni-lj.si

MARKETING (ADVERTISING)

Association of Surveyors of Slovenia

Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

e-mail: zveza.geodetov.slovenije@gmail.com

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

<http://www.geodetski-vestnik.com>

VSEBINA CONTENTS

UVODNIK | EDITORIAL

<i>Anka Lisec</i>	AMBICIJA AMBITION	183
<i>Gregor Klemenčič</i>	DIGITALNI IZZIV DIGITAL CHALLENGE	186

RECENZIRANI ČLANKI | PEER-REVIEWED ARTICLES

<i>Franc Dimc, Polona Pavlovčič Prešeren, Matej Bažec</i>	ODZIV GEODETSKIH INSTRUMENTOV GNSS NA MOTENJE Z ODDAJNIKOM PRELETNEGA SIGNALA L1 OPERATION OF GEODETIC GNSS INSTRUMENTS UNDER CHIRP SIGNAL L1 JAMMING	189
<i>Aleš Marjetič</i>	IZRAVNAVA PO METODI NAJMANJŠIH KVADRATOV Z UPOŠTEVANJEM POGREŠKOV PRI NEZNANKAH LEAST-SQUARES ADJUSTMENT TAKING INTO ACCOUNT THE ERRORS IN VARIABLES	205
<i>Miran Kuhar, Robert Brglez, Božo Koler</i>	KAKOVOST DOLOČITVE NADMORSKIH VIŠIN Z GNSS-VIŠINOMERSTVOM NA OBMOČJU LJUBLJANE QUALITY DETERMINATION OF MEAN SEA LEVEL HEIGHTS WITH GNSS LEVELLING ON THE LJUBLJANA CITY AREA	219
<i>Nina Kranjec, Mihaela Triglav Čekada, Milan Kobal</i>	NAPOVEDOVANJE DREVESNIH VRST IZ GEOMETRIJE IN INTENZITETE OBLAKA AEROLASERSKIH TOČK VRHOV DREVESNIH KROŠENJ PREDICTING TREE SPECIES BASED ON THE GEOMETRY AND INTENSITY OF AERIAL LASER SCANNING POINT CLOUD OF TREETOPS	234
<i>Sajid Mahmood, Zulkepli bin Majid, Khairulnizam bin M. Idris, Muhammad Hamid Chaudhry</i>	VPLIV VPADNEGA KOTA IN LASERSKEGA ODTISA NA NATANČNOST IN STOPNJO PODROBNOSTI PRI TERESTRIČNEM LASERSKEM SKENIRANJU INFLUENCE OF INCIDENT ANGLE AND LASER FOOTPRINT ON PRECISION AND LEVEL OF DETAIL IN TERRESTRIAL LASER SCANNER MEASUREMENTS	260

<i>Matthews Siphwe Mphuthi, Patroba Achola Odera</i>	282
OCENA RAZLIK MED VIŠINSKIM DATUMOM JUŽNE AFRIKE IN DATUMOM MEDNARODNEGA VIŠINSKEGA REFERENČNEGA SISTEMA ESTIMATION OF VERTICAL DATUM OFFSET FOR THE SOUTH AFRICAN VERTICAL DATUM, IN RELATION TO THE INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE SYSTEM	

STROKOVNE RAZPRAVE | PROFESSIONAL DISCUSSIONS

<i>Mihaela Triglav Čekada, Katja Oven, Dalibor Radovan, Bojan Stopar, Božo Koler, Dušan Kogoj, Miran Kuhar, Anka Lisec, Oskar Sterle, Jurij Režek</i>	299
STALNA GEODETSKA ZNAMENJA KOT TEMELJ ZA DELOVANJE GEODETSKE STROKE PERMANENT GEODETIC MARKS AS THE BASIS FOR SURVEYING PROFESSION	
<i>Joc Triglav</i>	311
OD GOSJEGA PERESA DO RAČUNALNIŠKEGA OBLAKA FROM QUILL TO THE CLOUD	
<i>Sandi Berk, Klemen Medved, Jurij Režek</i>	316
SIMPOZIJ EUREF 2021 V LJUBLJANI IZVEDEN VIRTUALNO EUREF 2021 SYMPOSIUM IN LJUBLJANA HELD VIRTUALLY	

NOVICE IZ STROKE | NEWS FROM THE FIELD

DRUŠTVENE NOVICE | NEWS FROM SOCIETIES

RAZNO | MISCELLANEOUS

DIPLOME IN MAGISTERIJI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG OD 1. 2. 2021 DO 30. 4. 2021	
MATEJA VOLGEMUT – NOVA DOKTORICA ZNANOSTI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG	
URŠKA DREŠČEK – NOVA DOKTORICA ZNANOSTI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG	
JERNEJ TEKAVEC – NOVI DOKTOR ZNANOSTI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG	
NAJAVA 49. GEODETSKEGA DNE: IZZIVI DIGITALNE PREOBRAZBE KATASTRA	

Slika na naslovnici:

Prikaz nove uradne višinske referenčne ploskve, ki se uporablja v višinskem sistemu SVS2010 z uradnim imenom SLO_VRP2016/Koper, kar je okrajšava za SLOvenska Višinska Referenčna Ploskev iz leta 2016, datum Koper. Razpon geoidnih višin (izolinij) je med 42,16 m in 50,61 m, povprečna vrednost je 46,16 m. vir: <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/drzavni-prostorski-koordinatni-sistem/vertikalna-sestavina/visinska-referencna-ploskev-geoid/>

AMBICIJA AMBITION

Anka Lisec

glavna in odgovorna urednica | Editor-in-chief

V dnevih, ko zaključujemo marsikatero službeno obveznost pred zasluženim poletnim oddihom, je izšla junijska številka Geodetskega vestnika. Ponuja nam raznolike prispevke tako iz znanosti in stroke kot novice iz stroke ter nekaj utrinkov iz društev – ki pa so zaradi epidemije še vedno v zelo omejenem obsegu.

Resnično upam, da smo na dobri poti k izhodu iz teh, človeku in družbi, zelo neprijetnih časov. V preteklih mesecih so močno zaznamovali delovanje družbe različni ukrepi, ki so bili včasih smiselni, včasih pa tudi precej nerazumni in nesorazmerni glede na posledice, pred katerimi naj bi varovali. Zaposleni na univerzi smo na primer skušali slediti stalno spreminjajočim se pravilom glede izvajanja pedagoškega in raziskovalnega dela. Po najboljših močeh smo se prilagajali in si prizadevali, da to ne bi veliko vplivalo na kakovost izvedbe. Kljub vsemu vloženemu trudu že opažamo negativne posledice ukrepov – tudi takšne, na katere ob sami epidemiji morda nismo niti pomislili. Naj omenim le, da smo se ob vrnitvi študentov in študentk v predavalnice marsikdaj vprašali, kam neki je izginil študentski zvedavi duh. Kje so mladostno sproščeni, motivirani in energični študentke in študenti?

Težko je obsojati odločevalce zaradi ukrepov ob razglašeni epidemiji, saj so se odločitve sprejemale v zelo negotovih časih, pa vendarle ostaja neprijeten občutek, da so prevladali izbrani »interesi«. Sredi velike družbene krize je predvsem težko poslušati o vlaganjih v »razvoj gospodarstva«, medtem ko posameznik in družba kot kompleksen organizem nista upoštevana, kaj šele postavljena na prvo mesto. Za ambiciozen in dolgoročen gospodarski razvoj je namreč treba razumeti kompleksnost družbe ter vpliv gospodarstva na njeno delovanje – zgolj finančni dobiček za ozek krog deležnikov pač ne šteje in ne prispeva k dolgoročnemu razvoju družbe.

Dolgoročni družbeni razvoj je nadalje močno povezan z napredkom v znanosti. Razvoj družbe in s tem tudi gospodarstva temelji na vrhunskih znanstvenih in razvojnih dosežkih. V zadnjem obdobju smo v Sloveniji sicer priča sprejemanju številnih razvojnih in strateških dokumentov, ki pa se v zelo omejenem obsegu dotikajo znanstveno-raziskovalnega segmenta gospodarstva. Ali se morda pisci teh dokumentov zanašajo le na priložnosti dosedanjih znanstvenih in razvojnih dosežkov? Jasno je, da pomeni varčevanje pri znanosti in razvoju dolgoročno obsodbo gospodarstva na stagniranje ali celo propad.

Pri navedenih strateških odločitvah pa bode v oči še nekaj – število dokumentov. Zdi se, da imamo veliko več strateških dokumentov kot pa pravih strategij, ki bi tudi opredeljevale korake za uresničitev

zastavljenih ciljev. Prav je, da se pri »ambicioznih« razvojnih načrtih spomnimo na pomen besede »ambicija«, ki izhaja iz latinskega »*ambitio*« in pomeni »slovesni obhod«. Ambicijo so prvotno povezovali z željo po uspehu in zasluženim »slovesnim obhodom« ob vrhunskih dosežkih. Ambicija se torej nanaša tudi na prehojeno pot do uspeha, se pravi na preudarno aktivnost za doseg želenega cilja. Ni dovolj, da tega le zapišemo in želimo doseči, poznati moramo tudi pot do njega in to pot opraviti, uspeh pa lahko zaznamujemo s »slovesnim obhodom« ob njegovi izpolnitvi.

Zveza geodetov Slovenije se je z drugimi institucionalnimi deležniki v stroki odločila, da pripravi strateške usmeritve razvoja stroke, kar zelo pozdravljam. Osrednji izziv pri tem je vključevanje deležnikov v oblikovanje strateških ciljev in načrtovanje poti k njihovem udejanjanju, kajti le tako lahko pričakujemo, da se bodo strateški cilji uresničili. Paziti moramo torej, da to ne bo le dokument, ampak strategija s skupnimi, ambicioznimi razvojnimi cilji, ki jih bomo prenesli v prakso in bodo prispevali k dobrobiti celotne družbe.

The June issue of Geodetski vestnik is released when many of us are completing our final working duties before we take our well-deserved summer vacations. This issue offers different scientific and professional articles, news from the field, and some glimpses into the activities of societies, which remain scarce due to the pandemic.

I sincerely hope that we are firmly set on the path that leads away from a period that has been rather unpleasant for people and society as a whole. The functioning of society has been decisively marked by different measures, sometimes appropriate, while at other times somewhat irrational and disproportionate to the consequences they were meant to alleviate. Thus, we at the university attempted to follow the constantly changing rules on how to perform our teaching and research tasks. We did our best to conform while maintaining the level of quality of all our activities. Despite all our efforts, we can observe the negative effects of measures – some of which were difficult to predict during the epidemic. Let me say we often wondered what happened to the curious minds of our students when they returned to our lecture rooms. Where have our motivated and lively students with their youthful energies gone?

It is difficult to blame the decision-makers for the measures taken when the epidemic was announced, as they were forced to shape them in a period of great uncertainty. Nevertheless, one cannot shake the nagging feeling that carefully chosen “interests” prevailed. It is really difficult to hear about all the investments in the “economic development” during a grave societal crisis when the individual and society as a complex organism are neglected, while they should have been the first to be considered. Ambitious and long-term economic development calls for an understanding of the complexity of society and the economic effects on its functioning – mere profit for a narrow group of stakeholders is not enough and does not contribute to the long-term development of society.

Furthermore, the development of society (including its economy) is closely connected with scientific progress. Numerous development and strategic documents have been accepted in Slovenia lately, but they hardly touch upon science and research in the economy. Are the authors of these documents relying only on the opportunities offered by existing scientific and development achievements? It is clear that savings in science and development mean long-term economic stagnation or even collapse.

There is something else that sticks out with the latest strategic decisions – the sheer number of documents. It seems that we can produce many more strategic documents than real strategies, the strategies that would define the steps for implementing the goals set. “Ambitious” development plans call us to look into the meaning of the word “ambition” derived from the Latin “abmitio”, which also means “go around” solemnly to celebrate remarkable achievements. One could argue that ambition incorporates the road to success, which means prudent activities to achieve a set goal. It is not enough to put something on paper, to want it; one needs to carve out the path for its achievement – one has to walk this path. Only then is it possible to “go around” and celebrate its fulfilment.

The Association of Surveyors of Slovenia, together with interested parties, has decided to prepare strategic guidelines for the development of the profession, the idea which I warmly welcome. The main challenge here remains how to include the stakeholders in shaping strategic goals and choosing the path for their fulfilment. Only in this way may one expect the strategic goals to be fulfilled. Therefore, we should be extremely careful that this does not remain one of several documents but becomes a proper strategy with common, ambitious development goals. Goals that will be transferred into practice and will contribute to the well-being of society as a whole.

DIGITALNI IZZIV DIGITAL CHALLENGE

Gregor Klemenčič

predsednik Zveze geodetov Slovenije | president of the Association of Surveyors of Slovenia

Na začetku letošnjega poletja je pred nami že nova številka Geodetskega vestnika. Poletje je za mnoge najlepši letni čas, ko si po vseh naporih med letom privoščimo letni dopust. In s tem čas zase in za družino, ko lahko v brezskrbnih dneh vsaj za kratko pozabimo na bremena vsakdanjika in se posvetimo sebi. Prijetno poletno opravilo je tudi branje in prepričan sem, da se bo marsikdo prav z veseljem poglobil v tokratno številko Geodetskega vestnika kje na ležalniku ali v viseči mreži, ob šumenju morja in v zavetju borove sence.

Ob koncu poletja bomo izvedli že 49. Geodetski dan, ki bo letos v Kopru. Naslov letošnjega dogodka je *Izzivi digitalne preobrazbe katastra*. Izbran je skrbno, saj je pred nami nekajletno obdobje, ko bo kataster nepremičnin v Sloveniji doživel korenite spremembe. Skrbno so izbrane tudi teme vsebinsko bogatih predavanj, ki bodo osvetlile digitalizacijo katastra iz različnih zornih kotov. Digitalen, kakovosten, večnamenski kataster je ključnega pomena na področju upravljanja prostora. Kataster, trdno vpet v sodoben državni koordinatni sistem, je večnamensko digitalno jedro vira informacij prostorske podatkovne infrastrukture, ki omogoča vsem drugim deležnikom nadgrajevanje z lastnimi podatki o naravnem in grajenem prostoru. Edinstvena lastnost katastra je povezava lege, oblike in lastnosti parcel in stavb s podatki o lastništvu. Te lastnosti nima in je ne more nadomestiti nobena druga evidenca. Pri tem je še kako pomembna geodetska stroka, ki skrbi za kakovost katastra in zagotavlja temelje za informacijsko podporo upravljanju prostora. Izrednega pomena je trdno družbeno razumevanje vloge katastra in vsestranska podpora vseh deležnikov. Geodetska stroka pa mora spremljati družbene izzive pri upravljanju prostora ter se aktivno odzivati z rešitvami in izboljšavami.

Obdobje, ki nas loči od uporabe Zakona o katastru nepremičnin v aprilu 2022, bo izredno zahtevno in bo od nas vseh terjalo veliko aktivnosti, da bomo na vseh področjih geodetske dejavnosti pripravljeni na izvajanje zakona. Potrebni bo veliko različnih izobraževanj za pravilno razumevanje vseh sprememb, ki nas čakajo. Ob tem ne bomo smeli pozabiti na ustrezno komunikacijo z javnostjo in drugimi deležniki, saj je to ključnega pomena za razumevanje prostorskih podatkov, ki jih danes uporablja vsak državljan. Živimo v obdobju silnih digitalnih družbenih sprememb in digitalni kataster je eden ključnih v tem procesu. Prepričan sem, da smo geodeti na to pripravljeni, izziv pa nam bo zagotovo, kako bomo kot stroka povezano usmerjali korake k skupnemu cilju. Priložnosti in možnosti je veliko, izkoristimo jih ter kot družbeno pomembna stroka pokažimo svojo veljavo.

Naj nam v prihodnje ne zmanjka optimizma in tvornega medsebojnega sodelovanja.

Srečno in vse dobro.

The beginning of this year's summer brings with it a new issue of Geodetski vestnik. Summer – for many, the best season, the season when they take their annual vacations and can shake off the burdens of the jobs for some time. It is the time for themselves, for their families, carefree days when one can, at least for some time, put aside everyday demands and focus on themselves. One of the pleasures of summer is reading, and I believe that many will gladly dip into the most recent issue of Geodetski vestnik in their lounge or hammock, in the shade of a pine tree and embraced by the relaxing sounds of sea waves.

At the end of the summer, the 49th Land Surveying Day will be organised: this year in Koper. This year's title is Challenges of the Digital Renovation of Cadastre. It has been chosen very carefully as the next few years is the period of extensive changes in the field in Slovenia. Equally carefully chosen are the topics of interesting lectures that will look at cadastre from different perspectives. A digitalised, high-quality, and multi-purpose cadastre is essential in spatial management. A cadastre, firmly embedded in a state-of-the-art state coordinate system, is a multi-purpose digital information core for spatial data infrastructure and enables all the stakeholders to upgrade it with their own data on natural and built environments. A unique characteristic of the cadastre is the link between the position, the shape, and the characteristics of plots of land and buildings with information about ownership. No other record is able to offer this; no other form of evidence can substitute for it. The land surveying profession that maintains the quality of the cadastre and builds the foundations of information support for land management is essential here. Another key aspect is a solid understanding of the role of the cadastre in society and the comprehensive support of all stakeholders. The task of the land surveying profession is to follow society challenges in space management and actively respond with solutions and improvements.

With the Real Estate Cadastre Act entering into force in April 2022, the period before us is full of challenges and calls for numerous activities; the surveying profession has to be able to support its implementation. A proper understanding of all the changes ahead calls for proper education. Of course, one should not forget about effective communication with the public and other stakeholders, as this is one of the most important foundations for proper understanding of spatial data being used by every citizen in contemporary society. We live in a period of tectonic digital shifts in our societies, and the digital cadastre has a pivotal role in this process. I am positive that surveyors are well-prepared, and undoubtedly the profession is facing a challenge of how to guide everybody uniformly towards a common goal. Opportunities and possibilities are ample; let us use them and prove our worth as a profession that is important for society.

Keep up a spirit of optimism and constructive cooperation in the future.

Good luck and all the best.

ODZIV GEODETSKIH INSTRUMENTOV GNSS NA MOTENJE Z ODDAJNIKOM PRELETNEGA SIGNALA L1

OPERATION OF GEODETIC GNSS INSTRUMENTS UNDER CHIRP SIGNAL L1 JAMMING

Franc Dimc, Polona Pavlovčič Prešeren, Matej Bažec

UDK: 528.28:528.5:655.023
 Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
 Prispelo: 1. 2. 2021
 Sprejeto: 14. 5. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.189-204
 SCIENTIFIC ARTICLE
 Received: 1. 2. 2021
 Accepted: 14. 5. 2021

IZVLEČEK

V prispevku predstavljamo rezultate testa ranljivosti geodetskih sprejemnikov GNSS ob namernem motenju signala v frekvenčnem področju L1 tehnologije GPS (angl. Global Positioning System). Preizkusili smo odziv devetih sprejemnikov GNSS različnih proizvajalcev, in sicer Leica Geosystems AG, Trimble Inc. in Javad GNSS Inc. Praktični preizkus je bil zasnovan na statičnih in kinematičnih motnjah signalov. Statične motnje z mirujočim motilnikom na različnih oddaljenostih od sprejemnikov (od 10 do 160 metrov) so trajale večkrat zaporedoma po tri minute. Za kratkotrajne kinematične motnje smo namestili motilnik v vozilo, ki se je testnemu območju približevalo z različnimi hitrostmi. Analiza različnih scenarijev je pokazala, da so motilniki v nekaterih situacijah onemogočili sprejem signalov s satelitov GPS, medtem ko so se sprejemniki na motnje signalov GLONASS odzvali različno. Ker med meritvami julija 2019 Galileo ni deloval kot predvideno, smo v študijo vključili le GPS in GLONASS. Geodetski instrumenti GNSS so se na motenje signala odzvali z zmanjšanjem razmerja med signalom in šumom (angl. signal-to-noise ratio – SNR) in bodisi s popolno nezmožnostjo določitve položaja bodisi z nepravilnim izračunom faznih neznank (inicializacijo) ter posledično nepravilno določitvijo položaja. Vzrok popolne nezmožnosti sprejema signala najbolj pripisujemo bližini motilnika, za nepravilno kodno in/fazi fazno določitve položaja pa tudi trajanju motenja.

KLJUČNE BESEDE

GNSS, namerno motenje signala, motilnik L1, prekinitve signala, razmerje signal-šum

ABSTRACT

This paper presents the results of a vulnerability test of several geodetic Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers in case of intentional signal interference in the frequency L1 for GPS (Global Positioning System). Nine instruments from different manufacturers (i.e., Leica Geosystems AG, Trimble Inc., Javad GNSS) were tested. The test was based on static and kinematic jamming. A static scenario with three-minute interruptions was followed by experiments with a stationary jammer located at distances from 10 m to 160 m from the receivers. For short-term kinematic interference, the jammer was installed in the vehicle, which passed the GNSS instruments at different speeds. An analysis of different scenarios showed that the jammer interrupted GPS but not GLONASS signals in certain situations. Since Galileo was not nominally operational at the time of the July 2019 measurements, only GPS and GLONASS were eligible for the study. The geodetic GNSS instruments reacted to the interruptions with a decreased signal-to-noise-ratio (SNR) and either with a complete inability to determine the code/phase position or with an incorrect calculation of phase ambiguities (initialization), which also affected the quality of the positioning. The proximity of the jammer played the most significant role in the complete inability to receive the signal; however, for the incorrect positioning longer duration of jamming was also a reason.

KEY WORDS

GNSS, intentional signal interference, jammer L1, signal interruptions, signal-to-noise ratio

1 UVOD

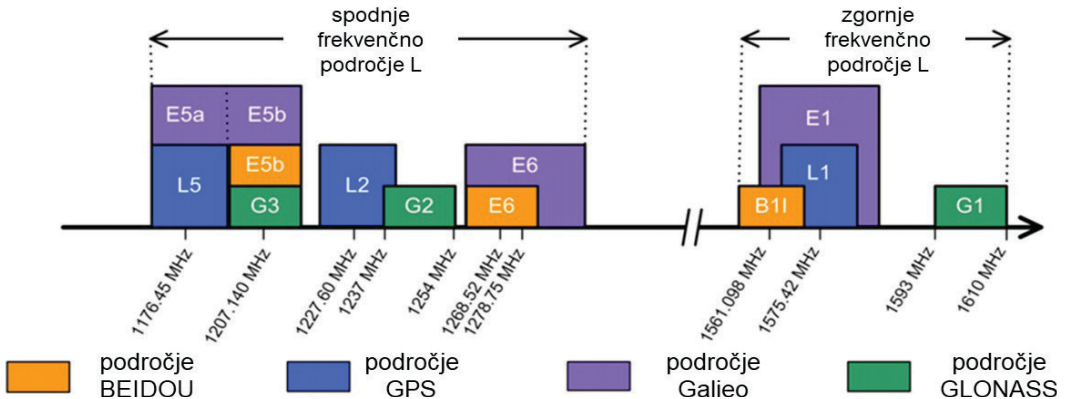
Pri vsakodnevni uporabi in zanašanju na tehnologijo globalnega pozicioniranja enega ali več globalnih satelitskih navigacijskih sistemov (angl. *Global Navigation Satellite System – GNSS*) se premalo zavedamo, da je satelitske signale GNSS precej enostavno motiti. Motnje so lahko nenamerne ali namerne. Prve izhajajo iz naprav, ki oddajajo signale večkratnikov oziroma višjih harmonikov osnovne frekvence, kateri sovpadajo neposredno v frekvence signalov GNSS ali v njihovo bližino. Povzročitelji nenamernih motenj so okvarjeni radijski oddajniki, kot so radioamaterske naprave, radarji, televizijski oddajniki, bazne postaje mobilnih omrežij ali celo sateliti. Namerne motnje so v zadnjem času zelo pogoste v vojaški in tudi civilni rabi. Pri slednji so najpogostejše motnje signalov iz naprav za zagotavljanje zasebnosti (angl. *personal privacy device – PPD*), ki so povezane z izogibanjem plačilu cestnine, s kriminalnimi dejanji, na primer tatvinami vozil, ki imajo vgrajeno možnost sledenja, in z izogibanjem sledenju. Seveda obstajajo tudi drugi razlogi za nastanek motenj, od naravnih do nenamernih umetnih, katerih učinke je mogoče zaznati in jih urejeno opisati v standardizirani obliki poročila (Thombre et al., 2018).

Uporaba motilnikov GNSS je zakonsko prepovedana in kazniva, ker uporabnik nima dovoljenja za oddajanje signala na frekvencah, določenih za GNSS. Motenje elektronskih naprav poteka s posebnim instrumentom, ki oddaja signal z enako frekvenco, kot je frekvenca signalov, ki se jih želi motiti. Pri GNSS je motenje zelo enostavno, saj so signali, ki prispejo na Zemljo, zelo šibki. Motilna naprava (angl. *jammer*) ustvari motilni signal, ki v skrajnem primeru lahko preglasi s satelita sprejeti signal in povzroči nezmožnost sprejema navigacijskih signalov in posledično določanje položaja. Zaradi karakteristik sprejemnikove antene je sprejemnik občutljivejši za motilne signale, sprejete z višjih višinskih kotov. Precej bolj tehnično so izpopolnjeni potvarjalniki signalov (angl. *spoofers*), kjer naprava oddaja lažni signal, zaradi česar je določitev položaja nepravilna. Težava pri tem je, da obe vrsti naprav vplivata na pravilnost ali sploh zmožnost določitve položaja in ju je brez dodatne namenske opreme izredno težko locirati.

GNSS pa ni namenjen le lokacijskim storitvam, ampak tudi prenosu časa za globalno poenoteno delovanje. Poleg transporta in zaščite ter reševanja se na optimalno delovanje naprav GNSS zanaša tudi gospodarska, komunikacijska in finančna infrastruktura. Zakonodajni vidik uporabe motilnikov podrobno opisujeta Rettinger in Batagelj (2013). Skupno izhodišče pri zakonskih rešitvah držav je, da je uporaba motilnikov strogo prepovedana. Mehiška vlada je izredno zaostрила kaznovalne ukrepe po ugotovitvi, da so bili v 85 % kraj tovornjakov uporabljeni motilniki (RNT, 2020). Prepoved rabe motilnikov ne izničuje pojava namernega motenja signalov GNSS, česar se proizvajalci geodetske opreme GNSS že dolgo zavedajo, zato skušajo z različnimi konstrukcijskimi in programskimi rešitvami učinke motenja signalov s satelitov omiliti ali pa moteče signale čim bolj odstraniti s prilagodljivimi visokofrekvenčnimi siti. K problemu pristopajo na dva načina, lahko izboljšujejo konstrukcijo anten GNSS ali pa v sprejemniku GNSS motnje zaznajo s posebnim programjem in jih rekonstruirajo, da jih lahko odštejejo od opazovanega signala (Borio in Closas, 2017). Pristop k zmanjšanju vpliva motečih signalov je zelo podoben problematiki sprejema odbitih signalov GNSS (angl. *multipath*) (Chang, 2011; Špánik in Hefty, 2017). V obeh primerih je cilj povečati razmerje med signalom in šumom (angl. *signal-to-noise ratio – SNR*). Pri konstrukcijskih rešitvah lahko omenimo nenehno izpopolnjevanje anten GNSS, kar je podrobno opisano v Rettinger in Batagelj (2013).

Motilniki GNSS oddajajo signale, ki v najpogosteje periodično preletajo frekvenčno področje s spreminjanjem frekvence, osredinjene okoli določenih vrednosti. Pri GPS se vrivajo v frekvenčna področja L1 (1575,42 MHz s širino 15,345 MHz), L2 (1227,60 MHz s širino 11,0 MHz) in L5 (1176,45 MHz s širino 12,5 MHz),

pri ostalih globalnih sistemih pozicioniranja se signali motilnikov vrivajo na druge frekvence (slika 1). Ker je uporaba motilnikov signalov GNSS na prostem zakonsko prepovedana in kazniva, večina študij ranljivosti signalov poteka v laboratorijih ali v strogo nadzorovanih razmerah. V Združenem kraljestvu poteka več napovedanih vojaških namernih motenj signalov GNSS, kjer napovedujejo lokacijo, čas in frekvenčno področje motenja (Ofcom, 2021). Pri tem uporabljajo motilnike visokih jakosti, ki vplivajo na instrumente GNSS na oddaljenosti več deset kilometrov (tudi do petdeset) od lokacije motilnika. V večini gre za motnje v zgornjem delu frekvenčnega področja L (frekvence 1575,42 MHz in 1597,55 MHz – 1605,89 MHz).



Slika 1: Frekvenčni spekter za opazovanja GNSS (Reil, 2017).

V študijah kakovosti določitve položaja z GNSS med motenjem so do sedaj večinoma ugotavljali možnost določitve položaja z navigacijskimi, to je kodnimi instrumenti (Fontanella et al., 2012). Pokazale so, da so navigacijski instrumenti zelo občutljivi, saj jih med motnjami 75 % ni bilo sposobnih določiti položaja, medtem ko so preostali položaj določili nepravilno (Kuusniemi et al., 2012). V praktičnem preizkusu namernih motenj v Severnem morju leta 2014 so v poizkus vključili geodetski sprejemnik Leica GS10 z anteno Leica AS10 (Glomswoll in Bonenberg, 2017), druga skupina leta 2015 pa tudi sprejemnik Javad Delta z anteno navXperience 3G+C (Medina et al., 2019). Študije so pokazale, da z uporabo motilnika v frekvenčnem področju L1 vplivajo na kakovost sprejema signalov GPS in Galileo, medtem ko signali GLONASS z motnjami večinoma niso bili obremenjeni. Razlog za to je predvsem drugačen koncept delovanja tehnologije GLONASS, kjer je frekvenčno področje G1 zamaknjeno nekoliko nad L1, medtem ko sta področji G2 in G3 precej pod L1 (slika 1). Večina motilnikov deluje zunaj GLONASS-ovih frekvenčnih področij. Sprejem področja G1 signalov GLONASS je morda manj moten tudi zato, ker vhodna enota (angl. *font-end*) sprejemnika GLONASS, ki je vgrajen v sprejemnike GNSS, zajema za signal vsakega satelita le 0,5 MHz široko prepustno področje, medtem ko je prepustno frekvenčno področje vhodnih enot sprejemnikov GPS na L1 široko 3 MHz (Demyanov et al., 2013).

Precej raziskav je bilo usmerjenih tudi v analize učinkovitosti delovanja eno- in večfrekvenčnih motilnikov na navigacijske sprejemnike GNSS (Jones, 2011; Kuusniemi et al., 2012; Borio et al., 2016), kjer se je predvsem izkazalo, da se je med prisotnostjo motenj napaka določanja horizontalnega položaja izrazito povečala. Nepravilna določitev položaja v horizontalni ravnini je znašala tudi več kot 10 metrov pri enofrekvenčnih kodnih opazovanjih in nekoliko manj, od 2,5 do 7,8 metra, pri dvofrekvenčnih kodnih opazovanjih, čeprav jih je oddajal oddajnik preletnega signala s sorazmerno majhno izsevano močjo.

Vsaj enak vpliv kot motilniki, katerih signali hkrati preletavajo več frekvenčnih področij ali hkrati z različnimi periodami preletavajo isto področje, imajo tako imenovani sistemski motilniki (Curran et al., 2017), ki lahko otežujejo delo na frekvenčnem področju L1. Sistemski motilnik je vmesni člen med lahko zaznavnim motilnikom, ki seva močne motnje na slepo, in potvarjalnikom (ang. *spoofers*), ker se osredotoča na onemogočanje delovanja sprejemnika na fizičnem ali podatkovnem sloju (ang. *physical, data layer*), ne zgolj na povečevanje moči motenja. Podatkovni sloj je v odsotnosti podatkov o efemeridah in časih oddaje signala najšibkejši člen pri določanju navigacijske rešitve. Za preprečitev določitve koordinat so dovolj že občasne, a pravočasne ter razmeroma šibke in težje zaznavne motnje, sistemski motilnik se lahko celo osredotoči na onemogočanje posameznega navigacijskega sistema, čeprav si frekvenčno področje deli z drugim sistemom, ali celo na onemogočanje izbranih satelitov (Curran et al., 2017). Študije kažejo, da so sprejemniki občutljivi tudi za motnje sistemov GSM, DECT, LTE, torej zunaj področja L1, a morajo biti vsaj pet velikostnih razredov močnejše, da dosežejo enak učinek kot motnje v področju L1 (Glomsvoll, Bonenberg, 2017).

V dani raziskavi nam je kot civilnim uporabnikom po odobritvi *Agencije za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije* (AKOS) uspelo zakonito izvesti poizkus uporabe motilnikov, izvorov preletnega signala, na prostem. V pretekli raziskavi uporabe nizkocenovnega motilnika L1 smo uporabili različne geodetske sprejemnike (Bažec et al., 2020) in ugotovili, da se instrumenti različnih proizvajalcev drugače odzivajo na motnje. Ugotovili smo, da so novejši sprejemniki precej bolj izpopolnjeni v odpornosti na motnje, vendar se še vedno lahko zgodi, da motilnik povsem onemogoči sprejem signalov. Zanimivo je, da je uporaba motilnika L1 pri nekaterih instrumentih vplivala tudi na težave sprejema signalov GLO-NASS, kar je v nasprotju z ugotovitvami drugih avtorjev (Glomsvoll in Bonenberg, 2017). V danem prispevku opisujemo nadgradnjo raziskave z dodatnimi rezultati, ki so pomembni predvsem za geodetske uporabnike. Namen prispevka je s problemom seznaniti širšo geodetsko javnost, ki za določitev položaja in navezavo na državni koordinatni sistem uporablja tehnologijo GNSS.

1.1 Cilj raziskave

Cilj raziskave je bil ugotoviti ranljivost in odzivnost nekaterih geodetskih sprejemnikov GNSS različnih proizvajalcev ob namernih motnjah signala v frekvenčnem področju L1. Pri tem smo se osredotočili na odziv geodetskih instrumentov GNSS na:

- a) nekajminutne namerne motnje signala, pri čemer je bil motilnik lociran na različnih oddaljenostih od instrumenta, in
- b) kratkotrajne namerne motnje, ko se je motilnik nahajal v premikajočem se vozilu.

V prvem primeru smo ugotavljali, do katere oddaljenosti motilnik, ki v področju L1 oddaja moč velikostnega reda 10 mW (primerjaj s Septentrio, 2019), vpliva na delovanje geodetskih instrumentov, medtem ko smo v drugem primeru ocenjevali, ali na sprejem signalov GNSS in na končno določitev koordinat vplivajo tudi kratkotrajne (nekajsekundne) motnje v bližini instrumenta (približno 20 metrov).

1.2 Struktura prispevka

Uvodu sledi poglavje s teoretičnimi izhodišči obravnavanega problema (2. poglavje). V tretjem poglavju opišemo metodologijo raziskave, ki ji sledijo rezultati z diskusijo (4. poglavje) in zaključek (5. poglavje).

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Jakost sprejema signala GNSS

S sprejemniki GNSS sprejemamo satelitske signale in jih obdelamo, da določimo položaj. V datotekah z opazovanji poleg kodnih, faznih ter Dopplerjevih opazovanj pridobimo tudi razmerje med šumom in signalom za posamezen satelit na različnih frekvencah, ki podaja kakovost sprejema signala. Sprejemnik GNSS lahko signal sprejme in brez napak obdela vsebovane podatke le, če moč šuma in v sprejetem frekvenčnem področju prisotnih motenj skupaj ne presega dopustne mejne vrednosti. Razširitev spektra med oddajanjem signalov omogoča, da signale posameznih satelitov v sprejemniku izločimo iz prevladujočega šuma s postopkom korelacije sprejetega signala in v sprejemniku generiranimi kodami satelitov. S korelacijo spekter sprejetega signala skrčimo. Kot že rečeno, vsak sprejemnik dopušča določen SNR, ki se običajno nanaša na moč signalov po izvedeni korelaciji in moč sprejetega šuma, obe moči sta izraženi v vatih (Hofmann-Wellenhof et al., 2007):

$$\text{SNR [dBm]} = S [\text{dBm}] - N [\text{dBm}] = 10 \cdot \log \left(\frac{P [\text{mW}]}{N [\text{mW}]} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{S^2}{\sigma_N^2} \right), \quad (1)$$

kjer S predstavlja jakost korelacijskega vrha popolnoma nekoreliranih signalov in kode, σ_N pa standardno deviacijo jakosti šuma SNR, ki ga izražamo v decibelih (dB), pove, kolikokrat signal presega vsoto zajetih šumov. Ob odboju signala oziroma v pogojih raznolikega sprejema, ko v sprejemnik vstopajo različno zakasneni signali, izvirajoči iz istega satelita, SNR splošno definiramo z amplitudama signala in šuma ($A_{\text{signal}}, A_{\text{sum}}$) (Leick et al., 2015):

$$\text{SNR [dB]} = 10 \cdot \log \left(\left(\frac{A_{\text{signal}} (\text{mV})}{A_{\text{sum}} (\text{mV})} \right)^2 \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{A_{\text{signal}} (\text{mV})}{A_{\text{sum}} (\text{mV})} \right). \quad (2)$$

Tipična vrednost SNR, predstavljena v veliko tehničnih dokumentih geodetskih sprejemnikov GNSS, je v področju 30 ± 2 dB (Leick et al., 2015). Če so vrednosti SNR višje, je sprejeti signal bolj kakovosten. SNR določamo za vsak sprejem posameznega satelita posebej, zato so SNR-ji istega satelita, ko se nahaja na različnih višinskih kotih, različni. Pri starejših instrumentih (primer Trimble 4000 SSI) znašajo vrednosti SNR okoli 30 dB, medtem ko je pri novejših instrumentih precej višji, lahko tudi okoli 50 dB.

Kakovost sprejetega signala izrazimo z razmerjem med signalom in skupaj z njim sprejetim šumom, ki je odvisen od šumne temperature okolice in samega sprejemnika (podrobnejša razlaga v: Vidmar, 2005). Običajno je za opis kakovosti sprejema uporabljeno razmerje med močjo sprejetega nemoduliranega nosilnega signala P_s in gostoto moči šuma N_0 , kar se za signale v sprejemnikih GNSS v literaturi podaja kot C/N_0 ali CNR (angl. *carrier-to-noise ratio*) (Badke, 2009; Faletti, 2010; Joseph, 2010):

$$\begin{aligned} \text{CNR [dBHz]} &= 10 \cdot \log \left(\frac{P_s [\text{W}]}{N_0 \left[\frac{\text{W}}{\text{Hz}} \right]} \right) = C [\text{dBW}] - (N [\text{dBW}] - \text{BW} [\text{dBHz}]) \\ &= C [\text{dB}] - N_0 [\text{dBHz}] = \text{SNR} [\text{dB}] + \text{BW} [\text{dBHz}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Pri tem C predstavlja moč nosilnega signala in N moč šuma, oba izrazimo v dBm ali dBW, N_0 je gostota

moči zatečenega šuma, izražena v dBmHz ali dBWHz, BW je pasovna širina opazovanih signalov glede na 1 Hz in jo podobno kot relativno izražene moči tudi izrazimo glede na 1 Hz z dBHz. Moč signala s satelita do sprejemne antene upade zaradi izgub med razširjanjem zgolj na približno 10^{-17} W, na toplotni šum vezana gostota moči šuma pa znaša -204 dBWHz. CNR je definiran za pasovno širino 1 Hz, kar pomeni, da običajna vrednost CNR-signalov C/A (angl. *coarse acquisition*) v sprejemnikih GPS, upoštevajoč pasovno širino, 2,046 MHz (BW = 63,1 dBHz), pade za 19,1 dB pod teoretično vrednost moči šuma, medtem ko CNR v sprejemnikih GLONASS zaradi manjše pasovne širine vhodne sprejemnikove enote (Demyanov et al., 2013) pade manj, torej ostaja moč signalov pri enakem šumu do dvakrat večja kot pri GPS v L1.

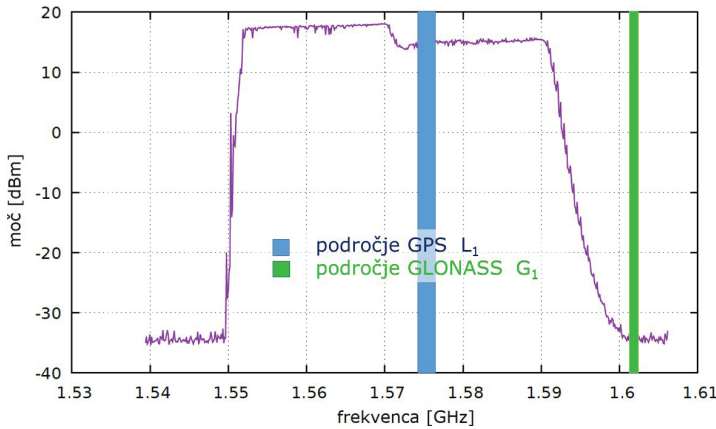
2.2 Motenje signalov GNSS

Motenje je odvisno od:

- a) vrste motilnega signala:
 - motenje s signalom sinusnega kontinuiranega valovanja (angl. *continuous wave – CW*),
 - enojna frekvenca ali modulirani signali glede na amplitudo (AM), frekvenco (FM) ali fazo (PM), ki motijo signal v širšem frekvenčnem področju,
 - motenje z generiranjem naključnega šuma (beli ali rožnati šum);
- b) osrednje frekvence motenja, kjer je lahko motilni signal:
 - v frekvenčnem področju signalov GNSS,
 - blizu frekvenčnega področja signalov GNSS ali
 - izven frekvenčnega področja signalov GNSS;
- c) frekvenčne pasovne širine motenj signala, kjer je moteče signale mogoče razdeliti na:
 - širokopasovne ali
 - ozkopasovne motnje;
- d) moč motnje, ki je opredeljena kot razmerje med močjo signala motnje in močjo nosilnega signala ali razmerjem J/S (angl. *jammer to signal*), in
- e) časovnega obdobja trajanja motnje, ki je lahko:
 - neprekinjeno ali
 - diskretno v časovnih intervalih ali impulzih. Pri motnjah z impulzi je lahko označen s širino impulza ali številom impulzov na sekundo.

Civilni uporabniki najpogosteje zaznavajo motenje, ki jih povzročajo PPD (Glomswoll in Bonenberg, 2017). Signalu, ki ga oddaja PPD, se frekvenca v prvem delu periode linearno povečuje od spodnjega roba frekvenčnega področja, v drugem pa zmanjšuje nazaj do spodnjega roba (angl. *single saw-tooth chirp signal*). Signali PPD-jev se med seboj ločijo po širini frekvenčnega področja, ki ga signal preletava (značilno od 10,7 do 44,9 MHz), po periodi, v kateri se zgodi prelet (pogosto med 8,62 in 18,97 μ s), in frekvenci, na katero je signal osredinjen (1575,42 MHz) (Kraus et al., 2011). Tovrstni preletni signal žagaste oblike je v strokovni literaturi imenovan tudi žvižg (angl. *chirp*). Primer spektra PPD, uporabljenega v terenskih preizkusih, je prikazan na sliki 2. Tovrstne motnje lahko do neke mere odpravimo z ustreznim sprejemnikom in primerno usmerjeno anteno. Sprejemniki so lahko opremljeni z zaščito pred motnjami bodisi s spreminjanjem algoritma pozicioniranja bodisi z ustrezno izbranimi visokofrekvenčnimi siti, ki odpravljajo vplive signalov zunaj frekvenčnega področja satelitskih signalov pred mešalno stopnjo

superheterodinskega pretvornika, s čimer zmanjšajo vpliv na korelacije.

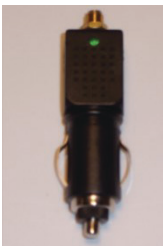


Slika 2: Izmerjena moč signala na izhodu uporabljenega motilnika druge kategorije (Mitch et al., 2012; Borio et al., 2016) s periodo preleta 10 μ s na frekvenčnem področju 1,570 GHz \pm 0,020 GHz, posneta s pasovno ločljivostjo 1 MHz.

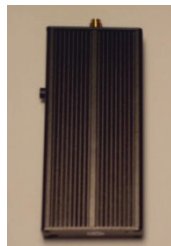
Razdalja, na kateri lahko PPD vpliva na sprejem signala, je eden najpomembnejših parametrov za oceno tveganja motenj, ki jih povzročajo te naprave in jih opažajo uporabniki ter o njih poročajo ustreznim službam. Pri najbolj enostavni obliki motnje (angl. *jamming*) sprejemnik GNSS ne zmore sprejeti in obdelati oslabljenega signala s satelitov zaradi premočnih motilnih signalov. Rezultat tega je nezmožnost sprejema signalov GNSS.

Motilnike GNSS, s katerimi nepridipravi namenoma motijo spekter GNSS, razdelimo v tri kategorije, ki se ločijo glede na napajanje in ohišje (Mitch et al., 2012):

1. kategorija (J01): so motilne naprave, zasnovane za priključitev na 12-voltno avtomobilsko vtičnico pomožnega napajanja (vtičnica za vžigalnik) (angl. *cigarette lighter jammers*) (slika 3.a),
2. kategorija (J02): so motilne naprave, ki se napajajo iz notranje akumulatorske baterije in imajo zunanjo anteno, nameščeno prek priključka SMA (slika 3.b), in
3. kategorija (J03): so motilne naprave oblike mobilnega telefona, napajajo se prek baterije in nimajo zunanjih anten (slika 3.c).



(a)



(b)



(c)

Slika 3: Motilniki GNSS (Mitch et al., 2012).

3 METODOLOGIJA RAZISKAVE

3.1 Opis poizkusa

Uporaba motilnikov GNSS je strogo prepovedana, zato smo poizkus na prostem izvedli šele po odobritvi Agencije za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije (AKOS). Meritve GNSS smo izvedli 20. julija 2019 v 120 minutah, vmes je večkrat potekalo motenje, najdlje zdržema tri minute. V poizkusu smo na testnem polju blizu Črnotič testirali devet geodetskih instrumentov različnih proizvajalcev (Trimble Inc. (Sunnyvale, CA, ZDA), Javad GNSS Inc. (San Jose, CA, ZDA), Leica Geosystems AG (Heerbrugg, Švica)) in generacij, in sicer: Trimble 4000 SSi, Trimble R8, Trimble R8S, Trimble R10, Javad Triumph -VS, Javad Triumph-LSA, Leica GS07, Leica GS15 in Leica GS18. Sprejemnike smo postavili na stativ v vrsto in sprejemali opazovanja z intervalom registracije 1 s (slika 4). Medtem smo se z motilnikom gibali okoli instrumentov, in sicer smo se najprej ustavljali na točno določenem mestu in sprožili triminutne motnje. Takrat je bil motilnik v mirujočem položaju, prvič s horizontalno in drugič z vertikalno orientacijo antene, vsakokrat smo motenje izvedli na različnih oddaljenostih (12 m, 50 m, 100 m, 160 m in nazadnje spet 12 m). To je bilo tako imenovano »statično motenje« signalov iz satelitov GNSS.



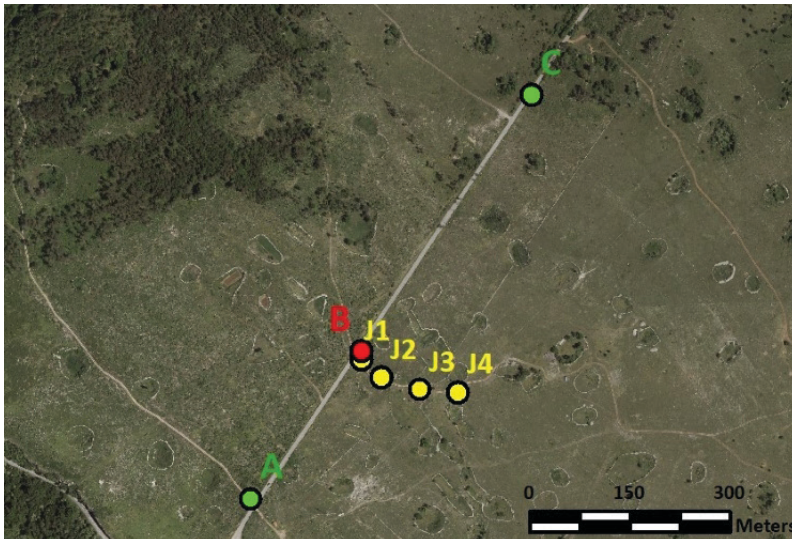
Slika 4: Geodetski instrumenti, testirani na motnje signala, ki preleta v frekvenčnem področju L1.



Slika 5: V vozilu nameščen motilnik povzroča kinematične motnje mirujočim obcestnim sprejemnikom.

Naprej smo motilnik namestili v vozilo in se mimo sprejemnikov GNSS peljali večkrat z različnimi hitrostmi: trikrat s 30 km/h, dvakrat s 60 km/h in po enkrat z 80 km/h in 90 km/h (slika 5). To so bile kratkotrajne motnje, ki smo jih glede na to, da je bil motilnik v kinematičnem načinu, poimenovali

»kinematične motnje«. Na sliki 6 prikazujemo lokacije motilnika med statičnimi motnjami (rumeno) glede na položaj instrumentov (rdeče) in skrajni točki vožnje mimo instrumentov A in C (zeleno).



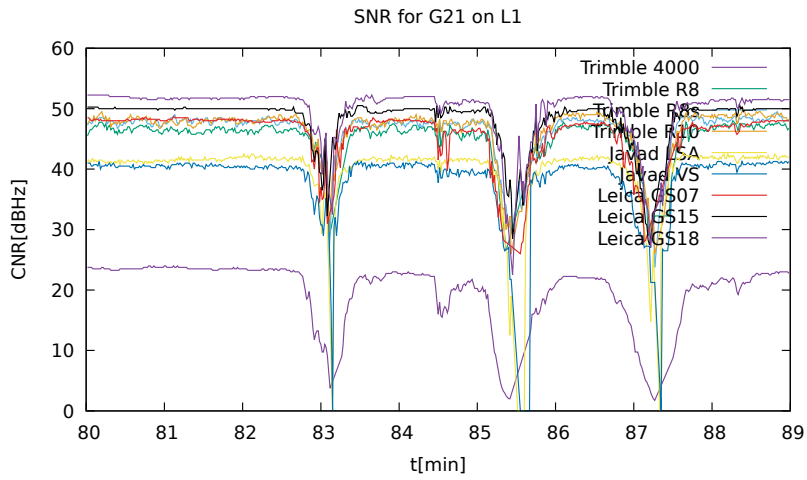
Slika 6: Lokacija instrumentov ob cesti, točka B (rdeče), skrajni točki vožnje mimo instrumentov A in C (zeleno), lokacije motilnika med statičnimi motnjami J1–J4 (rumeno) (Bažec et al., 2020).

4 OBDELAVA IN OBRAVNAVA REZULTATOV

Opazovanja GNSS smo iz vsakega sprejemnika posebej obdelali za vsak trenutek registracije, da smo lahko poleg ugotavljanja sprememb v vrednosti CNR določali tudi kakovost pozicioniranja v obdobjih motenja. Z obdelavo opazovanj GNSS iz vsakega instrumenta posebej smo koordinate določili relativno z navezavo na državno omrežje stalnih postaj SIGNAL. Ob tem velja posebej omeniti, da so meritve potekale ravno v času izpada tehnologije Galileo (Minetto et al., 2019); opazovanja s satelitov Galileo nam je sicer uspelo pridobiti, navigacijskega sporočila tega sistema pa ne. To je razlog, da smo v analize v nadaljevanju vključili le obravnavo GPS in GLONASS. Drugi razlog za navedeno analizo je dejstvo, da je tudi omrežje stalnih postaj GNSS, SIGNAL, med izvedbo poizkusa delovalo le na sprejemu signalov GPS in GLONASS.

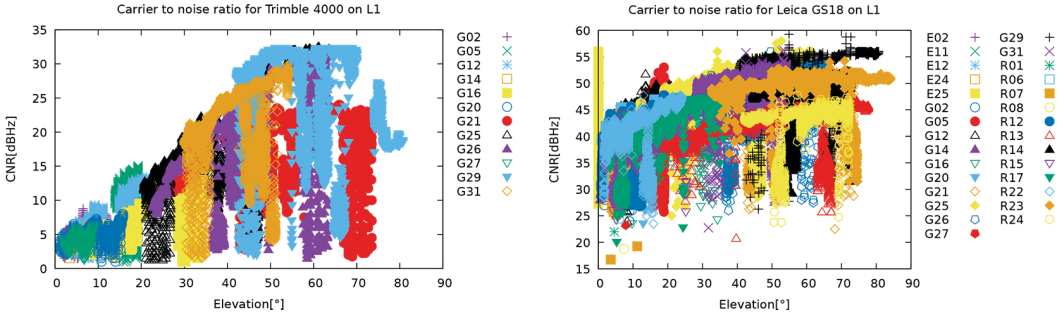
4.1 Analiza sprememb v vrednosti CNR

Iz opazovanj posameznega instrumenta (*.yyO datoteke RINEX) smo najprej ugotavljali spremembo vrednosti SNR, ki smo jih pretvorili v CNR. Le-te smo ugotavljali posebej za vsak instrument, satelit in izbrano frekvenco opazovanj. Zaradi obsežnosti podajamo le rezultate za vse instrumente za frekvenco L1 in satelit G21 (7). S slike 7 je razvidno, da je razmerje med signalom in šumom za najstarejši sprejemnik Trimble 4000 SSi zelo nizko, medtem ko so s konstrukcijo anten in z algoritmi razmerje pri ostalih instrumentih očitno izboljšali, tako da so vrednosti CNR celo za 20 dBHz ali več višje glede na navedeni sprejemnik. Nenadni padci v vrednostih so rezultat delovanja motilnika.



Slika 7: Primerjava razmerij moči motilnika glede na močnostno gostoto šuma za testirane instrumente.

Vrednosti CNR se med posameznimi sateliti z različnimi višinskimi koti razlikujejo. Velja, da imajo sateliti z višjimi elevacijami tudi pričakovano višje vrednosti CNR. Na sliki 8 prikazujemo, kako variirajo vrednosti CNR za različne satelite v odvisnosti od višinskih kotov (angl. *elevation*). Spet je očitno, da ima starejši sprejemnik Trimble 4000 SSi (leva slika) precej nižje vrednosti CNR kot novejši instrument Leica GS18.



Slika 8: Sprememba CNR v odvisnosti od višinskega kota za vse satelite, ki jih je sprejemniku uspelo sprejeti. Primerjava za stari instrument Trimble 4000 SSi, ki je sprejemal le opazovanja GPS, in instrument zadnje generacije Leica GS18 (statične motnje). CNR-območji za posamezna instrumenta sta izbrani drugače, da je slika preglednejša.

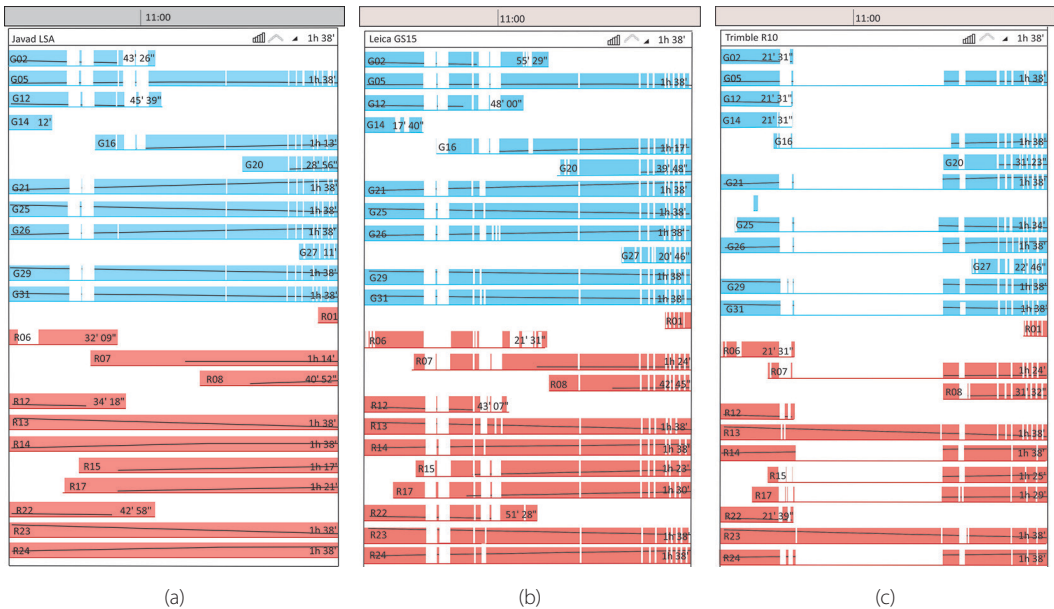
Med statičnimi motnjami, ki so trajale po tri minute (preglednica 1), je očitna izguba signalov GNSS (slika 9). Instrumenti so se na motnje odzivali precej različno. Ker smo motenje povzročali v frekvenčnem področju L1, bi lahko pričakovali, da signali s satelitov GLONASS sploh ne bodo moteni, a se pri posameznih sprejemnikih pričakovanja niso izpolnila. Pri instrumentih Trimble R8S, Leica GS07 in Leica GS15 je motilnik povzročil tudi izpad sprejema signalov s satelitov GLONASS, sprejemnik Leica GS18 pa je opazovanja GLONASS izgubil le deloma in za precej krajši čas kot ostali sateliti. Zaradi obsežnosti podajamo le tri ključne, ki ponazarjajo sprejem signalov GPS (modro) in GLONASS (rdeče) z instrumentov Javad Triumph-LSA, ki mu med motnjami ni uspelo sprejemati signalov GPS, uspešno

pa je sprejemal satelite GLONASS, Leica GS15, kjer so očitne prekinitve sprejema signalov s satelitov GPS in GLONASS, in s sprejemnika Trimble R10, kjer je nastopila očitna blokada delovanja, in sicer zaradi izpada signalov ali zaradi napake v obdelavi, saj daljši čas ni sprejemal opazovanj z večine satelitov.

Preglednica 1: Časi zaporednega triminutnega statičnega motenja na različnih oddaljenostih motilnika od instrumentov

Oddaljenost motilnika od instrumentov GNSS	Pričetek in konec motenja (lokalni čas)
12 m	9:37:21–9:40:37 9:41:11–9:44:10
50 m	9:53:51–9:56:54 9:57:25–10:00:19
100 m	10:03:03–10:06:16 10:03:03–10:06:16
160 m	10:13:44–10:17:36 10:18:09–10:20:58
12 m	10:24:01–10:24:23

Vsi instrumenti so se na bližino motilnika do 100 metrov odzvali s popolno izgubo podatkov s satelitov GPS. Podatki s satelitov GLONASS so bili med motnjami razpoložljivi na instrumentih Javad Triumph -VS, Javad Triumph-LSA, Trimble R8 in Leica GS18 (primerjava preglednica 1 in slika 9).

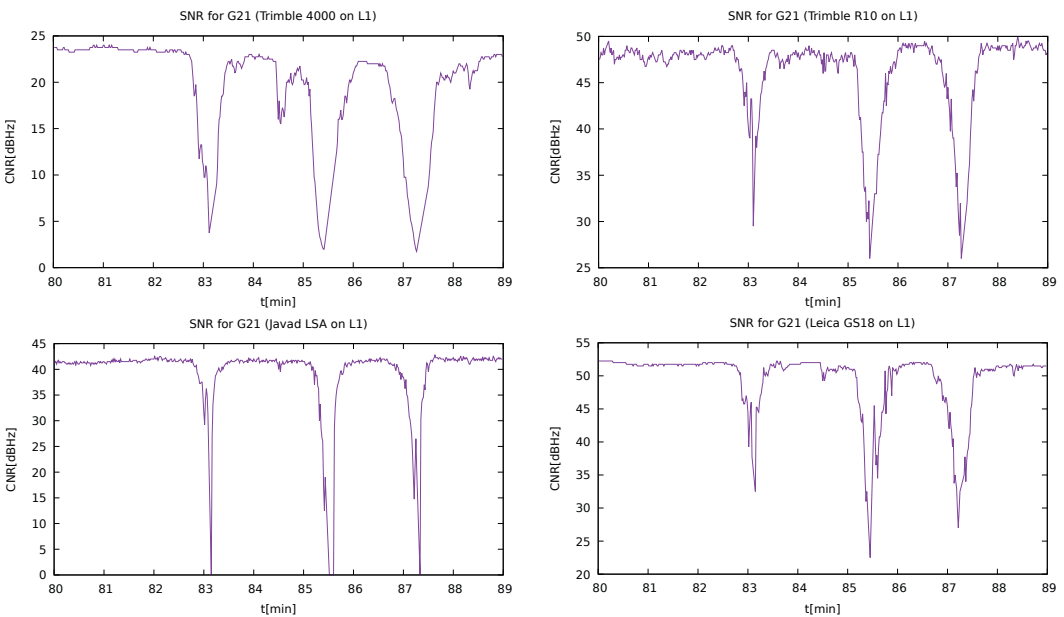


Slika 9: Pregled razpoložljivosti podatkov GPS (modro) in GLONASS (rdeče) za posamezne satelite in instrumente, ki so se na motnje odzvali različno: (a) Javad Triumph-LSA, (b) Leica GS15 in (c) Trimble R10.

Instrument Trimble R10 (9.c) se je na statično motenje odzval precej nenavadno, saj tudi po končanem motenju, ko je bil motilnik oddaljen približno 12 metrov od instrumentov, ni sprejel opazovanj s satelitov. Njegovo delovanje nam je uspelo ponovno vzpostaviti šele z večkratnimi vklopi in izklopi motilnika po daljšem trajanju izgube signala, kar je razvidno s slike 9. Pri tem je zanimivo, da je instru-

mentu vendarle vseskozi uspelo registrirati opazovanja dveh satelitov GLONASS, to je R13 in R23, ki sta sicer imela precej velik višinski kot. Nastala situacija je lahko izjema v našem eksperimentu, in ne pravilo, zato ne moremo preprosto skleniti, da je instrument Trimble R10 najbolj dovzeten za motnje od vseh preizkušenih.

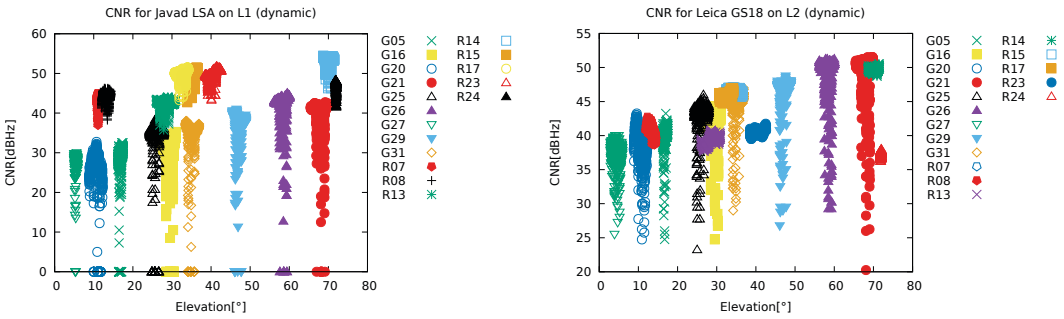
Pri kinematičnih motnjah je sprejemnik Trimble R10 deloval podobno kot ostali instrumenti. Na motnje se je odzval s padcem vrednosti CNR na okoli 20 dBHz, kar je veliko bolje kot pri instrumentu Javad Triumph-LSA, kjer so bili padci CNR veliko bolj izraziti (celo do 0 dBHz). Zanimivi in značilni so padci vrednosti CNR v času kratkotrajnih kinematičnih motenj, ki jih prikazujemo kot funkcijo časa, in sicer do 80. do 90. minute, ko smo izvajali kinematične motnje (slika 10). Očiten padec vrednosti CNR smo zabeležili na instrumentu Javad Triumph-LSA, ki je bil še izrazitejši kot pri instrumentu Trimble 4000 SSi. Odziv instrumenta Trimble R10 na kinematične motnje je bil podoben kot odziv instrumenta Leica GS18. Vrednosti CNR instrumenta Trimble R10 zunaj obdobja motenja so izrazito manjše kot CNR ostalih instrumentov.



Slika 10: Sprememba CNR v odvisnosti od trenutka izmere za satelit G21 za: Trimble 4000 SSi, Trimble R10, Javad Triumph-LSA in Leica GS18 (kinematične motnje). CNR-območje je izbrano za vsak instrument posebej.

Padci vrednosti CNR kinematičnega motenja v odvisnosti od višinskega kota satelitov so značilni za posamezne sprejemnike GNSS in skupine satelitov. Vrednost CNR za satelite GLONASS izrazito manj upade na enakih višinskih kotih kot za satelite GPS (slika 11).

Kinematične motnje niso tako izrazito učinkovale na sprejemnik Trimble R10, kot smo zabeležili med statičnimi motnjami. Tedaj se je sprejemnik Trimble R10 obnašal zelo podobno kot sprejemnik Leica GS18.



Slika 11: Sprememba CNR v odvisnosti od višinskega kota za vse satelite, ki jih je sprejemnik uspel sprejeti. Primerjava za stari instrument Trimble 4000 SSI, ki je sprejemal le opazovanja GPS, in instrument zadnje generacije Leica GS18 (kinematične motnje). CNR-območji med instrumentoma se zaradi večje preglednosti slike za posamezna instrumenta razlikujeta.

4.2 Kakovost pozicioniranja

Kakovost pozicioniranja ob prisotnosti motilnika opišemo z deležem uspešne določitve položaja:

- a) na kodni ali fazni način in
- b) le s faznimi opazovanji.

Iz rezultatov (preglednica 2) lahko potrdimo, da je bil instrument Trimble R10 najbolj občutljiv za umetno povzročene motnje, saj mu je med meritvami uspelo določiti položaj le v 52 %. Izmed teh je bilo v 49 % mogoče položaj določiti na fazni način. Pri instrumentu Trimble R8S je bilo položaj s kodo ali fazo mogoče določiti v 81 %, pri čemer je bilo le v 55 % mogoče položaj določiti bolj kakovostno, torej na fazni način.

Preglednica 2: Delež uspešne določitve položaja za instrumente GNSS, vključene v test, v 90-minutnem testu, kjer je bil interval registracije 1 s.

Instrument GNSS	Delež uspešne določitve položaja s kodo ali fazo	Delež uspešne določitve položaja s fazo
Trimble 4000 SSI	88 %	83 %
Trimble R8	99 %	98 %
Trimble R10	52 %	49 %
Trimble R8S	81 %	55 %
Javad Triumph-VS	100 %	89 %
Javad Triumph-LSA	100 %	91 %
Leica GS18	99 %	99 %
Leica GS07	94 %	94 %
Leica GS15	91 %	89 %

Poleg instrumenta Trimble R10, ki je med statičnimi motnjami povsem odpovedal, tudi instrument Trimble R8S ni bil najbolj učinkovit. Delež uspešne določitve položaja na fazni način je znašal 55 % (preglednica 1). Čeprav je instrument kazal uspešno določitev položaja, smo preverili razlike v vsakem trenutku registracije glede na znane prave vrednosti. Največje razlike v horizontalnem položaju so pri večini instrumentov znašale nekaj centimetrov, izrazito pa izstopa nepravilna določitev položaja s spre-

jemnikom Trimble R8 (razlika več kot 2 metra) in nekoliko manj z instrumentom Trimble R8S, kjer je bila razlika 23,7 centimetra. Podobno lahko ugotovimo za razlike v določitvi višin. Instrument Trimble R8S je zaradi motenj višino določil nepravilno za 48,3 centimetra, podobno Javad Triumph-LSA (49,6 centimetra), medtem ko je instrument Trimble R8 višino določil nepravilno za več kot 3 metre (preglednica 3). Avtorji prispevka smo prepričani, da so bile te razlike vezane izključno na intervale motenja signala L1 in jih ni izzval kakšen nenadzorovan pojav. Izguba sprejema signala s sprejemnikom Trimble R10 v času motenja je sicer moteča, vendar uporabnik lažje prenese izgubo signala in možnost pozicioniranja, kot pa da instrument brez opozorila nepravilno določi položaj.

Preglednica 3: Največje razlike od pravega položaja, ko je instrument kazal uspešno rešitev (angl. carrier-phase fixed).

instrument GNSS	Največje razlike v horizontalnem položaju [m]	Največje razlike v višini [m]
Trimble 4000 SSI	0,025	0,060
Trimble R8	2,251	3,128
Trimble R10	0,036	0,085
Trimble R8S	0,237	0,483
Javad Triumph-VS	0,096	0,127
Javad Triumph-LSA	0,092	0,496
Leica GS18	0,057	0,077
Leica GS07	0,066	0,163
Leica GS15	0,070	0,095

5 ZAKLJUČEK

Odzivu geodetskih instrumentov GNSS na namerne motnje signalov v Sloveniji do sedaj ni bilo posvečene posebne pozornosti tudi zato, ker je uporaba motilnikov zakonsko prepovedana. V dani raziskavi smo prišli do ugotovitev, ki jih bo v prihodnje treba podrobneje analizirati, in sicer:

- motilnik s preletanjem signala okoli frekvenčnega področja L1/E1 lahko zmoti tako sprejem signalov GPS, Galileo kot tudi GLONASS;
- motilnik lahko povzroči delno ali popolno izgubo signala tudi po končanem motenju (primer instrumenta Trimble R10);
- kakovost določitve položaja med motenjem se izrazito poslabša, čeprav algoritmi obdelave opazovanj kažejo na uspešno določitev faznih neznank, tj. inicializacijo.

V prispevku smo kakovost sprejetega signala določali s statičnimi opazovanji in ugotavljanjem spremembe kakovosti signala v časovni vrsti CNR (slike 7, 8, 10 in 11), podobno kot so ravnali že v drugih raziskavah (Glomsvoll in Bonenberg, 2017). Dodatno smo ugotavljali kakovost pozicioniranja med motnjami, in sicer tako, da smo položaj določali za vsako sekundo izvedbe meritev. V prispevku smo pokazali, da lahko s kontinuiranim spremljanjem vrednosti CNR hitro in enostavno sklepamo na prisotnost nameranih motenj ali ostalih vplivov na opazovanja (odboj), ko instrument GNSS deluje v statičnem načinu.

V eksperiment kinematičnih metod GNSS določanja položaja nismo vključili, saj je bil namen raziskave pokazati odziv instrumentov GNSS na motnje signala, kar je mogoče najboljše določiti s kakovostno pridobljenimi opazovanji v statičnem načinu. Znano je, da je pri kinematičnih meritvah GNSS prisotnost in izvor motenj veliko težje določiti tudi zato, ker so meritve kratkotrajne in so vezane na različne

situacije glede okolice sprejema signala GNSS. Kljub temu lahko iz izkušenj odziva sprejemnikov GNSS v statičnem načinu podamo ideje za nadaljnje delo.

V prihodnje bi veljalo razmisliti tudi o shranjevanju in arhiviranju opazovanj v kinematični določitvi položaja v realnem času (angl. *real-time kinematic* – RTK), saj lahko iz surovih opazovanj (na primer iz datotek z opazovanji RINEX, kjer imamo na voljo vrednosti SNR) naknadno sklepamo ali potrdimo, da so v določenih trenutkih nastopile anomalije sprejema signala, ki so vzrok za slabšo kakovost določitve položaja. Trenutno so namreč v situacijah, ko je določanje položaja vezano na uporabo metode RTK, glavni podatki, ki jih posreduje instrument, položaj in notranja natančnost določitve položaja ter primerna razporeditev satelitov na obzorju, kar določajo faktorji slabšanja natančnosti (angl. *dilution of precision* – DOP), medtem ko v izpisih rezultatov kakovosti sprejema signala med meritvami ni na voljo. Avtorji prispevka menijo, da bi pristop ugotavljanja kakovosti sprejema signala v kinematičnih meritvah v realnem času lahko enostavno izboljšali že tako, da bi v instrumentu beležili tudi opazovanja GNSS in jih ob rezultatih meritev z metodo RTK kot dodaten metapodatek uvrstili v arhiv terenske izvedbe meritev.

ZAHVALA

Prispevek je nastal v okviru programskih skupin Javne raziskovalne agencije Republike Slovenije, in sicer: *Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227)* in *Modeliranje in simulacije v prometu in pomorstvu (P2-0394)*.

Zahvaljujemo se *Agenciji za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije*, ki nam je omogočila izvedbo testov na prostem, in *Laboratoriju za sevanja in optiko Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani* za opravljeno meritev lastnosti motilnika. Zahvala gre tudi podjetju Geoservis d.o.o., ki nam je dal v izposojajo sprejemnik Leica GS07, in *Geodetski upravi Republike Slovenije*, od katere smo si izposodili sprejemnike Trimble R8, Trimble R8S, Trimble R10 in Javad Triumph-VS.

Literatura in viri:

Badke, B. (2009). Measuring GNSS Signal Strength. Inside GNSS. <https://insidegnss.com/measuring-gnss-signal-strength/>, pridobljeno 17. 1. 2021.

Bažec, M., Dimc, F., Pavlovčič Prešeren, P. (2020). Evaluating the Vulnerability of Several Geodetic GNSS Receivers under Chirp Signal L1/E1 Jamming. *Sensors*, 20 (3), 814–838. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030814>

Borio, D., Dovis, F., Kusunniemi, H., Lo Presti, L. (2016). Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. *Proceedings of the IEEE*, 104 (6), 1233–1245. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2543266>

Borio, D., Closas, P. (2017). A Fresh Look at GNSS Anti-Jamming. Inside GNSS. <https://insidegnss.com/a-fresh-look-at-gnss-anti-jamming/>, pridobljeno 30. 1. 2021.

Chang, C.-L. (2011). Anti-Multipath Filter with Multiple Correlators in GNSS Receivers. *Adaptive Filtering applications*, 381–399. DOI: <https://doi.org/10.5772/16696>

Curran, J. T., Navarro, M., Bavaro, M., Closas, P. (2017). A Look at the Threat of Systematic Jamming of GNSS. *Inside GNSS*. Inside GNSS, september-oktober, 46–53. <http://insidegnss.com/auto/sepoct17-CURRAN.pdf>, pridobljeno 23. 3. 2021.

Demyanov, V., Yasyukevich, Y., Jin, S. (2013). Effects of Solar Radio Emission and Ionospheric Irregularities on GPS/GLONASS Performance. V: *Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications*, Intech, Peking, Kitajska. DOI: <https://doi.org/10.5772/3439>

Faletti, E. (2009). Are Carrier-to-Noise Algorithms Equivalent in All Situations? Inside GNSS. <https://insidegnss.com/are-carrier-to-noise-algorithms-equivalent-in-all-situations/>, pridobljeno 16. 1. 2021.

Fontanella, D., Bauernfeind, R., Eissfeller, B. (2012). In-Car GNSS jammer localization with a vehicular ad-hoc network. V: *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, USA, 20–23 September 2012, str. 2885–2893.

Glomsvoll, O., Bonenberg, L. K. (2017). GNSS Jamming Resilience for Close to Shore Navigation in the Northern Sea. *Journal of Navigation*, 70 (1), 33–48. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463316000473>

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2007). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>

Jones, M. (2011). The Civilian Battlefield, Protecting GNSS Receivers from Interference

- and Jamming. Inside GNSS, april-maj, 40–49. <https://www.insidegnss.com/auto/marapr11-Jones.pdf>, pridobljeno 23. 3. 2021.
- Joseph, A. (2010). Measuring GNSS Signal Strength. Inside GNSS, november-december, 20–25. <https://insidegnss.com/measuring-gnss-signal-strength/>, pridobljeno 17. 1. 2021.
- Kraus, T., Bauernfeind, R., Eissfeller, B. (2011). Survey of In-Car Jammers – Analysis and Modeling of the RF Signals and IF Samples (Suitable for Active Signal Cancellation). V: Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, Oregon, ZDA, 20.–23. september 2011, 430–435.
- Kuusniemi, H., Airos, E., Bhuiyan, M. Z. H., Kröger, T. (2012). Effects of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. V: Proceedings of the European Navigation Conference, Gdansk, Poljska, 25.–27. april 2012, 1–14.
- Leick, A., Rapoport, L., Tatarnikov, D. (2015). GPS Satellite Surveying, 4. izdaja. John Wiley & Sons, Inc., DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119018612>
- Medina, D., Lass, C., Marcos, E. P., Ziebold, R., Closas, P., García, J. (2019). On GNSS Jamming Threat from the Maritime Navigation Perspective. V: 22nd International Conference on Information Fusion Proceedings, Ottawa, Kanada, 2.–5. julij 2019, 1–7.
- Minetto, A., Dovis, F., Nardin, A., Falletti, E., Margaria, D., Nicola, M., Vannucchi, M. (2019). What happened when Galileo experienced a week-long service outage, Analysis of the Signal Outage, GPS – World. <https://www.gpsworld.com/why-galileo-experienced-a-week-long-service-outage/>, pridobljeno 30. 1. 2021.
- Mitch, Ryan, H., Psiaki, M. L., O'Hanlon, B. W., Powell, S. P., Bhatti, J. A. (2012). Civilian GPS Jammer Signal Tracking and Geolocation. V: Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION/GNSS), Nashville, Tennessee, ZDA, 2012, str. 2901–2920. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10469>, pridobljeno 16. 1. 2021.
- Ofcom (2021). GPS Jamming Exercises. <https://www.ofcom.org.uk/spectrum/information/gps-jamming-exercises>, pridobljeno 18. 1. 2021.
- Petrovski, I. G. (2014). GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou for Mobile Devices, From Instant to Precise Positioning, Cambridge University Press: New York, NY, US, 2014, str. 110–127.
- Pullen, S., Gao, G. G. (2012). GNSS Jamming in the Name of Privacy. Inside GNSS, 7, 34–43. <https://insidegnss.com/gnss-jamming-in-the-name-of-privacy/>, pridobljeno 16. 1. 2021.
- Reil, A. (2017). Receiving BEIDOU, GALILEO and GPS signals with ATLAB® and R&S®IQOR, R&S®TSMV, application note. Rohde in Schwartz, 2017, 27. <https://manualzz.com/doc/8859862/1ma203>, pridobljeno 8. 3. 2021.
- Rettinger, A. D., Batagelj, B. (2018). Motenje GPS sprejemnikov na osnovi blokiranja ali prevare. Avtomatika, 118, 14–18. <http://avtomatika.com/SLO/AVTOMATIKA/A125/A125-GPS.pdf>, pridobljeno 18. 1. 2021.
- Resilient Navigation and Timing Foundation, GPS Jammers Used in 85% of Cargo Truck Thefts – Mexico Has Taken Action, spletni zapis. <https://mtfnd.org/2020/10/30/gps-jammers-used-in-85-of-cargo-truck-thefts-mexico-has-taken-action>, pridobljeno 15. 3. 2021.
- Septentrio (2019). GNSS Interference, brošura, 20 strani. <https://www.septentrio.com/en/brochures/gnss-interference>, pridobljeno 15. 3. 2021.
- Španik, P., Hefty, J. (2017). Multipath detection with the combination of SNR measurements – Example from urban environment, 66, 305–315. DOI: <https://doi.org/10.1515/geocart-2017-0020>
- Thombre, S., Zahidul, H., Bhuiyan, M., Eliardsson, P., Gabriellson, B., Pattinson, M., Dumville, M., Fryganiotis, D., Hill, S., Manikundalam, V., Pölöskey, M., Lee, S., Ruotsalainen, L., Söderholm, S., Kuusniemi, H. (2018). GNSS Threat Monitoring and Reporting: Past, Present, and a Proposed Future. Journal of Navigation, 71 (3), 513–529. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463317000911>
- Vidmar, M. (2005). Radiokomunikacije. Poglavje: 2. Toplotni šum v radijskih zvezah, 1. izd. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko ter Fakulteta za računalništvo in informatiko. <http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/vt/Radiokomunikacije/> pridobljeno 8. 3. 2021.



Dimc F., Pavlovčič Prešeren P., Bažec M. (2021). Odziv geodetskih instrumentov GNSS na motenje z oddajnikom preletnega signala L1.

Geodetski vestnik, 65 (2), 189–204.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.189-204>

doc. dr. Franc Dimc, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet
Cesta pomorščakov 4, SI-6320 Portorož
e-naslov: franc.dimc@fpp.uni-lj.si

asist. dr. Matej Bažec, univ. dipl. fiz.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet
Cesta pomorščakov 4, SI-6320 Portorož
e-naslov: matej.bazec@fpp.uni-lj.si

doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: polona.pavlovicic@fgg.uni-lj.si

IZRAVNAVA PO METODI NAJMANJŠIH KVADRATOV Z UPOŠTEVANJEM POGREŠKOV PRI NEZNANKAH

LEAST-SQUARES ADJUSTMENT TAKING INTO ACCOUNT THE ERRORS IN VARIABLES

Aleš Marjetič

UDK: 528.4
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.02
Prispelo: 17. 2. 2021
Sprejeto: 11. 5. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.205-218
REVIEW ARTICLE
Received: 17. 2. 2021
Accepted: 11. 5. 2021

IZVLEČEK

V članku obravnavamo postopek izračuna vrednosti neznank pod pogojem minimalne vsote kvadratov popravkov opazovanj (metoda najmanjših kvadratov) z upoštevanjem pogreškov pri neznankah. Problem so že predstavili številni avtorji, predusem na področju regresijske analize in računanja transformacijskih parametrov. Predstavljen je pregled teoretičnih osnov metode najmanjših kvadratov in njene razširitve z upoštevanjem pogreškov pri neznankah neznank v matriki modela. Metodo, ki jo lahko poimenujemo »popolna« metoda najmanjših kvadratov, v prispevku predstavimo na primeru prilagajanja regresijske premice nizu točk in na primeru izračuna transformacijskih parametrov za prehod med starim in novim slovenskim državnim koordinatnim sistemom. Z rezultati na podlagi ustreznih statistik potrdimo primernost obravnavane metode za izvajanje tovrstnih strokovnih nalog.

ABSTRACT

In this article, we discuss the procedure for computing the values of the unknowns under the condition of the minimum sum of squares of the observation residuals (least-squares method), taking into account the errors in the unknowns. Many authors have already presented the problem, especially in the field of regression analysis and computations of transformation parameters. We present an overview of the theoretical foundations of the least-squares method and extensions of this method by considering the errors in unknowns in the model matrix. The method, which can be called 'the total least-squares method', is presented in the paper for the case of fitting the regression line to a set of points and for the case of calculating transformation parameters for the transition between the old and the new Slovenian national coordinate systems. With the results based on relevant statistics, we confirm the suitability of the considered method for solving such tasks.

KLJUČNE BESEDE

izravnava po metodi najmanjših kvadratov, TLS, SVD, pogreški, transformacija

KEY WORDS

least-squares adjustment, TLS, SVD, errors, transformation

1 UVOD

V geodeziji količin, ki nas zanimajo, najpogosteje ne moremo neposredno izmeriti. Lahko pa te iskane količine izračunamo posredno na podlagi meritev. Najpogosteje za izračun iskanih količin opravimo več meritev od nujno potrebnih (nadštevilne meritve). V tem primeru model, ki povezuje meritve in neznane (iskane) količine, sestavlja več enačb od nujno potrebnih. Govorimo o predoločenem sistemu enačb za izračun neznanih količin oziroma o predoločenem modelu, ki povezuje meritve/opazovanja z neznankami.

Rešitev najpogosteje določimo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov (v nadaljevanju MNK) popravkov meritev. Vrednosti neznank izračunamo po MNK s sistemom normalnih enačb (Teunissen, 2003). Sistem enačb, ki povezujejo merske vrednosti in neznanke, pretvorimo v sistem linearnih enačb popravkov meritev ali tako imenovani Gauss-Markov model. V postopku izravnave sistem linearnih enačb popravkov meritev prevedemo v sistem normalnih enačb, ki omogočajo enolično določitev vrednosti neznank ob izpolnjenem kriteriju najmanjše vsote kvadratov popravkov meritev. V običajnem modelu izravnave obravnavamo samo pogreške meritev. Lahko pa rešitev iščemo tako, da predpostavimo, da so tudi v matriki modela (matrika \mathbf{A} v izrazu (1)), to je matriki, ki povezuje neznanke z meritvami, prisotni slučajni pogreški. Ta pristop so v preteklosti obravnavali številni raziskovalci na tem področju: Amiri-Simkooei in Jazaeri (2012), Neitzel (2010), Schafrin in Wiesser (2009) in drugi. Metodo izravnave so predstavili s kratico TLS (angl. *total least squares*), kar bi lahko v slovenskem jeziku poimenovali »popolna metoda najmanjših kvadratov«. Metoda se je pokazala kot uporabna predvsem na področjih regresijske analize in transformacij. V članku testiramo uporabnost metode TLS brez uteži in z utežmi (= WTLS, angl. *weighted total least squares*) na primeru linearne regresije in transformacije točk med starim in novim državnim koordinatnim sistemom Slovenije (D48/GK → D96/TM). Dodatno opišemo tudi računanje vrednosti neznank pod pogojem minimalne vsote kvadratov popravkov z uporabo razcepa SVD (razcep na singularne vrednosti ali SVD – angl. *singular value decomposition*). Cilj obravnave različnih načinov izračuna neznank je pokazati razlike, geometrijski pomen in oceniti kakovost posameznih rešitev.

2 ISKANJE REŠITVE PREDOLOČENEGA SISTEMA

2.1 Motivacija

Meritve in neznanke so povezane z matematičnimi izrazi. Med seboj jih v linearizirani obliki povežemo prek sistema (1).

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}; \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nu} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

V (1) predstavlja:

n – število meritev ali število enačb popravkov obravnavanega sistema,

u – število neznank,

\mathbf{b} – vektor odstopanj,

\mathbf{A} – matrika koeficientov pri neznankah ali tako imenovana matrika modela dimenzije $n \times u$,

\mathbf{x} – vektor neznank (poprakov približnih vrednosti neznank).

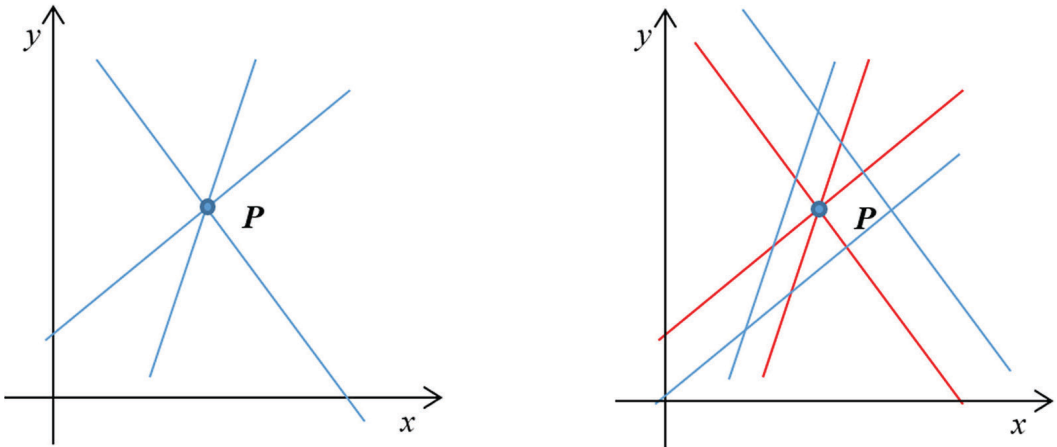
Iz (1) izhaja, da se vektor meritev \mathbf{b} nahaja v prostoru, ki ga napenja stolpci matrike \mathbf{A} . Pri tem je rang matrike \mathbf{A} : $\text{rang}(\mathbf{A}) = r \leq \min(n, u)$.

V sistemu (1), ki povezuje neznanke in meritve, imamo tri možne situacije za sistem n enačb za u neznank: predoločen sistem, ko velja $n > u$, enolično določen sistem, ko velja $n = u$, in poddoločen sistem, ko velja $n < u$ (slednji ni običajen, ko obravnavamo meritve, saj vedno stremimo k nadštevilnim meritvam). Sistem (1) lahko zapišemo tudi v obliki, ko matriki \mathbf{A} dodamo stolpec vektorja \mathbf{b} :

$$[\mathbf{A} | \mathbf{b}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ -1 \end{bmatrix} = 0 \tag{2}$$

Osredotočimo se samo na predoločen sistem in ga predstavimo na primeru iskanja presečišča treh premic:

- Tri premice se sekajo v isti točki – levo na sliki 1: V tem primeru imamo opravka s sistemom n konsistentnih (doslednih) enačb. Sistem (1) ima lastnost, da je $r = \text{rang}(\mathbf{A}) = \text{rang}([\mathbf{A} | \mathbf{b}]) = u$.
- Tri premice se ne sekajo v isti točki – desno, modre premice, na sliki 1: V tem primeru je $r = \text{rang}(\mathbf{A}) < \text{rang}([\mathbf{A} | \mathbf{b}]) = u + 1$ in ne velja enačaj v (1), ampak $\mathbf{Ax} \cong \mathbf{b}$. Nimamo enolične rešitve. Sistem (1) bi radi z rešitvijo za $\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}$ in posledično $\mathbf{b} \rightarrow \hat{\mathbf{b}}$ prevedli na konsistenten sistem (slika 1 desno, rdeče premice), da bo $\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{b}}$, za katerega bi veljalo, da je $r = \text{rang}(\mathbf{A}) = \text{rang}([\mathbf{A} | \hat{\mathbf{b}}]) = u$. Rang sistema $[\mathbf{A} | \mathbf{b}]$ želimo torej zmanjšati za 1.



Slika 1: Levo – sistem konsistentnih enačb, desno – sistem nekonsistentnih enačb (modre premice), rešitev po MNK (rdeče premice).

Za predoločen sistem iščemo tudi tako rešitev, ki bo izpolnila zahtevo, da je $\|\mathbf{v}\|^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min.$, kjer je $\mathbf{v} = \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{b}$ in \mathbf{P} – matrika uteži opazovanj. Iščemo torej rešitev, ki bo izpolnila pogoj minimalne vsote uteženih kvadratov popravkov opazovanj (MNK). Iščemo jo lahko na naslednje načine:

- Najverjetnejšo rešitev iščemo prek sistema normalnih enačb po MNK – posredna izravnava: $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$, $\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$ oziroma v primeru opazovanj enakih natančnosti, kjer velja $\mathbf{P} = \mathbf{I}$, je rešitev $\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$. (3)
- Uporabimo lahko tudi splošnejši pristop, ki ga predstavlja splošni model izravnave (SMI). V tem primeru rešitev za iskane neznanke ne iščemo neposredno iz meritev, ampak preko vektorja ekvi-

valentnih opazovanj, od katerih je vsako linearna kombinacija originalnih opazovanj. Model (1) bi zapisali v obliki $\mathbf{Bb} = \mathbf{Ax}$, rešitev pa izračunali z izrazom (\mathbf{Q} – matrika kofaktorjev opazovanj):

$$\hat{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{A}^T (\mathbf{BQB}^T)^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{BQB}^T)^{-1} \mathbf{b}, \quad (4)$$

kjer \mathbf{B} predstavlja matriko koeficientov pri opazovanjih.

Pristop je uporaben predvsem v postopkih aproksimacije krivulj in ploskev določenemu nizu točk, kjer obravnavamo kot »eno opazovanje« dejansko koordinatne pare (x, y) ali trojice (x, y, z) , ki so povrhu v matematični enačbi z neznankami povezani v nelinearni obliki. V tem primeru bi bilo zelo težko posamezno koordinato osamiti in izraziti v linearni obliki, kot se zahteva pri posredni izravnavi. Enako je pri transformaciji koordinat, ko vse koordinate vseh točk obravnavamo kot opazovanja. Rešitev SMI je v tem primeru veliko hitrejša in enostavnejša.

- c.) Rešitev iščemo z razcepom SVD, ki je samo različica izračuna po klasični metodi najmanjših kvadratov pod a.). Tudi pri razcepu SVD lahko upoštevamo uteži opazovanj. Če upoštevamo dejstvo, da je matrika \mathbf{P} za opazovanja pozitivno definitna, potem velja $\mathbf{P} = \mathbf{P}_c \mathbf{P}_c^*$ (razcep po Choleskem), in zato lahko prevedemo sistem (1) v obliko $(\mathbf{P}_c \mathbf{b}) = (\mathbf{P}_c \mathbf{A}) \mathbf{x}$.
- d.) Uporabimo metodo izravnave, ki upošteva tudi pogreške pri neznankah in jo detajlno razlagamo v nadaljevanju.

2.2 Metoda z obravnavo prisotnosti pogreškov (tudi) pri neznankah

Metodo lahko imenujemo tudi »popolna« izravnava po metodi najmanjših kvadratov (angl. *total least squares* – TLS). V tem primeru obravnavamo predoločen sistem, ki zaradi pogreškov v meritvah povzroči, da $\mathbf{Ax} \cong \mathbf{b}$ in $\{\text{rank}(\mathbf{A}) = u\} \neq \{\text{rank}([\mathbf{A}|\mathbf{b}]) = u + 1\}$. Klasična obravnava oziroma iskanje rešitve za vektor neznank po MNK predpostavlja prisotnost pogreškov samo v vektorju odstopanj \mathbf{b} . Če predpostavimo poleg pogreškov meritev tudi prisotnost pogreškov pri neznankah (EIV – angl. *errors in variables*; Neitzel, 2010; Simkoeei in Jazaeri, 2012), lahko zapišemo:

$$\mathbf{b} + \mathbf{v} = (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A) \mathbf{x}, \quad (5)$$

s stohastičnimi lastnostmi:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{e}_A \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \text{vec}(\mathbf{E}_A) \end{bmatrix} \sim \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_b & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_A \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

kjer je $\mathbf{e}_A = \text{vec}(\mathbf{E}_A)$ vektor, sestavljen iz stolpcev matrike \mathbf{E}_A dimenzije $n \cdot u \times 1$. \mathbf{Q}_b predstavlja matriko kofaktorjev meritev, \mathbf{Q}_A pa matriko kofaktorjev koeficientov v matriki \mathbf{A} .

Rešitev za \mathbf{x} sistema (5) izpeljemo z vektorjem Lagrangeovih multiplikatorjev ali korelat \mathbf{k} (dim $n \times 1$). Pogoj minimalne vsote kvadratov zapišemo z utežno funkcijo Φ :

$$\Phi = \mathbf{v}^T \mathbf{Q}_B^{-1} \mathbf{v} + \mathbf{e}_A^T \mathbf{Q}_A^{-1} \mathbf{e}_A + 2\mathbf{k}^T (\mathbf{b} + \mathbf{v} - \mathbf{Ax} + \mathbf{E}_A \mathbf{x}) = \min. \quad (7)$$

V (7) nastopa vektor \mathbf{e}_A , ki pripada matriki \mathbf{E}_A . Poenotimo zapise za \mathbf{e}_A in \mathbf{E}_A v (7) z uporabo kronckerjevega produkta:

$$\Phi = \mathbf{v}^T \mathbf{Q}_B^{-1} \mathbf{v} + \mathbf{e}_A^T \mathbf{Q}_A^{-1} \mathbf{e}_A + 2\mathbf{k}^T (\mathbf{b} + \mathbf{v} - \mathbf{Ax} + (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{e}_A) = \min. \quad (8)$$

Za določitev minimuma utežne funkcije Φ moramo parcialne odvode po spremenljivkah \mathbf{v} , \mathbf{x} , \mathbf{e}_A in \mathbf{k} izenačiti z 0 (Simkooei in Jazaeri, 2012).

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{v}^T} = \mathbf{Q}_b^{-1} \mathbf{v} + \mathbf{k} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{e}_A^T} = \mathbf{Q}_A^{-1} \mathbf{e}_A + (\mathbf{x} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{k} = 0 \tag{10}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{k}^T} = \mathbf{b} + \mathbf{v} - \mathbf{A}\mathbf{x} + (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{e}_A = 0 \tag{11}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{x}^T} = -\mathbf{A}^T \mathbf{k} + \mathbf{E}_A^T \mathbf{k} = 0 \tag{12}$$

Iz odvodov (9) in (10) izhajajo:

$$\mathbf{v} = -\mathbf{Q}_b \mathbf{k}, \tag{13}$$

$$\mathbf{e}_A = \text{vec}(\mathbf{E}_A) = -\mathbf{Q}_A (\mathbf{x} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{k}. \tag{14}$$

Če (13) vstavimo v (11), dobimo:

$$\mathbf{k} = \left(\mathbf{Q}_b + (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{Q}_A (\mathbf{x} \otimes \mathbf{I}_n) \right)^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}) = \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}) \tag{15}$$

kjer je $\mathbf{Q}_{\tilde{b}} = \mathbf{Q}_b + (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{Q}_A (\mathbf{x} \otimes \mathbf{I}_n)$.

Z upoštevanjem (15) iz (12) sledi rešitev za vektor neznank \mathbf{x} ob predpostavki pogreškov v modelu:

$$\hat{\mathbf{x}} = \left((\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{b}, \tag{16}$$

kjer bi $\left((\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{A} \right)$ lahko predstavljal matriko normalnih enačb razširjenega modela

$\mathbf{b} + \mathbf{v} = (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)\mathbf{x}$, ki predpostavlja tudi pogreške v modelu. Vendar ta matrika ni simetrična in ni pozitivno definitna za razliko od matrike normalnih enačb $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ modela $\mathbf{b} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x}$, kot smo ga »javljali«. Rešitev nam predstavlja prevedba izraza (16) z upoštevanjem zveze $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{E}_A$ oz. $\mathbf{A} = \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{E}_A$:

$$(\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{b} \tag{17}$$

Obema stranema odštejemo $(\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{E}_A \hat{\mathbf{x}}$:

$$\begin{aligned} (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{E}_A \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{b} - (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \mathbf{E}_A \hat{\mathbf{x}} \\ (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A) \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{E}_A \hat{\mathbf{x}}) \end{aligned} \tag{18}$$

Iz (18) sledi rešitev za neznanke:

$$\hat{\mathbf{x}} = \left((\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A) \right)^{-1} (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{E}_A \hat{\mathbf{x}}) \tag{19}$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \left((\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A) \right)^{-1} (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)^T \mathbf{Q}_{\tilde{b}}^{-1} \tilde{\mathbf{b}}, \tag{20}$$

kjer je $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b} - \mathbf{E}_A \hat{\mathbf{x}}$. Rešitev za vektor opazovanj in vektor popravkov modela dobimo z upoštevanjem (5) in (9) z izrazoma:

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A) \hat{\mathbf{x}} \tag{21}$$

$$\hat{\mathbf{v}} = -\mathbf{b} + \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{Q}_b \mathbf{k} \tag{22}$$

Če upoštevamo (14), da je $\mathbf{E}_A \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_n) \text{vec}(\mathbf{E}_A) = (\mathbf{x}^T \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{e}_A$, lahko zapišemo matrike kofaktorjev za izravnava opazovanja in neznanke:

$$\mathbf{Q}_b = \mathbf{Q}_b + (\hat{\mathbf{x}}^T \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{Q}_A (\hat{\mathbf{x}} \otimes \mathbf{I}_n) \tag{23}$$

$$\mathbf{Q}_x = (\tilde{\mathbf{A}}^T \mathbf{Q}_b^{-1} \tilde{\mathbf{A}})^{-1} \tag{24}$$

Pripadajoča referenčna varianca a-posteriori:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}_b^{-1} \hat{\mathbf{v}}}{n - u} = \frac{\mathbf{k}^T \mathbf{Q}_b^{-1} \mathbf{k}}{n - u} \tag{25}$$

2.1.1 Algoritem za izračun

Gre za iterativni postopek v naslednjih korakih (Simkooei in Jazaeri, 2012):

KORAK 1: Nastavimo začetno vrednost vektorja neznank

Začetne vrednosti neznank prevzamemo iz »navadne« izravnave po MNK, kjer upoštevamo natančnosti opazovanj¹ $\mathbf{P} = \Sigma_b^{-1}$.

$$\hat{\mathbf{x}}^0 = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b} \tag{26}$$

KORAK 2: $i = 0$ (i – iteracija)

$$\mathbf{v}^i = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}^i - \mathbf{b} \tag{27}$$

$$\mathbf{Q}_b^i = \mathbf{Q}_b + \left((\hat{\mathbf{x}}^i)^T \otimes \mathbf{I}_n \right) \mathbf{Q}_A (\hat{\mathbf{x}}^i \otimes \mathbf{I}_n) \tag{28}$$

V izrazu (28) nastopa blok matrika \mathbf{Q}_A , ki je odvisna od natančnosti opazovanj, ki nastopajo v izravnavi in jo izračunamo na naslednji način (Simkooei in Jazaeri, 2012):

$$\mathbf{Q}_A = \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^u \mathbf{c}_i \mathbf{c}_j^T \otimes \mathbf{Q}_{ij}, \tag{29}$$

pri tem sta \mathbf{c}_i in \mathbf{c}_j enotska vektorja z enico na mestu, ki pripada neznanki, drugje so členi enaki 0. Matrika \mathbf{Q}_{ij} predstavlja matriko kofaktorjev opazovanj, ki nastopajo ob neznankah, in je dimenzije $n \times n$.

Izračunamo vektor \mathbf{e}_A^i , ki v i -ti iteraciji pripada matriki \mathbf{E}_A^i :

$$\mathbf{e}_A^i = -\mathbf{Q}_A (\hat{\mathbf{x}}^i \otimes \mathbf{I}_n) (\mathbf{Q}_b^i)^{-1} \mathbf{v}^i \tag{30}$$

$$\tilde{\mathbf{A}}^i = \mathbf{A} - \mathbf{E}_A^i \hat{\mathbf{x}}^i \tag{31}$$

¹ Nanaša se na opazovanja, ki jih v običajni izravnavi po MNK obravnavamo kot opazovanja. Zadevo pojasnujemo na primeru določitve regresijske premice v nadaljevanju.

$$\mathbf{b}^i = \mathbf{b} - \mathbf{E}_A^i$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}^i}^{i+1} = \left(\tilde{\mathbf{A}}^{iT} (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}^i}^{-1}) \tilde{\mathbf{A}}^i \right)^{-1} \tag{32}$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{i+1} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}^i}^{i+1} \tilde{\mathbf{A}}^{iT} (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}^i}^{-1})^{-1} \mathbf{b}^i = \left(\tilde{\mathbf{A}}^{iT} (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}^i}^{-1}) \tilde{\mathbf{A}}^i \right)^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^{iT} (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}^i}^{-1})^{-1} \mathbf{b}^i = \tilde{\mathbf{N}}^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^{iT} (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}^i}^{-1})^{-1} \mathbf{b}^i \tag{33}$$

$$i = i + 1$$

KORAK 3: preverimo konvergenco

$$|\hat{\mathbf{x}}^{i+1} - \hat{\mathbf{x}}^i| < \delta, \tag{34}$$

kjer je δ predhodno izbrana vrednost za prekinitev iteracijskega postopka. V primeru izpolnjevanja pogoja (34) zaključimo z iteracijskim postopkom.

2.1.2 Ocena natančnosti

Sistem $\mathbf{b} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ smo prevedli na sistem $\tilde{\mathbf{b}} + \tilde{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}$. Torej imamo, če upoštevamo (21), (22) in (33):

$$\hat{\mathbf{b}} = \tilde{\mathbf{b}} + \tilde{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{E}_A)\hat{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{A}} \left(\tilde{\mathbf{A}}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}}^{-1} \tilde{\mathbf{A}} \right)^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^T (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}})^{-1} \tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{P}_A \tilde{\mathbf{b}} \tag{35}$$

$$\hat{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{b}} - \hat{\mathbf{b}} = -\mathbf{Q}_A \mathbf{k} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_A) \tilde{\mathbf{b}} \tag{36}$$

Iz zvez (35) in (36) lahko zapišemo pripadajoče matrike kofaktorjev:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}} = \mathbf{P}_A \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{b}}} = \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{x}}} \tilde{\mathbf{A}}^T \tag{37}$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_A) \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{b}}} = \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{b}}} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}} \tag{38}$$

Referenčna varianca a-posteriori znaša:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}}^{-1} \hat{\mathbf{v}}}{n - u} \tag{39}$$

2.2 Metoda »popolne« izravnave z uporabo razcepa SVD

Kot smo že omenili, če iščemo rešitev za vektor neznanek \mathbf{x} v sistemu (1), potem hočemo doseči, da je $\text{rank}(\hat{\mathbf{A}}) = \text{rank}([\hat{\mathbf{A}} | \hat{\mathbf{b}}]) = u$. Sistem (1) v obliki razširjene matrike lahko zapišemo kot:

$$[\hat{\mathbf{A}} | \hat{\mathbf{b}}] \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ -1 \end{bmatrix} = 0 \tag{40}$$

Če razcepimo razširjeno matriko $[\hat{\mathbf{A}} | \hat{\mathbf{b}}]$ po metodi SVD (Strang in Borre, 1997), dobimo (Markovsky in Van Huffel, 2007):

$$[\hat{\mathbf{A}} | \hat{\mathbf{b}}] = \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\mathbf{\Lambda}} \tilde{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ \tilde{\mathbf{u}}_1 & \tilde{\mathbf{u}}_2 & \dots & \tilde{\mathbf{u}}_n \\ | & | & & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \tilde{\lambda}_r & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & \tilde{\lambda}_{u+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{\mathbf{v}}_1 \\ -\tilde{\mathbf{v}}_2 \\ \vdots \\ -\tilde{\mathbf{v}}_{u+1} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{u+1} \tilde{\lambda}_i \tilde{\mathbf{u}}_i \tilde{\mathbf{v}}_i, \tag{41}$$

kjer sta \mathbf{U} in \mathbf{V} kvadratni ortogonalni matriki ter \mathbf{L} diagonalna matrika singularnih vrednosti (Soldo in Ambrožič, 2018).

Doseči želimo, da se rang zgornjega sistema iz $u + 1$ zmanjša na u ob tem, da se čim manj spremeni matrika $[\tilde{\mathbf{A}} | \tilde{\mathbf{b}}]$. Zato najmanjšo singularno vrednost v enačbi (41) $\tilde{\lambda}_{u+1}$ spremenimo v 0. Torej se zgornji izraz prevede na:

$$\begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ \tilde{\mathbf{u}}_1 & \tilde{\mathbf{u}}_2 & \dots & \tilde{\mathbf{u}}_n \\ | & | & & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_1 & & & 0 \\ & \tilde{\lambda}_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \tilde{\lambda}_u \\ 0 & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{\mathbf{v}}_1 - \\ -\tilde{\mathbf{v}}_2 - \\ \vdots \\ -\tilde{\mathbf{v}}_{u+1} - \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^u \tilde{\lambda}_i \tilde{\mathbf{u}}_i \tilde{\mathbf{v}}_i \quad (42)$$

Zapišemo lahko:

$$[\tilde{\mathbf{A}} | \tilde{\mathbf{b}}] \cdot \tilde{\mathbf{v}}_{u+1}^T = \left(\sum_{i=1}^u \tilde{\lambda}_i \tilde{\mathbf{u}}_i \tilde{\mathbf{v}}_i \right) \cdot \tilde{\mathbf{v}}_{u+1}^T = 0, \quad (43)$$

kjer je:

$\tilde{\mathbf{v}}_i \cdot \tilde{\mathbf{v}}_{u+1}^T = 0$, ker so vrstice v \mathbf{V} med seboj ortogonalne,

$\tilde{\mathbf{v}}_{u+1}^T = [v_{u+1,1} \quad v_{u+1,2} \quad \dots \quad v_{u+1,u} \quad v_{u+1,u+1}]^T$ – zadnji stolpec matrike \mathbf{V} .

Če povežemo (40) in (43), dobimo:

$$[\tilde{\mathbf{A}} | \tilde{\mathbf{b}}] \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ -1 \end{bmatrix} = [\tilde{\mathbf{A}} | \tilde{\mathbf{b}}] \cdot [v_{u+1,1} \quad v_{u+1,2} \quad \dots \quad v_{u+1,u} \quad v_{u+1,u+1}]^T = 0 \quad (44)$$

Iz (44) izhajajo rešitev za vektor neznank, ko upoštevamo tudi popravke (pogreške) pri neznankah:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{TLS}} = -\frac{1}{v_{u+1,u+1}} [v_{u+1,1} \quad v_{u+1,2} \quad \dots \quad v_{u+1,u}]^T \quad (45)$$

V tem primeru najdemo rešitev brez stohastične obravnave. Če bi želeli v izračunu upoštevati tudi uteži opazovanj, tako na strani vektorja \mathbf{b} kot na strani matrike \mathbf{A} , nastane težava. V razširitvi (2) oziroma (40) ne moremo upoštevati tako uteži opazovanj kot tudi uteži pri neznankah, kot je nakazano v poglavju 2.1 z razcepom matrike \mathbf{P} po Choleskem. Tu obravnavamo dve različni matriki uteži.

3 OBRAVNAVA NA PRAKTIČNEM PRIMERU

3.1 Regresijska premica

Desetim točkam določamo regresijsko premico. Matematična enačba, ki povezuje meritve in neznanke, je enačba premice: $y = kx + n$. Neznanke predstavljata koeficienta k in n , koordinata x »konstantno« vrednost, koordinata y pa »merjeno« vrednost. Primer koordinat in pripadajočih uteži je prevzet iz Neri

in sod., 1989, in predstavljen v Simkooei in Jazaeri, 2012.

Preglednica 1: Točke na premici, ki jim prilagajamo premico.

Točka	Konstanta		»Meritve«		Utež		[A b]	
	x	y	px	py	A	b		
T1	0,0	5,9	1000	1	0,0	1	5,9	
T2	0,9	5,4	1000	2	0,9	1	5,4	
T3	1,8	4,4	500	4	1,8	1	4,4	
T4	2,6	4,6	800	8	2,6	1	4,6	
T5	3,3	3,5	200	20	3,3	1	3,5	
T6	4,4	3,7	80	20	4,4	1	3,7	
T7	5,2	2,8	60	70	5,2	1	2,8	
T8	6,1	2,8	20	70	6,1	1	2,8	
T9	6,5	2,4	2	100	6,5	1	2,4	
T10	7,4	1,5	1	500	7,4	1	1,5	

Rank matrike **A** znaša 2, razširjene matrike **[A|b]** pa 3. Seveda je to posledica, ker točke ne ležijo na isti premici. Sedaj poiščemo rešitev za neznanki *k* in *n* na naslednje načine:

- izravnava po MNK brez upoštevanja uteži (MNK),
- uporaba razcepa SVD brez upoštevanja uteži (SVD) kot alternativa MNK brez upoštevanja uteži,
- popolna izravnava z uporabo razcepa SVD brez upoštevanja uteži (TLS SVD),
- izravnava po MNK z upoštevanjem uteži (MNKP),
- popolna izravnava z upoštevanjem uteži (WTLS),
- splošni model izravnave (SMI).

Preglednica 2: Rešitve izravnave regresijske premice glede na različne obravnave.

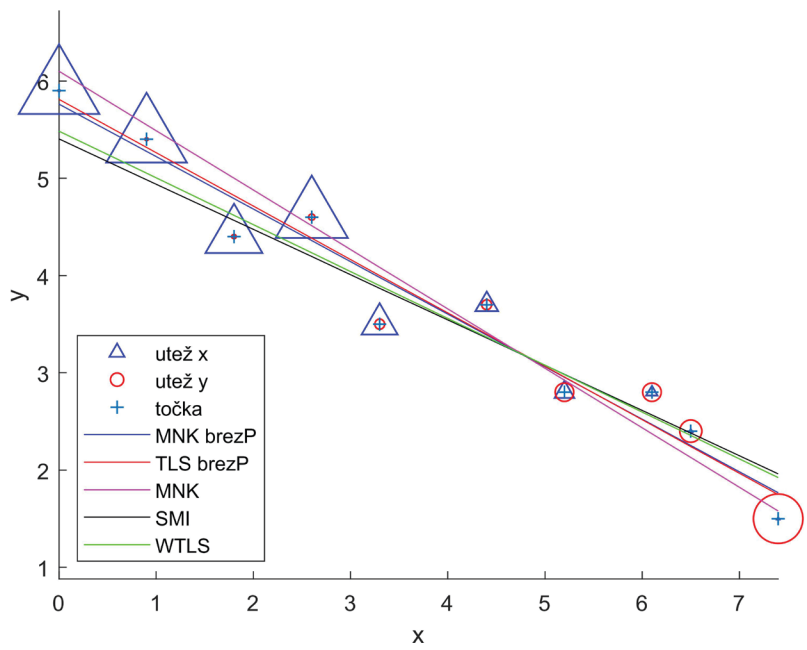
Metoda izračuna	Upoštevam uteži	<i>k</i>	<i>n</i>	σ_k	σ_n	$\hat{\sigma}_0$
MNK	ne	-0,53958	5,76119	0,04213	0,18949	0,316
SVD	ne	-0,53958	5,76119	/	/	
TLS_SVD	ne	-0,54886	5,81004	/	/	
MNK	da	-0,61066	6,09902	0,06216	0,42275	2,072
WTLS	da	-0,48129	5,48425	0,07017	0,35716	1,219
SMI	da	-0,46513	5,40367	0,07086	0,35207	1,156

Kriterij prekinutve iteracijskega postopka za »popolno« izravnavo z upoštevanjem uteži (WTLS) je izbran 10^{-12} . V tem primeru dosežemo 8 iteracij.

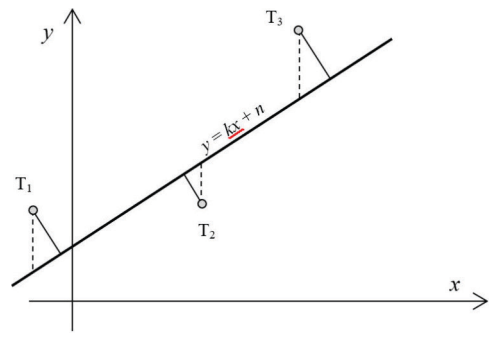
Na sliki 2 vidimo, da se pri izravnavi po MNK z upoštevanjem uteži (vijolična črta) rešitev popolnoma prilagodi točkam z večjo utežjo za koordinato *y*. Rešitev po metodi WTLS (zelena črta) pa enakomerno upošteva vse uteži, tako za *y* kot *x*. Rešitev je v tem primeru veliko bolj smiselna. Rešitev splošnega modela izravnave je po numeričnih vrednostih blizu rešitve WTLS.

Geometrijski pomen izravnave z upoštevanjem pogreškov pri neznankah v primeru regresijske premice lahko razložimo na naslednji način (Golub in Van Loan, 1980; Markovsky in Van Huffel, 2007): Če

iščemo rešitev z obravnavo koordinat y kot meritev x pa kot konstant, dobimo rešitev pod pogojem minimalne vsote kvadratov merskih vrednosti. Torej minimalne vsote kvadratov popravkov koordinat y po izravnavi (slika 3, črtkana črta). Če obravnavamo tudi koordinate x kot merjene vrednosti, pa dejansko iščemo minimum vsote kvadratov popravkov merjenih koordinat x in y hkrati. Torej minimiziramo vsoto kvadratov pravokotnih oddaljenosti »merjenih« točk od regresijske premice (slika 3, polna črta).



Slika 2: Rešitve regresijske premice.



Slika 3: Metoda najmanjših kvadratov (črtkana) v primerjavi s popolno izravnavo po MNK (polna črta).

Seveda je smiselna zgornja primerjava odklikov v smeri y in pravokotno samo, če ne upoštevamo uteži oziroma so te za vse »meritve« enake (npr. $\mathbf{P} = \mathbf{I}$). Pri upoštevanju uteži ne moremo obravnavati pravokotnih oddaljenosti, ampak neke poševne. Če sedaj zgornji primer obravnavamo z enotsko utežno matriko, lahko vidimo razliko v rezultatu – vsota kvadratov odklikov točk od regresijske premice:

– pravokotni odklik od premice: $\sum_{MNK} d_{\perp}^2 = \sum_{SMI} d_{\perp}^2 = 0.78748 > 0.78649 = \sum_{WTLS} d_{\perp}^2$

– odmik v smeri y od premice: $\sum_{MNK} d_y^2 = \sum_{SMI} d_{\perp}^2 = 0.89480 < 0.89593 = \sum_{WTLS} d_y^2$

Pri enotski utežni matriki za opazovanje (= vhodne koordinate točk) je rešitev za regresijsko premico enaka za posredno izravnavo in splošni model izravnave po metodi najmanjših kvadratov. Kot še vidimo, je rešitev WTLS taka, da minimizira pravokotni odmik točk od izračunane premice.

3.2 Transformacija koordinat

Različne pristope k iskanju rešitve izravnave obravnavamo na primeru iskanja transformacijskih parametrov za prehod iz koordinatnega sistema D48/GK v D96/TM. To sta prejšnja in aktualna različica slovenskega državnega koordinatnega sistema. Obravnava prehoda med obema različicama koordinatnih sistemov je aktualna, saj se v vsakdanji uradni geodetski praksi prepletajo podatki o točkah v obeh koordinatnih sistemih – točke zemljiškega katastra, stare točke različnih nivojev geodetskih mrež, točke izmere GNSS itd. Vprašanje oziroma tematika transformacije med koordinatnima sistemoma D48/GK in D96/TM je bila že večkrat obravnavana (Berk, 2017; Berk in Duhovnik, 2007; Marjetič in Pavlovčič, 2018, in drugi). Na ravni države oziroma za podatke, katerih skrbnik je Geodetska uprava Republike Slovenije, je bila uradno sprejet vsedržavni model trikotniške transformacije (odsekoma afine transformacije, Berk, 2017). V tej nalogi smo se lotili iskanja transformacijskih parametrov za prehod iz D48/GK v D96/TM na lokalnem območju JZ dela Ljubljane na podlagi točk, ki so bile dane v starem koordinatnem sistemu in določene z metodo GNSS v novem koordinatnem sistemu (Marjetič in Pavlovčič, 2018).

Preglednica 3: Seznam obravnavanih točk za transformacijo.

T	D48/GK					D96/TM				
	y [m]	x [m]	p_y	p_x	e [m]	n [m]	σ_e [mm]	σ_n [mm]	p_e	p_n
240-C2	461832,4600	99989,5000	1	1	461461,4803	100475,9817	1,2	1,7	10	5
240-C1	461849,9300	99989,2200	1	1	461478,8845	100475,7180	1,4	2,0	8	5
124-C0	459984,0200	99868,1900	1	1	459613,0262	100354,6710	1,5	2,0	8	5
204-C0	459937,1900	101340,7500	1	1	459566,2221	101827,2837	0,4	0,8	25	10
893-C0	456202,4000	99557,5400	1	1	455831,3858	100044,0614	0,2	0,3	40	35
292-C0	454777,1400	100905,6500	1	1	454406,2259	101392,2533	0,7	0,8	10	10

Natančnosti določitve koordinat točk v D48/GK ne navajamo, ker o tem nimamo podatka. Ocenjujemo, da so bile koordinate določene s centimetrsko natančnostjo (ali slabše). Natančnost koordinat točk v D96/TM izhaja iz rezultatov izmere in izračuna geodetske mreže (Marjetič in Pavlovčič, 2018) in je v splošnem nekajkrat boljša kot v D48/GK. Temu ustrezno priredimo tudi uteži posameznim točkam v obeh koordinatnih sistemih (preglednica 3).

Obravnavamo 4-parametrično podobnostno transformacijo v ravnini, ki ima obliko:

$$\begin{bmatrix} e \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}, \tag{46}$$

kjer so:

e, n – koordinate točk v novem koordinatnem sistemu,

y, x – koordinate točk v starem koordinatnem sistemu,

a , b – parametra transformacije, ki vključujeta spremembo merila in orientacije ($a = m \cdot \cos\alpha$, $b = m \cdot \sin\alpha$;
 m – merilo, α – rotacija), ter

c , d – parametra premika izhodišča koordinatnega sistema v smeri x in y .

Transformacijske parametre izračunamo na štiri različne načine, ki jih obravnavamo v tem prispevku: po MNK z upoštevanjem uteži, s postopkom »popolne« izravnave z razcepom SVD brez upoštevanja uteži (TLS_SVD) in s postopkom »popolne« izravnave z upoštevanjem uteži (WTLS, preglednica 4). V izračunu obravnavamo reducirane koordinate na težišče mreže v izvornem koordinatnem sistemu (D48/GK).

Preglednica 4: Rezultati izračuna transformacijskih parametrov.

Metoda izračuna	Upoštevam uteži	a	b	c [m]	d [m]	α [°]	m [ppm]	$\hat{\sigma}_0$ [m]
MNK	da	0,9999986	0,0000132	-370,98998	486,51088	2,72229	-1,35	0,09911
TLS_SVD	ne	0,9999942	0,0000143	-370,98587	486,51985	2,94140	-5,83	/
WTLS	da	0,9999948	0,0000140	-370,98617	486,51914	2,89402	-5,18	0,04278
SMI	da	0,9999948	0,0000140	-370,98617	486,51914	2,89398	-5,18	0,06051

Iz rezultatov v preglednici 4 vidimo, da metoda WTLS v obravnavanem primeru zagotavlja precej podobne rezultate z ali brez upoštevanja uteži (TLS_SVD) v izravnavi in so tudi enaki rezultatom splošnega modela izravnave (SMI), nekoliko je različna samo a-posteriori ocena natančnosti in kot rotacije a .

Zanima nas tudi ocena kakovosti transformacije z vidika primerjave transformiranih koordinat na podlagi izračunanih parametrov (preglednici 5 in 6). Pri tej analizi se omejimo samo na izračuna, ki upoštevata uteži (WTLS in MNK).

Preglednica 5: Razlika med transformiranimi in podanimi koordinatami v ciljnem koordinatnem sistemu – izračun po MNK z upoštevanjem uteži.

MNK	Novi KS (D96/TM)		Razlika		Transformirano v D96/TM	
	e [m]	n [m]	de [m]	dn [m]	e [m]	n [m]
240-C2	461461,4803	100475,9817	-0,0178	-0,0065	461461,4625	100475,9752
240-C1	461478,8845	100475,7180	0,0480	-0,0231	461478,9325	100475,6949
124-C0	459613,0262	100354,6710	-0,0028	0,0187	459613,0235	100354,6897
204-C0	459566,2221	101827,2837	-0,0092	-0,0354	459566,2130	101827,2484
893-C0	455831,3858	100044,0614	0,0187	0,0287	455831,4045	100044,0901
292-C0	454406,2259	101392,2533	-0,0617	-0,0363	454406,1642	101392,2170
		RMS [m]	0,0338	0,0268		

Iz rezultatov izračuna transformacijskih parametrov (preglednice 2–4) lahko razberemo, da so rezultati nekoliko drugačni, če izvajamo izravnavo klasično po metodi najmanjših kvadratov z upoštevanjem uteži ali pa obravnavamo tudi pogreške pri neznankah (WTLS). Razlike v transformiranih koordinatah v D96/TM med MNK in WTLS so reda velikosti centimetra. Z različico metode TLS z razcepom SVD dobimo zelo podobne rezultate kot z metodo WTLS.

Kateri rezultati so boljši, če primerjamo MNK in WTLS? Nekaj parametrov, ki smo jih tu izračunali, kaže na boljšo kakovost izravnave po metodi WTLS. Če nam merilo kakovosti predstavlja a-posteriori

ocena natančnosti, ki jo računamo iz vektorja popravkov meritev/opazovanj (koordinat točk), potem je vrednost boljša pri obravnavi WTLS (preglednica 4). Če je podana vrednost standardnega odklona a-priori 0,020 m za izhodiščne koordinate v D48/GK in 0,005 m za koordinate v D96/TM, je a-posteriori vrednost za obravnavo po MNK z upoštevanjem uteži pri opazovanjih velikosti približno 10 centimetrov, če so obravnavani tudi pogreški pri neznankah, pa znaša 4 centimetre. Tudi povprečje kvadratov odstopanj transformiranih koordinat na podlagi izračunanih parametrov od podanih v končnem/ciljnem koordinatnem sistemu (preglednici 5 in 6) je pri obravnavi WTLS manjša. Iz tega izhaja, da so vrednosti izračunanih transformacijskih parametrov z metodo WTLS določene/izračunane tako, da se transformirane koordinate v povprečju bolje prilegajo končnim »merjenim« koordinatam.

Preglednica 6: Razlika med transformiranimi in podanimi koordinatami v ciljnem koordinatnem sistemu – izračun po WTLS.

WTLS T	Novi KS (D96/TM)		Razlika		Transformirano v D96/TM	
	e [m]	n [m]	de [m]	dn [m]	e [m]	n [m]
240-C2	461461,4803	100475,9817	-0,0247	0,0005	461461,4557	100475,9822
240-C1	461478,8845	100475,7180	0,0411	-0,0160	461478,9256	100475,7020
124-C0	459613,0262	100354,6710	-0,0027	0,0278	459613,0235	100354,6988
204-C0	459566,2221	101827,2837	-0,0077	-0,0319	459566,2144	101827,2518
893-C0	455831,3858	100044,0614	0,0330	0,0421	455831,4188	100044,1035
292-C0	454406,2259	101392,2533	-0,0408	-0,0268	454406,1851	101392,2265
		RMS [m]	0,0292	0,0275		

4 ZAKLJUČEK

K problemu iskanja optimalne rešitve za neznanke v predoločenem sistemu enačb, ki povezujejo opazovanja in neznanke, lahko pristopimo na več načinov. Geodetu je v splošnem najbolj blizu izravnava po metodi najmanjših kvadratov, kjer prek Gauss-Markovega modela (1) v linearizirani obliki povežemo opazovanja, neznanke in konstante. Rešitev lahko v tem primeru prek sistema normalnih enačb izračunamo z ali brez upoštevanja natančnosti oziroma uteži (priredimo vsem meritvam enako utež, na primer 1) meritev. Tak način obravnave je včasih problematičen. Na primeru iskanja regresijske premice za niz točk v ravnini lahko samo eno koordinatno komponento točk obravnavamo kot opazovanje, druga pa predstavlja konstanto. Vendar je včasih smiselno, da obe koordinatni komponenti vstopata v model izravnave kot opazovanji. Glede na matematično povezavo nastopa koordinata x na strani modelne matrike **A** in tako »vsiljuje« obravnavo pogreškov tudi na strani neznank (EIV). Podobna situacija nastane pri izračunu transformacijskih parametrov, kjer želimo, da imajo tako točke v izvornem kot tudi v ciljnem koordinatnem sistemu v izravnavi status opazovanj. Kot razširitev standardnega postopka izravnave po MNK je bil poleg znanega splošnega modela izravnave razvit postopek popolne izravnave po metodi najmanjših kvadratov, v strokovni literaturi poznan pod imenom »total least squares« ali TLS. Postopek upošteva pogreške na strani neznank oziroma v matriki modela izravnave **A**, tudi z možnostjo upoštevanja uteži (WTLS, angl. *weighted total least squares*).

V članku smo na računskem primeru izračuna koeficientov regresijske premice in izračuna transformacijskih parametrov predstavili klasično izravnavo po MNK in različico TLS ter primerjali rezultate. Regresijska premica niza točk na ravnini, izračunana po postopku TLS, se prilagaja glede na podane

natančnosti tako x - kot tudi y -koordinat, kar je smiselno. Pri transformaciji koordinat lahko na podlagi izračunanih statistik ugotovimo, da se pri izravnavi po metodi WTLS vrednosti neznak bolje prilagajajo točkam v končnem (ciljnem) koordinatnem sistemu. Glede na natančnosti podanih koordinat, ki so v končnem koordinatnem sistemu (D96/TM) nekajkrat boljše kot v začetnem (D48/GK), je tak rezultat seveda primernejši.

Literatura in viri:

- Amiri-Simkoeei, A., Jazaeri, S. (2012). Weighted total least squares formulated by standard least squares theory. *Journal of Geodetic Science*, 2 (2), 113–124. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10156-011-0036-5>
- Amiri-Simkoeei, A., Zangeneh-Nejad, F., Asgari, J., Jazaeri, S. (2013). Estimation of straight line parameters with fully correlated coordinates. *Measurement*, 48 (2014), 378–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.11.005>
- Berk, S. (2017). 3TRA – Brezplačni program za transformacijo prostorskih podatko v nov referenčni koordinatni sistem Slovenije. *Geodetski vestnik*, 61 (4), 659–665. www.geodetski-vestnik.com/61/4/gv61-4_berk.pdf, pridobljeno 15. 1. 2021.
- Berk, S., Duhovnik, M. (2007). Transformacija podatkov geodetske uprave Republike Slovenije v novi državni koordinatni sistem. *Geodetski vestnik*, 51 (4), 803–826. http://www.geodetski-vestnik.com/51/4/gv51-4_803-826.pdf, pridobljeno 15. 1. 2021.
- Golub, G. H., Van Loan, C. F. (1980). *An Analysis of the Total Least Squares Problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 17 (6), 883–893. DOI: <https://doi.org/10.1137/0717073>
- Marjetič, A., Pavlovčič-Prešeren, P. (2018). Določitev položajev cerkvenih zvonikov v koordinatnem sistemu D96/TM. *Geodetski vestnik*, 62 (4), 587–603. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.04.587-603>
- Markovsky, I., Van Huffel, S. (2007). Overview of Total Least-Squares Methods. *Signal Processing*, 87 (10), 2283–2302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2007.04.004>
- Neitzel, F. (2010). Generalization of total least-squares on example of unweighted and weighted 2D similarity transformation. *Journal of Geodesy*, 84 (12), 751–762. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0408-0>
- Neri, F., Saitta, G., Chiofalo, S. (1989). An accurate and straightforward approach to line regression analysis of error-affected experimental data. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 22 (4), 215–217. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/22/4/002>
- Soldo, J., Ambrožič, T. (2018). Deformacijska analiza po postopku München. *Geodetski vestnik*, 62 (3), 392–412. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.03.392-414>
- Strang, G., Borre, K. (1997). *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, ZDA.
- Teunissen, P. J. G. (2003). *Adjustment theory – an introduction*. Delft: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology.



Marjetič A. (2021). Izravnava po metodi najmanjših kvadratov z upoštevanjem pogreškov pri neznankah. *Geodetski vestnik*, 65 (2), 205–218. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.205-218>

doc. dr. Aleš Marjetič, univ. dipl. inž. geod.
 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
 Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
 e-naslov: amarjeti@fgg.uni-lj.si

KAKOVOST DOLOČITVE NADMORSKIH VIŠIN Z GNSS- VIŠINOMERSTVOM NA OBMOČJU LJUBLJANE

QUALITY DETERMINATION OF MEAN SEA LEVEL HEIGHTS WITH GNSS LEVELLING ON THE LJUBLJANA CITY AREA

Miran Kuhar, Robert Brglez, Božo Koler

UDK: 528.2(497.2)Ljubljana)
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 24. 2. 2021
Sprejeto: 8. 6. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.219-233
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 24. 2. 2021
Accepted: 8. 6. 2021

RECENZIRANI ČLANKI | PEER-REVIEWED ARTICLES

SI | EN

IZVLEČEK

V prispevku smo analizirali kakovost določitve nadmorskih višin točk z RTK GNSS-višinomerstvom in uporabo nove višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper na območju Ljubljane. Na izbranih 57 reperjih smo določili merjene kvazigeoidne višine na podlagi elipsoidnih višin, izmerjenih z RTK GNSS-višinomerstvom, in nadmorskih višin v novem višinskem sistemu SVS2010. Primerjali smo jih z interpoliranimi vrednostmi kvazigeoidnih višin iz nove višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper.

ABSTRACT

This paper describes the quality determination of heights above mean sea level using RTK GNSS-levelling and new height reference surface SLO_VRP2016/Koper on the city area of Ljubljana. At 57 chosen benchmarks, quasigeoid heights were determined using ellipsoidal heights, determined with RTK GNSS-levelling technique and heights above mean sea level in the new height system SVS2010. The measured quasigeoid heights were compared with values interpolated from the new height reference surface SLO_VRP2016/Koper.

KLJUČNE BESEDE

kvazigeoid, višinska referenčna ploskev, RTK GNSS-višinomerstvo, elipsoidna višina, interpolacija, kakovost

KEY WORDS

quasigeoid, height reference surface, RTK GNSS-levelling, ellipsoidal height, interpolation, quality

1 UVOD

Nadmorske višine točk v državnem višinskem sistemu ali višinske razlike lahko določimo z različnimi geodetskimi merskimi metodami, ki jih delimo v terestrične (trigonometrično višinomerstvo in geometrični nivelman) in satelitske oziroma GNSS-višinomerstvo (Dragčević et al., 2016). V praksi se za določitev nadmorskih višin točk pogosto uporablja kombinacija elipsoidne višine, ki je določena z GNSS-izmero, in kvazigeoidne višine, ki je določena iz višinske referenčne ploskve (Kotsakis in Sideris, 1999). Kakovostno določitev nadmorskih višin omogoča sodoben višinski sistem in kakovosten model kvazigeoida oziroma višinska referenčna ploskev v kombinaciji s kakovostno izvedeno GNSS-izmero (Kuhar et al., 2011). Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS) je decembra 2018 uveljavila nov državni višinski sistem z oznako SVS2010 in nov model kvazigeoida v obliki višinske referenčne ploskve (VRP) z oznako SLO_VRP2016/Koper (Uredba, 2018). V novem državnem višinskem sistemu so nadmorske višine določene v sistemu normalnih višin (Koler et al., 2019) v višinskem datumu Koper (Sterle in Koler, 2019).

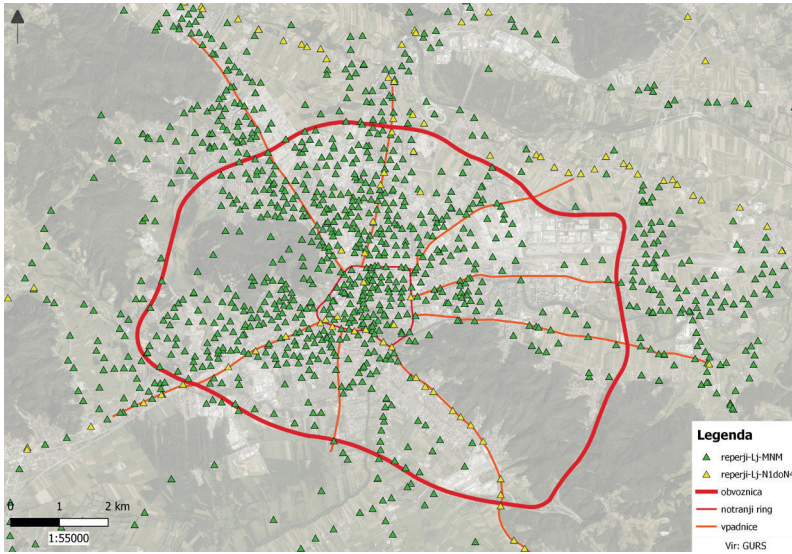
Kakovost določitve nadmorskih višin z GNSS-višinomerstvom lahko preverimo, če primerjamo merjene (nivelirane) normalne višine s kvazigeoidnimi višinami, interpoliranimi iz kvazigeoida oziroma višinske referenčne ploskve, ki jih odštejemo elipsoidnim višinam (Kiamehr in Sjöberg, 2005; Kwang et al., 2020). Kakovost nove višinske referenčne ploskve (SLO_VRP2016/Koper) in stare višinske referenčne ploskve (SLO_AMG2000) v prejšnjem državnem višinskem sistemu SVS2000 (ZDGRS, 2014) so za območje Slovenije analizirali Kuhar et al. (2011) ter Medved et al. (2020). Analiza je pokazala, da je nova višinska referenčna ploskev (SLO_VRP2016/Koper) bistveno kakovostnejša od stare referenčne ploskve (SLO_AMG2000) (Medved et al., 2020).

Kakovost določitve nadmorskih višin z GNSS-višinomerstvom in uporabo nove višinske referenčne ploskve na območju Ljubljane smo analizirali na 57 reperjih. Izbrani reperji sestavljajo približno celično mrežo velikosti 1 x 1 kilometer. Merjene kvazigeoidne višine na reperjih smo določili z RTK GNSS-višinomerstvom, ki se v praksi običajno uporablja za določitev nadmorskih višin točk, in geometričnim nivelmanom. Merjene kvazigeoidne višine smo primerjali z interpoliranimi vrednostmi iz SLO_VRP2016/Koper. V prispevku so predstavljeni izbor ustreznih reperjev v celični mreži in meritve na terenu, na koncu je podana grafična in numerična analiza pridobljenih rezultatov.

2 TESTNO OBMOČJE

Kontrolo nove višinske referenčne ploskve na območju mesta Ljubljana smo izvajali na reperjih nove nivelmanske mreže 1. reda ter mestne nivelmanske mreže (slika 1). Na sliki 1 je prikazan tudi približen potek obvoznice, notranjega ringa ter glavnih mestnih vpadnic. Podatke o reperjih, ki so prikazani na sliki 1, smo pridobili iz Gursove baze geodetskih točk.

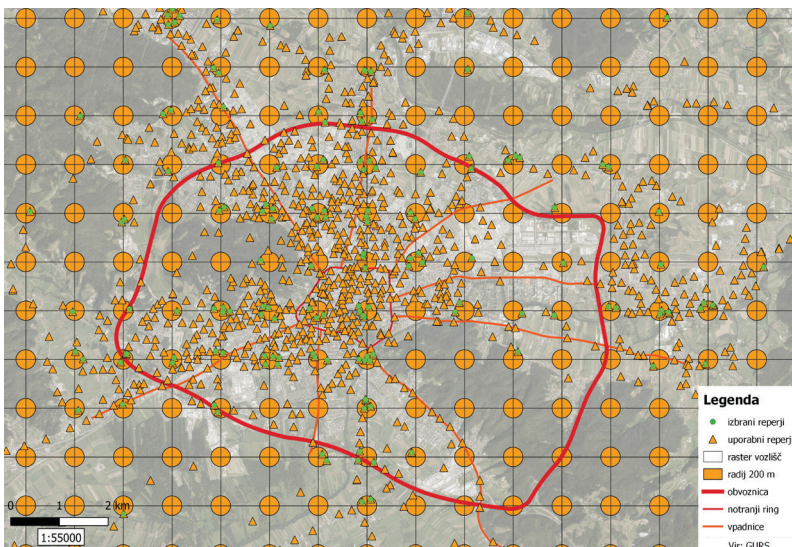
Iz podatkov Gursove spletne aplikacije (PREG, 2019) je razvidno, da je na območju Ljubljane stabiliziranih 1464 reperjev. Status uporabnega reperja za geodetsko izmero ima 1321 reperjev. Pričakovano je, da so reperji na območju Ljubljane razporejeni neenakomerno in da imajo večjo gostoto na pozidanih območjih (slika 1). Največ ohranjenih reperjev je v centru ter jugozahodnem in severnem delu Ljubljane. Na območju Rožnika imamo stabilizirane reperje, vendar je vprašanje, kakšna je dostopnost in predvsem možnost kakovostne GNSS-izmere glede na poraščenost. Na območju Golovca ni stabiliziranih reperjev. S slike 1 je razvidno, da je slabša pokritost z reperji tudi severno in južno od Litijske ceste (BTC, Fužine) ter na južnem delu Ljubljane (Rudnik, Trnovo).



Slika 1: Prikaz reperjev nove nivelmanske mreže od 1. do 4. reda in mestne nivelmanske mreže na izbranem območju Ljubljane (vir podlage: DOF050).

2.1 Priprava podatkov za izmero

Izbirno mrežo reperjev v celični mreži velikosti 1 x 1 kilometer smo opravili v programskem okolju QGIS (QGIS, 2021). Na začetku smo na državnem barvnem ortofotu DOF050 (e-Prostor, 2019) ustvarili podlago z izbranim testnim območjem. Za boljše orientacijo smo na podlagi prikazali potek ljubljanske obvoznice, notranji ring in glavne mestne vpadnice. Nato smo celotno bazo podatkov uvozili v program in uporabne reperje označili z oranžnimi trikotniki (slika 2).



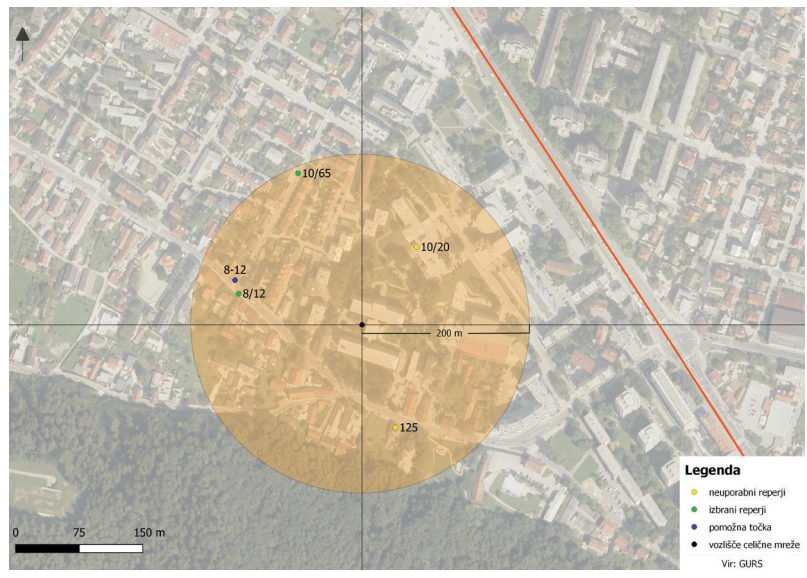
Slika 2: Izbor ustreznih reperjev ob vozliščih gridne mreže (izbrani reperji so označeni z zeleno).

Na izbrani podlagi smo ustvarili tudi celično mrežo velikosti 1 x 1 kilometer, z območjem do 200 metrov od vozlišča (oranžni krogec na sliki 2), saj smo se zavedali, da vsi reperji s statusom uporabni ne bodo na vozliščih celične mreže ali na terenu ne bodo dostopni (ograje, zasebna zemljišča), bodo uničeni ali neuporabni za GNSS-izmero. S premikanjem celične mreže smo dosegli, da je v območje vozlišč padel vsaj en reper, izbrani reperji so na sliki 2 označeni z zeleno.

Na vozliščih brez reperja ali če se je ta med ogledom terena pokazal kot neuporaben za GNSS-izmero, smo izbrali najbližji reper, četudi je bil oddaljen več kot 200 metrov od vozlišča celične mreže.

2.2 Izbira reperjev na terenu

Izbiro ustreznega reperja na terenu najlažje opišemo s sliko 3. V radiju 200 metrov okrog vozlišča celične mreže imamo štiri reperje (125, 8/12, 10/20 in 16/65, slika 3). Na podlagi predhodno pripravljene dnevnega načrta izmere smo poskusili izmero izvesti najprej na reperju 10/20. Zaradi obnovljene fasade je uničen, zato smo v naslednjem koraku poskušali izmero izvesti na reperju 125. Ker tudi ta ni bil uporaben, je bil naslednji izbrani reper 8/12. Modra pika na sliki 3 prikazuje kraj stabilizacije pomožne točke. Postopek izbire ustreznega reperja na terenu je zamuden in dolgotrajen, zato je predhodna priprava in analiza lokacij primernih reperjev zelo pomembna, saj nam zelo olajša kasnejše delo na terenu.



Slika 3: Prikaz izbora reperja na terenu v okolju QGIS.

V preglednici 1 prikazujemo statistične podatke, povezane z izborom primernih reperjev za izmero in številom terenskih dni.

Preglednica 1: Statistični podatki, povezani z izborom reperjev.

Skupno število pregledanih reperjev	Število izbranih reperjev	Število neuporabnih reperjev	Število terenskih dni
80	57	23	15

V raziskavo je bilo vključenih 80 reperjev. Iz različnih razlogov ni bilo mogoče izvesti izmere na kar 23 reperjih (28,8 %), ki so v Gursovi bazi geodetskih točk označeni kot uporabni. Izmero smo izvedli na 57 reperjih (71,2 %).

3 TERENSKA IZMERA

Nadmorske višine oziroma merjene kvazigeoidne višine reperjev smo določili s kombinacijo RTK GNSS-višinomerstva (elipsoidna višina h), geometričnega nivelmana (nadmorska višina H) ter kvazigeoidnih višin (ζ), interpoliranih iz SLO_VRP2016/Koper. Gre za različne vrste podatkov, na podlagi katerih lahko z različnimi geodetskimi merskimi tehnikami določimo nadmorske višine točk. Podatki predstavljajo različne referenčne ploskve (kvazigeoid, elipsoid), ki so tudi različne natančnosti (Kotsakis, Sideris, 1999). Kljub navedenemu pa ti podatki izpolnjujejo osnovno geometrijsko povezavo, ki je določena z enačbo $h - \zeta = H$ (Hofman-Wellenhof in Moritz, 2005).

Razen na treh reperjih, kjer je bilo GNSS-izmero mogoče izvesti neposredno na reperju, smo na preostalih reperjih pomožno točko stabilizirali z betonskim vijakom DIN 603 M. Vrh vijaka, na katerega se nanašata izmerjena elipsoidna (izmera GNSS) in nadmorska višina, prenesena z reperja (niveliranje), je enolično določen. Pomožno točko smo stabilizirali na razdalji od reperja, ki je omogočala navezavo pomožne točke na reper z enega stojišča nivelirja.

a) Izmera GNSS

Izmero GNSS smo izvedli z instrumentom Leica GS18 (Leica Geosystems, 2017). Elipsoidno višino točke smo določili z RTK GNSS-izmero v treh serijah, ki so trajale po dve minuti, z navezavo na državno omrežje GNSS SIGNAL (omrežje SIGNAL ...). Na vseh reperjih oziroma pomožnih točkah smo pazili, da je bila izmera RTK GNSS-izvedena v optimalnih razmerah. Izmero smo izvedli s čim večjim številom razpoložljivih satelitov ter z DOP-faktorjem, manjšim od 3. Izogibali smo se tudi predmetom in objektom, ki so moteči za GNSS-izmero in povzročajo večkratni odboj signala (Dragčević et al., 2016).

Med prvo in drugo serijo meritev GNSS je preteklo približno dvajset minut. Tretjo serijo smo izvedli po preteku vsaj ene ure, običajno pa več, saj smo medtem izvajali izmero na sosednjih reperjih po dnevnem načrtu izmere.

b) Nivelmanska izmera

Nivelmansko izmero smo izvedli z digitalnim nivelirjem Leica DNA03 in invar nivelmansko lato s črtno kodo (Leica GPCL2). Po prvi seriji GNSS-izmere smo prenesli nadmorsko višino reperja na pomožno točko z metodo geometričnega nivelmana z niveliranjem iz sredine. Razdalja med nivelirjem in nivelmansko lato ni presegala 30 metrov.

4 REZULTATI IN ANALIZA NATANČNOSTI

4.1 Analiza rezultatov RTK GNSS-izmere

Koordinate izmerjenih reperjev oziroma pomožnih točk smo določili z izračunom povprečja treh serij GNSS-izmere. V preglednici 2 in na diagramu 1 prikazujemo pregled natančnosti določitve koordinat točk, ki jih poda GNSS-sprejemnik.

Preglednica 2: Kakovost določitve horizontalnih koordinat in elipsoidne višine

	$\sigma_e [m]$	$\sigma_n [m]$	$\sigma_h [m]$
Min.	0,002	0,002	0,004
Maks.	0,005	0,006	0,016
Povprečje	0,003	0,003	0,007

Iz preglednice 2 lahko vidimo, da instrument poda zelo dobre natančnosti določitve horizontalnih koordinat točk, saj so vse vrednosti manjše od enega centimetra. Natančnost določitve elipsoidne višine je pričakovano slabša in znaša od 1,6 centimetra na reperju 11/26, do 0,4 centimetra na reperju 35/1. Povprečna natančnost določitve elipsoidne višine pa je manjša od 1 centimetra (7 milimetrov).

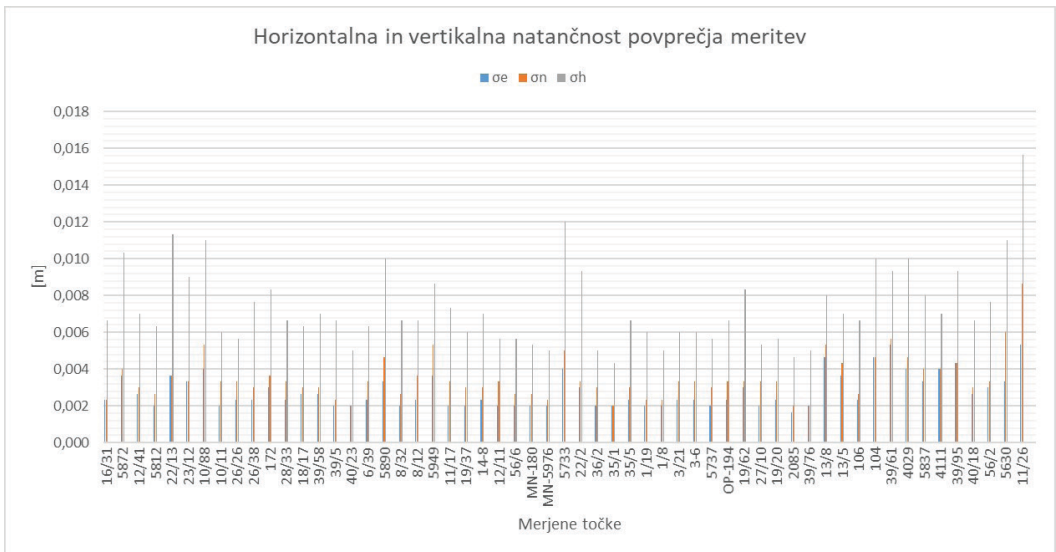


Diagram 1: Horizontalna in vertikalna natančnost povprečja GNSS-meritev.

Podatki o natančnosti določitve koordinat točk, ki jo poda instrument, so lahko zavajajoči, saj gre za tako imenovano notranjo natančnost, ki je veliko boljša od deklarirane natančnosti instrumenta (RTK, horizontalna natančnost: 8 mm; 0,5 ppm in vertikalna natančnost: 15 mm; 0,5 ppm (Leica Geosystems AG, 2017)). Iz analize podatkov posameznih izmer in razlike koordinat točk, določenih v posameznih serijah, ki je dostopna v Brglez (2020), lahko ugotovimo, da so razlike horizontalnih koordinat (diagram 2) in elipsoidnih višin (diagram 3) večje, kot bi pričakovali glede na oceno natančnosti, ki jo poda instrument.

Iz diagrama 2 lahko ugotovimo, da so odstopanja večja od ± 2 centimetrov na reperjih 22/13, 10/88 in 18/17. Odstopanja so med ± 1 in ± 2 centimetroma na reperjih 6/39, 18/12, 5733, 104 in 41/11, na ostalih reperjih pa so manjša od ± 1 centimetra. V Brglez (2020) je izvedena analiza vpliva razlik DOP-faktorja v posamezni seriji izmere na razlike določitve horizontalnih koordinat. Pokazala je, da večjih razlik v določitvi horizontalnih koordinat točke v različnih serijah ne moremo vselej povezati z DOP-faktorjem, temveč tudi s prisotnostjo ostalih za GNSS-meritve motečih vplivov. Ugotovimo lahko, da je kakovost določitve horizontalnih koordinat točk ustrezna za določitev kvazigeoidne višine na točki iz višinske referenčne ploskve.

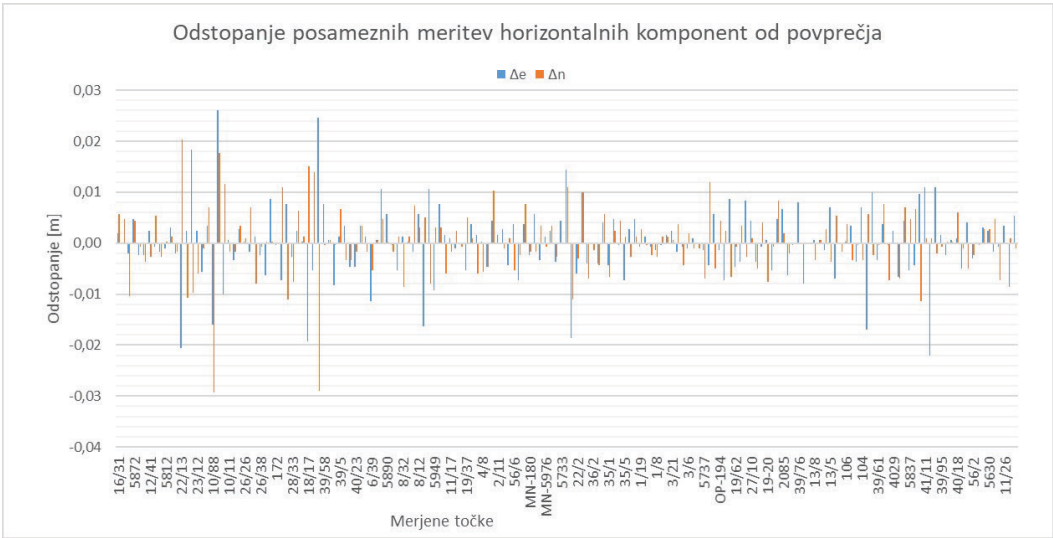


Diagram 2: Odstopanje posameznih meritev horizontalnih koordinat od povprečne vrednosti.

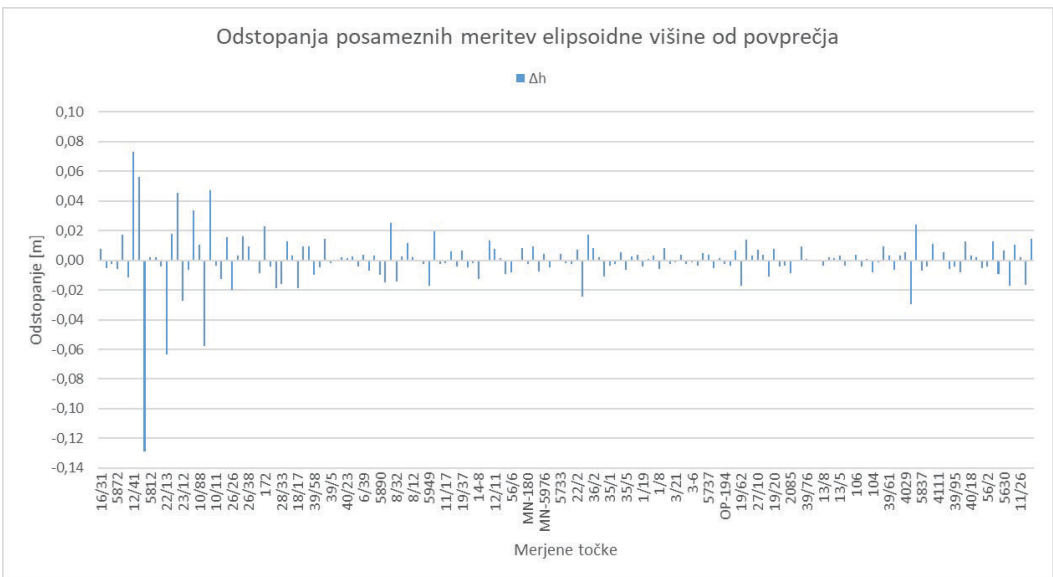


Diagram 3: Odstopanje posameznih meritev elipsoidnih višin od povprečja.

Pričakovano so največja odstopanja pri določitvi elipsoidnih višin na istih reperjih kot pri meritvah horizontalnih koordinat. Prav tako je pri merjenju elipsoidnih višin večji razpon odstopanj. Na reperju 12/41 znaša razlika med prvo in tretjo serijo določitve elipsoidnih višin približno 20 centimetrov (diagram 3). Razliko pripisujemo slabšim razmeram med izvedbo tretje serije meritev (DOP-faktor 3,4), saj je bil DOP-faktor v prvi in drugi seriji pol manjši (1,7) (Brglez, 2020). Podobno velja za reperje 22/13, 10/88 in 4029.

Na reperjih 8/32, 5733 in 104 je DOP-faktor znašal okoli 3, vendar so kljub temu odstopanja posameznih serij od povprečja manjša od ± 2 centimetrov, kot velja za ostale reperi. To je še en kazalec, da nekoliko večji DOP-faktor (okoli 3) ni nujno razlog za manj homogene meritve med serijami.

Preglednica 3: Statistični kazalci odstopanj posameznih meritev od povprečja na vseh reperjih

	Δe [m]	Δn [m]	Δh [m]
Min.	-0,022	-0,029	-0,129
Maks.	0,026	0,020	0,073
Povprečje	0,010	0,005	0,004

Pričakovano so razlike horizontalnih koordinat točk manjše kot meritve elipsoidnih višin z RTK GNSS -metodo. Iz diagrama 3 in preglednice 3 vidimo, da minimalna razlika merjene elipsoidne višine od povprečja znaša -0,129 metra in maksimalna 0,073 metra na reperju 12/41.

4.2 Ocena natančnosti razlik kvazigeoidnih višin in statistična analiza

V tem podpoglavju predstavljamo statistično analizo, ali so razlike med merjenimi kvazigeoidnimi višinami in kvazigeoidnimi višinami, ki so določene iz višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper, statistično značilne ali ne. Oceno statistične značilnosti razlik kvazigeoidnih višin naredimo v naslednjih korakih:

a) Določitev testne statistike za oceno statistične značilnosti razlik kvazigeoidnih višin

Oceno, ali je razlika kvazigeoidnih višin statistično značilna ali ne, naredimo na podlagi testne statistike (Savšek, 2017):

$$T^i = \frac{\Delta \zeta_{izm-int}^i}{\sigma_{\Delta_{izm-int}}} \quad (7)$$

V enačbi 7 sta:

$$\Delta \zeta_{izm-int}^i = \zeta_{izm}^i - \zeta_{int}^i, \quad (8)$$

kjer sta ζ_{izm}^i – merjena kvazigeoidna višina in ζ_{int}^i – interpolirana kvazigeoidna višina. Natančnost razlike kvazigeoidnih višin je:

$$\sigma_{\Delta \zeta_{izm-int}} = \sqrt{\sigma_{\zeta_{izm}}^2 + \sigma_{\zeta_{int}}^2}. \quad (9)$$

Iz enačbe 9 vidimo, da lahko natančnost razlik kvazigeoidnih višin izračunamo, če poznamo natančnost izmerjene in interpolirane kvazigeoidne višine.

b) Ocena natančnosti izmerjene kvazigeoidne višine

Natančnost izmerjene kvazigeoidne višine, izračunamo po enačbi:

$$\sigma_{\zeta_{izm}} = \sqrt{\sigma_{b_{RTK\ GNSS}}^2 + \sigma_H^2 + \sigma_{\Delta H}^2} \quad (10)$$

kjer so:

$\sigma_{b_{RTK\ GNSS}}$ – natančnost določitve elipsoidnih višin z RTK GNSS metodo,

σ_H – natančnost nadmorskih višin reperjev,

$\sigma_{\Delta H}$ – natančnost merjene višinske razlike med reperjem in pomožno točko.

Pri oceni natančnosti $\sigma_{\zeta_{izm}}$ nismo upoštevali natančnosti merjene višinske razlike med reperjem in pomožno točko z geometričnim nivelmanom ($\sigma_{\Delta H}$), saj znaša nekaj desetink milimetra in ne vpliva na končno oceno natančnosti merjene kvazigeoidne višine.

b1) Ocena natančnosti določitve elipsoidnih višin

Natančnost določitve elipsoidnih višin z RTK GNSS-metodo smo ocenili na podlagi deklarirane natančnosti instrumenta:

$$\sigma_{b_{RTK\,GNSS}} = 15 \text{ mm} + 0,5 \text{ mm} = 15 \text{ mm} \tag{11}$$

b2) Ocena natančnosti nadmorskih višin reperjev

Povprečna natančnost izravnanih nadmorskih višin vključenih reperjev 1. reda na območju Ljubljane znaša 4,14 milimetra in reperjev mestne nivelmanske mreže Ljubljana 1,43 milimetra (Brglez, 2020). Ocenjeno natančnost nadmorskih višin lahko izračunamo po enačbi:

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{H_{1,red}}^2 + \sigma_{H_{MN\,LJ}}^2} = 4,3 \text{ mm} \tag{12}$$

Ocenjena natančnost izmerjene kvazigeoidne višine po enačbi 10 tako znaša:

$$\sigma_{\zeta_{izm}} = 15,6 \text{ mm}$$

c) Ocena natančnosti interpoliranih kvazigeoidnih višin iz SLO_VRP2019/Koper

Geodetska uprava Republike Slovenije je izvedla kontrolo kakovosti določitve nadmorske višine na podlagi RTK GNSS-višinomerstva in z uporabo SLO_VRP2016/Koper na 1045 reperjih nivelmanske mreže 1. reda, ki so razporejeni po območju Slovenije. Standardni odklon določene nadmorske višine z RTK GNSS-višinomerstvom oziroma natančnost kvazigeoidnih višin $\sigma_{\zeta_{int}}$ znaša 22 milimetrov (GURS, 2020).

Natančnost razlike merjene in interpolirane kvazigeoidne višine, izračunane po enačbi 9, tako znaša:

$$\sigma_{\Delta\zeta_{izm-int}} = 27,6 \text{ mm}$$

d) Test hipotez

V splošnem lahko statistično značilnost razlik ocenjujemo po pravilu, da mora biti razlika večja od 3σ (Bezák et al., 2017; Šegina et al., 2020). V 1D-mrežah pri stopnji značilnosti lahko s stopnjo zaupanja 95 % potrdimo, da razlika merjene in interpolirane kvazigeoidne višine ni statistično značilna pri izbranem pogoju (Savšek, 2017):

$$\Delta\zeta_{izm-int}^i < 1,96 \cdot \sigma_{\Delta\zeta_{izm-int}} = 52,9 \text{ mm} \tag{12}$$

Ali so razlike kvazigeoidnih višin statistično značilne ali ne, smo preverjali z izbranim pogojem (enačba 12). Pri tem pogoju smo postavili ničelno H_0 domnevo in alternativno H_1 domnevo (Savšek, 2013):

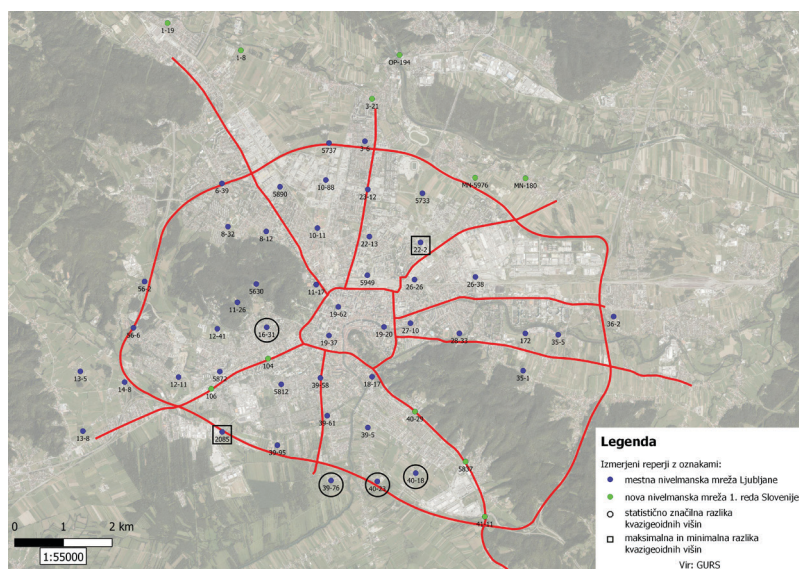
$$H_0: \Delta\zeta_{izm-int}^i < 1,96 \cdot \sigma_{\Delta\zeta_{izm}}$$

$$H_1: \Delta\zeta_{izm-int}^i > 1,96 \cdot \sigma_{\Delta\zeta_{izm}}$$

Če je pogoj ničelne domneve H_0 izpolnjen, domneve ne moremo zavriniti s tveganjem 5 %. Če pa pogoj ničelne domneve H_0 ni izpolnjen, lahko ničelno domnevo zavrujemo in sprejmemo alternativno domnevo H_1 s tveganjem 5 %.

4.3 Rezultati primerjave izmerjenih in interpoliranih kvazigeoidnih višin

V analizo kakovosti določitve nadmorskih višin z RTK GNSS-višinomerstvom smo vključili 57 reperjev (slika 4). V novo nivelmansko mrežo 1. reda Slovenije je bilo vključenih 11 (19,3 %) reperjev, na sliki 4 označenih z zeleno, in 46 (80,7 %) reperjev mestne nivelmanske mreže Ljubljane, ki so na sliki 4 označeni z modro.



Slika 4: Reperji nove nivelmanske mreže 1. reda in mestne nivelmanske mreže, vključeni v analizo kakovosti določitve nadmorskih višin z RTK GNSS-višinomerstvom.

V preglednici 4 prikazujemo izmerjene kvazigeoidne višine, interpolirane kvazigeoidne višine iz višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper ter razliko med njimi za štiri (7 %) reperje mestne nivelmanske mreže, ki je statistično značilna (na sliki 4 označeni s krogcem), saj presegajo kritično vrednost 52,9 milimetra, izračunano po enačbi 12. Ničelne hipoteze pri teh reperjih ne moremo sprejeti in s tveganjem 5 % sprejmemo alternativno hipotezo. S 5-odstotnim tveganjem lahko trdimo, da razlike med izračunanimi in interpoliranimi kvazigeoidnimi višinami ne spadajo v isto populacijo. Na ostalih 53 (93 %) reperjih razlike niso statistično značilne in znašajo od $-0,039$ metra na reperju 2085 do $0,039$ metra na reperju 22/2 (na sliki 4 označena s kvadratom).

V preglednici 5 so zbrani podatki o hitrostih posedanja navedenih reperjev ali reperjev v okolici (Drofenik, 2011). Če upoštevamo hitrost posedanja reperjev, vidimo (preglednica 4), da razlike kvazigeoidnih višin na reperjih 40/23, 16/31 in 40/18 niso statistično značilne. Na reperju 39/76, ki je bil zajet le v eno terminsko izmero in pri katerem smo upoštevali hitrost posedanja sosednjih reperjev, se razlika kvazigeoidnih višin sicer zmanjša, vendar je še vedno statistično značilna. Iz diagrama 3 za navedeni reper

lahko vidimo, da so odstopanja posamezne merjene elipsoidne višine od srednje vrednosti elipsoidne višine majhna, kar pomeni, da je elipsoidna višina določena dobro.

Preglednica 4: Primerjava izmerjenih kvazigeoidnih višin z interpoliranimi kvazigeoidnimi višinami iz višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper.

Reper	Red nivelmanske mreže	ζ_{izm} [m]	ζ_{int} [m]	Razlika [m]	Statistično značilna razlika
39/76	MN LJ	46,087	46,453	-0,366	DA
39/76 ¹	MN LJ	46,306	46,453	-0,147	DA
40/23	MN LJ	46,355	46,446	-0,091	DA
40/23 ¹	MN LJ	46,441	46,446	-0,019	NE
16/31	MN LJ	46,419	46,489	-0,070	DA
16/31 ¹	MN LJ	46,438	46,489	-0,051	NE
40/18	MN LJ	46,386	46,446	-0,061	DA
40/18 ¹	MN LJ	46,451	46,446	0,005	NE

¹ Upoštevana hitrost posedanja reperja iz preglednice 5.

Preglednica 5: Hitrosti posedanj reperjev s statistično značilno razliko kvazigeoidnih višin.

Reper	Povprečna hitrost posedanja [mm/leto]	Terminske izmere
16/31	- 0,4 ²	1963, 1972
39/76	- 8,1 ³	1963, 1993, 2000
40/18	- 7,3	1963, 1972, 1993, 2011
40/23	- 4,6	1993, 1996

² Hitrost posedanja je izračunana za sosednja reperja 16/5 in 5822, saj je bil reper 16/31 izmerjen samo leta 1963.

³ Hitrost posedanja je izračunana za sosednja reperja 39/74 in 39/103, saj je bil reper 39/76 izmerjen samo leta 1963.

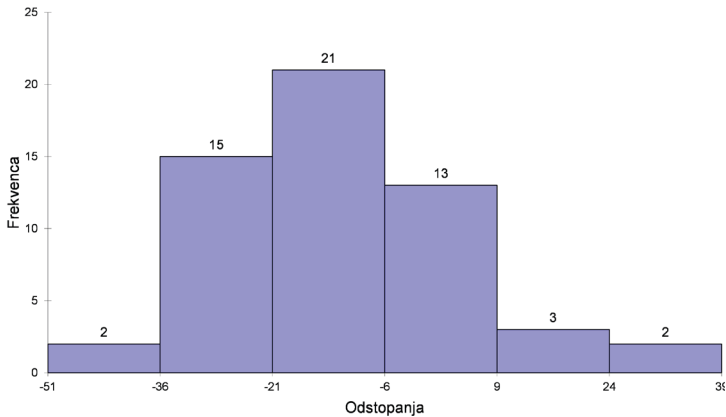
V preglednici 6 so prikazani osnovni statistični kazalci razlik kvazigeoidnih višin za vse reperje, nato brez reperja 39/76, za katerega lahko na podlagi rezultatov ocenimo, da razlika ni posledica slabo določene elipsoidne višine ali nadmorske višine, saj je stabiliziran v objektu na Ljubljanskem barju, ki je nestabilno. V naslednjih stolpcih so prikazani rezultati z upoštevanjem posedanj reperjev s statistično razliko kvazigeoidnih višin in rezultati glede na red nivelmanske mreže.

Preglednica 6: Osnovni statistični kazalci razlik kvazigeoidnih višin.

Statistični kazalci	Vsi reperji [m]	Brez statistično značilnih razlik [m]	Upoštevana hitrost posedanj reperjev ⁴ [m]	Reperji nove nivelmanske mreže 1. reda [m]	Reperji mestne nivelmanske mreže ⁴ [m]
St. odk.	0,051	0,016	0,017	0,007	0,017
Povprečje	-0,021	-0,012	-0,013	-0,024	-0,010
Min.	-0,366	-0,039	-0,051	-0,034	-0,051
Maks.	0,039	0,039	0,039	-0,013	0,039
Razpon	0,405	0,078	0,090	0,047	0,090
Reperji	57	53	56	11	45

⁴ Za reperje iz preglednice 5, na katerih je bila razlika kvazigeoidnih višin statistično značilna (preglednica 4). Izpuščen je reper 39/76, saj je razlika kvazigeoidnih višin kljub upoštevanju hitrosti posedanja na sosednjih reperjih (preglednica 5) še vedno statistično značilna.

Statistični kazalci, zbrani v preglednici 6, so pričakovani, saj dobimo najslabše rezultate (povprečje, razpon, minimalna razlika), če upoštevamo razlike kvazigeoidnih višin na vseh reperjih, in najboljše, če upoštevamo samo kvazigeoidne razlike na reperjih, ki niso statistično značilne. V povprečju je na območju Ljubljane razlika kvazigeoidnih višin od $-0,024$ metra, če upoštevamo razlike kvazigeoidnih višin na reperjih nove nivelmanske mreže 1. reda, do $-0,012$ metra, če izpustimo razlike kvazigeoidnih višin na reperjih, ki so statistično značilne (preglednica 4). Standardni odklon je pričakovano najmanjši, če upoštevamo samo reperje nove nivelmanske mreže 1. reda ($0,007$ metra), saj so bile nadmorske višine določene na podlagi izmer nivelmanskih poligonov v letih od 2006 do 2011. Največji standardni odklon dobimo, če upoštevamo razlike kvazigeoidnih višin na vseh reperjih ($0,051$ metra), saj je vpliv kakovosti nadmorske višine reperjev na izračun merjene kvazigeoidne višine za reperje, ki so stabilizirani v objekte na nestabilnem območju, izredno velik (preglednica 5). Standardna odklona, izračunana brez statistično značilnih razlik ($0,016$ metra) in z upoštevanjem hitrosti posedanja reperjev ($0,017$ metra) in na reperjih mestne nivelmanske mreže ($0,017$ metra), ki so bili zajeti v različne izmere nivelmanskih mrež na območju Ljubljane v letih od 1963 do 2011, so primerljive. Ocene natančnosti določitve kvazigeoidnih višin na območju Ljubljane so nekoliko boljše od ocenjene natančnosti, ki je bila določena za SLO_VRP2016/Koper ($0,022$ m, GURS, 2020).



Histogram 1: Porazdelitve razlik kvazigeoidnih višin.

Na histogramu 1 je prikazana porazdelitev razlik kvazigeoidnih višin na 56 reperjih, ki niso statistično značilne. Razlike so razdeljene v šest razredov: od -51 do 39 milimetrov, širine 15 milimetrov. Povprečna vrednost zanaša $0,013$ metra, standardni odklon $0,017$ metra (preglednica 6) in mediana $0,015$ metra. Na reperjih $16/31$, $40/18$ in $40/23$ je bila upoštevana hitrost posedanja reperjev (preglednici 4 in 5). Reper $39/76$ zaradi prevelikega posedanja ni vključen v analizo. Porazdelitev razlik kvazigeoidnih višin sledijo normalni porazdelitvi.

Preglednica 7: Razporeditev reperjev v razrede.

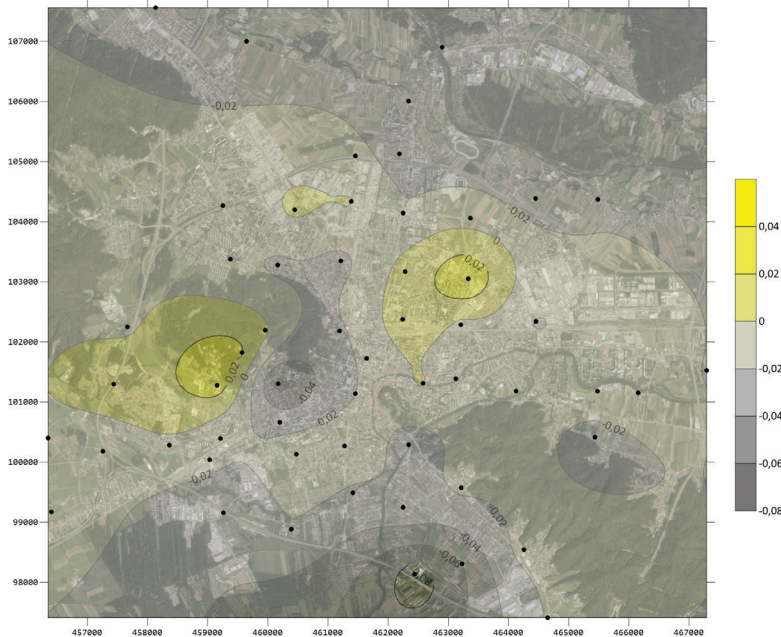
Razred	Število reperjev	Delež
-51 do -36	2	3,6 %
-36 do -21	15	26,8 %
-21 do -6	21	37,5 %
-6 do 9	13	23,2 %
9 do 24	3	5,4 %
24 do 39	2	3,6 %

Iz preglednice 7 vidimo, da je na 49 (87,5 %) reperjih razlika kvazigeoidnih višin v območju od -36 do 9 milimetrov. Dva (3,6 %) reperja sta v območju od -51 do -36 milimetrov in 5 (9,0 %) reperjev v območju od 24 do 39 milimetrov.

4.4 Grafična predstavitev kakovosti določitve nadmorskih višin z RTK GNSS-višinomerstvom na območju Ljubljane

Za lažjo predstavo razlik kvazigeoidnih višin grafično prikazujemo še izolinije razlik med izmerjeno in interpolirano kvazigeoidno višino v metrih, brez upoštevanja kvazigeoidne razlike na reperju 39/76 (slika 5).

Na podlagi naših rezultatov in s slike 5 lahko vidimo, da se na območju mesta Ljubljane izmerjene kvazigeoidne višine dobro ujemajo z interpoliranimi kvazigeoidnimi višinami iz nove višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper. Razlike so pričakovano največje na območju Ljubljanskega barja in so posledica posedanja reperjev. Manjše razlike se pojavijo še na območju Rožnika, ki je najverjetneje posledica večje kvazigeoidne razlike, določene na reperju 16/31. V preostalem delu Ljubljane se razlike gibljejo od 2 do 4 centimetrov.



Slika 5: Izolinije razlik med izmerjeno in interpolirano kvazigeoidno višino v [m].

5 ZAKLJUČEK

V prispevku smo analizirali kakovost določitve nadmorskih višin točk z RTK GNSS-višinomerstvom in uporabo nove višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper na območju Ljubljane. Obravnavano območje smo razdelili na celično mrežo velikosti približno 1 x 1 kilometer in na vozliščih izbrali 57 reperjev, na katerih smo določili merjene kvazigeoidne višine na podlagi elipsoidnih višin, izmerjenih z RTK GNSS-višinomerstvom, in nadmorskih višin reperjev v novem državnem višinskem sistemu SVS2010.

Elipsoidne višine so rezultat povprečja treh serij meritev z RTK GNSS-višinomerstvom. Primerjali smo jih z interpoliranimi vrednostmi kvazigeoidnih višin iz nove višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper.

Analiza rezultatov razlik kvazigeoidnih višin je pokazala, da so na obravnavanem območju Ljubljane povprečne razlike kvazigeoidnih višin $-2,1$ centimetra, če upoštevamo razlike na vseh reperjih, oziroma $-1,3$ centimetra, če izpustimo razliko na reperju 39/76, ki je stabiliziran na območju Ljubljanskega barja, in upoštevamo hitrost posedanj na treh reperjih, kjer je bila razlika kvazigeoidnih višin statistično značilna. Pričakovano dobimo najboljši rezultat $-1,2$ centimetra, če upoštevamo razlike kvazigeoidnih višin samo na reperjih, kjer razlike niso statistično značilne. Statistični kazalci jasno kažejo, da na reperjih, ki so stabilizirani v nestabilne objekte, na kakovost določitve merjene kvazigeoidne višine vpliva njihovo posedanje. Maksimalna vrednost razlike kvazigeoidnih višin je $3,9$ centimetra na reperju 22/2, minimalna vrednost pa $-36,6$ centimetra na reperju 39/76 oziroma $-14,7$ centimetra, če upoštevamo posedanja sosednjih reperjev. Če iz analize izpustimo reper 39/76, kjer je kljub upoštevanju hitrosti posedanja na sosednjih reperjih razlika kvazigeoidnih višin še vedno statistično značilna, dobimo minimalno razliko $-5,1$ centimetra na reperju 16/31. Če analiziramo kakovost določitve nadmorskih višin z RTK GNSS-višinomerstvom iz razlik, merjenih in interpoliranih kvazigeoidnih razlik iz višinske referenčne ploskve, je smiselno, da statistično značilne razlike iz analize izpustimo, če razlika ni posledica slabo določene elipsoidne ali nadmorske višine, saj je v tem primeru razlika najverjetneje posledica nestabilnosti repera. Če poznamo tudi hitrost vertikalnega posedanja repera ali reperjev v bližini, je seveda to smiselno upoštevati pri določitvi merjene kvazigeoidne višine.

Glede na opravljeno statistično analizo lahko ocenimo, da nova višinska referenčna ploskev SLO_VRP2016/Koper na območju Ljubljane omogoča kakovostno in zanesljivo določitev nadmorskih višin z GNSS-višinomerstvom. Na podlagi rezultatov raziskave bodo vsakdanji uporabniki GNSS-višinomerstva, ki zelo pogosto uporabljajo RTK-metodo izmere, pridobili okvirno oceno kakovosti določitve nadmorskih višin z GNSS-višinomerstvom in višinske referenčne ploskve SLO_VRP2016/Koper na območju Ljubljane. Opisan postopek kontrole kakovosti določitve nadmorskih višin z GNSS-višinomerstvom je lahko tudi v pomoč vsem izvajalcem geodetskih storitev, ki bi na nekem območju želeli preveriti kakovost določitve nadmorskih višin z GNSS-metodo izmere.

Viri in literatura:

- Bezák, N., Grigillo, D., Urbančič, T., Mikoš, M., Petrovič, D., Rusjan, S. (2017). Geomorphic response detection and quantification in a steep forested torrent. *Geomorphology*, 291, 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.034>
- Brglez, R. (2020). Višinska referenčna ploskev (SLO_VRP2016/KOPER) na območju Ljubljane. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B., Brglez): 61 str.
- Dragčević, D., Pavasović, M., Bašič, T. (2016). Accuracy validation of official Croatian geoid solutions over the area of City of Zagreb, *Geofizika*, 33 (2), 183–206. DOI: <https://doi.org/10.15233/gfz.2016.33.9>
- Drofenik, G. (2011). Določitev vertikalnih premikov reperjev na območju Ljubljanskega barja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G., Drofenik): 39 str.
- e-Prostor (2019). Državni ortofoto. <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/topografski-in-kartografski-podatki/ortofoto>, pridobljeno 10. 7. 2019.
- GURS (2020). Tehnično navodilo za uporabo novega državnega višinskega sistema (Različica 1.0, datum 20. 2. 2020). Geodetska uprava Republike Slovenije.
- Leica Geosystems AG. (2017). Leica GS18. User Manual. Leica Geosystems AG. Switzerland, Heerbrugg. Published in Switzerland: 54. str
- Kiamehr, R., Sjöberg, L. E. (2005). Comparison of the qualities of recent global and local gravimetric geoid models in Iran. *Studia Geophysica et Geodetica*, 49, 289–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11200-005-0011-7>
- Koler, B., Stopar, B., Sterle, O., Urbančič, T., Medved, K. (2019). Nov slovenski višinski sistem SVS2010, *Geodetski vestnik*, 63 (1), 27–40. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2019.01.27-40>
- Kotsakis, C., Sideris, M. G. (1999). On the adjustment of combined GPS/levelling/

- geoid networks, *Journal of Geodesy*, 73, 412–421. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001900050261>
- 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2011.02.226-234>
- Kwang, B. K., Hong, S. Y., Ha, J. C. (2020). Accuracy Evaluation of Geoid Heights in the National Control Points of South Korea Using High-Degree Geopotential Model. *Applied sciences*, 10 (4), 2–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041466>
- Medved, K., Kozmus Trajkovski, K., Berk, S., Stopar, B., Koler, B. (2020). Uvedba novega slovenskega višinskega sistema (SVS2010). *Geodetski vestnik*, 64 (1), 33–42. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.33-42>
- Omrežje SIGNAL – Slovenija-Geodezija-Navigacija-Lokacija. <https://gu-signal.si/>, pridobljeno 10. 11. 2020.
- QGIS (2021). QGIS – A Free and Open Source Geographic Information System. <https://www.qgis.org/en/site/>, pridobljeno 15. 3. 2021.
- PREG (2019). <http://prostor3.gov.si/preg>, pridobljeno 10. 7. 2019.
- Savšek, S. (2013). Pomen testiranja hipotez v deformacijski analizi. *Geodetski vestnik*, 57 (3), 465–478. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.03.465-478>
- Savšek, S. (2017). Alternativna metoda testiranja premikov v geodetski mreži. *Geodetski vestnik*, 61 (3), 387–411. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2017.03.387-411>
- Sterle, O., Koler, B. (2019). Določitev novega višinskega datuma Slovenije. *Geodetski vestnik*, 63 (1), 13–26. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2019.01.13-26>
- Šegina, E., Peternel, T., Urbančič, T., Realini, E., Zupan, M., Jež, J., Caldera, S., Gatti, A., Tagliaferro, G., Consoli, A., González, J. R., Auflič, M. J. (2021). Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System. *Remote Sensing*, 12, 3375. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12203375>
- Uredba (2018). Uredba o določitvi parametrov višinskega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema. Uradni list Republike Slovenije, št. 80/2018.
- ZDGRS (2014). Zakon o državnem geodetskem referenčnem sistemu. Uradni list Republike Slovenije, št. 25/2014.



Kuhar M., Brglez R., Koler B. (2021). Kakovost določitve nadmorskih višin z GNSS-višinomerstvom na območju Ljubljane. *Geodetski vestnik*, 65 (2), 219–233. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.219-233>

doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: miran.kuhar@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: bozo.koler@fgg.uni-lj.si

Robert Brglez, mag. inž. geod. geoinf.
Šerčeveja cesta 20, 3320 Velenje
e-naslov: brglez.robert@gmail.com

NAPOVEDOVANJE DREVESNIH VRST IZ GEOMETRIJE IN INTENZITETE OBLAKA AEROLASERSKIH TOČK VRHOV DREVESNIH KROŠENJ

PREDICTING TREE SPECIES BASED ON THE GEOMETRY AND INTENSITY OF AERIAL LASER SCANNING POINT CLOUD OF TREETOPS

Nina Kranjec, Mihaela Triglav Čekada, Milan Kobal

UDK: 528.715:633/635.055

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 20. 4. 2021

Sprejeto: 27. 5. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.234-259

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 20. 4. 2021

Accepted: 27. 5. 2021

S|I|E|N

IZVLEČEK

Na osnovi laserskih oblakov točk 240 posameznih dreves, ki smo jih identificirali tudi na terenu, smo razvili odločitvena drevesa za ločevanje listavcev in iglavcev ter posameznih drevesnih vrst (rdeči bor, navadna bukev, gorski javor, veliki jesen, evropski macesen, navadna smreka). Kot pojasnjevalne spremenljivke smo uporabili volumen zgornjega dela drevesne krošnje (višine 3 m) in povprečno intenziteto laserskih odbojev. Uporabili smo štiri nize aerolaserskih podatkov: iz maja 2012, septembra 2012, marca 2013 in julija 2015. Ugotovili smo, da najzanesljivejše rezultate za napovedovanje izbranih drevesnih vrst daje kombinacija volumna in povprečne intenzitete prvih treh laserskih nizov (uspešnost modela 60 %). Nekoliko nižjo uspešnost modela dobimo, če uporabimo samo povprečno intenziteto prvih treh nizov (54 %). Najslabšo uspešnost modela daje intenziteta niza 4, ki predstavlja lasersko skeniranje Slovenije (LSS) (31 %) oziroma volumen (21 %). Uspešnejše je razločevanje listavcev in iglavcev, ki na testnih podatkih dosegajo uspešnost 75 % oziroma 95 % (kombinacija volumna in povprečne intenzitete združenih prvih treh laserskih nizov). Če uporabimo samo intenzitete LSS, listavce in iglavce lahko ločimo z uspešnostjo 81 %.

KLJUČNE BESEDE

lidar, intenziteta, geometrija drevesa, drevesne vrste, strojno učenje, odločitveno drevo

ABSTRACT

Based on the laser point clouds of 240 individual trees that were also identified in the field, we developed decision trees to distinguish deciduous and coniferous trees and individual tree species: *Picea abies*, *Larix decidua*, *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Acer pseudoplatanus*, *Fraxinus excelsior*. The volume of the upper part of the tree crown (height of 3 m) and the average intensity of the laser reflections were used as explanatory variables. There were four aerial laser datasets: May 2012, September 2012, March 2013 and July 2015. We found that the combination of the volume and the average intensity of the first three laser datasets was the most reliable for predicting the selected tree species (60% model performance). A slightly poorer model performance was obtained if only the average intensity of the first three datasets was used (54% model performance). The worst model performance was given by the intensities (31% model performance) or the volumes (21% model performance) of dataset 4, which represents the national laser scanning of Slovenia (LSS). The best performing was the deciduous and coniferous separation, which achieved 75% and 95% success based on the test data (combination of volume and average intensity of the first three laser datasets). Using only the LSS intensities, deciduous and coniferous trees could be separated with 81% success.

KEY WORDS

lidar, intensity, the geometry of tree, tree species, machine learning, decision tree

1 INTRODUCTION

Aerial laser scanning allows detailed studies of the forest at the landscape level, as well as at the level of forest stands and individual trees. This is because the laser beam is reflected from the top of the tree, branches, trunk and finally from the ground. These data can be used to study not only the horizontal but also the vertical structure of the forest. This allows an estimation of the proportion of coniferous and deciduous trees in mixed forests, the tree density, the health status and the damage to the trees (Kobal et al., 2014; Mongus et al., 2018; Benčina and Kobal, 2019; Karna et al., 2020). The first national laser scanning of Slovenia, which was performed in 2014–2015, is therefore also a very useful source of data for a detailed study of Slovenian forests (Šturm et al., 2016).

Laser scanning data can be studied in vector format, i.e., as the point cloud, and in derivative raster format, where we analyse the relationships between the different raster digital elevation models (relief, surface, canopy) or other raster thematic derivatives (e.g., voxels), where we display the values of selected attributes from the laser point cloud (e.g., intensity).

Individual trees can be distinguished in the laser point cloud by using methods that examine the local geometry in the point cloud, by delineating trees based on treetop identification, detecting edges between tree crowns, finding shadows, and region growing (Kobal et al., 2014; Mongus and Žalik, 2015; Eysn et al., 2016; Burt et al., 2018; Kansanen et al., 2019). A more challenging and not yet fully explored area is the identification of individual tree species based on independent laser data. Procedures for tree-species classification based only on laser data can be divided into (Shi et al., 2018):

- methods that examine the geometric characteristics of a particular tree species (e.g., crown shape and density, leaf and branch distribution, canopy openness);
- methods that study the radiometric properties of laser reflections (e.g., intensity value of a single reflection).

The intensity of an individual laser-beam reflection depends on the shape of the leaves or needles, the orientation and size of the leaves or needles, the density of the leaves or needles in the tree crown and the distribution of tree branches in the canopy (Holmgren and Person, 2004; Korpela et al., 2010; 2013). It also depends on the type of laser scanner and the parameters of the flight mission used (Triglav Čekada, 2011).

In Slovenia, Triglav Čekada et al. (2017) studied the differences between the average intensities of different tree species as seen in multi-temporal laser data taken using two wavelengths (1064 nm and 1550 nm). They found that the average intensities of the deciduous trees at both wavelengths are higher than those for conifers during the leaf-on period, while the opposite is true during the leaf-off period. When they studied the differences between the intensities classified as the first or the only reflections and the average intensities of all reflections, they found that the latter are lower during the leaf-on period, while they are higher than the intensities of the first or the only reflections during the leaf-off period. Ørka et al. (2009) and Suranto et al. (2009) found that the proportion of different orders of laser returns (first, middle, last return) depends on the tree species, due to the different canopy structure of the individual tree species, i.e., the density of the needles or foliage and their distribution and the distribution of the branches.

In this investigation, we added a study of the geometry of the uppermost 3 m of the individual tree-crown point cloud to a study of the average intensities of different tree species in a different part of the

year in which the laser scanning was performed. We chose the top of the tree crown because this part of the tree is mostly not intermingled with neighbouring trees, and as Korpela et al. (2013) already noted, the differences in the distribution of tree branches with regard to the tree species can most easily be determined at the top of the trees. By analysing the average intensities of the individual trees' point clouds and analysing selected geometric parameters at different times of the year, we developed several predictive models based on machine learning – the decision-tree method was used. Based on multi-temporal laser datasets, the decision trees were developed to distinguish between the conifers and deciduous trees and to identify each studied tree species. In addition, we tested the performance of the decision-tree method on only one laser dataset, i.e., the national aerial laser scanning of Slovenia (LSS), as this would allow us to transfer this method from the test environment to a countrywide area.

2 DATA AND METHODOLOGY

2.1 Data

The test area is located near Podljubel, Slovenia, at an altitude of 700–800 m and is covered by mixed forests. The six tree species, which are the most frequent tree species in this test area, were considered in our study: Norway spruce (*Picea abies*), European larch (*Larix decidua*), Scots pine (*Pinus sylvestris*), European beech (*Fagus sylvatica*), sycamore (*Acer pseudoplatanus*) and ash (*Fraxinus excelsior*). For each tree species, we identified 40 trees in the field, being as similar as possible to each other in terms of canopy shape and size (Figure 1).

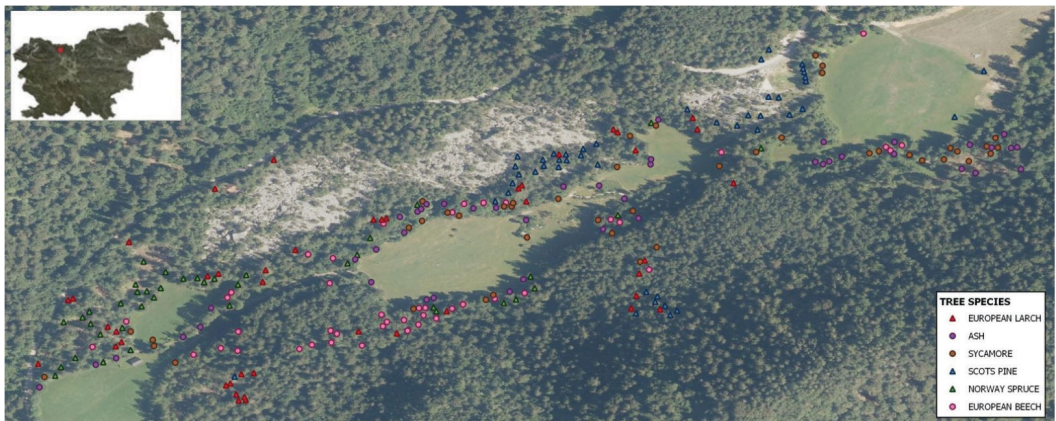


Figure 1: Locations of the selected trees (the source of the overview map of Slovenia: Geopedia; source of the base map: orthophoto taken at the same time as the laser scanning dataset 1).

We used the data from four datasets of aerial laser scanning (Table 1), taken in different years and at different times of the year. The first two datasets were scanned with the same Riegl LMS-Q560 scanner; the second two with the same type of scanner, i.e., the Riegl LMS-Q780. The first two datasets were scanned with a wavelength of 1550 nm; the second two, with 1064 nm. Three datasets were scanned during the leaf-on season and one dataset during the leaf-off season. These datasets also differ in terms of the average laser point density and the height of the flight above the ground. The data used in the analysis were in discrete pulse format, even though the full waveform laser scanner recorded the original

data. In parallel with the first two laser datasets, an aerial photogrammetric survey was performed from the same platform and orthophotos were produced as well.

Table 1: Aerial laser scanning dataset characteristics.

	Dataset 1	Dataset 2	Dataset 3	Dataset 4 (LSS)
Date	15 May 2012	18 September 2012	5 March 2013	17 July 2014
Point density [point/m²]	8	8	15	5
Wavelength [nm]	1550	1550	1064	1064
Height of flight [m]	700	700	1000	1200–1400
Leaf-on	Yes	Yes	No	Yes
Orthophoto	Yes	Yes	No	No

2.2 Preparation of aerial laser datasets

Before the field measurements of the individual trees were performed, we analysed an orthophoto taken at the same time as the laser dataset 1 in *ArcMap* (<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>). Together with the orthophoto, we displayed the points of local maxima from the digital canopy model (DCM) created from the laser dataset 1. The DCM is the difference between the digital surface model (DSM) and the digital terrain model (DTM). In it the local maxima represent the treetops of the dominant trees. The combined orthophoto with the local maxima was exported as a georeferenced TIFF and imported into the *Avenza Maps* mobile application (<https://www.avenza.com/avenza-maps/>), which allows location and navigation on maps prepared in advance on a smartphone. In the field, we identified the location and tree species of each selected tree and added in the application a photograph of the trunk and the top of the tree crown. We selected trees that differed in terms of the maximum height from other trees in the forest by at least 3 m or the tree canopy at the upper 3 m did not intermingle with the tree crowns of other trees.

The field-measured tree locations were related in *ArcMap* to local maximum points, determined from the DCM. The trees were divided by tree species (Figure 1). For each tree, we defined a polygon in the shape of a circle centred on the local maximum point of the tree and with a radius of 5 m. These polygons were used to crop all the laser datasets into smaller point clouds representing each tree, i.e., individual tree-crown point clouds. The cropping was performed using the *Extract LAS* tool in *ArcMap*. To obtain only the data of a single tree, without intermingled tree canopies from other trees, we used only the upper 3 m of the tree crown. The tree crowns themselves were determined in *CloudCompare* (<https://www.danielgm.net/cc/>), and the tree crowns were cropped to only the top 3 m in *RStudio* (<https://rstudio.com/>), where all further analyses were performed as well.

2.3 Determining the single tree-crown mean intensity and geometry

For an individual tree crown's point cloud, we calculated the average value of its intensity for each dataset separately. Here, we will compare only the relative ratios between the different trees in every dataset separately, as without an intensity normalisation the data scanned at different wavelengths cannot be directly compared.

For an individual treetop's point cloud we also calculated the following geometric features: the width of the narrowest and the width of the widest cross-sections of the crown top, the area of the narrowest and widest cross-sections, the floor area and the volume of the crown top. The widths of the narrowest and

widest sections of the canopy top were determined by drawing an ellipse around all the points in the tree-crown point cloud in the plan view. In the floor plan view the shortest and longest semi-axes of the ellipses define the narrowest and the widest sections (Figure 2). The areas of the narrowest and widest cross-sections of the crown tops were determined by calculating the area of the figure represented by the convex hull of laser points mapped onto the vertical plane through the previously determined narrower and wider axes of the ellipse, respectively (Figure 3). The floor area of the tree-crown point cloud was determined by calculating the area of the figure representing the projection of the convex hull around all the points in the treetop-canopy point cloud onto the horizontal plane. The volume of the treetop crown was calculated as the volume of the solid formed by the convex hull around all the points that form the treetop point cloud.

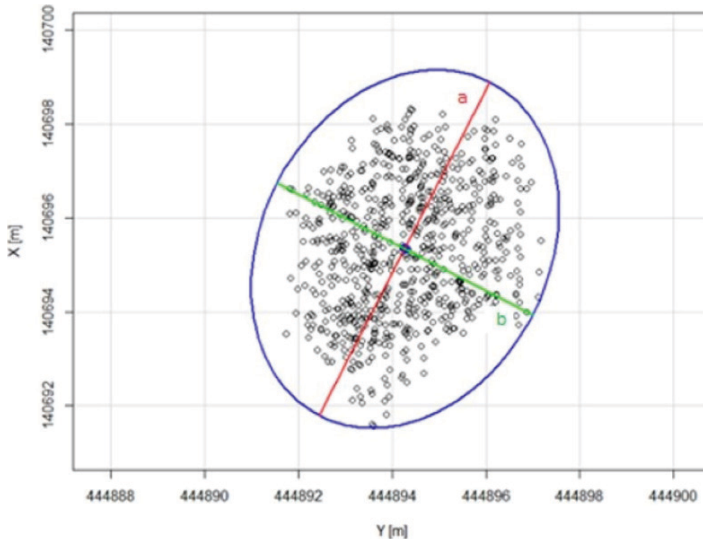


Figure 2: Outline of the ellipse around the tree-crown point cloud in the plan view and the narrowest and widest axes.

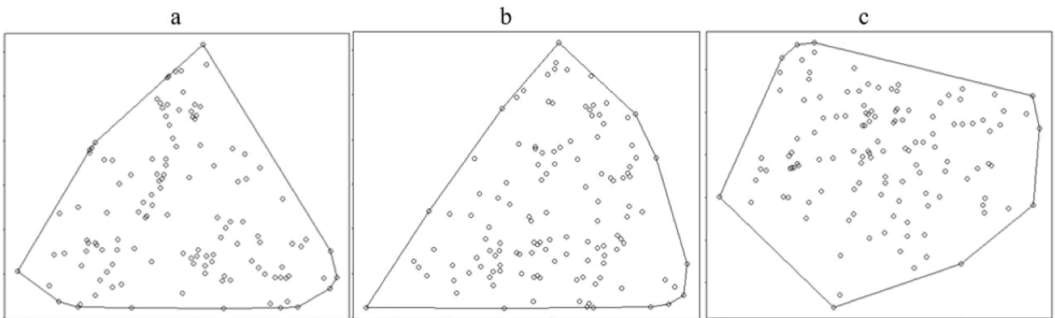


Figure 3: Plotting a convex hull for the Norway spruce tree-crown point cloud: a) narrow cross-section, b) wide cross-section, c) floor area.

For the successful discrimination between the values of the above-mentioned geometric parameters representing the individual trees or their treetop-crown point clouds, the original densities in the datasets with 5–15 points/m² were too low. Therefore, we increased the point-cloud density of each treetop point

cloud by merging datasets 1, 2 and 3. The first three datasets were recorded in a 10-month period with the same spatial accuracy. We assumed that the size and shape of the trees did not change significantly over this time. Due to the larger period between the recordings of the first three datasets and dataset 4 (LSS), we did not use the latter to produce the merged individual treetop-canopy point clouds.

2.4 Statistical analysis

For a statistical analysis of the differences in the average intensities and geometric parameters of the treetop point clouds we used a simple analysis of variance (ANOVA). In the case of statically significant ($p < 0.05$) differences, we used Tukey's honestly significant difference test to analyse which of the mean values differ statistically significantly. The statistical analyses were performed with *RStudio*.

2.5 Building decision trees

The mean-intensity values and the mean values of the geometric parameters of the treetops were combined into a single classification model for tree-species classification. The model was built using the decision-tree method, a versatile machine-learning algorithm. We used *RStudio* to build the decision tree, enabling the decision steps to be displayed graphically and the results weighted by the probability that each result truly belongs to a particular category.

The decision-tree thresholds were generated from a classification tree. The algorithm first divides the initial subset of the training set into subsets that are as class pure as possible based on the attributes of the data. The process is repeated until the subsets are clean or until a cleaner subset is obtained by repeated breaking. The threshold setting was based on recursive binary splitting. In this study we used the Gini Index as a criterion for the binary splitting, which shows how much of the training-set data belongs to a particular class. If the index value is small, most of the data are part of one class.

Eight different decision trees were constructed based on analyses of the mean values of the intensities and analyses of the mean values of the geometric parameters of the treetop point clouds (representing the uppermost 3 m of the tree crown). In the first four we built a recognition model for dividing between a conifer and deciduous tree, in the other four a recognition model for classifying selected tree species. The input data were divided into training and test data, which were independent of each other. The training data contained 80% of the randomly selected trees (192 trees) and the test data the remaining 20% of the trees (48 trees). The training data were used for the basic tuning of the model parameters.

Based on statistical analyses of the geometric and intensity values, we determined the input parameters for the decision trees. Different decision trees were constructed from the following input parameters:

- the tree-crown volumes,
- the intensity values of datasets 2, 3 and 4,
- the tree-crown volumes and intensities of datasets 2, 3 and 4,
- the intensities of dataset 4, the freely available national laser scanning of Slovenia.

For the geometry differentiation we chose volume, as this data captures the average values of all the other geometry parameters being considered.

The decision-tree model was evaluated on the basis of its performance, defined as the proportion of correctly classified trees in the training or test set of the control data.

3 RESULTS

3.1 Comparison of tree species by geometry

The tree-species crowns tended to differ statistically significantly ($p < 0.05$) when we compared the following parameters: narrow cross-section width, wide cross-section width, area of the narrow cross-section, area of the wide cross-section, floor area and volume (Figure 4). However, the following pairs of tree species do not differ statistically significantly ($p > 0.05$) when comparing the same parameters: European larch – Norway spruce, European larch – Scots pine and sycamore – European beech.

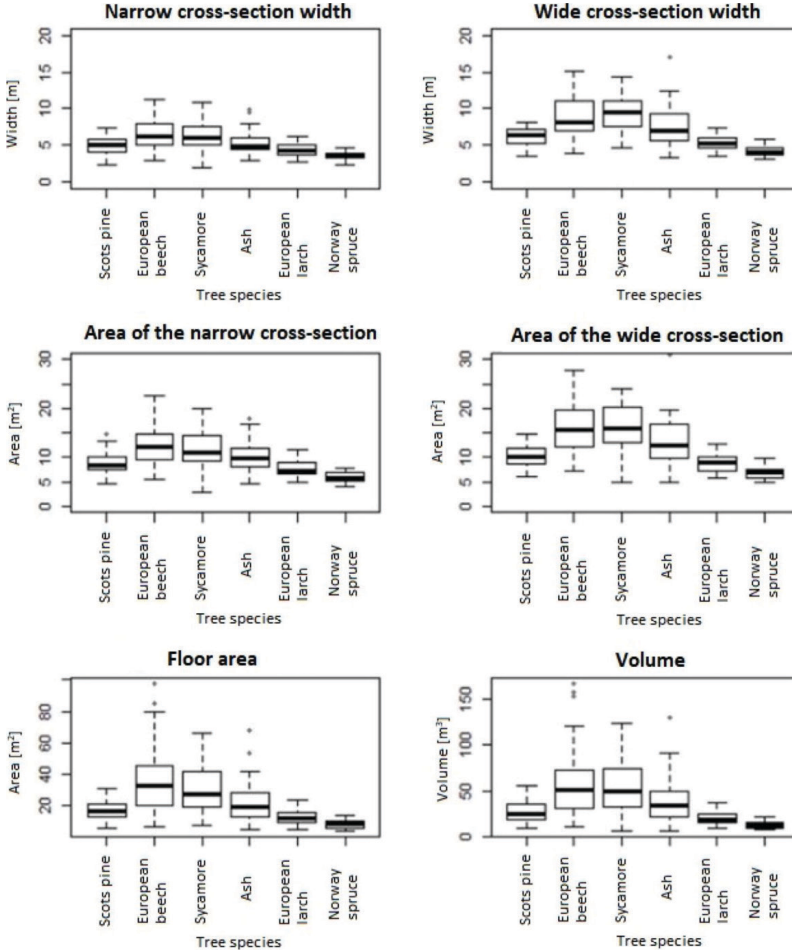


Figure 4: Comparison of tree-crown geometry by tree species.

3.2 Comparison of tree species using the intensity of laser points

The tree species' mean intensities differ statistically significantly ($p < 0.05$) when comparing the values between all the laser scanning datasets (Figure 5). The following tree-species-pair mean intensities were found to differ statistically significantly ($p < 0.05$): European beech – Scots pine, sycamore – Scots pine, European

larch – Scots pine and Norway spruce – Scots pine. On the other hand, the statistically insignificant differences ($p > 0.05$) between the mean intensities of the following species pairs were found: ash – sycamore.

Comparing all three datasets taken during the leaf-on season (datasets 1, 2, 4), we observed lower intensities for the coniferous tree species, while the opposite is true during the leaf-off season (dataset 3).

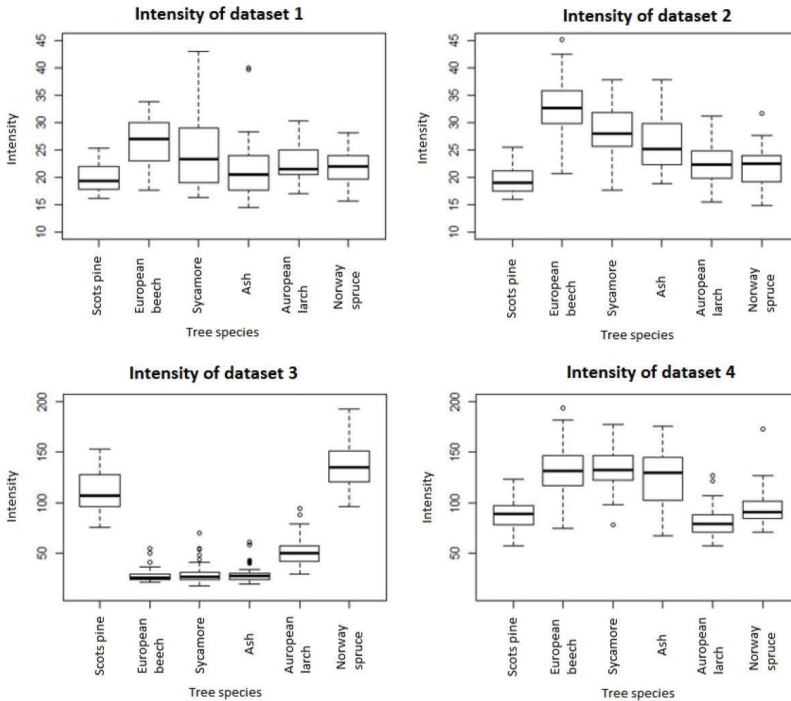


Figure 5: Comparison of tree-crown mean intensities presented by tree species and laser scanning dataset.

3.3 Decision trees for the prediction of coniferous and deciduous trees

Using a conifer/deciduous-prediction decision tree, where only the treetop crown's volume was considered, we successfully identified 79% of the trees of the training data (Table 2). In the test data we correctly identified 15 out of 21 conifers and 21 out of 27 deciduous trees. We misclassified 6 out of the 21 conifers, wrongly identified them as deciduous, and 6 of the 27 deciduous trees, which we misidentified as coniferous. Thus, we correctly classified 75% of the trees in the test data as conifers or deciduous.

Using a conifer/deciduous-prediction decision tree, where only the mean values of the intensities in datasets 2, 3 and 4 were considered, 93% of the trees in the training data were correctly identified being a coniferous or a deciduous tree. The success rate for the identification of coniferous and deciduous trees in the test data was 90%.

Using a prediction decision tree, where we used both the average values of tree crown volume and the average values of the intensities of datasets 2, 3 and 4 (Figure 6), we correctly identified 96% of the trees in the training data. The identification success rate of the conifers and deciduous trees in the test data was 95%.

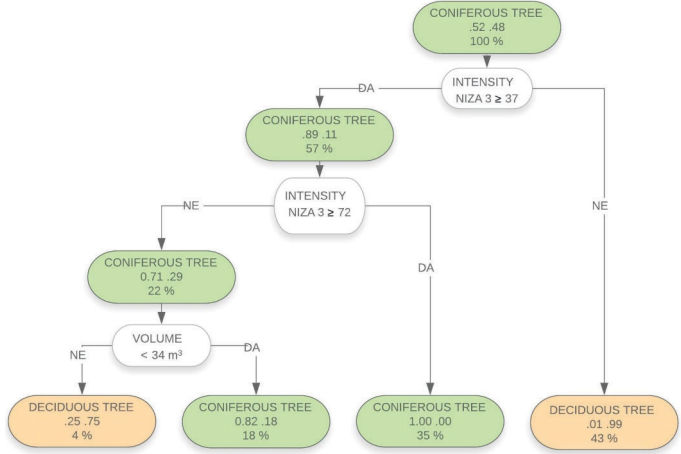


Figure 6: Decision tree for predicting conifers and deciduous trees from tree-crown volumes and average intensities of laser scanning datasets 2, 3 and 4.

Table 2: Results of conifer and deciduous-tree identification using different decision trees.

Training data			Test data			
	Coniferous	Deciduous	Success rate	Coniferous	Deciduous	Success rate
Volume						
Coniferous	86	13	79%	Coniferous	15	75%
Deciduous	27	66		Deciduous	6	
Intensity of datasets 2, 3 in 4						
Coniferous	98	1	93%	Coniferous	19	90%
Deciduous	12	81		Deciduous	3	
Volume and intensity in datasets 2, 3 in 4						
Coniferous	96	3	96%	Coniferous	19	95%
Deciduous	6	87		Deciduous	0	
Intensity of dataset 4 (LSS)						
Coniferous	87	12	85%	Coniferous	15	81%
Deciduous	16	77		Deciduous	3	

With the conifer and deciduous prediction decision tree, using only the average intensities of the laser scanning dataset 4 (LSS), we successfully classified 85% of the trees in the training data as coniferous or deciduous. The identification-success rate of the conifers and deciduous trees in the test data was 81%.

From the results it is clear that the least-successful decision tree on the test data is the prediction tree where only the treetop volume is considered (75% success rate). The decision tree where both the treetop volume and the intensity were used has the highest prediction-success rate (95%). The decision tree considering only the intensities of the laser scanning dataset 4 (LSS) had a success rate of 81% and the decision tree combining the intensities of the three datasets (2, 3, 4) had a success rate of 90%.

3.4 Decision trees for the prediction of separate tree species

Using a prediction decision tree where only the mean values of the volumes were considered, we correctly identified 48% of the tree species in the training data (Table 3). In the test data, we correctly identified 2 out of 5 Scots pines, 1 out of 13 European beeches, 2 out of 7 sycamores, 0 out of 8 ashes, 3 out of 8 European larches and 2 out of 7 Norway spruces. The identification-success rate of the tree species in the test data was 21%.

Using a decision tree where only the average intensities of sets 2, 3 and 4 were considered, we correctly identified 70% of the tree species in the training data. The identification-success rate of the tree species in the test data was 54%.

Using a decision tree, where we used the average treetop volumes and the average intensities of datasets 2, 3 and 4 (Figure 7), we correctly classified separate tree species for 74% of the trees in the training data. The identification-success rate of tree species in the test data was 60%.

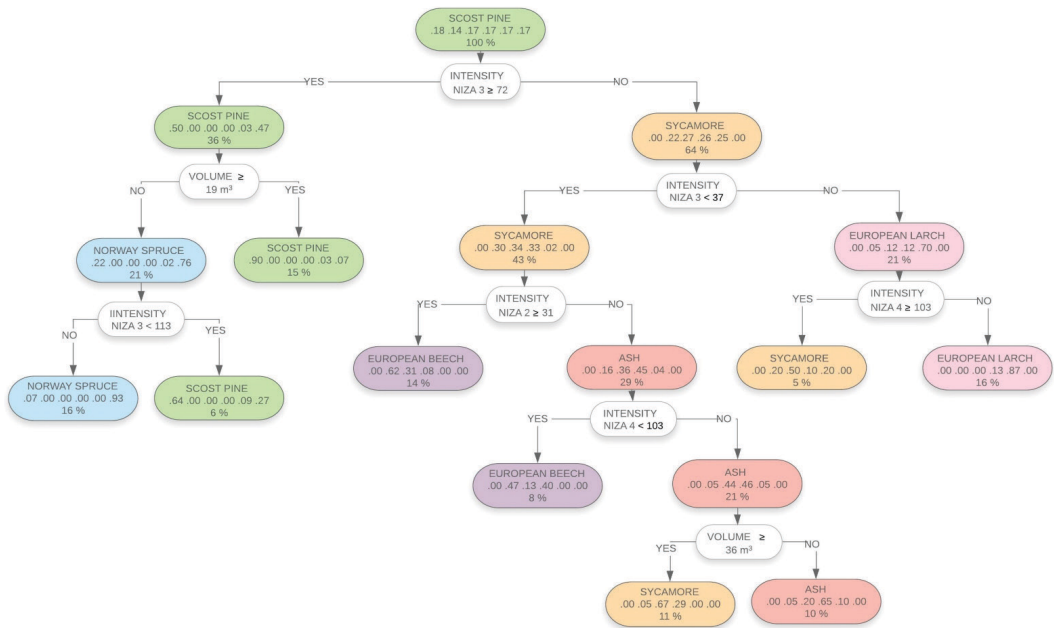


Figure 7: Decision tree for predicting tree species from treetop volumes and average intensities of laser scanning datasets 2, 3 and 4.

The decision tree where we used only the average intensities of dataset 4 (LSS) correctly classified the tree species with a 44% success rate in the training data. The identification-success rate of the tree species in the test data was 31%. The decision tree for tree-species separation based only on the geometry of the treetops is as ineffective as when trying to separate deciduous or coniferous trees, achieving an identification-success rate of only 21% in the test data. The decision tree using only the LSS intensities gives the second-worst results, with a 31% success rate for the test data. More than half of the tree species are correctly predicted by the following two decision trees: the first, which includes a combination of intensities from datasets 2, 3 and 4 (54%) and the second, which uses both volumes and a combination of those three intensities (60%).

Looking separately at the individual species and comparing the results of both the training and test data, we see that decision trees give poorer results when trying to identify ash trees. Most often, an ash tree was wrongly classified as a sycamore or a Scots pine. The European beech also has a poor identification-success rate: it cannot be distinguished from other tree species by the decision tree when only the intensities of dataset 4 (LSS) were used. The European beech identification is also as ineffective when using a decision tree where we compare only the mean volumes. Here, the European beech is mainly misclassified as a Scots pine or a sycamore.

Table 3: Tree species identification results using different decision trees.

Training data							Test data								
	Scots pine	European beech	Sycamore	Ash	European larch	Norway spruce	Success rate		Scots pine	European beech	Sycamore	Ash	European larch	Norway spruce	Success rate
Volume															
Scots pine	22	0	2	0	6	5	48%	Scots pine	2	1	0	0	1	1	21%
European beech	8	14	3	0	1	1		European beech	1	1	10	0	1	0	
Sycamore	8	4	18	0	2	1		Sycamore	2	3	2	0	0	0	
Ash	15	4	7	0	4	2		Ash	3	1	3	0	1	0	
European larch	14	0	0	0	16	2		European larch	3	0	0	0	3	2	
Norway spruce	1	0	0	0	9	23		Norway spruce	0	0	0	0	5	2	
The intensity of datasets 2, 3 in 4															
Scots pine	32	0	0	0	0	3	70%	Scots pine	5	0	0	0	0	0	54%
European beech	0	23	3	1	0	0		European beech	0	8	3	2	0	0	
Sycamore	0	10	19	4	0	0		Sycamore	0	4	1	2	0	0	
Ash	0	8	10	10	4	0		Ash	0	4	3	1	0	0	
European larch	2	0	2	2	26	0		European larch	1	0	0	0	7	0	
Norway spruce	9	0	0	0	0	24		Norway spruce	3	0	0	0	0	4	
Volume and intensity of datasets 2, 3 in 4															
Scots pine	33	0	0	0	0	2	74%	Scots pine	5	0	0	0	0	0	60%
European beech	0	23	3	1	0	0		European beech	0	8	4	1	0	0	
Sycamore	0	10	19	4	0	0		Sycamore	0	4	2	1	0	0	
Ash	0	8	7	13	4	0		Ash	0	4	2	2	0	0	
European larch	2	0	2	2	26	0		European larch	1	0	0	0	7	0	
Norway spruce	5	0	0	0	0	28		Norway spruce	2	0	0	0	0	5	
Intensity of dataset 4 (LSS)															
Scots pine	26	0	1	2	2	4	44%	Scots pine	5	0	0	0	0	0	31%
European beech	6	0	17	2	2	0		European beech	1	0	10	1	0	1	
Sycamore	1	0	26	2	1	3		Sycamore	1	0	5	1	0	0	
Ash	6	0	16	6	3	1		Ash	0	0	7	0	0	1	
European larch	13	0	1	0	15	3		European larch	5	0	0	0	3	0	
Norway spruce	16	0	2	1	3	11		Norway spruce	4	0	0	1	0	2	

4 DISCUSSION AND CONCLUSION

The tree species considered in this research can be distinguished from each other based on comparisons of the tree crown's geometry parameters. Based on the mean treetop-volume changes only the following pairs of tree species cannot be statistically significantly ($p > 0.05$) distinguished: ash – Scots pine, European larch – Scots pine, sycamore – European beech and Norway spruce – European larch. Due to their growth physiology, deciduous trees have a larger floor area, crown width and treetop volume than coniferous trees.

The intensities obtained with a wavelength of 1064 nm range between 0 and 200, and with a wavelength of 1550 nm, they range between 0 and 500. Since the intensity is described as an integer, a larger range between the smallest and highest values has an advantage. In this way it is easier to distinguish between the individual tree species by comparing the laser scanning datasets of 3 and 4, which were taken at 1550 nm, since one was taken during the leaf-off season (dataset 3) and the other during the leaf-on season (dataset 4). Therefore, in those two datasets, we can clearly recognise the differences between the intensities of tree species in leaf-on and leaf-off seasons.

In terms of mean intensity, we statistically significantly ($p < 0.05$) distinguished the following pairs of tree species in all datasets: European beech – Scots pine, sycamore – Scots pine, European larch – European beech and Norway spruce – European beech. The pair ash – sycamore cannot be statistically significantly ($p < 0.05$) distinguished in any dataset. Thus, based on the mean intensities in datasets 2, 3 and 4, conifers can be distinguished by prediction deciduous trees. In dataset 1, we statistically significantly separate fewer tree species; therefore, we did not use this dataset for the decision-tree development.

Norway spruce, Scots pine and European larch can only be distinguished from each other in dataset 3, which was recorded in early March, i.e., in the leaf-off season. European larch is distinctly different from Norway spruce and Scots pine in terms of its intensities, as it is the only coniferous tree that bears no needles during the leaf-off season. European beech, sycamore and ash can only be distinguished from each other in dataset 2, which was taken in mid-September, when early autumn already appears at this altitude. As we can see from those examples, the laser datasets taken in the leaf-off season make it easier to distinguish between tree species. Shi et al. (2018) came to the same conclusions on a German example, where they found it easier to distinguish between beech, birch and spruce during the leaf-off season. Triglav Čekada et al. (2017) came to the same conclusion on a Slovenian example.

In the decision-tree development described in detail in the research of Kranjec (2020), she has considered the implementation of normalised intensities as well, but those did not give more useful results. Therefore, in this paper we only discuss the non-normalised intensities due to there being fewer processing steps.

The best-performing decision tree for conifer and deciduous tree separation is based on the simultaneous consideration of the treetop volumes and the overall mean values of the intensities from datasets 2, 3 and 4. The conifer and the deciduous separation-success rate is 96% for the training data and 95% for the test data. In total, 115 out of 120 conifers and 114 out of 120 deciduous trees were successfully classified in the training and test data. Similarly, the decision tree that simultaneously uses the treetop volumes and the total average intensities of the three datasets (2, 3 and 4) performs best in identifying different tree species. In the training data, the correct tree species were identified for 74% of the trees, and in the test

data for 60% of the trees. In total, out of 40 trees of each tree species, we correctly identified the species of 38 Scots pines, 33 European larches, 33 Norway spruces, 31 European beeches, 21 sycamores and 15 ash trees if we combine the results from the training and test data. In general, the worst performing tree-species prediction was for ash, where all four prediction models gave equally poor results. European beech prediction performs even worse, but only in models where just the volumes or just the intensities of one dataset (LSS) were used.

All the decision trees perform better at identifying coniferous tree species, but less well at identifying deciduous tree species. Thus, among the conifers, in a few cases we could not distinguish between Norway spruce and Scots pine, while for deciduous trees we had difficulty to distinguish all the deciduous tree species between themselves.

The decision tree for conifer and deciduous tree identification, using only intensities from dataset 4, the freely available national laser scanning from Slovenia, achieved a success rate of 85% on the training data and 81% on the test data. In total, we correctly classified 102 out of 120 conifers and 101 out of 120 deciduous trees. These results can be used as a starting point for the separation of deciduous and coniferous tree mixtures at the level of forest stands anywhere in Slovenia. With additional calibration of the model by individual forest site-management classes that describe different growing conditions (Torresan et al., 2016), this will allow the methodology to be applied to forest-management units and forest-management areas in the future. The models performed less well in single-tree species identification, where we achieved 44% success on the training data and 31% on the test data. In total, out of 40 trees for each species, we correctly classified 31 Scots pines and 31 sycamores, 18 European larches, 13 Norway spruces, 6 ash trees and 0 European beeches.

When separating deciduous from coniferous trees and predicting the individual tree species, the best decision trees are those where we can apply multi-temporal laser scanning data, as these can describe the annual cycles on the trees, i.e., the changes in foliage between the leaf-on and leaf-off seasons. Therefore, when planning new laser scanning in areas where we already have one laser scanning dataset, it would be reasonable to consider the planning of a new laser scanning in the opposite foliage season to the one that we already have. This would give us a possibility to distinguish between the individual tree species with greater confidence in the future.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the Geodetic Institute of Slovenia for the data used in this study, which was commissioned within the framework of the cross-border project Slovenia-Austria 2011–2014: Natural Disasters without Borders (NH-WF). For the national laser scanning of Slovenia, we would like to thank the Ministry of Environment and Spatial Planning of the Republic of Slovenia.

Literature and references:

- Benciņa, A., Kopal, M. (2019). Uporaba laserskega skeniranja za vrednotenje poškodovanosti dreves zaradi zledoloma. *Gozdarski vestnik*, 77 (4), 159–169.
- Budej, B. C., St-Onge, B., Hopkinson, C., Audet, F. (2018). Identifying the genus or species of individual trees using a three-wavelength airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 204, 632–647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.037>
- Burt, A., Disney, M., Calders, K. (2018). Extracting individual trees from lidar point cloud using tree-seg. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 438–445. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13121>
- Eysn, L., Hollaus, M., Lindberg, E., Berger, F., Monnet, J.-M., Dalponte, M., Kopal, M., Pellegrini, M. A., Lingua, E., Mongus, D., Pfeifer, N. (2015). A benchmark of lidar

- based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space. *Forests*, 6 (5), 1721–1747. DOI: <https://doi.org/10.3390/f6051721>
- Holmgren, J., Persson, Å. (2004). Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90 (4), 415–423. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00140-8)
- Kansanen, K., Vauhkonen, J., Lähivaara, T., Seppänen, A., Maltamo, M., Mehtätalo, L. (2019). Estimating forest stand density and structure using Bayesian individual tree detection, stochastic geometry, and distribution matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 66–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.007>
- Karna, Y.K., Penman, T.D., Aponte, C., Hinko-Najera, N., Bennett, L.T. (2020). Persistent changes in the horizontal and vertical canopy structure of fire-tolerant forests after severe fire as quantified using multi-temporal airborne lidar data. *Forest Ecology and Management*, 472, 118255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118255>
- Kobal, M., Triplat, M., Krajnc, N. (2014). Pregled uporabe zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu. *Gozdarski vestnik*, 72 (5-6), 235–248.
- Korpela, I., Ørka, H. O., Maltamo, M., Tokola, T., Hyypä, J. (2010). Tree Species Classification Using Airborne LiDAR – Effects of Stand and Tree Parameters, Downsizing of Training Set, Intensity Normalization, and Sensor Type. *Silva Fennica*, 44. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.156>
- Korpela, I., Hovi, A., Korhonen, L. (2013). Backscattering of individual LiDAR pulses from forest canopies explained by photogrammetrically derived vegetation structure. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.06.002>
- Kranjec, N. (2020). Preučevanje gozdnih sestojev in posameznih drevesnih vrst iz normalizirane intenzitete laserskih točk. Magistrsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Mongus, D., Vilhar, U., Skudnik, M., Žalik, B., Jesenko, D. (2018). Predictive analytics of tree growth based on complex networks of tree competition. *Forest Ecology and Management*, 425, 164–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.039>
- Mongus, D., Žalik, B. (2015). An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 108, 219–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.004>
- Ørka, H. O., Næsset, E., Bollandsås, O. M. (2009). Classifying species of individual trees by intensity and structure features derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1163–1174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.002>
- Shi, Y., Wang, T., Skidmore, A. K., Heurich, M. (2018). Important LiDAR metrics for discriminating forest tree species in Central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 163–174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.002>
- Suranto, A., Seielstad, C., Queen, L. (2009). Tree species identification in mixed coniferous forest using airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 683–693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.07.001>
- Šturm, T., Pisek, R., Repnik, B., Matjašič, D. (2017). Pregledovalnik podatkov o gozdovih. *Geodetski vestnik*, 61 (1), 125–131.
- Torresan, C., Corona, P., Scrinzi, G., Marsal, J. V. (2016). Using classification trees to predict forest structure types from LiDAR data. *Annals of Forest Research*, 59 (2), 281–298. DOI: <https://doi.org/10.15287/afr.2016.423>
- Triglav Čekada, M., Lavrič, M., Kosmatin Fras, M. (2017). Ločevanje iglavcev in listavcev na podlagi neobdelane intenzitete laserskih točk. *Geodetski vestnik*, 61 (1), 23–34. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2017.01.23-34>
- Triglav Čekada, M. (2011). Možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja (lidar) za geomorfološke študije. *Geografski vestnik*, 83 (2), 81–93.

Kranjec N., Triglav Čekada M., Kobal M. (2021). Predicting tree species based on the geometry and intensity of aerial laser scanning point cloud of treetops. *Geodetski vestnik*, 65 (2), 234–259.
DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.234-259>

NAPOVEDOVANJE DREVESNIH VRST IZ GEOMETRIJE IN INTENZITETE OBLAKA AEROLASERSKIH TOČK VRHOV DREVESNIH KROŠENJ

OSNOVNE INFORMCIJE O ČLANKU:

GLEJ STRAN 234

1 UVOD

Aerolasersko skeniranje omogoča podrobno preučevanje gozda tako na krajinski ravni kot na ravni gozdnih sestojev in posameznih dreves, saj se laserski žarek večkrat odbije, in sicer od vrha drevesa, vej, debla in nazadnje od tal. Zato lahko na podlagi teh podatkov preučujemo ne le horizontalno, ampak tudi vertikalno strukturo gozda, kar omogoča oceno deleža iglastih in listnatih dreves, gostote dreves v sestoji, zdravstvenega stanja in poškodovanosti dreves (Kobal et al., 2014; Mongus et al., 2018; Benčina in Kobal, 2019; Karna et al., 2020). Lasersko skeniranje Slovenije v letih 2014–2015 je tako zelo uporaben vir podatkov tudi za preučevanje slovenskih gozdov (Šturm et al., 2016).

Laserske podatke lahko preučujemo zapisane v vektorski obliki, to je tako imenovano preučevanje oblaka točk, ter izvedeni rastrski obliki, kjer analiziramo razmerja med različnimi rastrskimi digitalnimi modeli višin (relief, površje, krošnje) oziroma drugimi rastrskimi tematskimi izvedenimi izdelki (na primer v-ksli), v katerih prikazujemo vrednosti izbranih atributov iz oblaka laserskih točk (na primer intenzitete).

Posamezna drevesa lahko v oblaku laserskih točk razmeroma uspešno ločimo z metodami, ki preučujejo lokalno geometrijo v oblaku točk, pri čemer razmejujemo drevesa na podlagi prepoznavanja njihovih vrhov, odkrivanja robov med krošnjami, iskanja senc in združevanja regij (Kobal et al., 2014; Mongus in Žalik, 2015; Eysn et al., 2016; Burt et al., 2018; Kansanen et al., 2019). Zahtevnejše in še ne popolnoma raziskano področje je prepoznavanje posameznih drevesnih vrst na podlagi samostojnih laserskih podatkov. Postopke za ločevanje drevesnih vrst lahko razdelimo na (Shi et al., 2018):

- metode, s katerimi se preučujejo geometrične lastnosti posamezne drevesne vrste (na primer oblika in gostota krošnje, razporejenost listov in vej, odprtost krošnje), ali
- metode, s katerimi se preučujejo radiometrične lastnosti laserskih odbojev (na primer intenziteta posameznega odboja).

Sama intenziteta laserskega odboja je odvisna od oblike listov ali iglic, njihove orientacije in velikosti, gostote v drevesni krošnji ter razporeditve drevesnih vej v krošnji (Holmgren in Person, 2004; Korpela et al., 2010–2013) ter od tipa laserskega skenerja in parametrov leta (Triglav Čekada, 2011).

Pri nas so se s preučevanjem povprečnih intenzitet različnih drevesnih vrst v veččasovnih laserskih podatkih, posnetih z dvema valovnima dolžinama (1064 nm in 1550 nm) ukvarjale že Triglav Čekada et

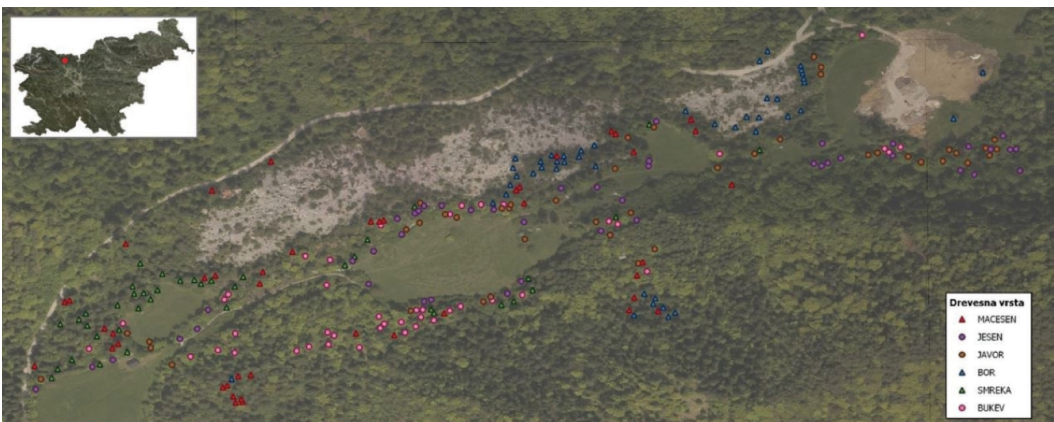
al. (2017). Ugotovile so, da so povprečne intenzitete listavcev v obeh valovnih dolžinah višje od iglavcev v času olistanosti, medtem ko je v času neolistanosti ravno nasprotno. Ko so ločile med sabo intenzitete prvih in edinih odbojev in intenzitete vseh odbojev, so ugotovile, da so slednje nižje v času olistanosti, medtem ko so v času neolistanosti višje od intenzitet prvih in edinih odbojev. Delež različnih redov odbojev (prvi, srednji, zadnji odboj) je odvisen od strukture krošnje posamezne preučevane vrste, torej od gostote iglic ali listja ter njihove razporeditve in razporeditve vej, kar so predhodno ugotovili že Ørka et al. (2009) in Suranto et al. (2009).

V naši raziskavi smo k preučevanju intenzitet odboja glede na različno drevesno vrsto in del leta, v katerem je bilo izvedeno lasersko skeniranje, dodali še preučevanje geometrije vrhnjih 3 metrov oblaka točk posameznega drevesa. Vrh krošnje smo si izbrali, ker se ta del drevesa večinoma ne prepleta s sosednjimi drevesi, prav tako so že Korpela et al. (2013) ugotovili, da je mogoče razlike v razporeditvi drevesnih vej glede na vrsto najlažje določiti na vrhu dreves. Z analizo povprečnih intenzitet oblakov točk posameznih dreves in analizo izbranih geometrijskih parametrov v različnih obdobjih leta smo razvili več napovedovalnih modelov na podlagi strojnega učenja – uporabili smo metodo odločitvenih dreves (angl. *decision tree*). Z uporabo veččasovnih laserskih podatkov smo razvili odločitvena drevesa za ločitev med iglavci in listavci ter za določitev posamezne drevesne vrste. Dodatno smo preverili uspešnost odločitvenega drevesa samo na enem nizu laserskih podatkov, in sicer na podatkih laserskega skeniranja Slovenije, saj bi tako lahko metodo prenesli iz testnega okolja na območje, ki pokriva celotno državo.

2 PODATKI IN METODOLOGIJA

2.1 Podatki

Testno območje stoji v bližini Podljubelja na nadmorski višini od 700 do 800 metrov in je poraščeno z mešanim gozdom. V raziskavi smo obravnavali šest drevesnih vrst, ki se na izbranem območju pojavljajo najpogosteje: navadno smreko (*Picea abies*), evropski macesen (*Larix decidua*), rdeči bor (*Pinus sylvestris*), navadno bukev (*Fagus sylvatica*), gorski javor (*Acer pseudoplatanus*) in veliki jesen (*Fraxinus excelsior*). Za vsako drevesno vrsto smo na terenu določili 40 dreves, ki so si čim bolj podobna po obliki krošnje in velikosti (slika 1).



Slika 1: Lokacije izbranih dreves (vir pregledne karte Slovenije: Geopedia, <http://www.geopedia.si>), vir podlage: ortofoto, posnet skupaj z laserskim skeniranjem niza 1).

Uporabili smo podatke štirih nizov aerolaserskih skeniranj (preglednica 1), ki so bili posneti v različnih letih in različnih letnih časih. Prva dva niza sta bila posneta z istim skenerjem Riegl LMS-Q560, druga dva z enakim tipom skenerja Riegl LMS-Q780. Prva dva niza sta bila posneta z valovno dolžino 1550 nm, druga dva z valovno dolžino 1064 nm. Trije nizi so bili posneti med olistanostjo ter en niz v času neolistanosti. Laserski nizi se med seboj razlikujejo tudi po gostoti laserskih točk in višini leta nad terenom. V analizi smo uporabili podatke, zapisane v pulznem načinu, originalni podatki pa so bili posneti s polnovalovnim laserskim skenerjem. Pri prvih dveh nizih so poleg aerolaserskega skeniranja izvedli še aerofotografiranje ter iz njih izdelali ortofote.

Preglednica 1: Lastnosti aerolaserskega skeniranja po nizih

	NIZ 1	NIZ 2	NIZ 3	NIZ 4 (LSS)
Datum snemanja	15. 5. 2012	18. 9. 2012	5. 3. 2013	17. 7. 2014
Gostota oblaka točk [točk/m²]	8	8	15	5
Valovna dolžina [nm]	1550	1550	1064	1064
Višina leta nad terenom [m]	700	700	1000	1200–1400
Olistanost	DA	DA	NE	DA
Ortofoto	DA	DA	NE	NE

2.2 Priprava podatkov aerolaserskega skeniranja

Pred terenskim snemanjem posameznih dreves smo v programu *ArcMap* (<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>) prikazali ortofoto, ki je bil posnet istočasno kot laserski niz 1. Nanj smo dodali točke lokalnih maksimumov iz digitalnega modela krošenj (DMK), ki smo ga izdelali iz laserskih podatkov niza 1. DMK je razlika med modelom površja (DMP) in modelom reliefa (DMR). V njem lokalni maksimumi predstavljajo vrhove dominantnih dreves. Ortofoto z lokalnimi maksimumi smo izvozili kot georeferenciran TIFF in tega uvozili v mobilno aplikacijo *Avenza Maps* (<https://www.avenza.com/avenza-maps/>), ki omogoča določitev lokacije in navigacijo na predpripravljeni karti kar na pametnem telefonu. Na terenu smo vsakemu izbranemu drevesu določili lokacijo, vrsto in dodali fotografijo debla ter vrha krošnje. Na terenu smo izbirali drevesa, ki so se po višini za vsaj tri metre ločila od ostalih dreves v gozdu, oziroma se njihove krošnje v zgornjih metrih niso prepletale s krošnjami ostalih dreves.

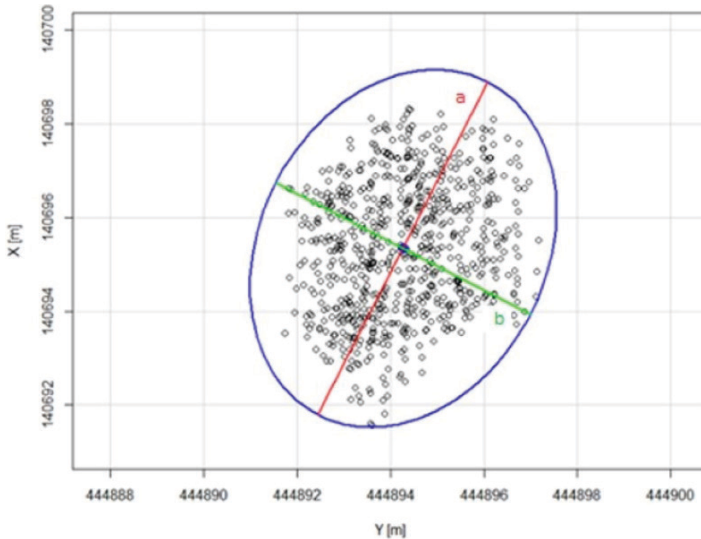
Terensko izmerjene lokacije dreves smo v programu *ArcMap* premaknili na točko lokalnega maksimuma, določenega na podlagi DMK, ki predstavlja na terenu izmerjeno drevo. Drevesa smo razdelili po drevesnih vrstah (slika 1). Vsakemu drevesu smo določili poligon v obliki kroga, s središčem v točki lokalnega maksimuma drevesa in polmerom pet metrov. Te poligone smo uporabili za obrez vseh nizov laserskih podatkov na manjše oblake točk, ki so prikazovali posamezno drevo. Obrez smo izvedli z orodjem *Extract LAS* (*ArcMap*). Da bi dobili le podatke o posameznem drevesu, brez prepletanja drevesnih krošenj z drugimi drevesi, smo uporabili le zgornje tri metre vrhov drevesnih krošenj. Same drevesne krošnje smo določili v programu *CloudCompare* (<https://www.danielgm.net/cc/>), obrez drevesne krošnje na le zgornje tri metre pa smo izdelali v programu *RStudio* (<https://rstudio.com/>), kjer smo izvedli tudi vse nadaljnje analize.

2.3 Določanje povprečnih vrednosti intenzitet in geometrije posamezne drevesne krošnje

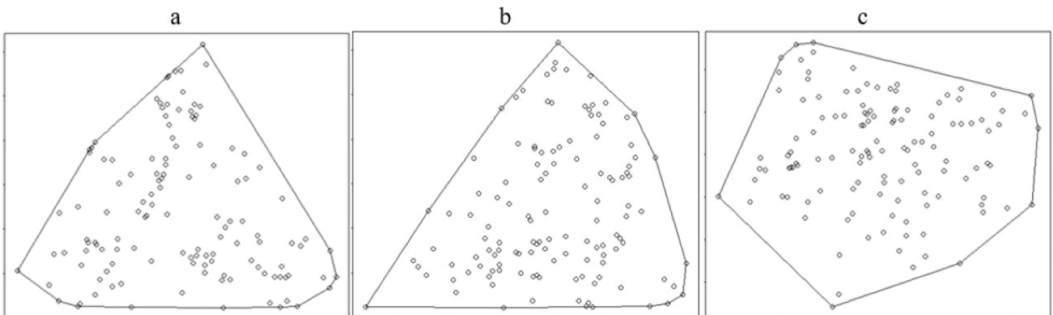
Iz oblaka točk vrha posamezne drevesne krošnje smo izračunali povprečno vrednost njegove intenzitete za vsak podatkovni niz posebej. Tu primerjamo le relativna razmerja v posameznem nizu, saj nenormaliziranih intenzitet, narejenih z različnimi valovnimi dolžinami, med sabo ne moremo neposredno primerjati.

Za vsak vrh drevesne krošnje smo izračunali naslednje geometrijske značilnosti: širino njegovega ožjega in širšega prereza, površino njegovega ožjega in širšega prereza ter površino tlorisa in volumen vrha krošnje. Širino ožjega in širino širšega prereza vrha krošnje smo določili tako, da smo laserskim točkam v pogledu tlorisa očrtali elipso ter določili njeno najkrajšo in najdaljšo polos (slika 2).

Površino ožjega in širšega prereza vrha krošnje smo določili z izračunom površine lika, ki ga predstavlja konveksna množica laserskih točk, preslikanih na vertikalno ravnino skozi prej določeno ožjo oziroma širšo os elipse (slika 3). Površino vrha krošnje v prerezu tlorisa smo določili z izračunom površine lika, ki ga predstavlja konveksna množica laserskih točk, preslikanih na horizontalno ravnino. Volumen vrha krošnje smo izračunali kot volumen telesa, ki ga tvori konveksna množica laserskih točk vrha krošnje.



Slika 2: Oris elipse laserskim točkam v tlorisu ter določitev ožje osi in širše osi elipse.



Slika 3: Izris konveksne množice na drevesni krošnji smreke: a) ožji prečni prerez, b) širši prečni prerez, c) prerez v tlorisu.

Za uspešno razlikovanje med vrednostmi navedenih geometrijskih parametrov med posameznimi drevesi oziroma njihovimi posameznimi oblaki točk so originalne gostote posameznih nizov od 5 do 15 točk/m² premalo. Zato smo gostoto v oblaku točk posameznega drevesa povečali tako, da smo združili točke nizov 1, 2 in 3. Snemanja prvih treh nizov so bila izvedena v razponu desetih mesecev z enako prostorsko točnostjo. Predpostavili smo, da se velikost in oblika dreves v tem času nista bistveno spremenila. Zaradi večje časovne razlike med snemanjem prvih treh nizov in nizom 4 (LSS) slednjih nismo uporabili za pripravo združenih oblakov točk.

2.4 Statistična analiza

Za statistično analizo razlik v intenziteti odbojev laserskih točk in geometriji vrha krošenj smo uporabili enostavno analizo variance ANOVA, pri statično značilnih ($p < 0,05$) razlikah pa Tukeyjev test mnogoterih primerjav (angl. *Tukey's honestly significant difference test*), kjer smo preverili, med katerimi skupinami se povprečne vrednosti med seboj statistično značilno razlikujejo. Statistično analizo smo izvedli v programu *RStudio*.

2.5 Izdelava odločitvenih dreves

Povprečne vrednosti intenzitet in parametre geometrije drevesnih krošenj smo združili v enoten model prepoznavanja drevesnih vrst. Model smo izdelali z metodo odločitvenih dreves, vsestranskim algoritmom strojnega učenja. Za izdelavo odločitvenega drevesa smo uporabili program *RStudio*, kjer lahko korake odločanja prikažemo grafično, rezultate pa ovrednotimo z verjetnostjo, da posamezen rezultat resnično spada v določeno kategorijo.

Mejne vrednosti odločitvenega drevesa so bile izdelane na podlagi klasifikacijskega drevesa (angl. *classification tree*). Algoritem v osnovi najprej začetno podmnožico učnega niza razdeli glede na attribute podatkov na razredno čim bolj čiste podmnožice. Postopek se ponavlja, dokler podmnožice niso čiste oziroma s ponovnim razbitjem ne pridobimo čistejših podmnožic. Določitev mejnih vrednosti je bila izdelana na podlagi binarnega ločevanja (angl. *recursive binary splitting*). V članku smo kot kriterij pri binarnem ločevanju uporabili Ginijev indeks (angl. *Gini index*), ki prikaže, koliko podatkov učnega niza pripada nekemu razredu. Če je vrednost indeksa majhna, je večina podatkov del enega razreda.

Na podlagi analiz povprečnih vrednosti intenzitet in analiz povprečnih vrednosti geometrij zgornjih treh metrov vrhov drevesnih krošenj smo izdelali osem različnih odločitvenih dreves. V prvih štirih smo izdelali model prepoznavanja iglavcev in listavcev, v drugih štirih model prepoznavanja izbranih drevesnih vrst. Vhodne podatke smo delili na učne in testne podatke, ki so bili med seboj neodvisni. Učni podatki so vsebovali 80 % naključno izbranih dreves (192 dreves), testni podatki pa preostalih 20 % dreves (48 dreves). Učne podatke smo uporabili za osnovno nastavitvev parametrov modela.

Na podlagi statističnih analiz geometrijskih vrednosti in vrednosti intenzitet smo določili vhodne parametre za odločitvena drevesa. Različna odločitvena drevesa so bila izdelana iz naslednjih vhodnih parametrov:

- volumnov drevesnih krošenj,
- intenzitet niza 2, 3 in 4,

- volumnov drevesnih krošenj in intenzitet niza 2, 3 in 4 ter
- intenzitet niza 4, prosto dostopnih podatkov laserskega skeniranja Slovenije.

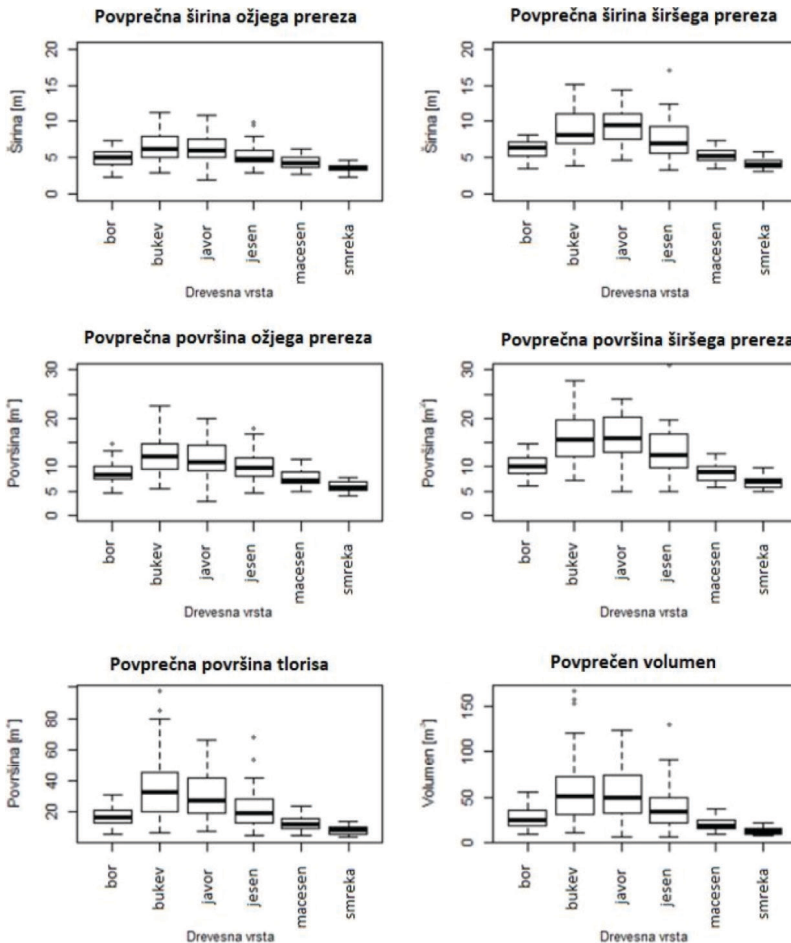
Pri razlikovanju geometrije smo se odločili za volumen, saj ta podatek zajema povprečne vrednosti vseh ostalih obravnavanih parametrov geometrijskih parametrov.

Model odločitvenega drevesa smo ocenili z uspešnostjo, ki je definirana kot delež pravilno klasificiranih dreves učnega oziroma testnega niza.

3 REZULTATI

3.1 Primerjava drevesnih vrst po geometriji

Statistično značilno ($p < 0,005$) se med seboj razlikujejo vrhovi krošenj drevesnih vrst po ožji širini prereza, širši širini prereza, površini ožjega prereza, površini širšega prereza, površini tlorisa in volumnu (slika 4), vendar se po geometriji vrha krošenj statistično značilno ne razlikujejo ($p > 0.05$) naslednji pari drevesnih vrst: navadna smreka – evropski macesen, evropski macesen – rdeči bor in gorski javor – navadna bukev.

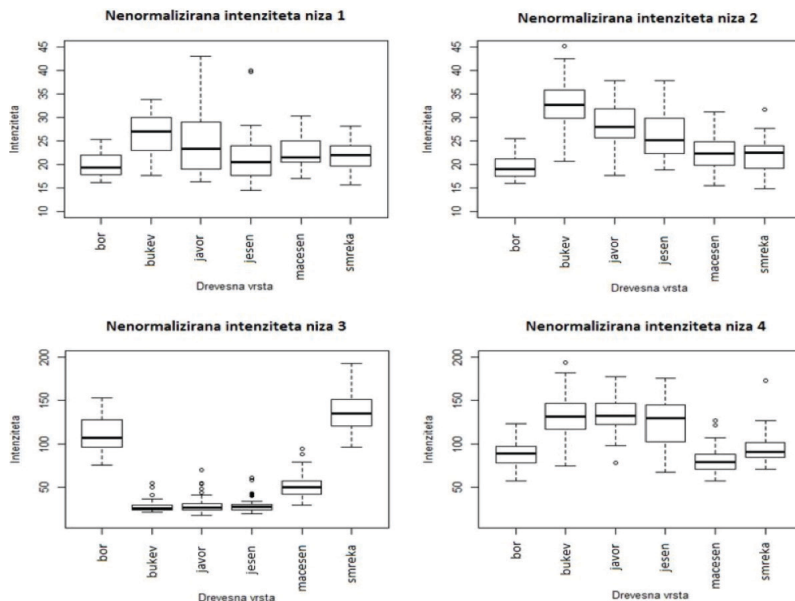


Slika 4: Primerjava geometrije drevesnih krošenj po drevesnih vrstah.

3.2 Primerjava drevesnih vrst po intenziteti

Statistično značilno ($p < 0,05$) se po drevesnih vrstah razlikujejo tudi povprečne vrednosti intenzitet v vseh nizih (slika 5), med seboj pa se statistično značilno razlikujejo ($p < 0,05$) naslednji pari drevesnih vrst: navadna bukev – rdeči bor, gorski javor – rdeči bor, evropski macesen – navadna bukev in navadna smreka – navadna bukev. Statistično značilno ($p > 0,05$) v nobenem nizu ne moremo razlikovati povprečnih vrednosti intenzitet para veliki jesen – gorski javor.

Če primerjamo vse tri nize iz časa olistanosti (nizi 1, 2, 4), opazimo nižje vrednosti intenzitet pri iglavcih, v času neolistanosti (niz 3) pa ravno nasprotno.



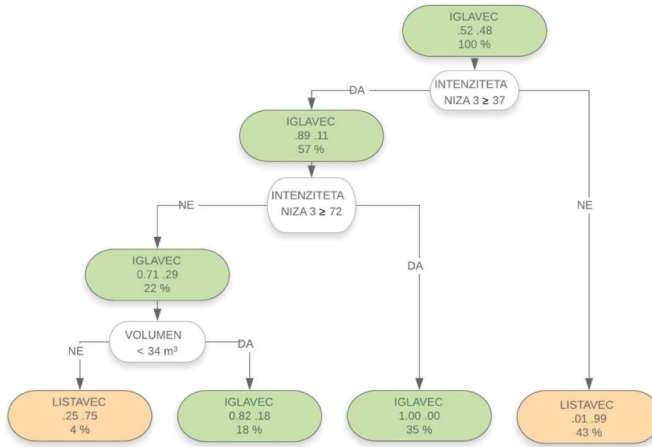
Slika 5: Primerjava povprečnih vrednosti intenzitet drevesnih krošenj po drevesnih vrstah v posameznih nizih.

3.3 Odločitveno drevo napovedovanja iglavcev oziroma listavcev

Z odločitvenim drevesom napovedovanja iglavcev oziroma listavcev, v katerem smo upoštevali samo volumen vrha krošnje, smo v učnih podatkih uspešno določili 79 % dreves (preglednica 2). V testnih podatkih smo pravilno prepoznali 15 od 21 iglavcev in 21 od 27 listavcev. Napačno smo razvrstili 6 od 21 iglavcev in jih prepoznali kot listavce ter 6 od 27 listnatih dreves, ki smo jih napačno prepoznali kot iglasta. Tako smo pravilno med iglavce in listavce v testnih podatkih razvrstili 75 % dreves.

Z odločitvenim drevesom napovedovanja iglavcev oziroma listavcev, v katerem smo upoštevali le povprečne vrednosti intenzitet niza 2, 3 in 4, smo v učnih podatkih pravilno določili, ali je drevo iglasto ali listnato, 93 % dreves. Uspešnost prepoznavanja iglavcev in listavcev v testnih podatkih je 90 %.

Z odločitvenim drevesom napovedovanja, kjer smo uporabili tako povprečne vrednosti volumna krošnje kot povprečne vrednosti intenzitet niza 2, 3 in 4 (slika 6), smo v učnih podatkih pravilno prepoznali 96 % dreves. Uspešnost prepoznavanja iglavcev in listavcev v testnih podatkih je 95 %.



Slika 6: Odločitveno drevo napovedovanja iglavcev oziroma listavcev iz vrednosti volumnov in povprečnih vrednosti intenzitet niza 2, 3 in 4.

Preglednica 2: Rezultati prepoznavanja iglavcev in listavcev z odločitvenim drevesom

Učni podatki			Testni podatki		
iglavc	listavec	uspešnost	iglavc	listavec	uspešnost
volumen					
iglavc	86	79 %	iglavc	15	75 %
listavec	13		listavec	6	
	27			21	
intenziteta niza 2, 3 in 4					
iglavc	98	93 %	iglavc	19	90 %
listavec	1		listavec	2	
	12			24	
volumen in intenziteta niza 2, 3 in 4					
iglavc	96	96 %	iglavc	19	95 %
listavec	3		listavec	2	
	6			27	
intenziteta niza 4 (LSS)					
iglavc	87	85 %	iglavc	15	81 %
listavec	12		listavec	6	
	16			24	

Z odločitvenim drevesom napovedovanja iglavcev oziroma listavcev, kjer smo uporabili samo povprečne intenzitete niza 4 (LSS), smo v učnih podatkih uspešno razvrstili med iglavce in listavce 85 % dreves. Uspešnost prepoznavanja iglavcev in listavcev v testnih podatkih je 81 %.

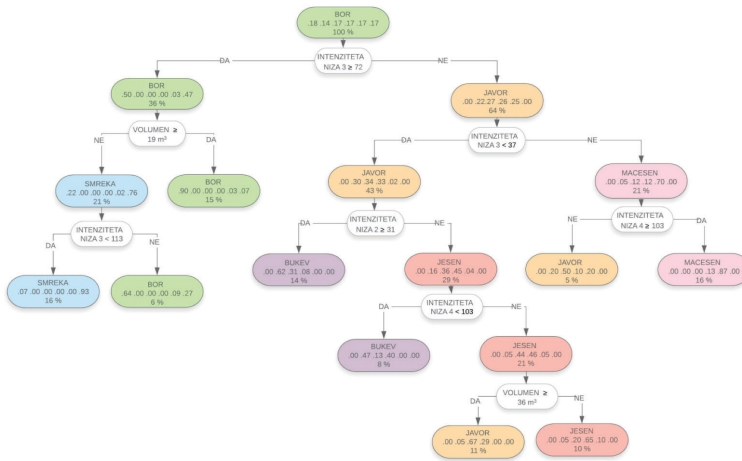
Razvidno je, da je na testnih podatkih najmanj uspešno odločitveno drevo napovedovanja, kjer upoštevamo samo volumen vrha krošenj (uspešnost 75 %). Najvišjo uspešnost (95 %) napovedovanja ima odločitveno drevo, v katerem upoštevamo tako volumen kot intenziteto. Odločitveno drevo, kjer upoštevamo samo intenzitete niza 4 (LSS), je uspešno v 81 %, odločitveno drevo s kombinacijo intenzitet treh nizov pa v 90 %.

3.4 Odločitvena drevesa napovedovanja drevesnih vrst

Z odločitvenim drevesom napovedovanja, kjer upoštevamo samo povprečne vrednosti volumnov, smo v učnih podatkih pravilno prepoznali 48 % drevesnih vrst (preglednica 3). V testnem nizu smo pravilno prepoznali 2 od 5 rdečih borov, 1 od 13 navadnih bukev, 2 od 7 gorskih javorjev, 0 od 8 velikih jesenov, 3 od 8 evropskih macesnov in 2 od 7 navadnih smrek. Uspešnost prepoznavanja drevesnih vrst v testnih podatkih je 21 %.

Z odločitvenim drevesom napovedovanja, kjer upoštevamo le povprečne vrednosti intenzitete nizov 2, 3 in 4, smo v učnih podatkih pravilno prepoznali 70 % drevesnih vrst. Uspešnost prepoznavanja drevesnih vrst v testnih podatkih je 54 %.

Z odločitvenim drevesom napovedovanja, kjer smo uporabili povprečne vrednosti volumna in povprečne vrednosti intenzitet nizov 2, 3 in 4 (slika 7), smo v učnih podatkih pravilno po drevesnih vrstah razvrstili 74 % dreves. Uspešnost prepoznavanja drevesnih vrst v testnih podatkih je 60 %.



Slika 7: Odločitveno drevo napovedovanja drevesnih vrst iz vrednosti volumnov in povprečnih vrednosti intenzitet niza 2, 3 in 4.

Z odločitvenim drevesom napovedovanja, pri katerem smo uporabili samo povprečne intenzitete niza 4 (LSS), smo v učnih podatkih pravilno med drevesne vrste razvrstili 44 % dreves. Uspešnost prepoznavanja drevesnih vrst v testnih podatkih je 31 %. Enako kot pri napovedovanju, ali je drevo listavec ali iglavec, so tudi pri napovedi drevesne vrste najslabši rezultati napovedovanja, ki temeljijo samo na geometriji vrhov dreves, saj uspešnost na testnih podatkih znaša 21 %. Drugo najslabše odločitveno drevo je tisto, ki uporabi samo intenzitete LSS, in sicer z uspešnostjo 31 %. Več kot polovico drevesnih vrst pravilno napovešča odločitveno drevo, ki vključuje kombinacijo treh intenzitet (54 %), ter odločitveno drevo, ki uporablja tako volumne kot kombinacijo treh intenzitet (60 %).

Če pogledamo ločeno po posameznih vrstah ter primerjamo rezultate, tako na učnih kot testnih podatkih, vidimo, da odločitvena drevesa dajejo slabše rezultate pri prepoznavanju velikega jesena, saj je največkrat uvrščen med gorski javor ali rdeči bor. Sledi navadna bukev, ki jo z odločitvenim drevesom, kjer uporabimo samo intenzitete niza 4 (LSS), ne moremo ločiti od drugih drevesnih vrst. Slabše rezultate napovedovanja navadne bukve dobimo tudi pri odločitvenem drevesu, ki uporabi samo volumne. Največkrat navadno bukev odločitveno drevo napačno razvrsti med rdeči bor ali gorski javor.

Preglednica 3: Rezultati prepoznavanja drevesnih vrst z odločitvenim drevesom.

Učni podatki							Testni podatki								
	rdeči bor	navadna bukev	gorski javor	veliki jesen	evropski macesen	navadna smreka	uspešnost		rdeči bor	navadna bukev	gorski javor	veliki jesen	evropski macesen	navadna smreka	uspešnost
volumen															
rdeči bor	22	0	2	0	6	5	48 %	rdeči bor	2	1	0	0	1	1	21 %
navadna bukev	8	14	3	0	1	1		navadna bukev	1	1	10	0	1	0	
gorski javor	8	4	18	0	2	1		gorski javor	2	3	2	0	0	0	
veliki jesen	15	4	7	0	4	2		veliki jesen	3	1	3	0	1	0	
evropski macesen	14	0	0	0	16	2		evropski macesen	3	0	0	0	3	2	
navadna smreka	1	0	0	0	9	23		navadna smreka	0	0	0	0	5	2	
intenziteta niza 2, 3 in 4															
rdeči bor	32	0	0	0	0	3	70 %	rdeči bor	5	0	0	0	0	0	54 %
navadna bukev	0	23	3	1	0	0		navadna bukev	0	8	3	2	0	0	
gorski javor	0	10	19	4	0	0		gorski javor	0	4	1	2	0	0	
veliki jesen	0	8	10	10	4	0		veliki jesen	0	4	3	1	0	0	
evropski macesen	2	0	2	2	26	0		evropski macesen	1	0	0	0	7	0	
navadna smreka	9	0	0	0	0	24		navadna smreka	3	0	0	0	0	4	
volumen in intenziteta niza 2, 3 in 4															
rdeči bor	33	0	0	0	0	2	74 %	rdeči bor	5	0	0	0	0	0	60 %
navadna bukev	0	23	3	1	0	0		navadna bukev	0	8	4	1	0	0	
gorski javor	0	10	19	4	0	0		gorski javor	0	4	2	1	0	0	
veliki jesen	0	8	7	13	4	0		veliki jesen	0	4	2	2	0	0	
evropski macesen	2	0	2	2	26	0		evropski macesen	1	0	0	0	7	0	
navadna smreka	5	0	0	0	0	28		navadna smreka	2	0	0	0	0	5	
intenziteta niza 4 (LSS)															
rdeči bor	26	0	1	2	2	4	44 %	rdeči bor	5	0	0	0	0	0	31 %
navadna bukev	6	0	17	2	2	0		navadna bukev	1	0	10	1	0	1	
gorski javor	1	0	26	2	1	3		gorski javor	1	0	5	1	0	0	
veliki jesen	6	0	16	6	3	1		veliki jesen	0	0	7	0	0	1	
evropski macesen	13	0	1	0	15	3		evropski macesen	5	0	0	0	3	0	
navadna smreka	16	0	2	1	3	11		navadna smreka	4	0	0	1	0	2	

4 RAZPRAVA IN SKLEP

Obravnavane drevesne vrste lahko med seboj ločimo s primerjavami geometrije vrhov drevesnih krošenj, vendar statistično značilno ($p > 0,05$) iz povprečnih vrednosti volumnov ne moremo ločiti naslednjih parov drevesnih vrst: veliki jesen – rdeči bor, evropski macesen – rdeči bor, gorski javor – navadna bukev in navadna smreka – evropski macesen. Zaradi fiziologije rasti listnata drevesa dosegajo večjo površino prereza, širino krošnje in volumen vrha drevesne krošnje kot iglavci.

Vrednosti intenzitet, pridobljene z valovno dolžino 1064 nm, znašajo med 0 in 200, z valovno dolžino 1550 nm pa med 0 in 500. Ker se intenziteta beleži kot celo število, je večji razpon med vrednostmi

prednost. Zato lažje ločimo posamezne drevesne vrste, če primerjamo niza 3 in 4, ki sta bila posneta z valovno dolžino 1550 nm. Ker pa je eden posnet v času neolistanosti (niz 3) in drugi v času olistanosti (niz 4), na njiju lahko lepo prepoznamo tudi to razliko.

Glede na povprečne intenzitete lahko statistično značilno ($p < 0,05$) v vseh nizih ločimo pare navadna bukev – rdeči bor, gorski javor – rdeči bor, evropski macesen – navadna bukev in navadna smreka – navadna bukev. Statistično značilno ($p < 0,05$) v nobenem nizu ne moremo razlikovati povprečnih vrednostih intenzitet para veliki jesen – gorski javor. Tako iz povprečnih vrednosti intenzitet v nizih 2, 3 in 4 med seboj lahko ločimo iglavce od listavcev. V nizu 1 med seboj statistično ločimo najmanj drevesnih vrst, zato povprečnih vrednosti intenzitet iz niza 1 v odločitvenih drevesih nismo uporabili.

Smreko, bor in macesen lahko med seboj ločimo le v nizu 3, ki je bil posnet začetek marca, torej v neolistanem delu leta. Evropski macesen se pri tem po vrednostih intenzitete izrazito loči od navadne smreke in rdečega bora, saj v času neolistanosti med iglavci edini nima iglic. Navadna bukev, gorski javor, veliki jesen lahko med seboj ločimo le v nizu 2, ki je bil posnet sredi septembra, ko se na tej nadmorski višini že pojavi zgodnja jesen. Tako drevesne vrste lažje med seboj ločimo v času neolistanosti. Do enakih ugotovitev so v Nemčiji prišli Shi et al. (2018), ki so med seboj lažje ločili bukev, brezo in smreko v času neolistanosti, pri nas pa Triglav Čekada et al. (2017).

Opazimo, da imajo v času olistanosti nižje vrednosti intenzitet iglavci, v času neolistanosti pa je ravno nasprotno, kar so ugotovili že Holmgren in Persson (2004), Ørka et al. (2009), Triglav Čekada et al. (2017), Shi et al. (2018). V času olistanosti, v nizu 2, ima med listavci najvišjo vrednost intenzitete navadna bukev, sledi gorski javor, najnižjo povprečno vrednost ima veliki jesen. V času neolistanosti, v nizu 3, ima med iglavci najvišjo vrednost intenzitete navadna smreka, sledi rdeči bor, najnižjo, podobno listavcem, ima evropski macesen. Da ima smreka višjo povprečno intenziteto v času neolistanosti, sta v raziskavi na Švedskem ugotovila tudi Holmgren in Persson (2004), pri nas pa Triglav Čekada et al. (2017).

V raziskavi smo se ukvarjali tudi z možnostjo uporabe normaliziranih intenzitet (Kranjec, 2020), ki pa niso dale uporabnejših rezultatov, zato zaradi manj korakov obdelave v članku uporabljamo le nenormalizirane intenzitete.

Najuspešnejše odločitveno drevo prepoznavanja iglavcev in listavcev temelji na hkratnem upoštevanju volumnov in skupnih povprečnih vrednosti intenzitet iz nizov 2, 3 in 4. Uspešnost prepoznavanja iglavcev in listavcev v učnih podatkih znaša 96 %, v testnih pa 95 %. Skupaj smo v učnih in testnih podatkih uspešno pojasnili 115 od 120 iglavcev in 114 od 120 listavcev. Enako je odločitveno drevo napovedovanja, ki hkrati uporablja volumne in povprečne skupne vrednosti intenzitet treh nizov (2, 3 in 4), najuspešnejše pri razpoznavanju posamezne drevesne vrste. V učnih podatkih smo pravilno drevesno vrsto določili 74 % drevesom, v testnih podatkih 60 % drevesom. Skupaj smo v učnih in testnih podatkih od 40 dreves posamezne drevesne vrste pravilno določili vrsto 38 rdečim borom, 33 evropskim macesnom, 33 navadnim smrekam, 31 navadnim bukvam, 21 gorskim javorjem in 15 velikim jesenom. V splošnem se najslabše obnese napovedovanje velikega jesena, kjer dajo vsi štirje napovedovalni modeli enako slabe rezultate. Slabše se obnese še napovedovanje navadne bukve, vendar le v modelih, kjer uporabimo samo volumne ali samo intenzitete enega niza (laserskega skeniranja Slovenija).

Vsa odločitvena drevesa dosegajo večjo uspešnost pri prepoznavanju drevesnih vrst med iglavci, manj uspešni so pri prepoznavanju drevesnih vrst listavcev. Tako med iglavci v nekaj primerih nismo ločili med navadno smreko in rdečim borom, pri listavcih pa smo imeli težave z medsebojnim ločevanjem vseh drevesnih vrst.

Z odločitvenim drevesom prepoznavanja iglavcev in listavcev, kjer smo uporabili samo intenzitete iz prosto dostopnih podatkov laserskega skeniranja Slovenije, smo na učnih podatkih dosegli uspešnost 85 %, na testnih pa 81 %. Skupaj smo pravilno razporedili 102 od 120 iglavcev ter 101 od 120 listavcev. Ti rezultati odločitvenega drevesa so zagotovo lahko izhodišče za ločevanje mešanosti oziroma listavcev in iglavcev na ravni gozdnih sestojev kjerkoli v Sloveniji, kar ob dodatni kalibraciji modela po posameznih rastiščno-gojitvenih razredih, ki upoštevajo različne rastiščne razmere (Torresan et al., 2016), omogoča uporabo metodologije na ravni gozdnogospodarskih enot in gozdnogospodarskih območij. Manj uspešni so se modeli izkazali pri prepoznavanju posamezne drevesne vrste, kjer smo v učnih podatkih dosegli uspešnost 44 %, v testnih pa 31 %. Skupaj smo od 40 dreves posamezne drevesne vrste pravilno razvrstili 31 rdečih borov in 31 gorskih javorjev, 18 evropskih macesnov, 13 navadnih smrek, 6 velikih jesenov in 0 navadnih bukev.

Pri ločevanju listavcev od iglavcev in pri napovedovanju posameznih drevesnih vrst so najboljša odločitvena drevesa napovedovanja, v katerih obravnavamo veččasovne laserske podatke, saj le-ti lahko opišejo največje letne cikle na drevesih, to je spremembe med olistanostjo in neolistanostjo. Zato bi bilo pri načrtovanjih novih laserskih skeniranj na območjih, kjer že imamo en laserski podatkovni niz, smiselno razmisliti o podrobnem časovnem načrtovanju novega laserskega skeniranja, da zajamemo sezono olistanosti/neolistanosti, ki je še nimamo skenirane. Tako bomo omogočili večjo zanesljivost določitve posameznih drevesnih vrst v prihodnjih analizah.

ZAHVALA

Za podatke, ki smo jih uporabili v raziskavi, se najlepše zahvaljujemo Geodetskemu inštitutu Slovenije, ki jih je naročil v okviru čezmejnega projekta Slovenija-Avstrija 2011–2014: *Naravne nesreče brez meja (NH-WF)*. Za podatke laserskega skeniranja Slovenije se zahvaljujemo Ministrstvu za okolje in prostor Republike Slovenije.

Literatura in viri:

Glej stran 246



Kranjec N., Triglav Čekada M., Kobal M. (2021). Napovedovanje drevesnih vrst iz geometrije in intenzitete oblaka aerolaserskih točk vrhov drevesnih krošenj. Predicting tree species based on the geometry and intensity of aerial laser scanning point cloud of treetops. *Geodetski vestnik*, 65 (2), 234–259. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.234-259>

Nina Kranjec, mag. inž. geod. geoinf.

Dobrovita d.o.o.

Tbilisjska ulica 87, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

e-naslov: nina@dobrovita.com

izr. prof. dr. Milan Kobal, univ. dipl. inž. gozd.

Univerza v Ljubljani, Biotehnična fakulteta,

Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire

Večna pot 83, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

e-naslov: milan.kobal@bf.uni-lj.si

doc. dr. Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije in

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

e-naslov: mihaela.triglav@gis.si

VPLIV VPADNEGA KOTA IN LASERSKEGA ODTISA NA NATANČNOST IN STOPNJO PODROBNOSTI PRI TERESTRIČNEM LASERSKEM SKENIRANJU

INFLUENCE OF INCIDENT ANGLE AND LASER FOOTPRINT ON PRECISION AND LEVEL OF DETAIL IN TERRESTRIAL LASER SCANNER MEASUREMENTS

Sajid Mahmood, Zulkepli bin Majid, Khairulnizam bin M. Idris, Muhammad Hamid Chaudhry

UDK: 528.71

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 9. 10. 2020

Sprejeto: 5. 6. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2022.01.260-281

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 9. 10. 2020

Accepted: 5. 6. 2021

IZVLEČEK

Terestrični laserski skenerji (angl. terrestrial laser scanners – TLS) se uporabljajo na različnih področjih, kot so geodezija, gozdarstvo, ohranjanje kulturne dediščine, rudarstvo, topografija, urbanistično planiranje, forenzika ipd. Navedena tehnologija je močno spremenila zbiranje prostorskih podatkov v 3D, predvsem z vidika hitrega zajema podatkov. Ni veliko priporočil glede georeferenciranja oblakov točk, zato se v praksi poskuša zajeti kar se da veliko elementov geometrije skeniranih objektov, predvsem zaradi bojazni, da bodo podatki skeniranja nepopolni. Pri načrtovanju skeniranja sta med drugim izrednega pomena zagotavljanje položajne točnosti in stopnje podrobnosti (angl. level of detail – LOD), ki sta odvisni od vpadnega kota, velikosti laserskega odtisa, prostorskega obsega in ločljivosti. V raziskavi smo razvili matematični model za različne konfiguracije površja skeniranja ob upoštevanju prostorskega obsega, vpadnega kota in odtisa laserskega žarka. Razviti model pomaga pri izbiri stojišča TLS za zajem podatkov z zahtevano položajno točnostjo in stopnjo podrobnosti. Modele smo verificirali z izpeljavo enega modela iz drugega s spreminjanjem vrednosti obravnavanih parametrov. Vplive vpadnega kota in velikosti odtisa laserskega žarka smo obravnavali matematično in eksperimentalno za primer naravne poševne površine. Na podlagi predstavljenih rezultatov lahko načrtujemo ustrezen položaj stojišča TLS, s katerim bomo dosegli zahtevano točnost in stopnjo podrobnosti.

KLJUČNE BESEDE

terestrično lasersko skeniranje, vpadni kot, 3D izmera, digitalni model terena, oblak točk

ABSTRACT

Terrestrial laser scanners (TLS) are used for a variety of applications, e.g., surveying, forestry, cultural heritage preservation, mining, topographic mapping, urban planning, forensics etc. This technology has made a huge shift in 3D spatial data collection due to much faster speed compared to other techniques. In the absence of guiding principles for positioning TLS relative to an object, surveyors collect data at maximum arrangements of scanning geometry elements due to fear of incomplete data of TLS. In 3D spatial data acquisition, positional accuracy and Level of Detail (LOD) are major considerations and are dependent on laser incident angle, footprint size, range and resolution. Mathematical models have been developed relating range, incident angle and laser footprint size for different surface configurations. These models can be used to position TLS to collect data at required positional accuracy and LOD. Models have been verified by deriving one model from other surface models by changing parameters. Effects of incident angle and footprint size have been studied mathematically and experimentally on a natural sloping surface. From the results, surveyors can plan the positioning of the scanner so that data is collected at the required accuracy and LOD.

KEY WORDS

Terrestrial laser scanning, Incident Angle, 3D surveying, Digital Terrain Model, Point cloud

1 INTRODUCTION

Since 1990, when the world's first 3D commercial laser scanner was launched in the USA by Ben Kacyra, an Iraqi expatriate and civil engineer (Kościuk, 2012), this equipment is advancing technologically as well as its utility in diverse situations. Terrestrial Laser Scanner (TLS) or terrestrial LiDAR has created space in 3D data collection for a wide variety of applications (Kandrot, 2013) and has addressed the problems of data quality with no or minimal interference with other activities. In the last two decades, the technology of TLS is becoming popular amongst the surveying community because of its capability of collecting millions of 3D points within seconds with high accuracy. Most of the TLS systems are equipped with external or in-built cameras to acquire images of areas being scanned, thus capable of providing photorealistic 3D coloured point cloud (Luh *et al.*, 2014). To visualize the use of TLS in the multidisciplinary domain, it is enough to type the phrase “*Applications of Terrestrial Laser Scanner*” in google scholar, and one will find more than 51,000 search results, but if the search is made year-wise, the total results are even more than 85,000 till 2019 (Figure 1). It clearly indicates that TLS is now a well-recognized, trusted and well-established technology for direct 3D measurements.

Russhakim *et al.* (2019) compared TLS with Mobile Laser Scanning during a building survey and mapping application and found better accuracy results for TLS. Its data can be integrated with other sensors like ALS for better reconstruction of 3D objects like building reconstruction, as done by Abdullah *et al.* (2017). An overview of the use of this technology for different projects, including the accuracy achieved, efficiency and analysis, can be found in Pinkerton (2011). A detailed review of this technology, its geometric and radiometric characteristics can be found in Mahmood *et al.* (2018).

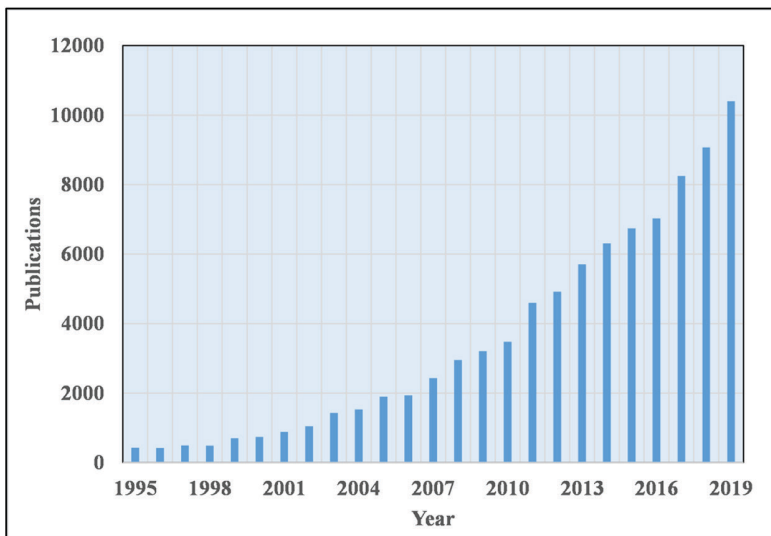


Figure 1: Google scholar search results in line with (Cheng *et al.*, 2018) on “Applications of Terrestrial Laser Scanners” phrase (Accessed on June 13, 2020).

The accuracy of 3D point cloud depends upon the type of scanner, i.e. Time of Flight (ToF) or phase-based, mechanical assembly precision, e.g. rotation mechanism, geometrical aspects/parameters of scanning, e.g. range, incident angle, laser footprint, feature surface properties, environmental impacts, mixed

pixel phenomenon, thermal expansion, instrument vibration and errors in post-processing of point cloud due to registration and filtering processes (Soudarissanane *et al.*, 2008; Reshetyuk, 2009; Lichti, 2010a). Out of the above geometrical properties, incident angle, laser footprint, and range are directly related to each other and affects the accuracy and Level of Detail (LoD - what minimum size of an object is to be mapped) of the scanned object/area. So to effectively use this technology for 3D surveying, mathematical models have been developed for both parameters of incident angle and laser footprint for the study of their variation with range. These models can further be used for modelling of inaccuracies induced due to these parameters. After development of models, this paper focused on experimental study for their effects on Digital Terrain Model (DTM). The effect on LoD will be dealt in future. The developed models and results of this study can be used for positioning TLS for optimal results both in accuracy and LoD.

2 RELATED STUDIES

The incident angle is the angle between the incident laser beam and the surface normal in the case of plane surface (Figure 2), and in the case of a curved surface, it is the angle between the incident laser beam and normal to the tangent plane at the point of incidence. Since the normal is defined as a vector pointing outwards and perpendicular to the plane surface or tangent plane so it will always remain in the interval $[0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}]$.

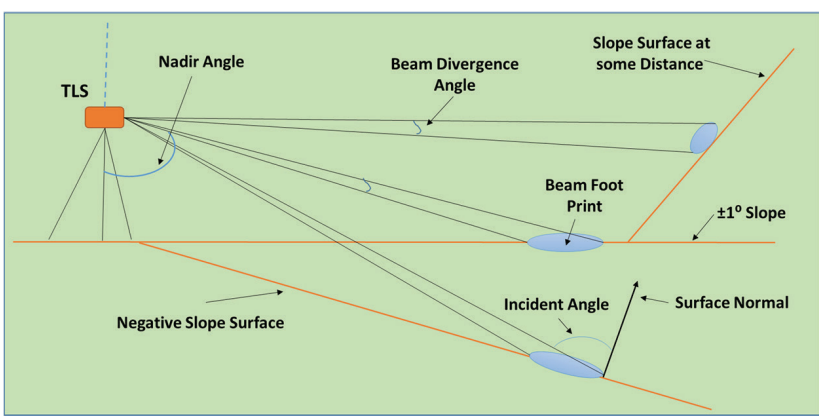


Figure 2: Incident angle schematic representation.

The incident angle affects the reflected energy. Power distribution across the pulse is not uniform but can be considered as symmetrical Gaussian distribution with maximum energy concentrated within the footprint (Schaer *et al.*, 2007). The laser beam shape, spot size and reflectivity from the target are dependent on the incident angle. The backscattered signal from the target surface will be a function of the integrated energy distribution across the whole footprint. Theoretically, as per radar range Equation (1), the reflected intensity of TLS is directly proportional to the cosine of incidence angle (Tan and Cheng, 2016).

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \rho \cos \alpha}{4R^2} \eta_{sys} \eta_{atm} \tag{1}$$

where P_r is received laser power, P_t is transmitted laser power, D_r is receiver aperture diameter, R is Range, ρ is scanned target reflectance, α is incident angle and η_{sys} and η_{atm} are system transmission and atmos-

pheric transmission factors. This proportionality means that at larger incident angles, less reflectivity and hence adverse effects on accuracy. This is because laser spot deformed to an elliptical shape compared to the orthogonal alignment of beam, resulting in less reflectivity, affecting the scanned distance and, hence, 3D accuracy. It can be explained in two ways; firstly, the ellipse centre deviates from the point to which the distance is being measured, thus elongating the distance; secondly, more signal strength is reflected from the closer part of the elliptical spot leading to shortening of distance. Kersten *et al.* (2008) tested five different scanners for investigation of effects of incident angle and found that an increase in angle results in a decrease in geometric accuracy of objects, and also ToF scanners are influenced less than the phase difference scanners. They have not modelled the effect but just measured the effect of incident angle for different scanners. Soudarissanane *et al.* (2008) observed that density, intensity and accuracy of point cloud decrease with an increase in incident angle. They used phased based scanner, and measurements were made from a distance of 10 m only. Kersten *et al.* (2009) stated that the accuracy of any laser scanner is adversely influenced by incident angles of more than 45° and again reported that ToF scanners are less affected as compared to phase difference scanners. Soudarissanane *et al.* (2009) and Soudarissanane *et al.* (2011) developed a mathematical model of the influence of incident angle on range. The test of the model revealed that incident angle contributes approximately 20 % to the total error budget of a particular scan point. Voegtle and Wakaluk (2009) observed a decrease of about 0.4 mm in the standard deviation of range measurement with an increase in incident angle. They attributed this phenomenon towards that particular laser scanner (HDS 6000, Leica) used for the scanning by saying that it might be due to its characteristics of higher accuracy for angle as compared to range. Zámečníková *et al.* (2015) investigated and quantified the effect of incident angle using a TOF scanner and total station on reflectorless distance measurement from different distances ranging from 3.5 m to 30 m. They observed that effect of incident angle is not as prominent as of other factors at close ranges of 3.5 and 5.2 m but detected a systematic effect of 1.7 mm and 2.0 mm for rough and smooth surface respectively at 30 m range.

Lichti *et al.* (2005a) modelled the effect of laser beam width as an uncertainty in the horizontal and vertical angles which affects the range and quantifies an approximate range error of 0.15 m for a 3 mrad beam divergence and 45° incident angle at 100 m range for a Cyra Cyra 2500 laser scanner. Lichti *et al.* (2005b) conducted an experiment to calculate the systematic bias because of laser beam width by scanning eight times a 4.5×3.3×80 m corridor using Riegl LMS-Z210 scanner (3 mrad divergence, i.e. 150 mm diameter at 50 m) and compared these measurements with the total station. They observed systematic beam width error but were unable to predict the value because the error in their scan setup was not only due to beam width but was strongly correlated with incident angle, however they recommended that beam width error must be considered in ground surveys for scanners having broad beam width. Soudarissanane (2016) rearranged the equations developed by (Sheng, 2008) to model laser beam footprint size for different surface configurations and used those for modelling of TLS laser beam footprint size. These equations for TLS are only applicable for vertical planes at some distance from TLS.

The laser footprint, which depends on range, incident angle and beam divergence, will affect the resolution of the scan and hence LoD because the final spot size illuminates certain area on striking the target. The average of attributes within the spot area is recorded by the receiver. Thus due to the larger spot size diameter, the survey result will have less overall detail on objects smaller than spot size. Also, if two lasers are hitting the same target at the same distance, the one that has a small spot size due to smaller beam

divergence will result in increased resolution and finer details. The other will produce low resolution due to larger divergence and spot size and hence fewer details (Bruce et al., 2016).

From the above discussion, it can be deduced that the effect of incidence angle on quality of point cloud has no acceptable model or value which can be applied during scanning for the topographic survey. And as per Kaasalainen *et al.* (2011), the possible correction for incidence angle effects on intensity which affects 3D accuracy, should also include information on the target surface reflectivity, which is not possible for the topographic survey. In the absence of this, a surveyor is unable to apply corrections for incident angle if at all significant or otherwise to point cloud. This necessitates investigation for optimal incident angle and spot size considering the effects of beam divergence and range for the topographic survey.

3 METHODOLOGY

In survey design, it is the first step to define the position of TLS so that maximum coverage and LoD at required accuracy could be achieved. Accuracy, along with other factors, is also affected by the angle of incidence and laser beam footprint size. Mathematical models have been developed to evaluate the variation of incidence angle and laser beam footprint size with range for different surface configurations, as shown in Figure 2. The mathematical correctness of these models has been checked by deriving a model for one surface configuration from the model of another surface configuration. From these mathematical modelling, graphs were plotted for observing the variation of incident angle, and laser beam footprint size with range and conclusions were drawn. The efficacy of the developed models based on conclusions has been elaborated in section 6. This was followed by the investigation of the effects of incident angle and beam footprint on DTM through field experimentation. The layout of the field experimentation is depicted in Figures 14 and 15. To see the effect on DTM, firstly, a base DTM was generated from the TLS position having the least values of incident angle and laser beam footprint size. Subsequently, six more DTMs were generated from different TLS positions by increasing the values of incident angle and laser beam footprint size. These DTMs were subtracted from the base DTM to see the difference, which actually is impacted by the incident angle and laser beam footprint size.

4 INCIDENT ANGLE MODELLING AND ITS EFFECTS

The scanner measures the backscattered reflected energy, which generally retraces the incident beam path. The amount or intensity of reflected light depends on the surface properties and the scanning geometry. A laser beam with zero incident angle, i.e. hitting the object perpendicularly, will have a circular footprint, whereas all other hits will result in elliptical-shaped footprints on the surface. Energy distribution will be the same along all radial sections in case of a zero-incident angle compared to the elliptical footprint. At the same range, the reflected energy is more in the case of zero-incident angle as compared to non-zero hits. It means that reflected intensity will keep decreasing with an increase in incident angle.

A lower intensity of the reflected signal means a deteriorated Signal to Noise Ratio (SNR). Since the detection unit of TLS generally uses a threshold value to distinguish between noise and the reflected signal so, if a signal is too weak, it will not be detected as a reflected signal. A signal is weak when its magnitude is smaller than the noise level of the detection unit. For longer distances or higher incident angles, the detection of the signal becomes harder, and some signals are even rejected, having less energy than the noise level.

4.1 Incident Angle Variation for Horizontal Surfaces

For horizontal surfaces, only the vertical angular increment capability of the instrument affects the incident angle, whereas horizontal angular increment traces a circular path, so no change in the range of laser beam. Figure 3 illustrates the concept of incident angle in the case of horizontal surface. 'E' is the TLS located at 'F' having instrument height 'h'. 'R' is the range of incident laser beam hitting at point 'A' making angle 'θ' with the nadir. 'α' and 'N' are the incident angle and corresponding normal vector respectively to the surface.

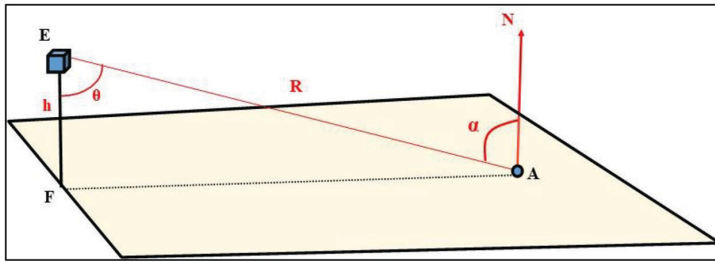


Figure 3: Incident angle for the horizontal surface.

By sine law in ΔAEF,

$$\frac{R}{\sin 90^\circ} = \frac{h}{\sin(90^\circ - \alpha)} \rightarrow \alpha = \cos^{-1}\left(\frac{h}{R}\right) \tag{2}$$

Equation (2) illustrates that as the range increases, the incident angle also increases. This increase is shown in Figure 4.

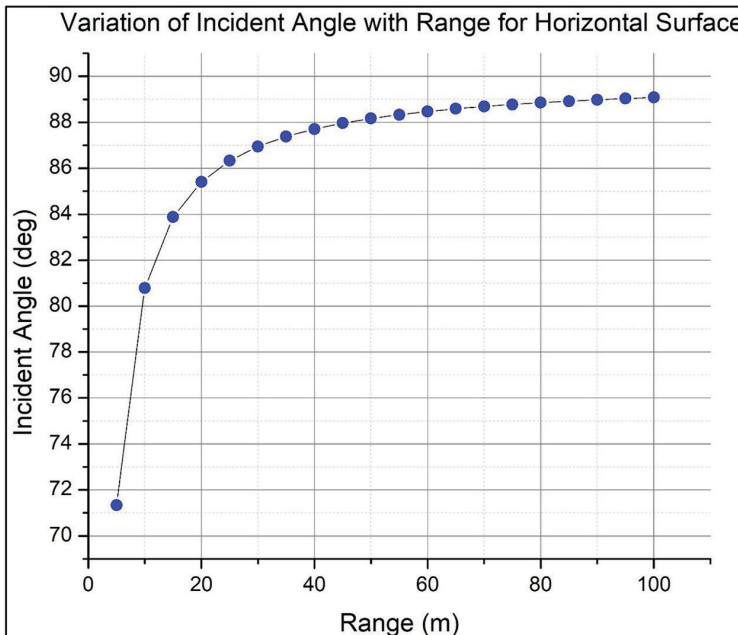


Figure 4: Incident angle variation with range for the horizontal surface.

The graph of Figure 4 has been drawn for an instrument height of 1.6 m. It can be seen from the graph that the incident angle reaches 85° at a range of just 20 m and then approach asymptotically to 90°. If a topographic survey is planned based on previous literature which generally recommends scanning below 45° (Daliga and Kurałowicz, 2016), below 55° (Zámečníková *et al.*, 2015) and below 65° (Lichti, 2007, Soudarissanane *et al.*, 2009) of incident angle, then it can be seen from the graph that useful range is less than 5 m which renders TLS totally inefficient whereas it has been observed by authors that a compatible quality DTM can be generated even beyond a range of 100 m and up to 200 m for horizontal surface.

4.2 Incident Angle Variation for Sloping Surfaces

Consider Figure 5, which represents a surface making an angle of ‘γ’ with the horizontal and scanner is placed at the foot of sloping surface. All other notations are as explained above in Figure 3.

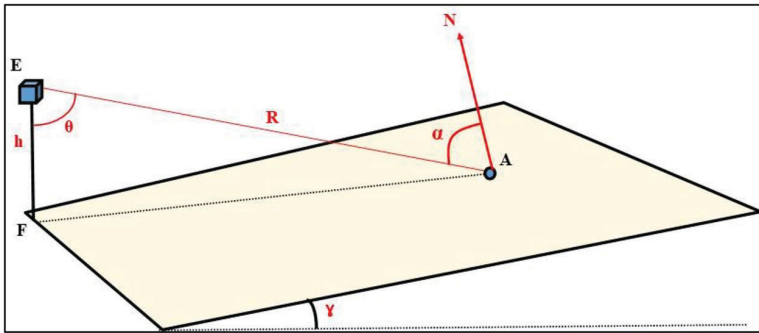


Figure 5: Incident angle for the positive sloping surface. Modified from (Mahmood *et al.*, 2020).

By sine law in $\triangle AEF$

$$\frac{R}{\sin(90^\circ - \gamma)} = \frac{h}{\sin(90^\circ - \alpha)} \rightarrow \frac{R}{\cos \gamma} = \frac{h}{\cos \alpha} \tag{3}$$

Therefore the incident angle at laser point ‘A’ is given by,

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{h}{R} \cos \gamma\right) \tag{4}$$

Equation (4) renders the same incident angle as obtained from Equation (2) for horizontal surface by substituting $\gamma = 0^\circ$. The graphs of Equation (4) for $\gamma = 5^\circ$ and $\gamma = 45^\circ$ are shown in Figure 6.

The graphs of Figure 6 depicts the same behaviour of change in incident angle as depicted in the case of horizontal surface in Figure 4. The only difference is that as the slope of the surface increases, so as the incident angle for the same range. This can be seen for the initial three values of incident angles for $\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 25^\circ$ and $\gamma = 45^\circ$ which are approximately 71°, 73° and 77° for a range of 5 m. This information leads to the conclusion that the scanner should not be placed within 5 m of the foot of any sloping surface. The same graphs are the output in case of a negative sloping surface, as shown in Figure 7. The reason for the same graphs is the same final equation for incident angle as Equation (4) because sine of the angle at point ‘F’ renders the same value, i.e. $\sin(90^\circ - \gamma) = \sin(90^\circ + \gamma) = \cos \gamma$.

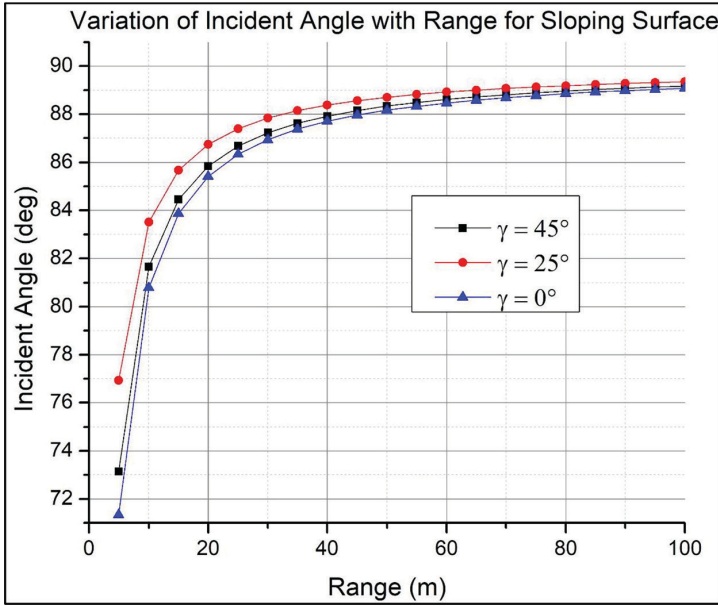


Figure 6: Incident angle variation with range for the sloping surface.

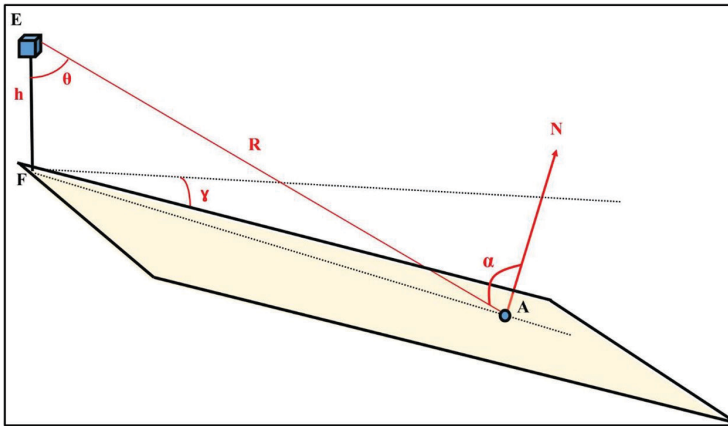


Figure 7: Incident angle for the negative sloping surface. Modified from (Mahmood et al., 2020).

4.3 Incident Angle Variation for Sloping Surface at Some Distance from Scanner

This surface is depicted in Figure 8, and all parameters are the same as explained in previous sections except 'd', which is the shortest distance to a surface perpendicular to the line 'BC' and instrument height 'EF' and 'φ' is the angle in the horizontal plane. In ΔEBC,

$$EC = \frac{d}{\cos \varphi} \tag{5}$$

In ΔAEC, by sine law in terms of 'α';

$$\frac{\frac{d}{\cos \varphi}}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{R}{\sin(180^\circ - \gamma)} \rightarrow \alpha = \cos^{-1} \left(\frac{d \sin \gamma}{R \cos \varphi} \right) \tag{6}$$

which is the incident angle 'α';

and in terms of 'θ', range 'R' can be expressed as

$$\frac{EC}{\sin \{90^\circ + (\gamma - \theta)\}} = \frac{R}{\sin(180^\circ - \gamma)} \rightarrow R = \frac{d \sin \gamma}{\cos \varphi \cos(\gamma - \theta)} \tag{7}$$

For γ = 90°, φ = 0° and θ = 90°, Equation (7) renders R = d and subsequently from Equation (6) α = 0°, which confirms the model.

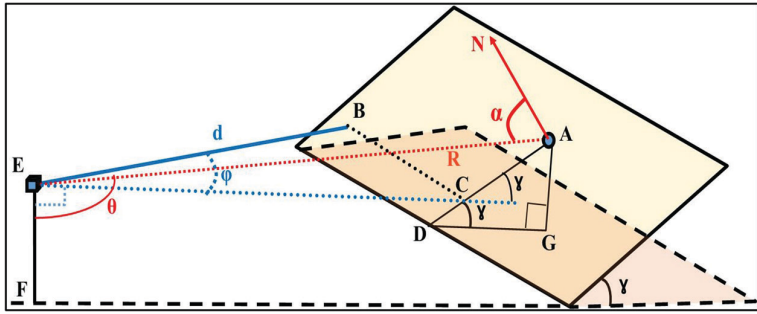


Figure 8: Incident angle for the sloping surface at some distance = d from the scanner. Modified from (Mahmood *et al.*, 2020).

Using values of 'd' and 'γ' as 20 m and 50° respectively and for different values of 'θ' and 'φ', corresponding values of 'R' and incident angle 'α' calculated from Equations (7) and (6) respectively are as shown in Table 1.

Table 1: A Sample of calculations for incident angle and corresponding parameters.

d (m)	γ (deg)	θ (deg)	φ (deg)	R (m)	α (deg)
20	50	90	0.0	20.0	40.0
20	50	99	9.0	23.6	49.0
20	50	111	21.0	33.9	61.0
20	50	117	27.0	44.0	67.0
20	50	129	39.0	103.3	79.0
20	50	135	45.0	248.6	85.0

The variation of incident angles with range for two values of 'γ' has been plotted and is shown in Figure 9.

The following can be observed from Table 1 and the graphs of Figure 9:

- The behaviour of change of incident angle for the sloping surface at a distance 'd' from the scanner (Figure 8) is the same as in the case of horizontal and sloping surfaces above (Figures 5 and 7), i.e. it approaches asymptotically to 90°.
- With an increase in surface slope, incident angle decreases, and so the scanner should be placed optimally away from the surface, keeping in view other geometrical parameters.

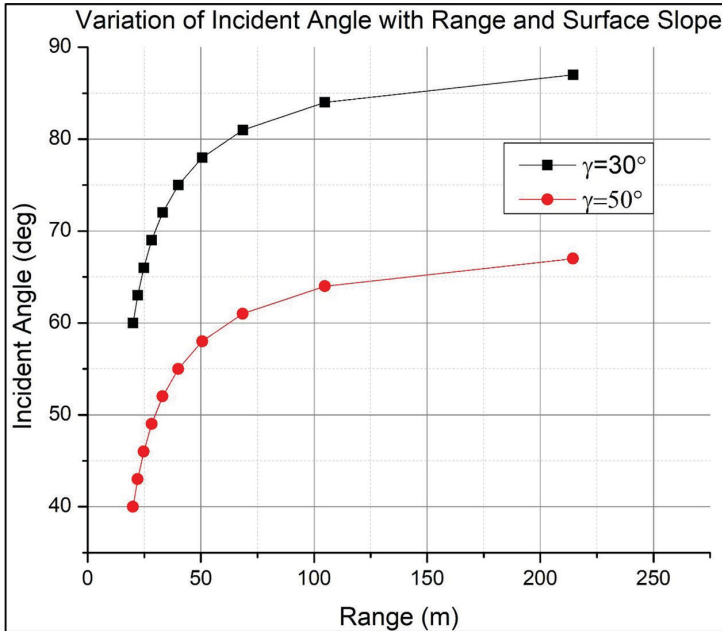


Figure 9: Incident angle variation for the sloping surface at a distance, $d = 20$ m from the scanner.

5 BEAM FOOT PRINT MODELLING AND ITS EFFECTS

Laser beam width is considered one of the intrinsic properties of the scanner, affecting positional uncertainty and spatial resolution. As explained above that the apparent location of the range observation is along the centerline of the emitted beam, but the actual point location cannot be predicted since it could lie anywhere within the projected beam footprint.

5.1 Beam Foot Print Size on Horizontal Surface

Assuming range observation along the centreline of the beam, its footprint size can be modelled as in Figure 10.

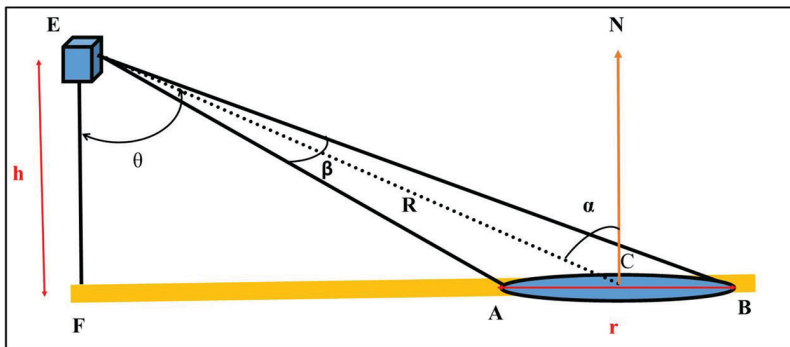


Figure 10: Schematic layout of TLS beam footprint for the horizontal surface.

The footprint of the laser beam away from TLS will be like an ellipse, as shown in Figure 10. The major axis being the most critical will be modelled here. Let 'β' denotes the beam divergence, 'r' as the major axis of elliptical footprint and rest terminologies are as already explained in previous sections. In this case, the angle 'α' is the same as the scanning angle 'θ'.

By sine law in ΔAEC,

$$AC = \frac{R \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right)} \tag{8}$$

Similarly, in ΔBEC:

$$CB = \frac{R \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left(\theta + \frac{\beta}{2} \right)} \tag{9}$$

Therefore, the length of the major axis will be AB = AC + CB, which after trigonometric simplifications, becomes;

$$AB = r = \frac{R \cos \theta \sin \beta}{\cos^2 \frac{\beta}{2} - \sin^2 \theta} \tag{10}$$

Which in terms of instrument height 'h' can be written as:

$$r = \frac{h \sin \beta}{\cos^2 \frac{\beta}{2} - \sin^2 \theta} \quad \text{where} \quad h = R \cos \theta \tag{11}$$

For h = 1.6 m, θ = 85°, β = 7.33335E-05 radians, the values of 'R' and 'r' can be calculated using Equation (11) as 18.4 m and 15.5 mm respectively.

The variation of major axis length 'r' is plotted against the range 'R' for instrument height of 1.6 m and beam divergence of β = 0.0042017° (Topcon, 2019), is as depicted in Figure 11.

From Figure 11, it can be seen that at a range of 100 m, the length of the major axis of the elliptical footprint of the laser beam is approximately 475 mm. Since for horizontal surface, there is no significant change in the height of ground points, and also there is no question of detection of any small object during DTM creation, so there is no effect of footprint size in final DTM which means that a range of 100 m or more for the horizontal surface is acceptable for DTM generation. But for the detection of objects, the size of the major axis has to be less than or equal to half of the object size. Similarly, the beam footprint can be modelled for sloping surface using the terminologies used in Figures 5 and 6.

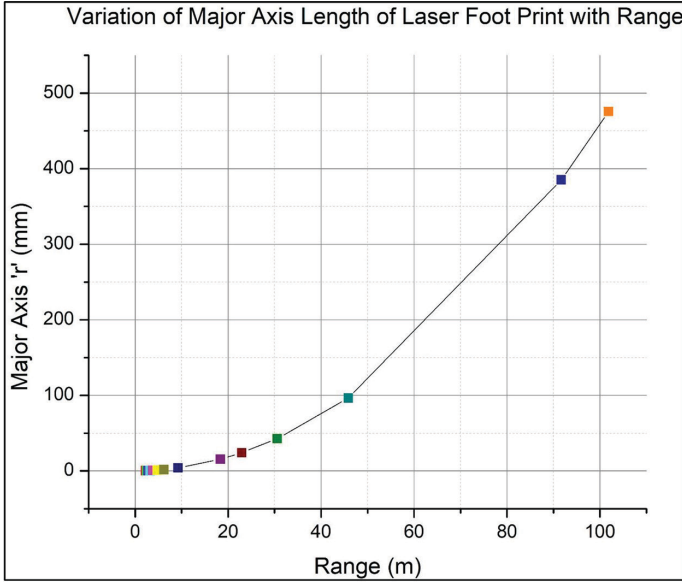


Figure 11: Variation of major axis length of elliptical footprint with range for the horizontal surface.

5.2 Beam Foot Print Size on Vertical and Inclined Surfaces

The elliptical footprint size ‘AB’ of the laser beam on an inclined surface at any distance ‘d’ from the scanner can be modelled using the visualized schematic diagram shown in Figure 12.

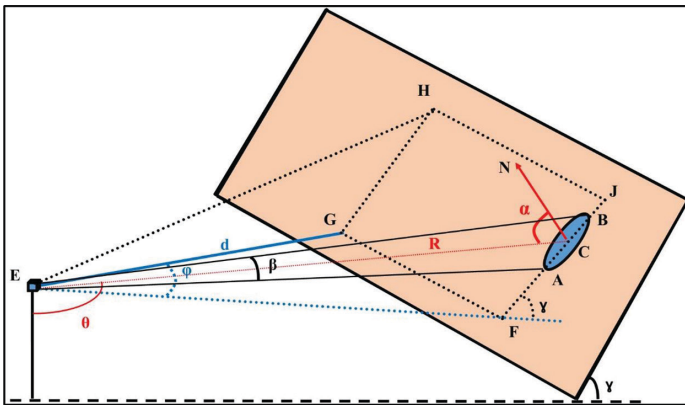


Figure 12: Schematic layout of laser beam footprint on an inclined surface. Modified from (Mahmood *et al.*, 2020).

All terminologies have already been explained in previous sections. Different angles in different triangles and subsequent steps are as explained below. By sine law in ΔAEC and ΔBEC :

$$\frac{AC}{\sin \frac{\beta}{2}} = \frac{R}{\sin \left\{ 90^\circ + \left(\theta - \gamma - \frac{\beta}{2} \right) \right\}} \rightarrow AC = \frac{R \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left(\theta - \gamma - \frac{\beta}{2} \right)} \tag{12}$$

$$\frac{CB}{\sin \frac{\beta}{2}} = \frac{R}{\sin \left\{ 90^\circ - \left(\theta - \gamma + \frac{\beta}{2} \right) \right\}} \rightarrow CB = \frac{R \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left(\theta - \gamma + \frac{\beta}{2} \right)} \tag{13}$$

$$\text{Hence } AB = AC + CB \rightarrow AB = \frac{R \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left(\theta - \gamma - \frac{\beta}{2} \right)} + \frac{R \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left(\theta - \gamma + \frac{\beta}{2} \right)} \tag{14}$$

$$AB = \left[\frac{R \cos(\theta - \gamma) \sin \beta}{\cos^2 \frac{\beta}{2} - \sin^2(\theta - \gamma)} \right] \tag{15}$$

where 'R' can be calculated from ΔEFC using sine law as:

$$\text{'R' can be calculated from } \Delta EFC \text{ using sine law as } \rightarrow R = \frac{d \sin \gamma}{\cos \varphi \cos(\theta - \gamma)} \tag{16}$$

Equations (15) and (16) can be used for vertical surface by substituting $\gamma = 90^\circ$ and reduces to:

$$AB = \left[\frac{R \sin \theta \sin \beta}{\cos^2 \frac{\beta}{2} - \cos^2 \theta} \right] \quad \text{and} \quad R = \frac{d}{\cos \varphi \sin \theta} \tag{17}$$

As a confirmatory check on the authenticity of Equations (15) to (17), for vertical surface at incident angle of 0° i.e. when $\theta = 90^\circ$, $\gamma = 90^\circ$, and $\varphi = 0^\circ$, these equations becomes;

$$AB = \left[\frac{R \sin \beta}{\cos^2 \frac{\beta}{2}} \right] \quad \text{and} \quad R = d \tag{18}$$

$$\text{After simplification } AB = \frac{d * 2 \sin \frac{\beta}{2} \cos \frac{\beta}{2}}{\cos^2 \frac{\beta}{2}} \rightarrow AB = 2d \tan \frac{\beta}{2} \tag{19}$$

Equation (19) confirms the correctness of Equations (15) to (17) for footprint size. Also, as per the specifications of Topcon TLS model GLS 2000 (Topcon, 2019), the spot size is less than or equal to 11 mm at a range of 150 m. By substituting the values of $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\gamma = 90^\circ$, $\beta = 0.0042017^\circ$ and $d = 150$ m in Equations (15) and (16), the value of 'AB' comes out is 11 mm, which further confirms the validity of the model. It should be noted that only the major axis has been modelled being more in length, and if at some value of it, its effect on data is acceptable, then the minor axis will definitely be acceptable, being shorter in length.

The plots of range versus footprint major axis from Equations (17) for the vertical surface at $d = 30$ m with parameters representing lines GH and GF of Figure 13 are the same and is shown in Figure 13a, whereas the graph for the same quantities with parameters representing line GJ is shown in Figure 13b.

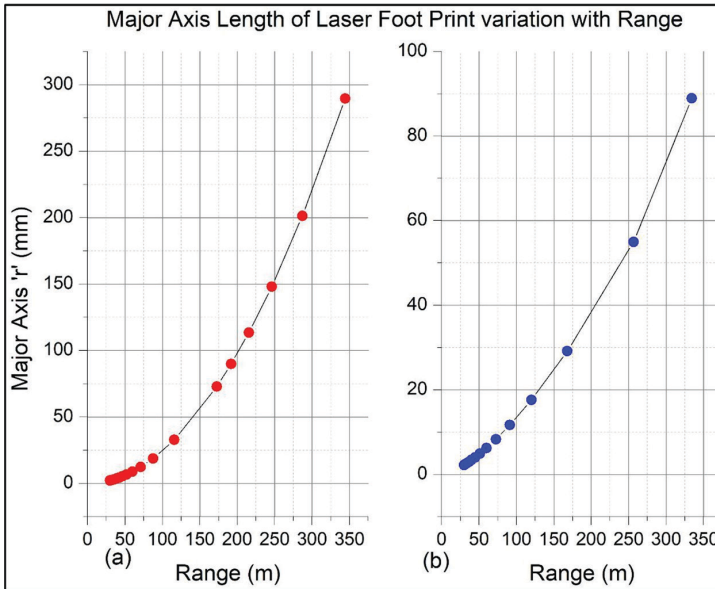


Figure 13: Variation of laser beam footprint major axis length with range for vertical surface for $d = 30$ m (a) along lines GH and GF (b) along line GJ of Figure 12.

For vertical surface at a distance $d = 30$ m from the scanner, the maximum length of the major axis of beam footprint is approximately 290 mm at a range near 350 m. But this depends on the distance ‘ d ’ of the scanner from the vertical surface. It is also seen from Figures 11 and 13 that the variation behaviour of footprint size with range is the same for horizontal and vertical surfaces except for the difference in corresponding values. With the models, it is possible to calculate footprint size for any configuration of parameters related to the surface depicted in Figure 12.

6 EFFICACY OF MODELS

For identification of any object in FoV, the distance between adjacent laser beam footprints must be less than or equal to half of the dimension of an object. It should also be noted that in laser scans, object identification also depends on the size of the beam footprint. If the footprint size is larger than the object dimension, the object will not be identifiable or could not be mapped. Thus for any object to be identifiable in the scan, the two criteria must be fulfilled, firstly the interspacing of adjacent points should be smaller than object size, and secondly, the footprint size should also be smaller than the object dimension. As an example, during the scanning of the façade of a building, as shown in Figure 14, the surveyor can adjust the location of the scanner for the LOD required.

If it is required to map/locate the railings present on the building façade marked in a red circle whose blow up is depicted on the right side of Figure 14, a surveyor needs to measure the parameters ‘ d ’, ‘ ϕ ’, ‘ θ ’ and ‘ R ’ and then can use relevant equations as in this case, equation 17 to calculate the laser footprint size. By comparing the size of footprint and railing size, the surveyor can decide whether the railing will be mapped or not and then readjust the scanner location. It should be noted that for mapping any object, the footprint should be less than the dimension of the object. Thus the models proposed could be used

beforehand to calculate the footprint size and then relocate the scanner if necessary. This paper aims to study the effect of incident angle and footprint size on precision in 3D surveying, so it will be studied in the next paragraphs, and object identification using these models will follow in future.

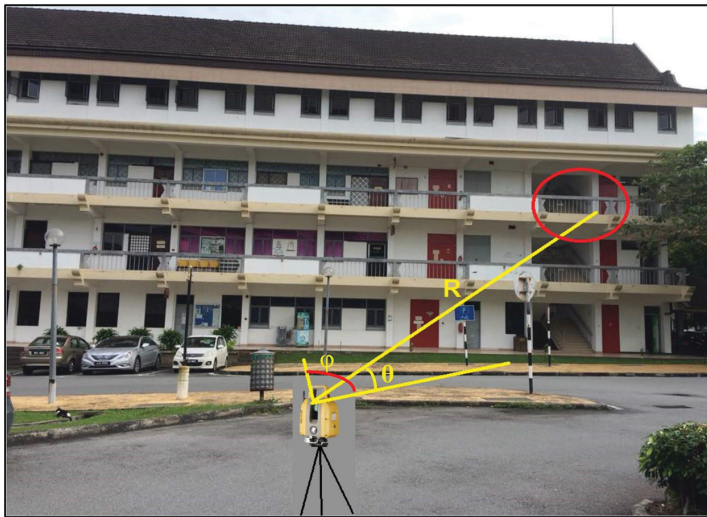


Figure 14: Planning for Locating a TLS for Surveying Required LOD. Adapted from (Mahmood et al., 2020).

7 PRACTICAL REALIZATION OF INCIDENT ANGLE AND FOOTPRINT SIZE

Investigating the effects of incident angle and laser footprint size on point cloud product, i.e. the DTM through practical experimentation, is explained in the following paragraphs.

7.1 Experimental Setup

In contrast to typical laboratory tests, it was intended to investigate the effects of incident angle on the point cloud on the natural landscape, which is the main focus of this study, i.e. topographic surveying. The biggest challenge was to design the test in the natural environment in such a way so that errors from other sources should either be avoided or annulled during processing, and only effects of incident angle could be studied. The main sources of errors in focus were due to range and registration/georeferencing processes. The test site intended was a vertical wall or nearly vertical slope having a minimum of 100 m clear field of view so as to find incident angle effects with more than 95 % confidence level from a minimum of two different ranges. This type of natural slopes or walls were available but were devoid of the intended field of view for scanning. The only site available was a small portion of the side slope of football ground having a 50 m of the field of view, as shown in Figure 15.

The portion of slope selected for the test is about 10 m x 20 m in size as marked in Figure 15(b), having a slope of approximately 26° . The site was thoroughly cleaned of any debris, and also the grass was cut to almost zero levels so as to avoid any errors resulting from these in DTM. For marking the locations of scanning and prism stations, a small nail in a wooden wedge was used, as shown in Figure 15(c) to minimize the error due to location displacement. The scanning setup consists of the scanning site marked with a black rectangle and seven scanning stations marked with numbers from 1 to 7 in Figure 16.

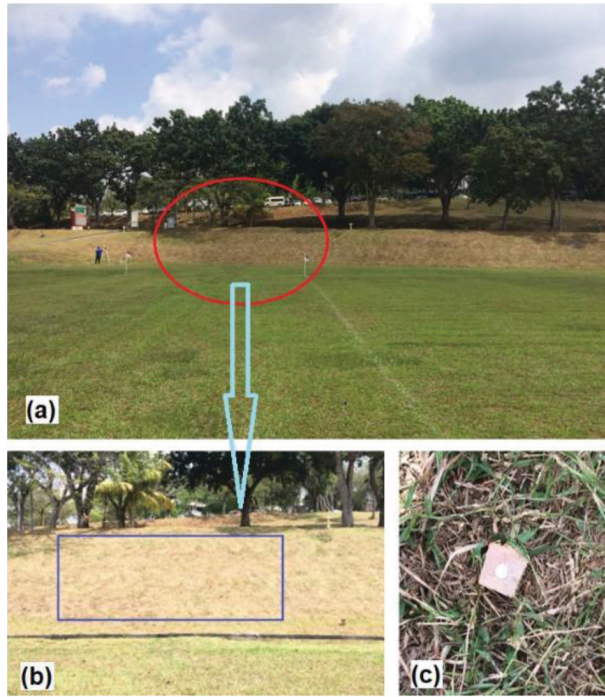


Figure 15: Test site for incident angle effects inside UTM, Skudai.

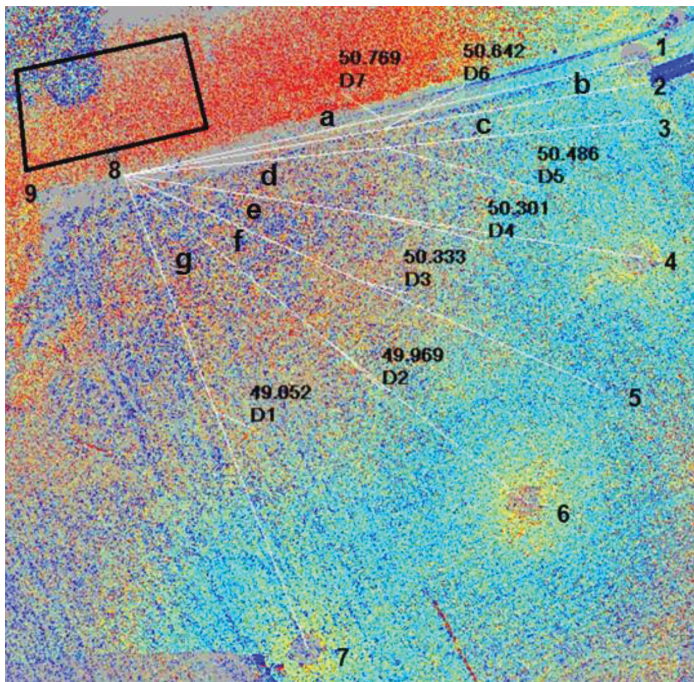


Figure 16: Scanning locations for investigation of effects of incident angle.

Figure 16 represents the sloping surface that was scanned from scanner locations 1 to 7 which resulted in different incident angles. A small patch of the scanned surface near '8' was taken, and DTMs generated for all scan locations. Base DTM was taken from location '7' because of the least incident angle among seven scanning locations, and DTMs resulting from scan locations other than '7' were subtracted from it to see the incident angle effects.

Figure 16 has been generated from the original point cloud using ScanMaster software from scanning stations 1, 4, 6 and 7. Point cloud from scanning locations 2, 3 and 5 are not displayed to make occluded areas of other scanning locations visible in the figure. The main theme behind this experimental setup was to scan the target area from a location to have the maximum possible incident angle and at the same time to keep other sources of error as minimum as possible. All scanning locations from 1 to 7 were manually measured using measuring tape from location '8', which is almost in the centre of the bottom line of the rectangular scanned location, to remove any error due to range difference. All distances from scanning stations to location '8' are measured and annotated using ScanMaster software. It can be seen that the range difference is approximately within 1.5 m distance which is so small that it will result in an equal contribution of error due to range, if any, in final products, which will be eliminated during DTM differences.

Angles between lines joining scanner locations '1' to '7' to location '8' are marked as alphabets from 'a' to 'g' and are also measured using ScanMaster software and are as shown in Table 3.

Table 2: Incident angles relative to scanned locations.

Angle ID as in Figure 16	Average Incident Angle with Rectangular Patch centre line (deg)
a	86.3
b	83.4
c	79.4
d	64.3
e	49.2
f	34.1
g	3.4

The narrow scanning angles coupled with the slope of rectangular location results in average incident angles ranging from approximately 4° to 87°. In order to reduce the error due to resolution, all scanning was carried out using a high resolution of 6.3 mm at 10 m.

7.2 Data Acquisition and Processing

To minimize the errors due to registration/georeferencing, all scan locations were referred to the position at location '9', which is slightly on one side of the rectangular patch. The scanner was initially placed at location '9', and coordinates of all scanning locations were measured using prisms at scanning locations relative to arbitrary coordinates of location '9'. Subsequently, the scanner was replaced with a prism at location '9', which acted as backsight for all scanning locations. After data collection, all scans were registered to location '9' using the technique of foresight backsight registration through ScanMaster software. The quality of registration was checked from 'back sight error' and 'occupation errors', which were below mm level.

The small rectangular portion, as mentioned in Figure 16, was cropped from all scans, and new clouds were created. All DTMs were generated using the topo to raster tool of ArcMap, which uses iterative finite difference interpolation technique, an optimized version of local interpolation methods like inverse distance weighted, etc. This is designed for the creation of hydrologically correct DEMs and is based on the ANUDEM program developed by (Hutchinson et al., 2011). The reason for choosing this technique is that it interpolates elevation values for a raster under such constraints, ensuring an output of connected drainage structures and the correct representation of break lines. The constraint of drainage enforcement attempts to remove all sinks or depressions because these are generally errors, since sinks are rare in natural landscapes. A sample DTM from location ‘7’ is as shown in Figure 17.

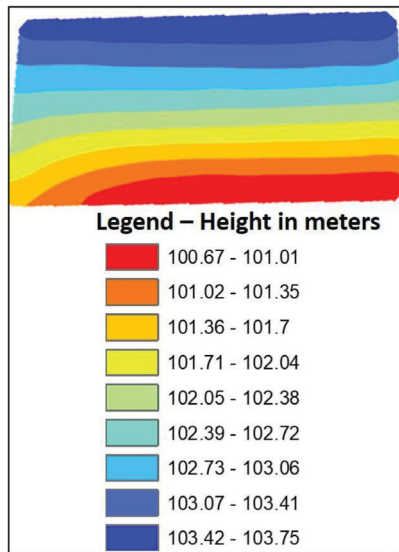


Figure 17: DTM of a small rectangular segment from location 7.

7.3 Results and Analysis

Before creating the DTMs from cropped rectangular area point clouds of all seven locations, the number of points of all cropped scans was noted one by one from ScanMaster software (Table 4).

Table 3: Number of points from different scan locations.

Scanning Location	Number of Points of cropped Scan	Average Incident Angle with Rectangular Patch centre line (deg)
1	7759	86.3
2	10560	83.4
3	13972	79.4
4	24710	64.3
5	31958	49.2
6	37991	34.1
7	41946	3.4

It can be seen that as the scan angle decreases, i.e. incident angle increases, the number of points decreases. The decreasing pattern of individual points with respect to the increase in incident angle is as shown in Figure 18.

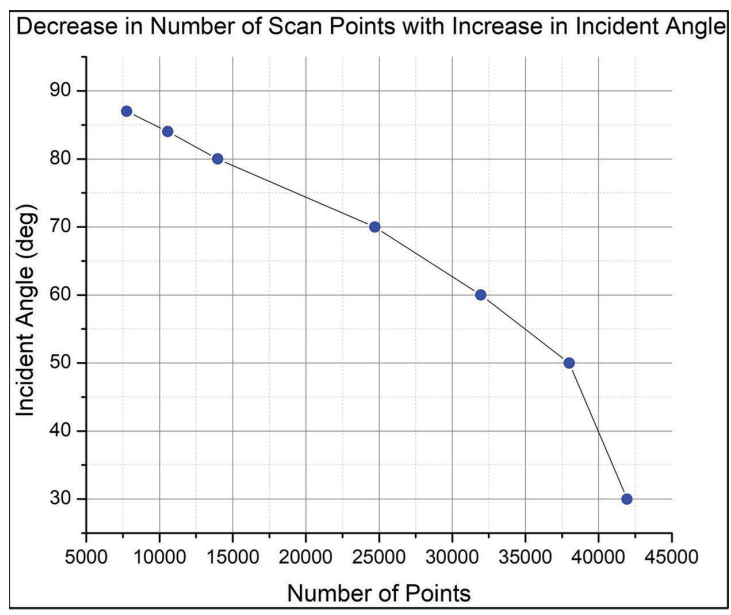


Figure 18: Variation of the number of scan points with change in incident angle.

It can be noted from Figure 18 that the incident angle and the corresponding number of scan points are inversely proportional and are also almost linearly related to each other. The regression analysis rendered the value of Multiple R as 0.964, which means that both incident angle and number of points are strongly linearly correlated. The decrease in the number of points with an increase in incident angle depends on the surface roughness. Smooth surfaces will lose more points as compared to rough surfaces. It can be explained in any of the following ways:

- a. There may be no return signal at a large incident angle and smooth surface at all due to a large reflection angle.
- b. There may be less energy reflected back and detected as the noise at a large incident angle and rough surface because of lower intensity than a threshold.
- c. In the case of a rougher surface, reflected energy might be re-reflected in another direction due to the masking effect.

To quantify the error contribution due to incident angle, seven DTMs were created. The DTM of scanning location number '7' was used as the base DTM because of the least incident angle. All other six DTMs were subtracted using the raster algebra tool of ArcMap (Table 5).

Column 2 of Table 5 depicts the mean difference between DTMs which can be termed the mean error because it can be presumed that DTM generated from scanning location having minimum incident angle will be the most accurate. In this case, DTM from location '7' has the least incident angle. This is because all other error sources contribute in the same amount that cancels during difference except

the incident angle effect. It can also be noted from column 2 of Table 5 that the mean difference values become negative, which means that with an increase in incident angle, the error in the height of DTM also increases (Figure 19).

Table 4: Mean error and standard deviation in DTM differences.

DTM Difference	Mean Error (m)	Standard Deviation (σ) (m)
Loc 7 – Loc 6	0.0069	0.0095
Loc 7 – Loc 5	-0.0119	0.0043
Loc 7 – Loc 4	-0.0023	0.0095
Loc 7 – Loc 3	-0.0070	0.0119
Loc 7 – Loc 2	-0.0134	0.0102
Loc 7 – Loc 1	-0.0257	0.0146

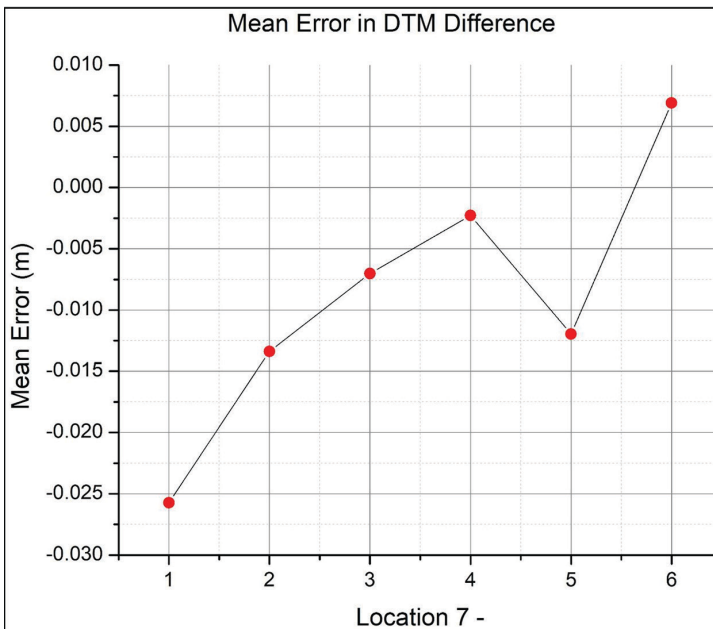


Figure 19: Variation in mean difference (error) among DTMs scanned from different incident angles.

Figure 19 depicts that the error in DTMs increases as the incident angle increases, and both are strongly related linearly if DTM of location 5 is considered as an outlier. If location 5 is not considered an outlier, then the regression analysis renders the value of Multiple R as 0.834 and is considered an outlier than 0.973. In both cases, however, incident angle and error can be considered linearly related.

8 CONCLUSION

Terrestrial laser scanners are widely used in fulfilling diverse type of surveying needs. This paper presented a scan planning approach to minimize the effects of incident angle and laser beam footprint size on both error budget and LOD. This approach has been realized using sensor models that relate different

scan geometry parameters and helps in scanner placement, which ensures required LOD and precision beforehand, leading to optimized scan planning considering the effects of laser beam incident angle and footprint size. The mathematical models have been developed for different surface configurations and verified mathematically by deriving one model from other surface models by changing the parameters. The combined error budget due to incident angle and laser footprint size has been studied on the natural landscape inside the UTM campus.

These models can be used beforehand as guiding principles for positioning the TLS in such a way to ensure accurate data collection at user-specified LOD, which will result in an economic approach ensuring completeness, reduced data and collection time and less processing time. It is recommended that these models may be incorporated in the next generations of TLS so as to get optimized data instead of redundant data due to fear of incompleteness.

Literature and references:

- Abdullah, C. C. K., Baharuddin, N., Ariff, M., Majid, Z., Lau, C., Yusoff, A., Idris, K., Aspuri, A. (2017). Integration of Point Clouds Dataset from Different Sensors. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W3. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w3-9-2017>
- Bruce, D., Crosby, C., Carr, S. (2016). TLS Field Methods Manual. https://d32ogogmya1dw8.cloudfront.net/files/.../tls_field_methods_manual.v2.pdf, accessed 5. 7. 2019.
- Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., Chen, Y. (2018). Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors*, 18 (5), 1641. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18051641>
- Daliga, K., urałowicz, Z. (2016). Examination method of the effect of the incidence angle of laser beam on distance measurement accuracy to surfaces with different colour and roughness. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22 (3), 420–436. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702016000300024>
- Hutchinson, M. F., Xu, T., Stein, J. A. (2011). Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. *Geomorphometry*, 2011, 19–22. <https://gisandscience.com/2011/12/15/recent-progress-in-the-anudem-elevation-gridding-procedure>, accessed 3. 5. 2019.
- Kaasalainen, S., Jaakkola, A., Kaasalainen, M., Krooks, A., Kukko, A. (2011). Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods. *Remote Sensing*, 3 (10), 2207–2221. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs3102207>
- Kandrot, S. M. (2013). Coastal Monitoring: A New Approach. *Chimera*. <http://research.ucc.ie/journals/chimera/2013/00/kandrot/09/en>, accessed 15. 11. 2019.
- Kersten, T. P., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H. (2008). Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. Paper presented at the Integrating Generations FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden. www.fig.net/pub/fig2008/papers/ts02d/ts02d_01_%20mechelke_etal_2785.pdf, accessed on 11. 2. 2019.
- Kersten, T. P., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H. (2009). Methods for geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanning systems. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2009 (4), 301–315. DOI: <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2009/0023>
- Kościuk, J. (2012). Modern 3D scanning in modelling, documentation and conservation of architectural heritage. *Wiadomości Konserwatorskie*, 82–88. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPK6-0025-0071>, accessed 21. 3. 2019.
- Lichti, D., Franke, J., Cannell, W., Wheeler, K. (2005b). The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys. *Journal of Spatial Science*, 50 (1), 75–89. DOI: <https://doi.org/10.1080/14498596.2005.9635039>
- Lichti, D. D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM–CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (5), 307–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004>
- Lichti, D. D. (2010a). A review of geometric models and self-calibration methods for terrestrial laser scanners. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 16 (1). <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/17242>, accessed 18. 2. 2020.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., Tipdecho, T. (2005a). Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks. *Journal of Surveying Engineering*, 131 (4), 135–142. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9453\(2005\)131:4\(135\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9453(2005)131:4(135))
- Luh, L. C., Setan, H., Majid, Z., Chong, A. K., an, Z. (2014). High resolution survey for topographic surveying. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012067>
- Mahmood, S., Majid, Z., Idris, K. M. (2020). Terrestrial LiDAR sensor modeling towards optimal scan location and spatial density planning for 3D surveying. *Applied Geomatics*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00320-9>
- Mahmood, S., Majid, Z., Idris, K. M., Zainuddin, K. (2018). Geometric and Radiometric Characteristics of Terrestrial Laser Scanning—A Review. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 118 (24). <https://acadpubl.eu/hub/2018-118-24/1/43.pdf>, accessed 10. 12. 2019.
- Pinkerton, M. (2011). Terrestrial laser scanning for mainstream land surveying. *Survey Quarterly*, 300 (65), 7. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/fs03d/fs03d_pinkerton_3814.pdf, accessed 20. 10. 2018.

Reshetyuk, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral Dissertation, KTH. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A139761&dsid=452>, accessed 21. 3. 2017.

Russhakim, N. A. S., Ariff, M. F. M., Majid, Z., Idris, K. M., Darwin, N., Abbas, M. A., Zainuddin, K., Yusoff, A. R. (2019). The suitability of terrestrial laser scanning for building survey and mapping applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-663-2019>

Schaer, P., Skaloud, J., Landtwing, S., Legat, K. (2007). Accuracy estimation for laser point cloud including scanning geometry. Paper presented at the Mobile Mapping Symposium 2007, Padova. <https://infoscience.epfl.ch/record/116146>, accessed 18. 6. 2017.

Sheng, Y. (2008). Quantifying the size of a lidar footprint: A set of generalized equations. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5 (3), 419–422. DOI: <https://doi.org/10.1109/lgrs.2008.916978>

Soudarissanane, Lindenbergh, Gorte, B. (2008). Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up. Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 3–11. <https://www.researchgate.net/publication/229037307>, accessed 10. 11. 2019.

Soudarissanane, Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66 (4), 389–399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005>

Soudarissanane, S. (2016). The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry. TU Delft, Delft University of Technology. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:b7ae0bd3-23b8-4a8a-9b7d-5e494ebb54e5>, accessed 20. 6. 2019.

Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2009). Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points. Paper presented at the Proceedings ISPRS Workshop Laserscanning 2009, 1-2 Sept 2009, Paris, France. <https://gnss.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/21/2016/04/Soudarissanane2009Incidence.pdf>, accessed 25. 9. 2019.

Tan, K., Cheng, X. (2016). Correction of incidence angle and distance effects on TLS intensity data based on reference targets. Remote Sensing, 8 (3), 251. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8030251>

Topcon. (2019). Topcon Positioning Systems, Inc. <https://www.topconpositioning.com/mass-data-and-volume-collection/laser-scanners/gls-2000> accessed on 06-05-2019

Voegtle, T., Wakaluk, S. (2009). Effects on the measurements of the terrestrial laser scanner HDS 6000 (Leica) caused by different object materials. Proceedings of ISPRS Work, 38, 68–74. https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/3-W8/papers/68_laserscanning09.pdf, accessed 15. 10. 2017.

Zámečnicková, M., Neuner, H., Pegritz, S., Sonleitner, R. (2015). Investigation on the influence of the incidence angle on the reflectorless distance measurement of a terrestrial laser scanner. Vermessung & Geoinformation, 2 (3).



Mahmood S., bin Majid Z., bin M. Idris K., Hamid Chaudhry M. (2021). Influence of incident angle and laser footprint on precision and level of detail in terrestrial laser scanner measurements. Geodetski vestnik, 65 (2), 260–281.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.260-281>

Corresponding author: Assist. Prof. Dr. Sajid Mahmood
 National University of Sciences and Technology (NUST),
 College of Civil Engineering
 Campus Risalpur 24080, Pakistan
 e-mail: smehmood@mce.nust.edu

Dr. Khairulnizam bin M. Idris
 University Technology Malaysia, Faculty of Built Environment
 and Surveying
 81310 Johor Bahru, Malaysia
 e-mail: khairulnizam@utm.my

Assoc. Prof. Dr. Zulkepli bin Majid
 University Technology Malaysia, Faculty of Built Environment
 and Surveying
 81310 Johor Bahru, Malaysia
 e-mail: zulkeplimajid@utm.my

Assist. Prof. Muhammad Hamid Chaudhry
 GIS Center at the University of the Punjab Lahore, Pakistan
 e-mail: hamid.gis@pu.edu.pk

OCENA RAZLIK MED VIŠINSKIM DATUMOM JUŽNE AFRIKE IN DATUMOM MEDNARODNEGA VIŠINSKEGA REFERENČNEGA SISTEMA

ESTIMATION OF VERTICAL DATUM OFFSET FOR THE SOUTH AFRICAN VERTICAL DATUM, IN RELATION TO THE INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE SYSTEM

Matthews Siphwe Mphuthi, Patroba Achola Odera

UDK: 528.242
 Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
 Prispelo: 24. 2. 2021
 Sprejeto: 28. 4. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.282-297
 SCIENTIFIC ARTICLE
 Received: 24. 2. 2021
 Accepted: 28. 4. 2021

IZVLEČEK

Razlika in vrednost težnostnega potenciala v Južni Afriki se ocenjujeta na štirih temeljnih referenčnih točkah, in sicer s primerjavo z mednarodnim višinskim referenčnim sistemom IHRS. Predvideva se, da obstajajo razlike med višinskim datumom Južne Afrike (W_P) in globalnim višinskim datumom (W_0). V raziskavi je bil uporabljen pristop rešitve problema geodetskega robnega pogoja za eno točko (angl. geodetic boundary value problem – GBVP), kjer smo z Brunsovo enačbo ocenili vrednost anomalije višine po teoriji Molodenskega iz tako imenovanega motečega potenciala (T_P). Na obravnavanih mareografih v Južni Afriki je težnostni potencial odstopal od globalnih referenčnih vrednostih za naslednje vrednosti: Cape Town $0,589 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, Port Elizabeth $-1,993 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, East London $-2,593 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, Durban $2,154 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. Odmik višinskega datuma na obravnavanih točkah glede na mednarodni višinski referenčni sistem je tako 6,013 centimetra v Cape Townu, $-20,347$ centimetra v Port Elisabethu, $-26,478$ centimetra v East Londonu in 21,996 centimetra v Durbanu. Ugotovljene razlike se lahko uporabljajo za uskladitev višinskega datuma Južne Afrike z mednarodnim višinskim referenčnim sistemom.

ABSTRACT

The vertical offset and the geopotential value over South Africa is estimated on the four fundamental benchmarks in relation to the international height reference system (IHRS). It is estimated to obtain discrepancies between the South African local vertical datum (W_P) and the global vertical datum (W_0). A single-point-based geodetic boundary value problem (GBVP) approach was used following Molodensky theory for estimating the height anomalies from the disturbing potential (T_P) using Brun's formula. The gravity potential at each tide gauge benchmark (TGMB) in South Africa deviates from the potential of the global reference surface by $0.589, -1.993, -2.593$ and $2.154 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ for Cape Town, Port Elizabeth, East London and Durban, respectively. The corresponding vertical datum offsets between the international height reference system and the four fundamental benchmarks over South Africa are 6.013, -20.347 , -26.478 , and 21.996 cm for Cape Town, Port Elizabeth, East London and Durban, respectively. These offsets can be used for the unification of the South African vertical datum at the four tide gauge benchmarks in a manner that is consistent to the international height reference system.

KLJUČNE BESEDE

geoid, kvazigeoid, težnostni potencial, višinski datum, moteči potencial, anomalija višine

KEY WORDS

Geoid, quasigeoid, geopotential, vertical datum, disturbing potential, height anomaly

1 INTRODUCTION

The resolution for the development of an international height reference system (IHRs) was released by the International Association of Geodesy (IAG) in July 2015 (IAG, 2015). The IHRs was developed to provide a global vertical reference system of high precision. This will provide support in monitoring global changes, geohazards, and prediction of several Earth's science phenomena. The IHRs is defined by an equipotential surface of the Earth's gravity field realised by a conventional value, $W_0 = 62,636,853.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (Burša et al., 2001; 2004; Sánchez et al., 2016; Sánchez and Sideris, 2017) Australian Height Datum 1971 (AHD 71). However, a number of recent researches have shown that this value may have increased by $1 - 2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (Rülke et al., 2013; Albarici et al., 2019). The value of W_0 in practice depends on the realisation of the vertical datum (Amjadiparvar et al., 2013) we compute the offsets of three height datums in North America (NAVD88, CGVD28 and Nov07).

The South African land levelling datum (LLD) has been providing the reference frame for a variety of practical applications, such as the construction of roads, the development of infrastructures and a variety of developmental activities in the country. The South African LLD was realized over a century ago, based on mean sea level (MSL) observations from four tide gauge stations (situated in Cape Town, Port Elizabeth, East London, Durban). It was connected to the national benchmark network by primary levelling networks, which were adjusted independently. In addition, heights measured above LLD are classified as spheroidal orthometric height system. This height system provides a poor approximation of the true orthometric height system. However, it is estimated to be more closer to the normal height system (Merry, 1985).

In this height system, the spheroidal orthometric correction was applied to all the height differences from the primary levelling networks, computed from normal gravity. However, the orthometric correction was computed for only four levelling loops around Cape Town, meaning that the actual gravity measurements were taken for only those loops (Merry, 1977, 1985; Wonnacott & Merry, 2011). The spheropotential number is used in this height system instead of the geopotential number which is derived from the normal gravity (Odumosu et al., 2015).

The South African vertical datum suffer from a number of problems such as; numerous errors from the levelling networks and tide gauge sea level measurements, instability due to high MSL variability, and it was established from inconsistent levelling networks, just to mention a few. In addition, it has been established by Merry (2003) that the South African LLD is 15–20 cm below the mean sea level. Therefore, in order for South Africa to meet the standards of the global vertical datum, the South African vertical datum must be unified and also be defined by a gravity potential value. This will provide South Africa with a modernised vertical datum.

To achieve this, the South African vertical datum should be defined by means of a geoid model; this approach will solve some of the problems associated with the LLD. The main focus of this study is to estimate the vertical datum offset for the South African vertical datum, at the four fundamental benchmarks, in relation to the IHRs. The national primary levelling networks can be adjusted using geopotential difference instead of height differences. This is conducted by studying the relationship between gravity potential and height in the vertical datum definition and realisation. The growing need for a global refer-

ence surface requires a unification of all existing vertical datums around the world, which is a scientific problem of high practical significance (Sánchez et al., 2018).

Unification of height systems requires the determination of the transformation parameters or datum offsets between existing vertical datums, each of which is defined with a fundamental surface of zero elevation. Vertical datum offset is an existing discrepancy between datums; it can be estimated from GPS/levelling data of benchmarks on land, GPS/levelling data of tide gauge stations, Global Geopotential Models (GGM) and a precise geoid model (Singh, 2018). Presently, it is common practice for a vertical reference surface to be defined by a gravimetric geoid model.

Traditionally, national and regional height datums were defined with respect to a selected network of tide gauge stations; and height networks were established by terrestrial techniques such as spirit levelling. Height differences (dH) measured during levelling are scaled by gravity (g) to determine the difference in gravity potential (dW , also known as a change in gravity potential), this relationship can be expressed as follows (Heiskanen & Moritz, 1967):

$$dW = g \times dH \quad (1)$$

The difference in gravity potential is known as geopotential number (C_p), in this study, it is defined as the difference between the constant gravity potential at the global geoid (W_0) and the gravity potential at the point P on the local geoid (W_p) it can be expressed as follows (Heiskanen & Moritz, 1967):

$$C_p = W_0 - W_p = -\int_0^P dW = -\int_0^P g dH, \quad (2)$$

If W_p and W_0 could be measured and defined respectively, an ideal height system could be determined. The negative sign in the equation above indicates that an increase in height invokes a decrease in gravity potential. It should also be noted that over a short or in regions of low gravitational variation, the geopotential number will be insignificant (Heiskanen and Moritz, 1967).

2 VERTICAL DATUM

The geoid is commonly known as the surface of equal geopotential; the numerical value of the geopotential of the global geoid has been determined from analysis of satellite tracking data, GPS/levelling data and satellite altimetry measurements. A vertical reference frame is a reference network consisting of a set of physical reference points, whose vertical coordinates refer to the reference system measured within that frame. Meanwhile, the vertical datum is defined as the zero-level surface (Sánchez and Sideris, 2017; Zhang et al., 2020). A local vertical datum is usually defined by a fundamental benchmark/s or point/s of origin, related to the mean sea level at tide gauge station(s).

Over the years, many different types of vertical datums have been used. To name a few examples of datums and their related height system, heights derived from GPS observations are referred to as ellipsoidal heights (b) have as a datum the ellipsoidal surface, the orthometric height (H^0) derived from traditional spirit levelling measured above a geoidal surface, the normal height (H^N) measured above a quasigeoid surface, and the spheroidal orthometric height (H^{LLD}) measured above the land levelling datum (LLD), as depicted in Figure 1.

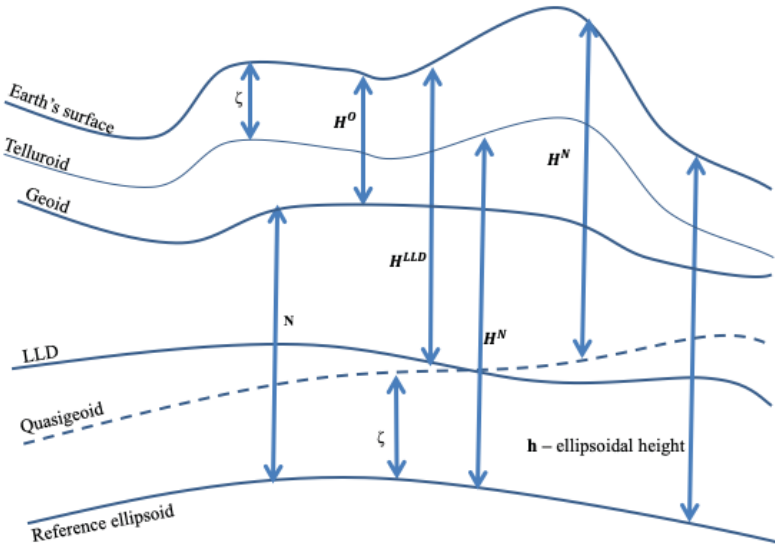


Figure 1: Relationship between common height systems.

Ellipsoidal heights are geometric quantities with no physical meaning; it is only practical if the information of the geoid undulation (N) is available and also it is measured solely from space-based instruments. However, orthometric and normal heights are the most commonly used height systems, in which height differences can be represented in potential differences, as defined in section 1. These height systems can be expressed as follows (Heiskanen & Moritz, 1967):

$$H^o = \frac{C_p}{\bar{g}} = \frac{W_0 - W_p}{\bar{g}}; H^N = \frac{C_p}{\bar{\gamma}} = \frac{W_0 - W_p}{\bar{\gamma}} \tag{3}$$

where \bar{g} and $\bar{\gamma}$ are mean actual and normal gravity along actual and normal plumb-lines through point P (on the Earth surface), respectively. In general, national vertical datums are defined by selecting fundamental Benchmark/s at coastal tide gauge stations and setting $N = 0$, $W_0 = W_p$, and then they are connected to the national levelling network.

In this study, vertical datum offsets are estimated using a single-point-based Geodetic Boundary Value Problem (GBVP) approach following Molodensky’s theory for estimating the height anomalies from the disturbing potential using Bruns’s formula. The vertical datum offset is only estimated at the four fundamental benchmarks to be able to unify the South African vertical datum to the global vertical datum.

3 THEORETICAL BACKGROUND

The relationship between the gravity potential (W) and the corresponding normal potential of the reference ellipsoid can be determined from estimating the disturbing potential (ζ), this can be expressed as follows (Heiskanen and Moritz, 1967):

$$W_p = U_p + T_p \tag{4}$$

The normal potential at a point on the Earth surface is determined as follows (Heiskanen & Moritz, 1967):

$$U_p = U_0 + \frac{\partial U_0}{\partial h} h_p, \tag{5}$$

Where h_p represents an ellipsoidal height at the point P , U_0 is the normal gravity potential obtained directly from the World Geodetic System 1984 (WGS84) reference ellipsoid and $\frac{\partial U_0}{\partial h}$ is the gradient of normal gravity potential. In this study, a single-point-based GBVP approach is employed to determine the vertical datum offset for height system unification. This is done by following Molodensky theory for estimating the height anomalies from the disturbing potential using Bruns's formula.

The disturbing potential at the point P is computed from the spherical harmonic coefficients of the latest Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE) based GGM (to degree 300) TIM6 (Zingerle et al., 2019) "abstract": "TIM_R6e is an extended version of the satellite-only global gravity field model TIM_R6 (Brockmann et al., 2019. According to Odera (2019), the GOCE-based GGM, especially the timewise solution (TIM) has the best agreement with the latest gravimetric quasigeoid model over South Africa. It was integrated with the residual gravity anomalies ($\Delta g - \Delta g_{GGM}$) using Stokes's integral while residual terrain model (RTM) was used to cater for the contribution of short wavelength component. This was done by evaluating Stokes's integral of the gravity anomalies combined with the Molodensky G_1 term. The solution to the GBVP at point P in terms of the disturbing potential is expressed as follows (Torge & Muller, 2012), this is usually referred to as the remove-compute-restore procedure,

$$T_p = T_{GGM} + \frac{R}{4\pi} \int \int_{\sigma} (\Delta g - \Delta g_{GGM} + G_1) \times S(\psi) d\sigma + T_{RTM} \tag{6}$$

Where, R – a mean radius of the Earth, Δg – free-air gravity anomalies, Δg_{GGM} – gravity anomalies generated by the GGM, ψ – geocentric angle/ spherical distance, $d\sigma$ – an infinitesimal surface element of the unit sphere σ (corresponding to ellipsoidal coordinates), $S(\psi)$ Stokes's function, T_{GGM} – long-wavelength component of the disturbing potential. The Stokes's Kernel function can be computed as expressed by equation (7) (Heiskanen & Moritz, 1967), the Stokes' integral in equation (6) was evaluated using the technique described in detail by Yun (1999) (see section 3, eq. 6), a brief elaboration of the technique for computer programming was given by Bracewell (1978).

$$S(\psi) = \frac{1}{\sin(\frac{\psi}{2})} - 6 \sin \frac{\psi}{2} + 1 - 5 \cos \psi - 3 \cos \psi \cdot \ln \left[\sin \frac{\psi}{2} + \sin^2 \frac{\psi}{2} \right]. \tag{7}$$

The contribution of the RTM to the disturbing potential (T_{RTM}) was evaluated as follows (Forsberg, 1985):

$$T_{RTM} = -\pi G \rho H_p^2 - \frac{G \rho R^2}{6} \int \int_{\sigma} \frac{(H^3 - H_p^3)}{l^3} d\sigma \tag{8}$$

Where H and H_p are the heights of roving point and computation point, respectively, G – is the Newtons gravitational constant, ρ – is the topographic mass density distribution, $\rho = 2670 \text{ kg.m}^{-3}$, and l – is the planar distance between the computational point and the roving points. The residual gravity anomalies are in principle converted into residual disturbing potential, using 2D Fourier transform with a spherical approximation of the RTM terrain correction integration (Yun, 1999). Moreover, a digital elevation model (DEM) from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) at 90 m spacing was used to evaluate the Molodensky G_1 term (see equation (6)), this can be expressed as follow (McCubbine et al., 2018):

$$G_1 = \frac{\Delta\varphi\Delta\lambda}{2\pi} \left[(H \cdot \Delta g) \times \frac{1}{\ell^3} - H_p \left(\Delta g \times \frac{1}{\ell^3} \right) \right] \tag{9}$$

Where $\Delta\varphi$ and $\Delta\lambda$ are the differences in latitude and longitude, respectively. The G_1 term contribution was only computed for the central $1^\circ \times 1^\circ$ grid of the $4^\circ \times 4^\circ$ gravity data grid in order to handle/reduce any edge effect. It is used as a terrain correction on the computed height anomaly. Furthermore, it is more significant in mountainous regions and relies heavily upon a detailed, accurate DEM (McCubbine et al., 2018). A computer program designed from *python* was used for this computation. Therefore substituting equations (5) and (6) into equation (4) to determine the gravity potential at a point P on the local vertical datum yields,

$$W_p = U_0 + \frac{\partial U_0}{\partial h} h_p + T_{GGM} + \frac{R}{4\pi} \int_{\sigma} (\Delta g - \Delta g_{GGM} + G_1) \times S(\psi) d\sigma + T_{RTM} \tag{10}$$

Hence the gravity potential difference between global and local vertical reference (LLD) surfaces at a point P can be expressed as,

$$\delta W_p = W_0 - W_p = W_0 - [U_0 + \frac{\partial U_0}{\partial h} h_p + T_{GGM} + \frac{R}{4\pi} \int_{\sigma} (\Delta g - \Delta g_{GGM} + G_1) \times S(\psi) d\sigma + T_{RTM}], \tag{11}$$

The h_p in this case, refers to the ellipsoidal height at the tide gauge benchmark (TGBM). The height anomaly at the TGBM is estimated from Brun's formula, and the gradient of the normal potential gives an approximation of the normal gravity value $\left(\frac{\partial U_0}{\partial h} \approx \gamma \right)$. Therefore, equation (11) can be expressed as:

$$\delta W_p = W_0 - W_p = (W_0 - U_0) + \gamma(h_p - H_p^{LLD} - \zeta_{GGM} - \zeta_{res} - \zeta_{RTM}), \tag{12}$$

where ζ_{GGM} gives the contribution of the GGM, expressed as,

$$\zeta_{GGM} = \zeta_0 + \frac{GM_g}{r\gamma} \sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{a_g}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{n,m} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{n,m} \sin m\lambda) \times \bar{P}_{n,m}(\sin \bar{\varphi}) \tag{13}$$

where GM_g – is the gravity mass constant of the geopotential model in m^3s^{-2} defined from the geodetic model, γ – is normal gravity in ms^{-2} , r – is radial distance to the computational point in m , a_g – is the semi-major axis of the geopotential model, $\Delta \bar{C}_{n,m}$ – is the difference between the fully normalised harmonic coefficient $\bar{C}_{n,m}$ and harmonic coefficient generated by the normal gravity field $C_{n,m}^*$, $\Delta \bar{S}_{n,m}$ – is the difference between the fully normalised spherical harmonic coefficient $\bar{S}_{n,m}$ and the harmonic coefficient generated by the normal gravity field $S_{n,m}^*$, n and m are the degree and order for a geopotential model, $\bar{P}_{n,m}$ – is the fully normalised harmonics Legendre function, $\bar{\varphi}$ – is geocentric latitude of the computation point, λ – is the geodetic longitude of the computation point.

The ζ_0 represents a zero-degree harmonic term to the GGM geoid undulations with respect to a specific reference ellipsoid, $\zeta_0 = \frac{GM_g - GM_0}{R\gamma} - \frac{W_0 - U_0}{\gamma}$ (Heiskanen & Moritz, 1967). The contribution of residual gravity anomalies (Δg) with the effect of the GGM and the terrain removed (ζ_{res}) is expressed as,

$$\zeta_{res} = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\sigma} (\Delta g - \Delta g_{GGM} + G_1) \times S(\psi) d\sigma \tag{14}$$

The contribution of the indirect effect on the height anomaly at the point $P(\zeta_{RTM})$ is given by Amos (2007) as,

$$\zeta_{RTM} = \frac{-\pi G \rho H_p^2}{\gamma} - \frac{G \rho R^2}{6\gamma} \iint_{\sigma} \frac{(H^3 - H_p^3)}{\ell^3} d\sigma \tag{15}$$

After estimation of the local gravity potential value W_p , using equation (10), the vertical datum offsets on the South African vertical datum in relation to the IHRS was computed as,

$$\delta\zeta_p = \frac{\delta W_p}{\gamma_p} \tag{16}$$

This offset will provide an adjustment factor for the South African vertical datum to the IHRS. A unified vertical datum will provide a reference surface for engineering projects across countries, flooding control initiatives, plate tectonic movements determination and analysis, coastal hazard studies, unification of national gravity anomaly database, and improvement of the continental geoid, amongst other applications.

4 DATA AND METHODS

Several different data set were made available for the purpose of this study. The land and marine gravity data over South Africa were provided by the South African Council for Geoscience (SACGS) and Bureau Gravimetricque Internationale (BGI). However, the marine gravity data was coarse; it was supplemented with a global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 (Sandwell et al., 2014). Moreover, both the horizontal and vertical coordinates associated with the gravity data from SACGS and BGI are of low accuracy, as they have been interpolated from a 1:50000 map; this will introduce distortions on the resulting gravity anomalies.

The gravity data was screened for duplications using *Golden Surfer software*; the free-air gravity anomalies on the land gravity data range between -101.3 and 129.3 mGal with a mean and standard deviation of 16.3 and ± 31.1 mGal, respectively. The free-air gravity anomalies from the land gravity data were compared to the set of free-air gravity anomalies generated using the GOCE-based GGM (TIM6) harmonic coefficients (up to degree and order 300). Thereafter, a mean difference of -2.1 mGal with a standard deviation of ± 10.7 mGal was obtained.

The free-air gravity anomalies on the marine gravity data range between -97.5 and 115.7 mGal with a mean and standard deviation of 2.4 mGal and ± 30.4 mGal, respectively. The free-air gravity anomalies from the marine gravity data were compared to the set of free-air gravity anomalies generated using the GOCE-based GGM (TIM6) harmonic coefficients (up to degree and order 300). Thereafter, a mean difference of 11.8 mGal with a standard deviation of ± 17.5 mGal was obtained. The gravity data was limited to a $4^\circ \times 4^\circ$ grid around each TGBM to reduce computation time, as depicted in Figure 2.

The first-order gravity data have a maximum uncertainty of ± 1 mGal while the accuracy of the first-order levelling network in South Africa is estimated at $1.9\sqrt{Lmm}$, L being the distance of a levelling line in km. The GPS measurements of the TGBMs were collected by the Nation Geo-Spatial Information (NGI), South African government agency. The heights were determined using differential carrier-phase GPS measurements linked to the national network of permanent GPS stations, TrigNet. The coordinates are in the ITRF2008(20016.2) reference frame and refer to the WGS84 ellipsoid. The internal

accuracy of GPS coordinates is approximately ± 1 and ± 2 cm on the horizontal and vertical position, respectively (Odera, 2019). The differences between ellipsoidal and spheroidal heights are considered as height anomalies, as the South African LLD provides heights that are closer to the normal height system (Merry, 1985; Odera, 2019).

The SRTM data at 3 arc-second (90 m resolution) DEM was used for computation of the terrain effect (G_1 term). The DEM is uniform on the specified grid ($4^0 \times 4^0$) around each TGBM, as depicted in Figure 3 – Figure 6. The remove-restore method is used to compute the height anomalies of the TGBMs. The long-wavelength component of the disturbing potential was determined from the spherical harmonic coefficients of the latest GOCE-based GGM (TIM6 up to 300 degrees and order), and the medium wavelength component was determined from the gravity data residuals, using Stokes’s integral as described in the previous subsection. The residual terrain model (RTM) was used to cater for the contribution of the short-wavelength component. A computer program designed from *python* was used for this computation. The four fundamental tide gauge benchmarks located in Cape Town (TGBM_CPT), Port Elizabeth (TGBM_PEL), East London (TGBM_ELN), and Durban (TGBM_DBN) over South Africa are shown in Figure 2.

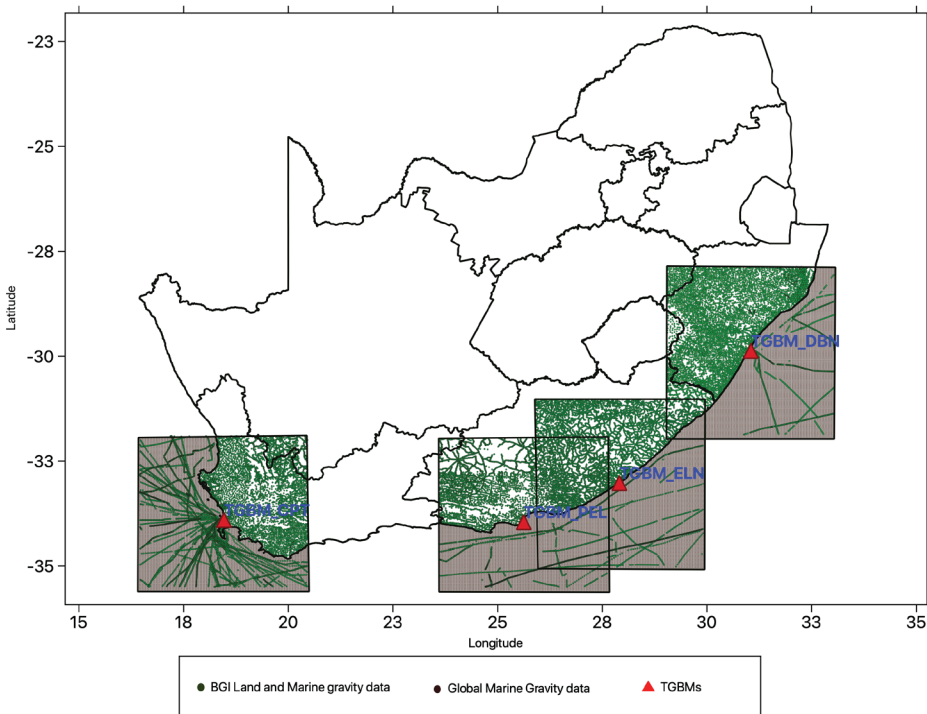


Figure 2: Distribution of the fundamental benchmarks over South Africa.

The elevation map round each TGBM was generated using DEM from SRTM90 to provide a terrain visualisation, as depicted in Figure 3 - Figure 6. A kriging interpolation method was used to generate contour maps because it is statistically more sophisticated and it allows identifying distortions in the data. Moreover, it was used to evaluate the contribution of the indirect effect on the height anomaly.

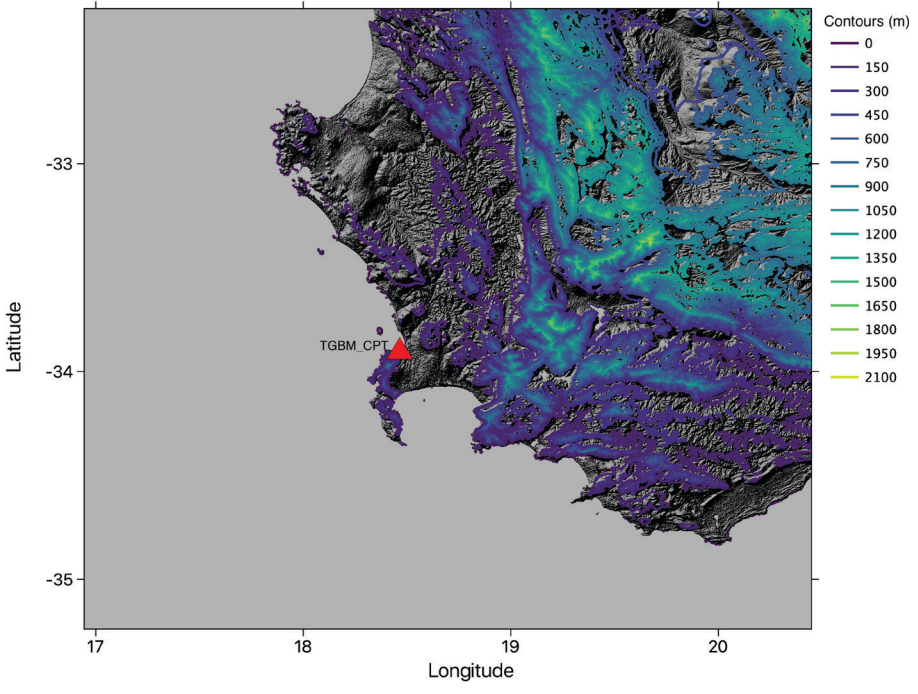


Figure 3: Elevation around Cape Town TGBM.

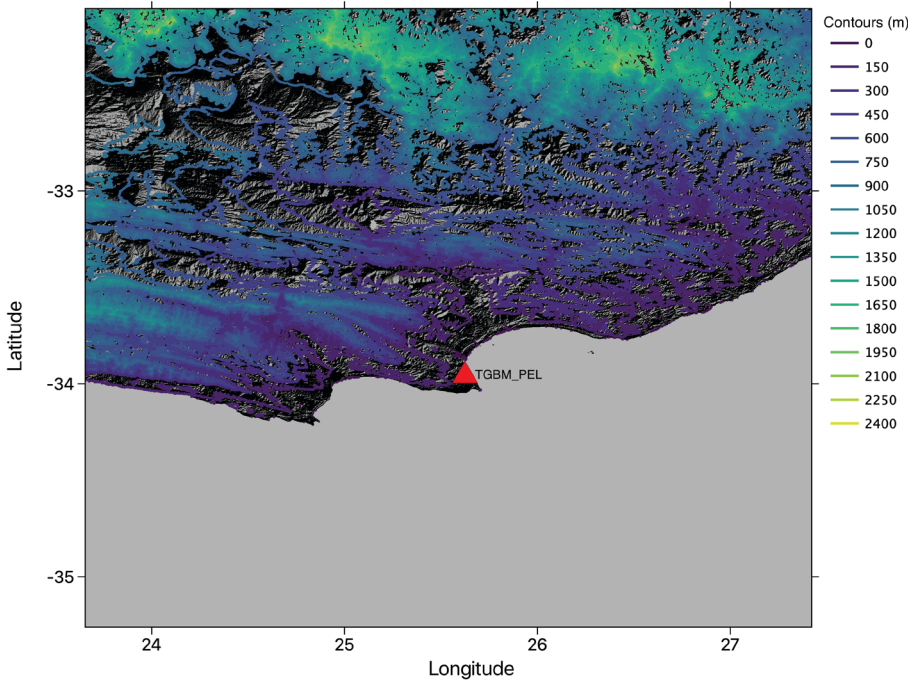


Figure 4: Elevation around Port Elizabeth TGBM.

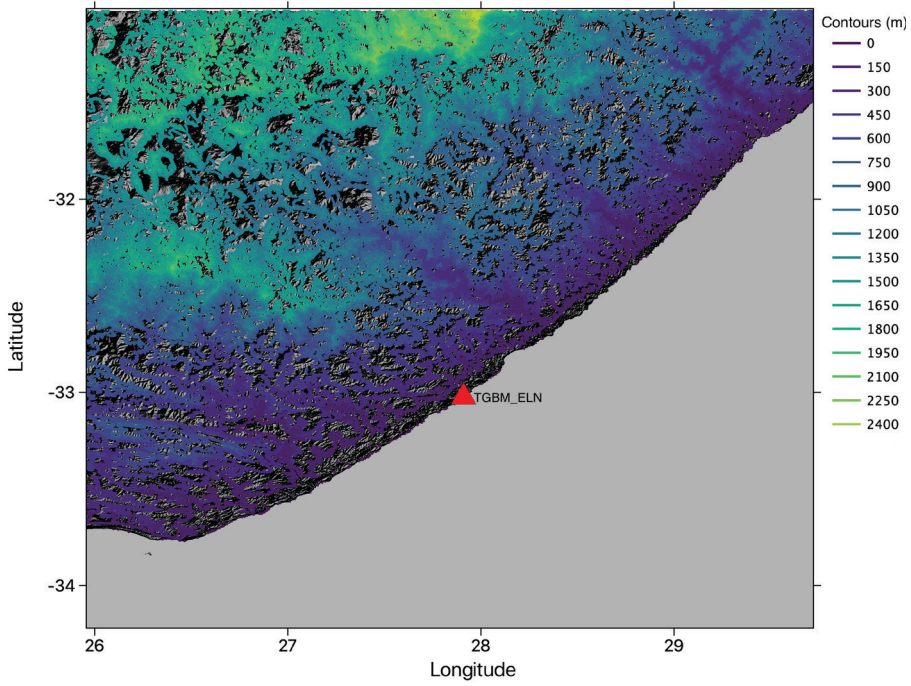


Figure 5: Elevation around East London TGBM.

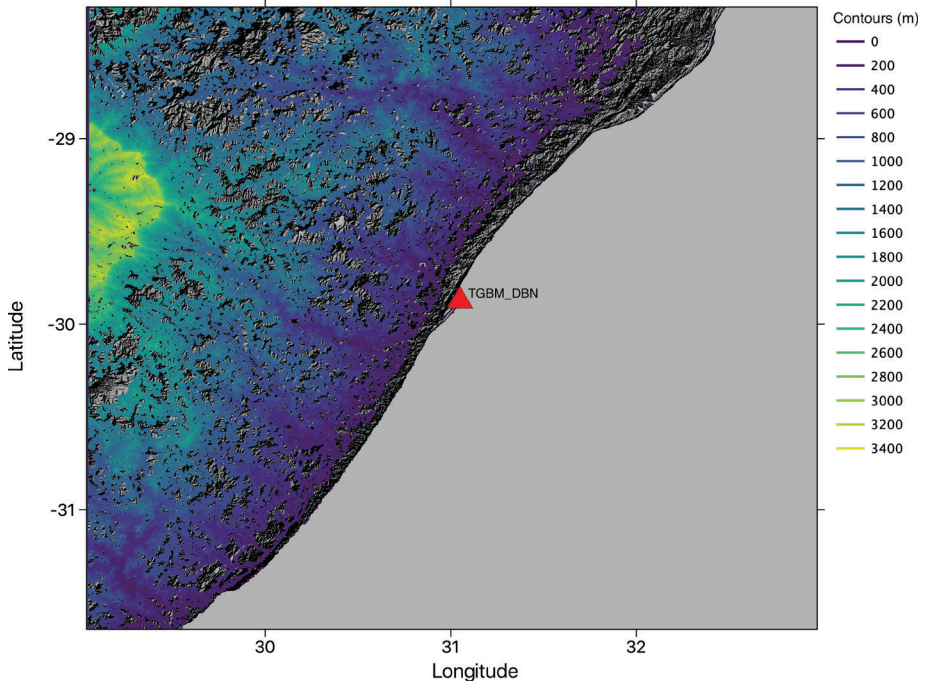


Figure 6: Elevation around Durban TGBM.

5 RESULTS AND DISCUSSION

The derived physical constant of the normal gravity potential for the WGS84 reference ellipsoid is $U_0 = 62636851.7146 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ as given by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). The gravity residuals used on Stokes integral, as expressed in equation (6), was determined from the gravity anomalies computed from the observed gravity data (Δg), the gravity anomalies generated by the coefficients of the spherical harmonics (Δg_{GGM}), from the GOCE based GGM and the Molodensky G_1 term determined from a convolution of heights with gravity anomalies. The residual gravity anomalies around each TGBM are as depicted in Figure 7 – Figure 11. A kriging gridding method on the *Golden Sufet software* was used to generate the contour maps, it produces a more accurate grid file, and it is a very flexible gridding method.

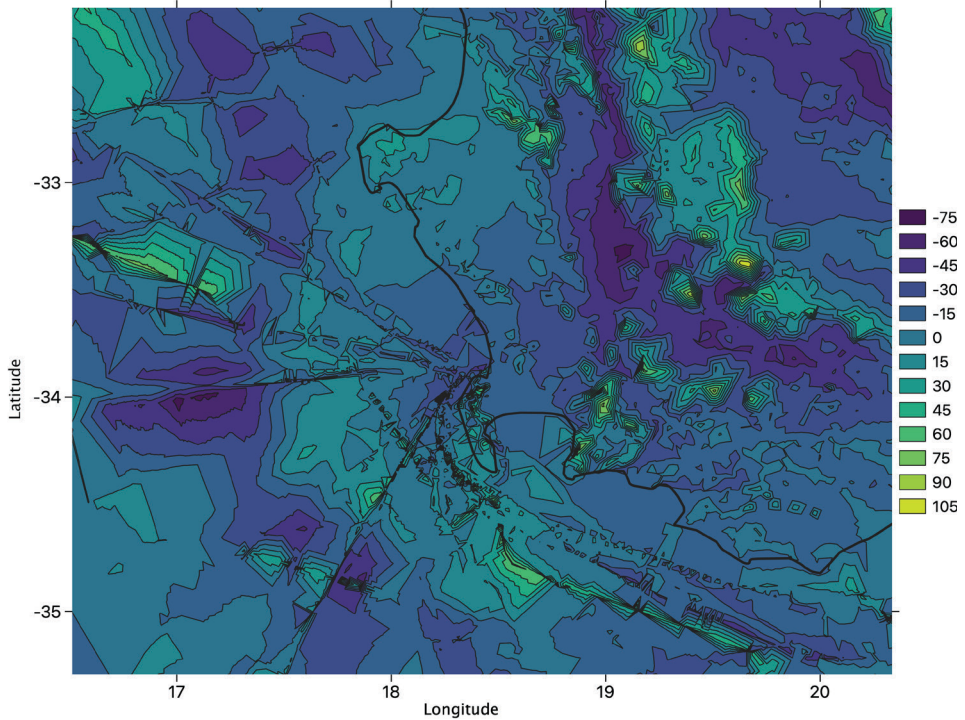


Figure 7: Residual gravity anomalies around Cape Town TGBM (units are in mGal).

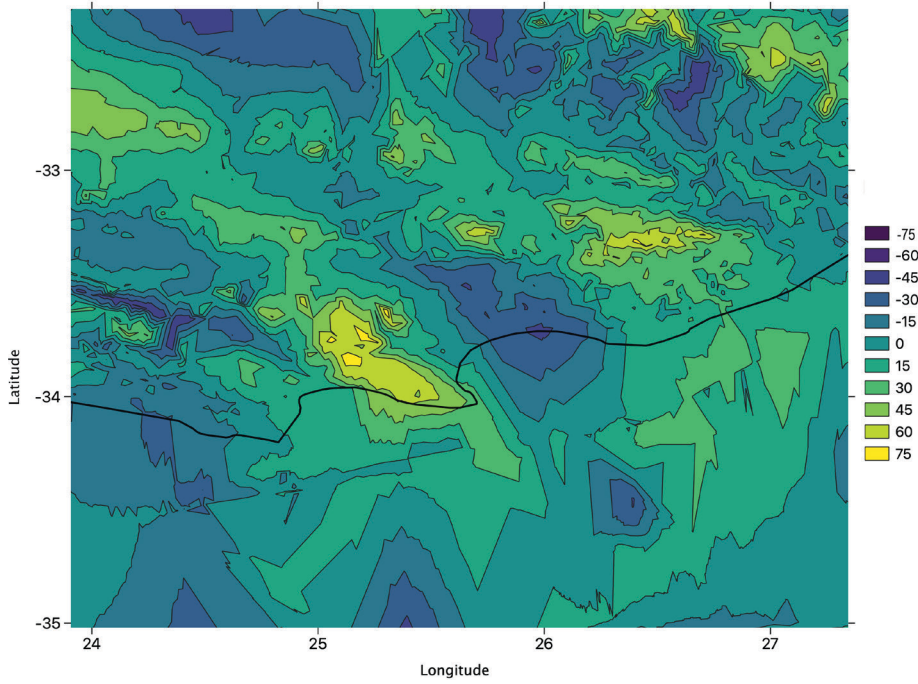


Figure 8: Residual gravity anomalies around Port Elizabeth TGBM (units are in mGal).

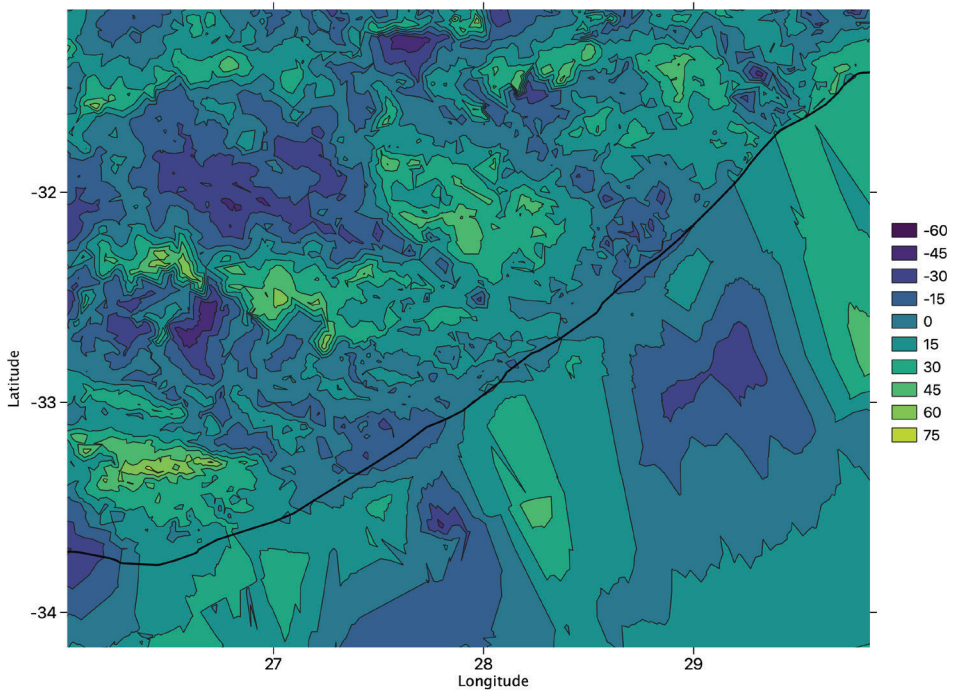


Figure 9: Residual gravity anomalies around East London TGBM (units are in mGal).

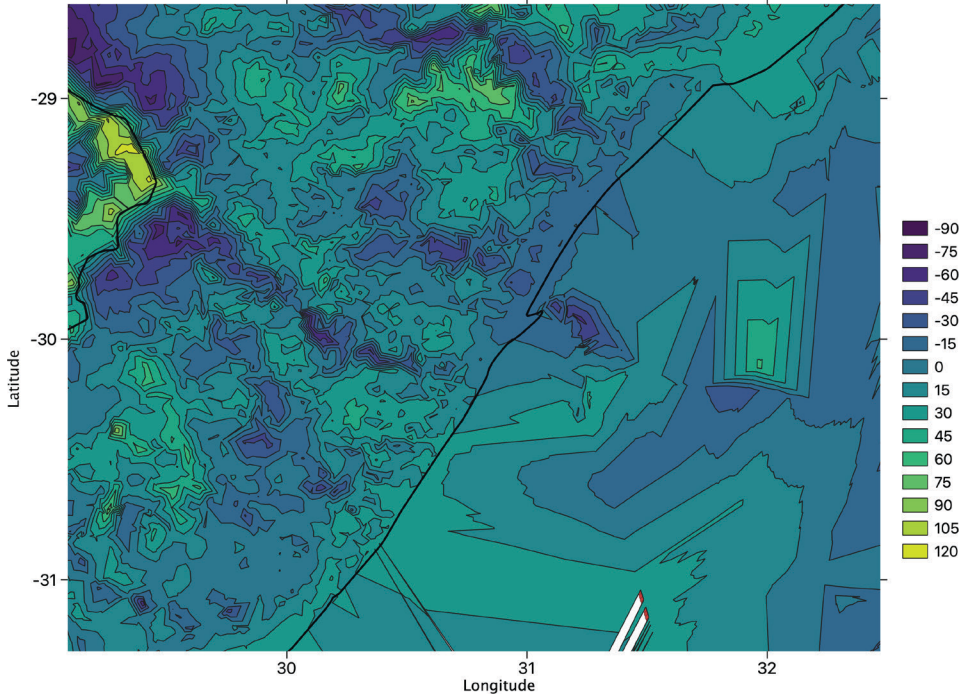


Figure 10: Residual gravity anomalies around Durban TGBM (units are in mGal).

As discussed in the previous section that the South African vertical datum is constrained to four TGBMs, the vertical datum offset is determined on the four fundamental benchmarks in relation to the IHRs, the estimated potential discrepancies are as depicted in Figure 11. The vertical datum offset at each TGBM was evaluated using equation (16), and the potential difference between the local and the global reference surface was evaluated using equation (12). The components involved in the computation of the vertical datum offset at each TGBM, are as illustrated in Table 1. Results of estimated offsets are also included in Table 1.

Table 1: Vertical datum offset parameters and estimated offset at each TGBM.

TGBM	$h_p(\text{m})$	$H_p^{LLD}(\text{m})$	$\zeta_{GGM}(\text{m})$	$\zeta_{res}(\text{m})$	$\zeta_{RTM}(\text{m})$	$W_p(\text{m}^2\text{s}^{-2})$	$\delta W_p(\text{m}^2\text{s}^{-2})$
CPT	34.423	3.6281	31.996	0.085	-1.519	62636852.811	0.589
PEL	31.487	4.2233	29.276	0.016	-1.997	62636855.393	-1.993
ELN	33.823	4.4153	30.642	0.018	-1.160	62636855.993	-2.593
DBN	32.678	4.3076	28.465	-0.010	-0.477	62636851.246	2.154

The gravity potential at each TGBM in South Africa deviates from the potential of the global reference surface by 0.589, -1.993, -2.593 and 2.154 m^2s^{-2} for Cape Town, Port Elizabeth, East London and Durban, respectively. These deviations are as depicted in Figure 11.

The corresponding vertical datum offset between the international height reference system and the four fundamental benchmarks over South Africa are 6.013, -20.347, -26.478, and 21.996 cm for Cape Town, Port Elizabeth, East London and Durban, respectively. These offsets can be used for the unification

of the South African datum at the four TGBMs in a manner that is consistent with the international height reference system. The estimated gravity potential on the four fundamental benchmarks are as illustrated in Table 1.

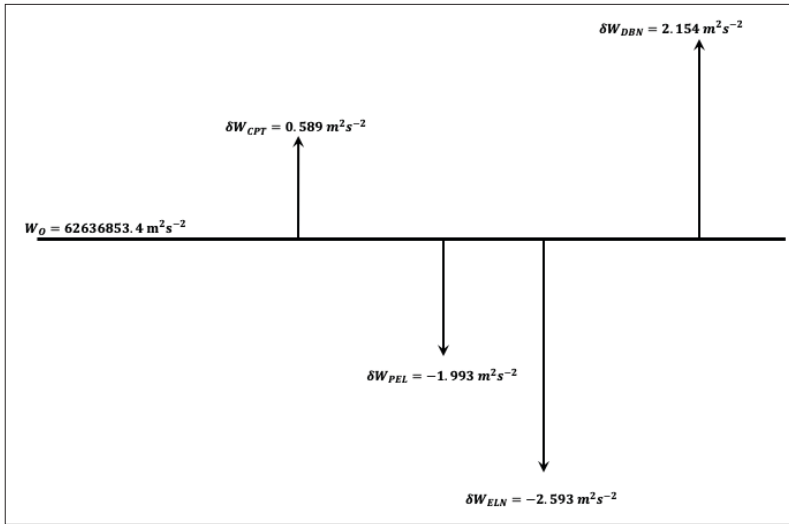


Figure 11: Vertical datum offset on the four TGBM in relation to the global vertical datum.

This forms part of the datum parameters, and it should be as reliable as possible. The quality of the fundamental benchmarks can be improved by being connected to the gravity data networks. The desired physical heights system can be deduced from geopotential values using equation (3). The advantages of using geopotential value for height determination is that there is no need to compute orthometric or normal corrections to the measured height differences, thus avoiding any approximations in the corrections and it is very easy to convert between height systems, as one does not have to compute a new set of corrections.

6 CONCLUSION

The vertical datum offset on the South African vertical datum in relation to the IHRS, has been estimated using the single-point-based GBVP solution at four TGBMs. The gravity data on a $4^0 \times 4^0$ grid around each fundamental benchmark was selected for the purpose of estimating their disturbing potential; this was performed in combination with the spherical harmonics coefficients from the GOCE based GGM, TIM-R6 (complete to 300 degrees and order).

The gravity potential at each TGBM in South Africa deviates from the potential of the global reference surface by 0.589, -1.993, -2.593 and 2.154 m^2s^{-2} for Cape Town, Port Elizabeth, East London and Durban, respectively. The corresponding vertical datum offset between the international height reference system and the four fundamental benchmarks over South Africa are 6.013, -20.347, -26.478, and 21.996 cm for Cape Town, Port Elizabeth, East London and Durban, respectively. This evaluation provides South Africa with a direct link to the IHRS and a positive step towards the South African vertical datum realisation and unification.

Acknowledgements

We are grateful to the Department of Rural Development and Land Reform (DRDLR) for the financial support granted through a postgraduate scholarship. The following organisations are appreciated for directly providing or making relevant data freely available on their websites; National Geo-Spatial Information (GPS/levelling and SAGEOID data), Bureau Gravimétrique International (land and marine gravity data), South African Council for Geoscience (terrestrial gravity data), United States Geological Survey (SRTM data). We are also grateful to the reviewers, for their comments and suggestions that have been used to improve the quality of the paper.

Literature and references:

- Albarici, F. L., Foroughi, I., Guimarães, G. D. N., Santos, M., Trabanco, J. (2019). A new perspective for physical heights in Brazil. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25 (1), 0–3. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000100001>
- Amjadiparvar, B., Rangelova, E. V., Sideris, M. G., Véronneau, M. (2013). North American height datums and their offsets: The effect of GOCE omission errors and systematic levelling effects. *Journal of Applied Geodesy*, 7(1):39–50. DOI: <https://doi.org/10.1515/jag-2012-0034>
- Amos, M. J. (2007). Quasigeoid Modelling in New Zealand to Unify Multiple Local Vertical Datums. Curtin University of Technology.
- Bracewell, R. (1978). *The Fourier Transform And Its Applications*. Third Edit ed. Singapore: McGraw-Hill Higher Book Co.
- Burša, M., Kouba, J., Müller, A., Raděj, K., True, S.A., Vatrč, V., Vojtišková, M. (2001). Determination of geopotential differences between local vertical datums and realization of a world height system. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 45 (2), 127–132. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021860126850>
- Burša, M., Kenyon, S., Kouba, J., Šíma, Z., Vatrč, V., Vojtišková, M. (2004). A global vertical reference frame based on four regional vertical datums. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 48 (3), 493–502. DOI: <https://doi.org/10.1023/b:sgeg.0000037468.48585.e6>
- Forsberg, R. (1985). Gravity field terrain effect computations by FFT. *Bull. Geodesique* 59, 39(1985), 342–360. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02521068>
- Heiskanen, W. A., Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy*. Freeman, San Francisco.
- IAG. (2015). Resolution (no 1) for the establishment of a global absolute gravity reference system. IAG – International Association of Geodesy, 39, 1–2. https://iag.dgf.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf.
- McCubbine, J. C., Featherstone, W. E., Brown, N. J. (2018). Error propagation for the Molodensky G 1 term. *Journal of Geodesy*, 93 (6), 889–898. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1211-6>
- Merry, C. L. (1977). Gravity and the South African height system. *The South African Survey Journal*, 16 (1), 44–53.
- Merry, C. L. (1985). Distortions in the South African levelling networks due to the influence of gravity. In *Proceedings, Eighth Conference of Southern African Surveyors*, Durban. 1–15.
- Merry, C. L. (2003). DEM-induced errors in developing a quasi-geoid model for Africa. *Journal of Geodesy*, 77 (9), 537–542. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-003-0353-2>
- Odera, P. A. (2019). Assessment of the latest generation GOCE-based global gravity field models using height and free-air gravity anomalies over South Africa. *Arabian Journal of Geosciences*, 12 (5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4337-9>
- Odumosu, J. O., Ajayi, O. G., Idowu, F. F., Adesina, E. A. (2015). Evaluation of the various orthometric height systems and the Nigerian scenario – A case study of Lagos State. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 30 (1), 46–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.09.002>
- Rülke, A., Liebsch, G., Sacher, M., Schäfer, U., Schirmer, U., Ihde, J. (2013). Unification of European height system realizations. *Journal of Geodetic Science*, 2 (4). DOI: <https://doi.org/10.2478/v10156-011-0048-1>
- Sánchez, L., Sideris, M. G. (2017). Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHR5). *Geophysical Journal International*, ggx025. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>
- Sánchez, J. L., de Freitas, S. R. C., Barzaghi, R. (2018). Offset evaluation of the ecuadorian vertical datum related to the IHR5. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 24 (4), 503–524. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702018000400031>
- Sánchez, L., Čunderlík, R., Dayoub, N., Mikula, K., Minarechová, Z., Šíma, Z., Vatrč, V., Vojtišková, M. (2016). A conventional value for the geoid reference potential W0. *Journal of Geodesy*, 90 (9), 815–835. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0913-x>
- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H. F., Garcia, E., Francis, R. (2014). New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346 (6205), 65–67. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
- Singh, S. K. (2018). Towards the modernization of Indian vertical datum. In *FIG Congress 2018 Embracing our smart world where the continents connect: enhancing the geospatial maturity of societies Istanbul, Turkey, May 6–11, 2018*. V. 0.
- Torge, W., Muller, J. (2012). *Geodesy*. 4th ed. Walter de Gruyter. Available: www.degruyter.com.
- Wonnacott, R., Merry, C. (2011). A New Vertical Datum for South Africa ? In *Conference Proceedings of the AfricaGEO*. 1–14.
- Yun, H. S. (1999). Precision geoid determination by spherical FFT in and around the Korean peninsula. *Earth, Planets and Space*, 51 (1), 13–18. DOI: <https://doi.org/10.1186/BF03352204>

Zhang, P., Bao, L., Guo, D., Wu, L., Li, Q., Liu, H., Xue, Z., Li, Z. (2020). Estimation of vertical datum parameters using the gbvp approach based on the combined global geopotential models. *Remote Sensing*, 12 (24), 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244137>.

Zingerle, P., Brockmann, J. M., Pail, R., Gruber, T., Willberg, M., Ince, E. S., Reißland, S. (2019). The polar extended gravity field model TIM_R6e. DOI: <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.005>



Siphiwe Mphuthi M., Achola Odera P. (2021). Estimation of vertical datum offset for the South African vertical datum, in relation to the international height reference system, 65 (2), 282-297.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.282-297>

Corresponding author: Matthews Siphiwe Mphuthi

*University of Cape Town, School of Architecture, Planning and Geomatics, Division of Geomatics
Private Bag X3, Rondebosch 7701, South Africa
e-mail: mphmat021@myuct.ac.za*

Patroba Achola Odera

*University of Cape Town, School of Architecture, Planning and Geomatics, Division of Geomatics
Private Bag X3, Rondebosch 7701, South Africa*

STALNA GEODETSKA ZNAMENJA KOT TEMELJ ZA DELOVANJE GEODETSKE STROKE

PERMANENT GEODETIC MARKS AS THE BASIS FOR SURVEYING PROFESSION

Mihaela Triglav Čekada, Katja Oven, Dalibor Radovan, Bojan Stopar, Božo Koler, Dušan Kogoj, Miran Kuhar, Anka Lisec, Oskar Sterle, Jurij Režek

1 UVOD

S poznavanjem različnih načinov stabilizacij stalnih geodetskih znamenj iz obdobja klasične geodetske izmere lahko ugotovimo njihov namen, torej za kakšno vrsto geodetske mreže gre, kdaj oziroma kdo jo je stabiliziral, če pa znamenje še stoji na isti lokaciji kot ob postavitvi, ga lahko uporabimo tudi za izmero. Geodezija je ena izmed tistih strok, ki za kakovostno delovanje v sodobnem času potrebuje povezavo med podatki, pridobljenimi s sodobnimi merskimi tehnologijami in metodami izmere, ter podatki, ki so bili izmerjeni v preteklosti. Omenimo le dva najpomembnejša primera, to so geodetske točke različnih geodetskih mrež, ki materializirajo različne koordinatne sisteme in so podlaga za vse dejavnosti, povezane s pozicioniranjem v prostoru, ter zemljiškokatastrska mejna znamenja, ki omogočajo pravno varstvo lastništva nepremičnin.

V nadaljevanju predstavljamo rezultate ciljnega raziskovalnega projekta V2-1924 *Stalna geodetska znamenja kot temelj za kakovostno delovanje geodetske stroke*, v katerem smo preučevali stalna geodetska znamenja iz obdobja tako imenovane klasične geodetske izmere. Preučili smo možnost za njihovo uporabo v geodeziji v sodobnem času ter opredelili njihov kulturno-zgodovinski in morebitni turistični pomen. Izdelali smo konceptualni model in vzorčni primer podatkovne zbirke o pomembnih znamenjih, kjer smo izbrana geodetska znamenja opisali glede na vse tri navedene vidike. V vzorčni zbirki je za zdaj razmeroma malo različnih znamenj, vendar lahko podatke v njej obravnavamo kot primer za naknadne popise tovrstnih znamenj.

Preučevanje možnosti uporabe stalnih geodetskih znamenj iz obdobja klasične geodetske izmere zahteva poleg preverbe, ali znamenje v naravi še obstaja oziroma v kakšnem stanju je, še obsežno arhivsko poizvedovanje, ki pa je lahko časovno zelo zamudno. Da bi vseeno prišli do nekega osnovnega izbora najpomembnejših stalnih geodetskih znamenj, smo v projektu opravili pogovore s starejšimi strokovnjaki, ki so izmero izvajali tudi že pred širokim razmahom tehnologije GNSS.

Delo lahko obravnavamo kot nadaljevanje v preteklosti podanih pobud za približanje vedenja o tehniški dediščini, kakršna so stalna geodetska znamenja, strokovni in tudi splošni javnosti. Spodbuditi namreč želimo k podajanju predlogov za evidentiranje in vpis posebej zanimivih in pomembnih znamenj med kulturno dediščino ali njihovo vključevanje med obstoječe turistične oziroma planinske zanimivosti, o čemer so pisali že Mlakar (1993a, 1993b), Miklič (2013), Triglav (2018) ter Lisec in sod. (2020).

2 PREGLED STATUSA RAZLIČNIH GEODETSKIH ZNAMENJ

V zaključnem poročilu projekta (Triglav Čekada in sod., 2021) so podrobno opisani zgodovinski razvoj različnih vrst geodetskih mrež v Sloveniji in najpogostejši načini stabilizacije njihovih točk. V tem prispevku predstavljamo le nekaj primerov različnih izvedb stabilizacije. Predvidevamo, da bo tako lažje razumeti, kako smo v okviru raziskave prišli do izbora geodetskih znamenj, ki smo jih vključili v testno zbirko. Opisali bomo le geodetske mreže, ki imajo velik zgodovinski pomen v naši stroki. Izpustili bomo sodobni geodetski omrežji za GNSS-izmero, to sta omrežji SIGNAL in kombinirana geodetska mreža, o katerih lahko več najdete v drugih delih, kot sta Oven in sod. (2019), Ritlop in sod. (2019). Prav tako ne bomo omenjali geodetskih mrež, namenjenih za potrebe inženirske geodezije, kot so geodetske mreže železniških in cestnih predorov, kjer imajo starejše že prav tako pomemben zgodovinski pomen, saj bi za njihovo podrobno obravnavo potrebovali ločeno raziskavo. Zaradi lažje preučitve stanja stalnih geodetskih oznak in znamenj smo si nekatera ogledali tudi na terenu.

2.1 Trigonometrične mreže in triangulacijske baze

Najstarejše lokacije trigonometričnih točk I. reda na ozemlju današnje Slovenije sežejo v obdobje po letu 1810, ko je bila vzpostavljena osnovna trigonometrična mreža na zahodnem Koroškem, Štajerskem in v Primorju. Takoj zatem je sledila vzpostavitev trigonometričnih mrež na Primorskem v okviru Napoleoneove Ilirije. Ohranile so se lokacije točk I. reda, sama fizična znamenja prvotne izvedbe stabilizacije pa so med večjimi obnovami zamenjali z novimi (Triglav Čekada in Jenko, 2020). Najstarejša še ohranjena originalna znamenja (stabilizacije) trigonometričnih točk lahko najdemo ponekod v trigonometrični mreži II. reda, kjer pri naknadnih obnovah niso zamenjali originalnih oznak – na primer 303 II. red Veliki Javornik, 329 II. red Limberk. Tudi med trigonometričnimi točkami nižjih redov naletimo na kar nekaj primerov, ki imajo v Gursovi podatkovni bazi trigonometričnih točk neznan datum izračuna koordinat y in x ali samo H (v podatkovni bazi so označeni z vrednostjo 1801, kar pa ni dejanska letnica), kar lahko pomeni tudi, da gre pri taki točki za starejši način stabilizacije.

Trigonometrične in poligonske mreže so začele izgubljati večino svojega praktičnega pomena ob uradni uveljavitvi GNSS-izmere leta 2006 ter z uveljavitvijo novega koordinatnega sistema D96/TM (ZEN, 2006; Berk in sod., 2004), zato kasneje niso več redno nadomeščali uničenih ali poškodovanih točk iz mestnih geodetskih mrež. Na ruralnih območjih ter v gozdnatih in hribovitih predelih pa še vedno najdemo različne lepo ohranjene označbe trigonometričnih točk: štirikoten kamen vrhnje dimenzije 20 cm \times 20 cm ali manj, kvadratni kamen z naknadno dodanim kovinskim čepom, kamen z betonsko obrobo, kovinski čep ali tudi samo žebliček, nameščen v naravno skalo ipd. (slika 1).

Vzporedno s klasičnimi trigonometričnimi mrežami najvišjega reda so vzpostavili triangulacijske baze. Pri nas imamo ohranjeni triangulacijski bazi pri Mariboru iz leta 1860 ter pri Radovljici iz leta 1949 (Delčev in sod., 2014). Lokalni triangulacijski in poligonski mreži Ljubljane je služila še ljubljanska triangulacijska baza, ki je bila vzpostavljena leta 1955 in je le deloma ohranjena. Za potrebe testiranja geodetskega merilnega inštrumentarija so bile s stebri stabilizirane še: komparatorski bazi v Logatcu leta 1976 ter komparatorska baza Geodetskega zavoda Slovenije v Ljubljani leta 1976. Na tleh četrtega nadstropja Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani je bil leta 1972 označen talni komparator, ki pa po obnovi tlaka iz leta 2018 ni več v celoti ohranjen.



a



b

Slika 1: Različni primeri stabilizacij trigonometričnih točk: a) granitni kamen točke 588 IV. reda v trigonometričnem okraju 10 na Kladuškem griču pod Logatcem, b) granitni kamen z naknadno dodano betonsko obrobo, namenjena za fotogrametrično izmero točke 116 II. reda, na hribu Tabor v Ljubljani (foto: M. Triglav Čekada, 2021).

2.2 Geodinamične mreže

S pojavom natančnih razdaljemerov v 70. letih preteklega stoletja so na geodinamično zanimivih območjih začeli vzpostavljati tako imenovane geodetske geodinamične mreže (Kogoj, 2000). Po letu 1976 so tako izvajali izmero horizontalnih premikov ob tektonskih prelomih na petih geodetskih geodinamičnih mikromrežah (Karavanke, Ljubljanski centralni sistem, Idrija/Kanomlja, Krško) ter na treh mikromrežah v Ljubljanski kotlini (Gameljne, Ljubljana, Dobravica). V mrežah Karavanke, Idrija in Ljubljanski centralni sistem so privzeli že obstoječe trigonometrične točke in njihove stabilizacije. Mreže Krško in tri mikromreže v Ljubljanski kotlini pa so bile na novo stabilizirane s posebnimi tipi stabilizacij. Mreža Krško je stabilizirana s podzemno cevjo, ki je dolga en meter in ima premer 0,25 metra, je navpično vkopana v tla in na vrhu zalita z betonom. Na gornji ploskvi, ki je malo pod nivojem terena v cevi, pokriti z betonskim pokrovom, pa je vgrajena kovinska plošča z vijakom za prisilno centriranje. Točke Ljubljanskih mikromrež so večinoma stabilizirane z betonskimi stebri višine 1,2 metra (slika 2a).



a



b

Slika 2: a) Primer stabilizacije točke geodinamične mreže Ljubljana na Šišenskem hribu na Rožniku (foto: M. Triglav Čekada, 2020) in b) primer stabilizacije geodinamične točke Premogovnika Velenje v Vitanju (foto: A. Mencin, 2004).

Poleg navedenih geodetskih geodinamičnih mrež obstajajo na nekdanje rudarsko intenzivnih območjih še posebne mreže za spremljanje posedanja površja. Tukaj kot primer omenimo dve geodinamični mreži Premogovnika Velenje, ki sta bili stabilizirani po letu 1995 s stebri ali pa v tla in sta namenjeni GNSS-izmeri (slika 2b).

2.3 Nivelmanske mreže

Prve izmere nivelmanskih poligonov v Sloveniji lahko umestimo v obdobje med letoma 1873 in 1895, ko so vzpostavljali avstro-ogrsko nivelmansko mrežo. Najstarejše nivelmanske reperje iz tega obdobja lahko najdemo stabilizirane na stavbah ob železniških progah, saj je bil avstro-ogrski nivelman sestavljen iz mreže nivelmanskih zank, ki so večinoma potekale ob železniških progah in le izjemoma ob cestah (Koler, 1993). V avstro-ogrski monarhiji so na slovenskem ozemlju v bližini naselja Smolnik pri Rušah leta 1878 stabilizirali tudi tako imenovani fundamentalni reper FR-1049 (slika 3a). Fundamentalni reper je bil leta 2006 razglašen za kulturni spomenik in je označen s številko EŠD 6399. Zadnjič je bil obnovljen leta 2009. Kasneje so stabilizirali dodatne reperje ali zamenjali manjkajoče v okviru izmer prvega nivelmana visoke natančnosti SFRJ v obdobju 1946–1957, drugega nivelmana visoke natančnosti SFRJ v obdobju 1970–1973 ter izmer posameznih nivelmanskih poligonov po letu 1980 in v letih 2000–2016, ko so merili novo nivelmansko mrežo I. reda Republike Slovenije (Koler in sod., 2019). Nivelmanski reperji nižjih redov so večinoma stabilizirani z vodoravno ali pokončno vzdanimi kovinski čepi (slika 3b).



a



b

Slika 3: a) Avstro-ogrski fundamentalni reper v bližini naselja Smolnik pri Rušah (foto: D. Radovan, 2021), b) reper nižjega reda, vodoravno vzdani kovinski čepi v stavbo (foto: B. Koler).

2.4 Gravimetrične mreže

Osnovno gravimetrično mrežo Slovenije sestavlja 35 točk, med katerimi je 29 relativnih točk, imenovanih tudi gravimetrične točke I. reda, in šest absolutnih gravimetričnih točk, imenovanih gravimetrične točke 0. reda (Koler in sod., 2006). Vse absolutne gravimetrične točke so stabilizirane tako, da so temeljene neposredno v skalno podlago, na kateri stojijo izbrani objekti, v katerih se točka nahaja. Stebri so pritrjeni na kamninsko podlago s sidrom, ki je zvrtno v skalno podlago. Središče točke je dodatno označeno z medeninastim čepom. Stabilizacija relativnih gravimetričnih točk izvira še iz obdobja postavitve osnovne gravimetrične mreže Jugoslavije, ki je bila vzpostavljena med letoma 1964 in 1967. Enajst relativnih gravimetričnih točk je stabiliziranih z vkopanimi betonskimi kamni dimenzij 50 cm × 50 cm × 100 cm.

Ostalih 18 relativnih gravimetričnih točk je stabiliziranih s kovinskimi čepi, ki so nameščeni v stopnišča ali podstavke starejših, masivnejših objektov, kot so cerkve ali spomeniki.



Slika 4: Primer stabilizacije gravimetrične točke Radmirje GT15 iz osnovne gravimetrične mreže (foto: M. Kuhar, 2006).

2.5 Katastrski mejniki in meje katastrskih občin

O razvoju zemljiškega katastra na Slovenskem obstaja več literature, med najnovejšo štejemo tudi knjigo Slaka in sod. (2020). Manj pa je znanega o različnih tipih stabilizacij starih mejnih znamenj oziroma ohranjenosti prvotnih mejnih znamenj. Mejna znamenja in meje so bili v slovenskem prostoru pomembni že več stoletij pred nastankom katastra, saj »so označevali obseg pravic do zemlje, ki je nekoč veljala za temelj preživetja« (Vilfan, 1996). Kljub večstoletni tradiciji označevanja posestnih meja, predvsem cerkvene in dominikalne posesti, katerih meje so privzeli ob nastavitvi prvega parcelno orientiranega katastra (Mlakar, 1996; Lisec in sod., 2020), se je žal v preteklosti veliko takih mejnikov uničilo. Med najstarejša ohranjena mejna znamenja na Slovenskem lahko štejemo mejnike posesti nekdanjih fevdalnih ali cerkvenih gospostev, med temi so zanimivi tudi mejniki gozdnih posesti nekdanjih gospostev, kot je kanalsko gospodstvo, kjer so oznake vklesane v naravne skale z letnico 1716 (Kozorog, 2008). Takšna ohranjena nekdanja obeležja posestnih meja starih gospostev imajo še vedno velikokrat vlogo mejnika na parcelni meji (Lisec in sod., 2020).

Danes so zemljiškokatastrske točke na terenu lahko zaznamovane z različnimi mejniki: kvadratna označba z vrhno velikostjo 10 cm × 10 cm, označba okrogle oblike, križ, vklesan v naravni kamen, ali grajeni objekt (slika 5).

Tudi nekateri mejniki katastrskih občin segajo še v obdobje izdelave jožefinskega katastrskega operata v letih 1785–1789, ko so jih na terenu določili s predstavniki soseske (Ribnikar, 1982), mnogi mejniki pa so celo starejši, saj so se za meje katastrskih občin prevzele stare uveljavljene administrativne meje.

Kasneje, v okviru vzpostavitve franciscejskega katastra, so pred detajlno katastrsko izmero še enkrat popisali, skicirali in izmerili meje katastrskih občin. Na teh skicah so velikokrat označene tudi lokacije posebnih mejnikov katastrskih občin (Lisec in Ferlan, 2017). Mejniki katastrskih občin iz tega obdobja imajo obliko približno meter visokega stebra, izklesanega iz naravnega kamna. Po letu 1953 so na podlagi jugoslovanske zvezne uredbe meje katastrskih občin začeli označevati z večjimi betonskimi mejniki z dimenzijo vrhnje ploskve 25 cm × 25 cm (Slak in sod., 2020).



a



b



c



d

Slika 5: Primeri različnih stabilizacij katastrskih točk: a) betonski kamen s pravokotnim križem, b) klin s plastičnim pokrovom rumene barve, c) in d) dva primera oznak, vklesanih v naravno skalo (foto: M. Triglav Čekada, 2021).

2.6 Nekdanje meje okrožij, dežel in države

Meje nekdanjih okrožij, dežel in države so velikokrat potekale po mejah katastrskih občin oziroma nasprotno – za meje katastrskih občin so se prevzele uveljavljene administrativne meje. Ker so se meje

katastrskih občin ohranile do današnjih dni, lahko ostanke nekdanjih obeležij regionalnih razdelitev najdemo na današnjih mejah katastrskih občin. Nekatero zelo markantno primerko najdemo v Liseč in sod. (2020). Tukaj pa bomo prikazali dva primera dvestoletnih kamnov iz Primorske, ki še vedno zaznamujeta katastrsko mejo (slika 6).

Med novejša mejna znamenja štejemo še ohranjene mejnike rapalske meje, postavljene v letih 1920–1925 (Žorž, 2017), posebne mejnike med okupiranimi območji v letih 1941–1943 (Mikša, 2020) ter mejnike Svobodnega tržaškega ozemlja iz obdobja 1947–1954.



a



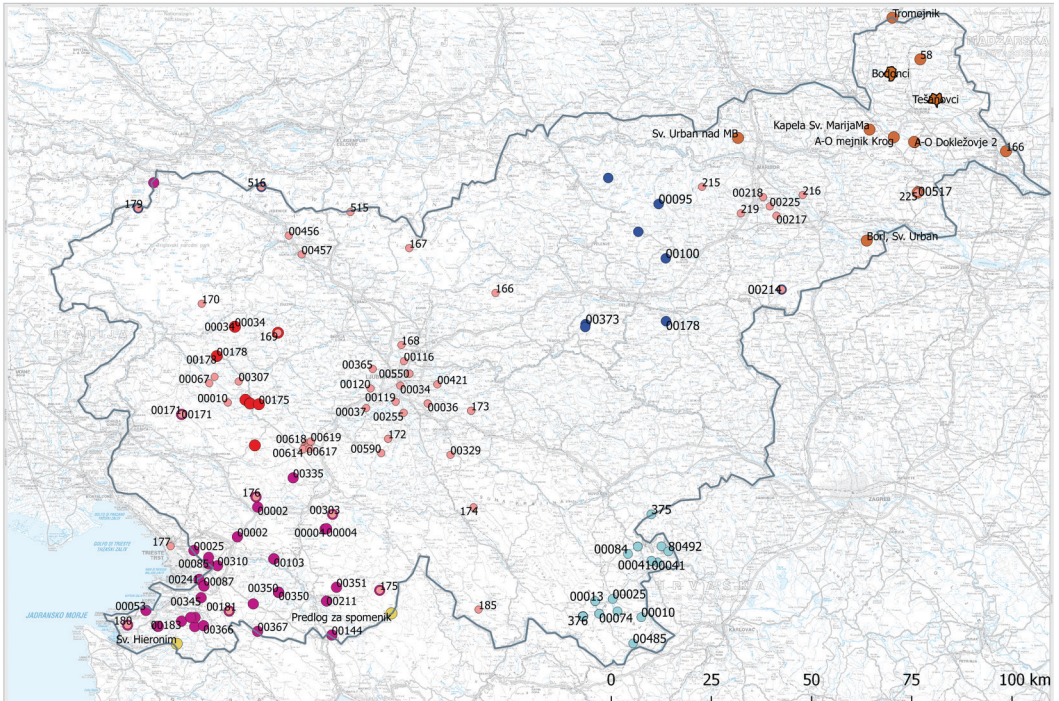
b

Slika 6: Primera dveh mejnikov nekdanjih okrožij iz Primorske, ki še vedno zaznamujeta mejo katastrskih občin: a) Jermanec na Kokoši, današnji tromejnik katastrskih občin 2458 Bazovica, 2459 Lokev, 2553 Gročana; b) ob glavni cesti pred Markovščino, meja katastrskih občin 2574 Markovščina in 2575 Gradišče (foto: M. Triglav Čekada, 2021).

3 INTERVJUJI Z IZKUŠENIMI STROKOVNJAKI

Na podlagi nestrukturiranih intervjujev s strokovnjaki, ki imajo dolgoletne, tudi terenske izkušnje, smo identificirali veliko zanimivih stalnih geodetskih znamenj, ki bi jih bilo smiselno v prihodnosti varovati. Zaradi epidemije covid-19 smo večino intervjujev opravili s spletnimi konferenčnimi aplikacijami oziroma po telefonu. Le enega, s pokojnim Marjanom Jenkom, smo izvedli v živo. Intervjuvali smo šest geodetov in enega geografa, ki pa se je dolga leta poklicno ukvarjal z usklajevanjem poteka slovensko-hrvaške državne meje. Večinoma smo identificirali zanimive trigonometrične in poligonske točke ter različna stara mejna znamenja na nekdanjih mejah dežel in okrajev, ki še danes praviloma sovpadajo z mejami katastrskih občin. Ker intervjuvanci niso vedeli za odgovore drugih intervjuvancev, se predvsem predlogi po varovanju izbranih trigonometričnih točk I. reda večkrat prekrivajo.

Z intervjuji smo identificirali zanimiva geodetska znamenja, ki pa ne pokrivajo enakomerno celotne Slovenije (slika 7), saj so bili intervjuvanci večinoma najbolj aktivni v svojih lokalnih okoljih, zato bi bilo v prihodnosti smiselno takšne pogovore nadaljevati. Nekatere predloge bomo v prihodnosti, enako kot predloge Marjana Jenka (Triglav Čekada in Jenko, 2020), predvidoma podrobneje predstavili tudi v člankih v Geodetskem vestniku.



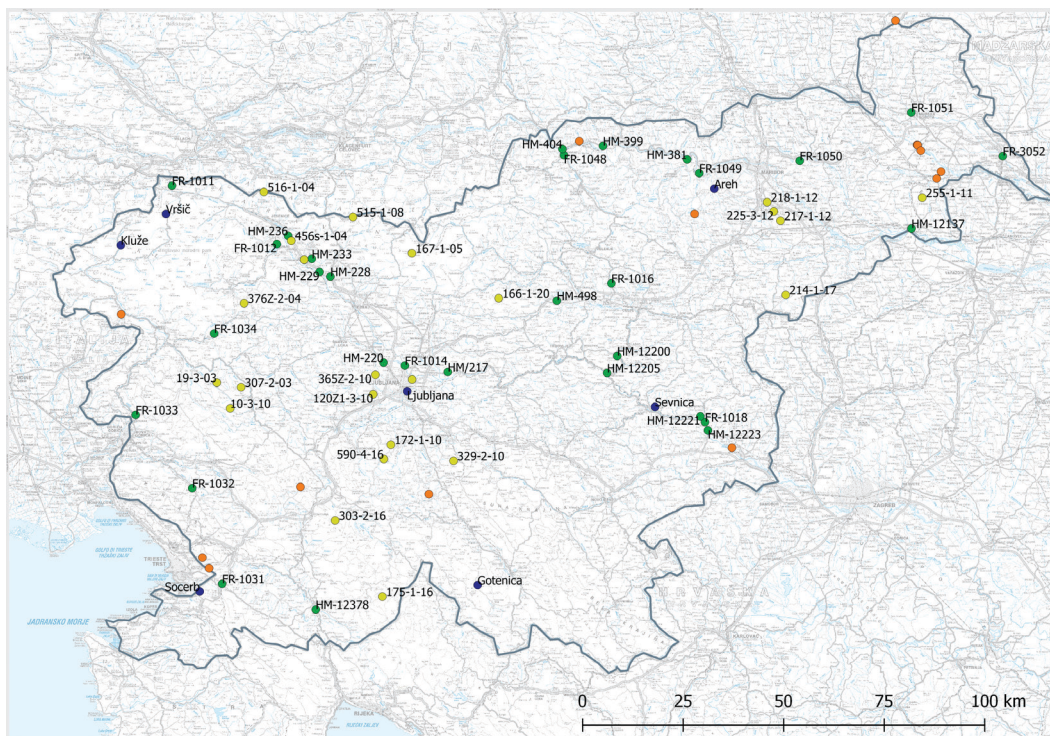
Slika 7: Pregledni izris vseh predlogov, ki so jih podali intervjuvanci: roza – Marjan Jenko, rumeno – mag. Dušan Fatur, vijoličasto – Ivan Lojk, rjave – dr. Joc Triglav, rdeče – Egon Likar, svetlo modre – Damjan Gregorič in temno modre – mag. Damjan Kvas.

Med predlogi najdemo vse štiri cerkve, ki jih je Liesganig leta 1792 vključil v izmero tako imenovanega dunajskega poldnevnik in ležijo na naših tleh: Sv. Urban nad Mariborom, Sv. Marija Magdalena na Kapeli, Sv. Urban pri gradu Borl in Jeruzalem (Triglav, 2014). Med predlogi je še skupno 20 trigonometričnih točk I. reda, vse ohranjene triangulacijske in komparatorske baze, 44 trigonometričnih točk nižjih redov, od tega 14 cerkvenih zvonikov in 30 trigonometričnih točk, označenih z različnimi kamni ali stebri. Med njimi je še 11 nekdanjih obeležij deželnih ali okrajnih meja, ki še vedno stojijo na prvotnih lokacijah in še vedno sovpadajo tudi z mejami katastrskih občin. Dodani so še štirje mejniki rapalske meje ter antena na Mali Peči nad Črnim Vrhom, ki sicer ne spada med uradne trigonometrične točke, vendar so jo prav tako uporabljali med trigonometričnimi izmerami. Med predlogi je še tromejnik Slovenija-Madžarska-Avstrija ter izbrane trigonometrične in poligonske točke dveh katastrskih občin 53 Bodonci in 93 Tešanovci, kot primera, kjer se je izvedla transformacija zemljiškokatastrskih načrtov iz sistema Gellérthegey v ravninski državni koordinatni sistem v Gauss-Krügerjevi projekciji s preračunom nekaterih starih in hkrati novih meritev na še obstoječih izbranih starih trigonometričnih in poligonskih točkah (Triglav 1993, 2004, 2013).

4 IZDELAVA KONCEPTUALNEGA MODELA ZBIRKE POMEMBNIH GEODETSKIH ZNAMENJ IN IZDELAVA VZORČNE ZBIRKE

Na podlagi preučitve vsebin, ki so opredeljene v Pravilniku o podrobnejši vsebini zbirk državnega prostorskega koordinatnega sistema (Uradni list RS, št. 26/2015), Zakonu o varstvu kulturne dediščine (ZVKD-1, Uradni list RS, št. 16/2008, 123/2008, 8/2011 – ORZVKD39, 90/2012, 32/2016, 21/2018 – ZNOrg), ter obstoječih vsebin v zbirki državnih geodetskih točk smo opredelili skupine atributov oziroma podatke, ki naj jih zbirka pomembnih znamenj vsebuje. Podatke smo razdelili na osnovne podatke o geodetskem znamenju ter podatke, ki so pomembni za vrednotenje in kategorizacijo geodetskega znamenja. V prvi skupini so geodetski podatki o stalnem znamenju (koordinate, opis lokacije, vrsta stabilizacije, leto stabilizacije ipd.), podatki o geodetski mreži, katere del je stalno geodetsko znamenje, ter osnovni podatki o nepremičnini, na kateri stoji (zemljiška parcela, stavba). V skupini podatkov, pomembnih za vrednotenje in kategorizacijo, so: popis materialnega stanja znamenja, podatki o že obstoječem vpisu v register kulturne dediščine, če je ta že bil izveden, kratek opis pomembnosti geodetskega znamenja iz različnih vidikov (strokovno-aktualni pomen, strokovno-zgodovinski pomen, lokalni pomen za pokrajino ali občino, nacionalni pomen, svetovni pomen za UNESCO, turistični potencial) ter podatki in fotografije s terenskih ogledov. Zaradi različnih lastnosti različnih geodetskih mrež smo izdelali štiri ločene tabele: za točke horizontalnih geodetskih mrež (trigonometrične mreže, triangulacijske baze, komparatorске baze, geodinamične mreže ...), za točke iz nivelmanskih mrež, za točke gravimetričnih mrež ter za mejna znamenja (različne zemljiškokatastrske točke, stara mejna znamenja, ki še vedno označujejo meje katastrskih občin).

Za oceno, koliko dela potrebujemo in katere vse predvidene podatke večinoma lahko zapolnimo s terensko inventarizacijo in pregledom znanih arhivskih gradiv, smo izdelali vzorčno zbirko, v katero smo vključili predloge, ki smo jih izbrali na podlagi lastnih strokovnih ocen ter podatkov, pridobljenih z intervjuji, in sicer: 23 predlogov horizontalnih geodetskih točk, 29 predlogov nivelmanskih geodetskih točk, 15 predlogov mejnih znamenj ter osem predlogov gravimetričnih točk. Med geodetske točke horizontalnih geodetskih mrež smo za zdaj uvrstili izbrane trigonometrične točke I. reda, izbrane točke triangulacijskih baz ter nekaj primerov trigonometričnih točk nižjih redov, ki so pomembne s strokovnega, zgodovinskega in turističnega vidika hkrati (365 II. red Toško Čelo; 307 II. red Jelenk na Šebreljski planoti, 10 III. red Potok na Vojskem; 19 III. red Vrhovec na Šebreljski planoti, 303 II. red Veliki Javornik, 329 II. red Limberk, 590 IV. red Županov vrh nad Rakitno, 376 II. red Možic nad Soriško Planino). V prihodnosti bomo v podatkovno zbirko uvrstili še vse točke I. reda ter druge zanimive geodetske točke trigonometričnih mrež, katerih stanje bomo pred tem preverili na terenu. Med nivelmanske točke smo uvrstili avstro-ogrski fundamentalni reper (slika 3) in 16 ohranjenih avstro-ogrskih reperjev, ki so stabilizirani na različnih objektih. V zbirko je vključeno tudi 12 ohranjenih fundamentalnih reperjev, ki so bili stabilizirani v 70. letih preteklega stoletja za potrebe izmere II. nivelmana visoke natančnosti. Vsi navedeni reperji so vključeni tudi v novo nivelmansko mrežo I. reda Slovenije. Med gravimetrične točke smo uvrstili šest točk 0. reda ter dve točki I. reda (GT 2 Ljubljana, GT 9 Vršič). Med mejna znamenja smo dodali izbrane najstarejše mejne kamne, ki še stojijo na originalnih lokacijah, mnogi od teh pa so že vpisani v register kulturne dediščine. Vzorčno zbirko smo predali naročniku projekta – Geodetski upravi Republike Slovenije.



Slika 8: Pregledni izris lokacij predlogov iz testne zbirke: rumene – horizontalne točke, zelene – nivelmanske točke, modre – gravimetrične točke ter oranžne – katastrska znamenja.

5 SKLEP

Rezultati tega projekta so odprli obširno področje raziskovanja zgodovine geodetske stroke skozi še obstoječo materializirano geodetsko dediščino, ki jo geodeti srečujemo med terenskim delom ali pa jo srečujejo pohodniki in planinci na svojih poteh. Nismo se omejili le na geodetska znamenja, ki bi lahko bila pomembna za širšo skupnost ter zato primerna za vključitev med Unescovo dediščino (glej Lisec in sod., 2020), ampak smo začeli izdelovati sezname zanimivih geodetskih znamenj, za katere menimo, da presegajo okvire geodetske stroke in imajo tudi širši zgodovinski oziroma turistični pomen. Osnovni pogoj je, da geodetska znamenja stojijo na prvotni lokaciji, saj tako še vedno »govorijo« o namenu postavitve, meritvah, opravljenih na njih v preteklosti, ter postopkih, ki so sledili tem meritvam.

Delo s tem še ni zaključeno. Nekatera dela bomo v prihodnje izvajali v okviru drugih projektov ali prostovoljno v okviru Zveze geodetov Slovenije. Tako ne bodite presenečeni, če se bomo kdaj v prihodnosti obrnili tudi na vas s prošnjo, da bi z vami radi opravili intervju o vašem strokovnem mnenju glede zanimivih stalnih geodetskih znamenj v vašem okolišju.

Za konec pa omenimo še, da lahko geodetska znamenja sčasoma pridobijo drugoten pomen. Vsi sicer poznamo cerkvene zvonike, ki jih v naši stroki uporabljamo kot trigonometrične točke, vendar pa imajo v osnovi verski pomen. Na Donački gori stoji zidan steber, ki predstavlja trigonometrično točko I. reda št.

219 in je naknadno dobil še verski pomen, saj ga danes uporabljajo tudi kot versko znamenje. Kozorog (2008) omenja še veliko starejša v naravno skalo vklesana zemljiškokatastrska znamenja v Selški dolini in Baški grapi, ki so sčasoma prav tako dobila še drugačen pomen, saj so postala obeležja dogodkov, povezanih s turškimi vpadi.

Zahvala

Raziskava je nastala v okviru ciljnega raziskovalnega projekta V2-1924: Stalna geodetska znamenja kot temelj za kakovostno delovanje geodetske stroke, ki sta ga sofinancirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Geodetska uprava Republike Slovenije.

Avtorji se še posebej zahvaljujemo vsem intervjuvancem: Marjanu Jenku, mag. Dušanu Faturju, Ivanu Lojku, dr. Jocu Triglavu, Egonu Likarju, Damjanu Gregoriču in mag. Damjanu Kvasu. V poročilu projekta smo za slikovit prikaz stanja različnih geodetskih točk uporabili še fotografije drugih avtorjev, ki se jim prav tako zahvaljujemo za posredovanje njihovega fotografskega gradiva.

Literatura in viri:

- Berk, S., Komadina, Ž., Marjanovič, M., Radovan, D., Stopar, B. (2004). The Recomputation of the EUREF GPS Campaigns in Slovenia. V: J. A. Torres (ur.), H. Hornik (ur.). Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Toledo, 4.–7. 6. 2003, EUREF Publication, 13. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, str. 132–149.
- Delčev, S., Timar, G., Kuhar, M. (2014). O nastanku koordinatnega sistema D48. *Geodetski vestnik*, 58 (4), 681–694. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.04.681-694>
- Kogoj, D. (2000). Geodetske meritve stabilnosti tal ob tektonskih prelomih na območju Slovenije. *Geodetski vestnik*, 44 (1–2), 53–71.
- Koler, B. (1993). Izmere nivelmanskih mrež višjih redov na območju Republike Slovenije. *Geodetski vestnik*, 37 (4), 274–281.
- Koler, B., Medved, K., Kuhar, M. (2006). Projekt nove gravimetrične mreže 1. reda Republike Slovenije. *Geodetski vestnik*, 50 (3), 451–460.
- Koler, B., Stopar, B., Sterle, O., Urbančič, T., Medved, K. (2019). Nov višinski sistem SVS2010. *Geodetski vestnik*, 63 (1), 27–40. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2019.01.27-40>
- Kozorog, E. (2008). Mejna znamenja na severnem Primorskem. *Goriški letnik: zbornik Goriškega muzeja*, 32, 77–90.
- Lisec, A., Ferlan, M. (2017). 200 let od začetka parcelno-orientiranega katastra. *Geodetski vestnik*, 61 (1), 76–90.
- Lisec, A., Dajkno, J., Flogie Dolinar, E., Čeh, M. (2020). Mreža meja in mejnikov: nominacija za Unescovo svetovno dediščino. *Geodetski vestnik*, 64 (3), 403–415.
- Mlakar, G. (1993a). Geodezija in planinstvo – 1, *Planinski vestnik*, XCIII (10), 437–440.
- Mlakar, G. (1993b). Geodezija in planinstvo – 2, *Planinski vestnik*, XCIII (11), 486–489.
- Mlakar, G. (1996). Meje: posestne in državne. Inštitut za geodezijo in fitogrametrijo FGG Ljubljana, Ljubljana.
- Miklič, J. (2013). Geodetska tehnična dediščina je tudi 10 stebrov državnih trigonometričnih točk 1. reda. <https://docs.google.com/file/d/0B5YuyWVuf3EQaFZLUDBoTWSZQIU/edit>, pridobljeno 12. 5. 2021.
- Mikša, P. (2020). Okupacijski mejni kamni (1941–1945) na Slovenskem – še danes vidni markerji prostora. *Zgodovina.si*, <http://zgodovina.si/16704-2>, pridobljeno 12. 5. 2021.
- Oven, K., Ritlop, K., Triglav Čekada, M., Pavlovčič Prešeren, P., Sterle, O., Stopar, B. (2019). Vzpostavitev kombinirane geodetske mreže v Sloveniji in analiza njenega delovanja v obdobju 2016–2018. *Geodetski vestnik*, 63 (4), 491–513. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2019.04.491-513>
- Ribnikar, P. (1982). Zemljiški kataster kot vir za zgodovino. *Zgodovinski časopis*, 36 (4), 321–337.
- Ritlop, K., Fabiani, N., Oven, K., Pavlovčič Prešeren, P., Sterle, O., Stopar, B., Triglav Čekada, M. (2019). Povečanje zanesljivosti GNSS-omrežij SIGNAL in O. red. *Geodetski vestnik*, 63 (4), 514–524. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2019.04.514-524>
- Slak, J., Triglav, J., Koraci, K., Ravnihar, F. (2020): Slovenska zemlja na katastrskih načrtih. Ljubljana, Geodetska uprava RS. https://www.projekt.e-prostor.gov.si/fileadmin/user_upload/gradiva/Slovenska_zemlja_na_katastrskih_nacrtih.pdf, pridobljeno 12. 5. 2021.
- Triglav Čekada, M., Jenko, M. (2020). Načini stabilizacije trigonometričnih točk skozi čas v Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 64 (4), 469–488. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.04.469-488>
- Triglav Čekada, M., Oven, K., Radovan, D., Koler, B., Kogoj, D., Kuhar, M., Lisec, A., Sterle, O., Stopar, B. (2021). Stalna geodetska znamenja kot temelj za kakovostno delovanje geodetske stroke. Končno poročilo, Ciljni raziskovalni projekt V2-1924. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 149 str., https://gis.si/wp-content/uploads/2021/05/koncno_porocilo_V2-1924_StalnaGeodetskaZnamenja_JDMM.pdf, pridobljeno 12. 5. 2021.
- Triglav, J. (1993). Project Bodonci – The Renewal of Cadastral Plans of Scale 1 : 2880. *GIM*, september, 69–73.

- Triglav, J. (2004). Projekt Bodonci: postopki in potek transformacije katastrskih načrtov iz koordinatnega sistema Gellerthegey v Gauss-Kruegerjev državni koordinatni sistem. Seminarska naloga pri predmetu izravnalni račun. 100 str.
- Triglav, J. (2013). Projekt Tešanovci – obnova zemljiškokatastrskih načrtov. Geodetski vestnik, 57 (1), 147–161.
- Triglav, J. (2014): Zgodovina topografskih izmer habsburške monarhije (1. del). Življenje in tehnika, december, 48–57.

- Triglav, J. (2018). 5. julij 1822 – Prva geodetska ekipa na vrhu Triglava. Geodetski vestnik, 62 (1), 120–126.
- Vilfan, S. (1996). Zgodovinska pravotvornost in Slovenci. Ljubljana: Cankarjeva založba: 526 str.
- Zakon o evidentiranju nepremičnin (ZEN). Uradni list RS, št. 47/2006.
- Žorž, G. (2017). Varovanje rapalske meje in vojaška navzočnost na območju XI. armadnega zbora. Magistrsko delo. Ljubljana, Filozofska fakulteta, 193 str.

doc. dr. Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: mihaela.triglav@gis.si

mag. Katja Oven, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: katja.oven@gis.si

dr. Dalibor Radovan, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: dalibor.radovan@gis.si

prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: bojan.stopar@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.

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

izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: miran.kuhar@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Anka Lisec, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: anka.lisec@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: oskar.sterle@fgg.uni-lj.si

mag. Jurij Režek, univ. dipl. inž. geod.

Geodetska uprava Republike Slovenija
Zemljemerska 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: jurij.rezek@gov.si

OD GOSJEGA PERESA DO RAČUNALNIŠKEGA OBLAKA FROM QUILL TO THE CLOUD

Joc Triglav

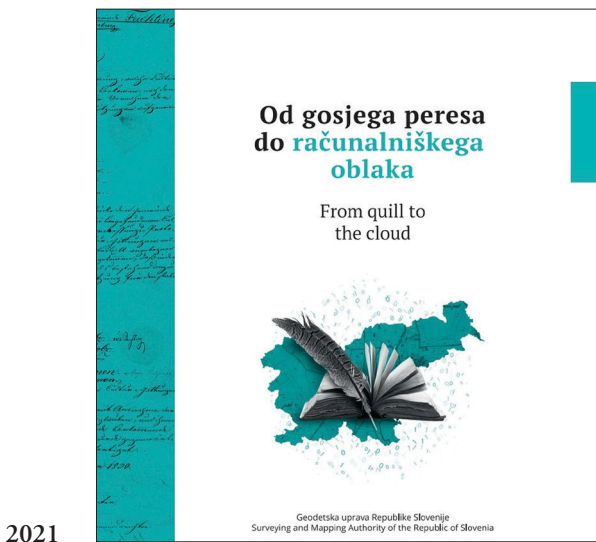
1 UVOD

Geodetska uprava Republike Slovenije je v marcu 2021 v okviru programa eProstor izdala publikacijo z naslovom *Od gosjega peresa do računalniškega oblaka*. Knjiga obsega 250 strani, izšla je v tiskani in digitalni obliki. Besedilo je v slovenskem jeziku in angleškem prevodu, podprto pa je z obiljem skrbno izbranega slikovnega gradiva. Gradivo je zbral in uredil mag. Janez Slak, avtorji pa so poleg njega še Anton Kogovšek, Darja Tibaut, Irena Poženel, Bojan Pirc in mag. Ema Pogorelčnik. Uvodno spremeno besedo je napisal Tomaž Petek, generalni direktor Geodetske uprave Republike Slovenije.

To je že tretji naslov v seriji, ki se je leta 2019 začela z delom *Dediščina katastrof na Slovenskem* in leta 2020 nadaljevala s knjigo *Slovenska zemlja na katastrskih načrtih*. Obe sta bili ob izidu predstavljeni v Geodetskem vestniku.

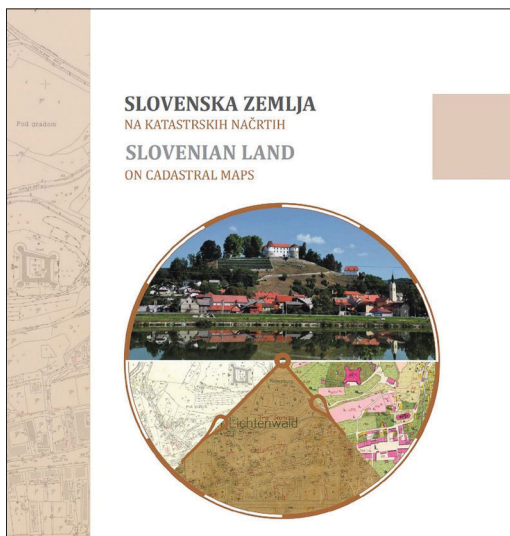
2 TRILOGIJA

Vse tri knjige se vsebinsko povezujejo, zato jih iz razloga celovitosti na spodnji sliki 1 predstavljam v časovni vrsti s sliko naslovnice, QR-kodo in tudi s spletnim naslovom za dostop do digitalne različice.



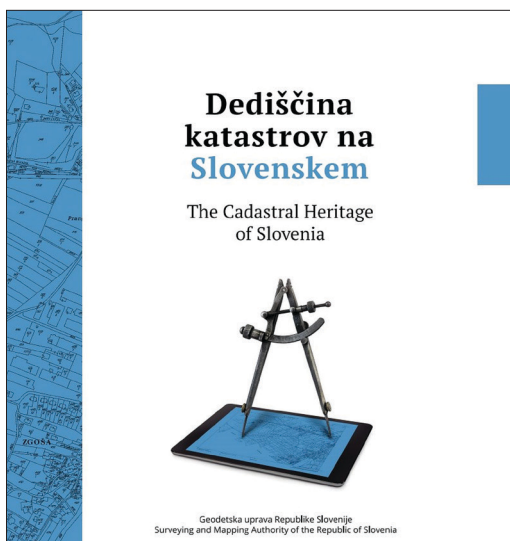
https://www.projekt.e-prostor.gov.si/fileadmin/user_upload/gradiva/Od_peresa_do_racunalniskega_oblaka_.pdf

2020



https://www.projekt.e-prostor.gov.si/fileadmin/user_upload/gradiva/Slovenska_zemlja_na_katastrskih_nacrlih.pdf

2019



https://www.projekt.e-prostor.gov.si/fileadmin/user_upload/gradiva/Dediscina_katastrov_na_Slovenskem.pdf

Slika 1: Časovna vrsta naslovnih izdanih knjig z navedbo QR-kode in spletnega naslova za dostop do digitalnih različic.

Poleg predstavljenih so na spletni strani <https://www.projekt.e-prostor.gov.si/gradiva/> v digitalni obliki dostopne še druge zanimive digitalne publikacije projekta eProstor.

Knjigi iz zadnjih dveh let sta bili v naši reviji že predstavljeni, zato le na kratko ponovimo, da je v prvi iz leta 2019 po obdobjih opisano arhivsko gradivo zemljiškega katastra, katastra stavb in državnih prostorskih načrtov ter njegova celovita digitalizacija. V drugi knjigi iz leta 2020 so predvsem predstavljeni katastrski načrti po vrstah geodetske izmere in obdobjih nastanka ter metode njihovega

vzdrževanja. Velik del vsebine pa je namenjen opisom digitalizacije katastrskih načrtov in lokacijske izboljšave zemljiškokatastrskih prikazov. Priporočam, da ob prebiranju tretjega dela znova pobrsate tudi po prvih dveh. Če del nimate pri roki v tiskani obliki, so na zgoraj navedenih spletnih povezavah vsakomur dosegljiva z le nekaj kliki.

3 VSEBINA

Letošnja knjiga osvetli zemljiški kataster v Sloveniji še z dodatnih vidikov, čemur je namenjena dobra polovica vsebine. Posebna pozornost je na začetku posvečena obsežnemu in slikovno ponazorjenemu opisu zemljiškokatastrskega operata franciscejskega in reambulančnega katastra. Sledi opis vzdrževanja analognega zemljiškega katastra po posameznih časovnih obdobjih, pogojenih z državnopolitičnimi okoliščinami ter vsakokratno geodetsko in katastrsko zakonodajo – do leta 1918, po letu 1918, po letu 1930, po letu 1945, po letu 1974 in v sodobnem času. Iz opisov in slikovnega gradiva lahko razberemo, kako so se skozi čas postopki vzdrževanja katastra spreminjali.

Izjemno strokovno zanimiv, tako za starejšo kot za mlajšo generacijo geodetov, je opis prehoda na računalniško vzdrževanje opisnih podatkov zemljiškega katastra. Iz slikovnega primera arhivskega gradiva katastrskega urada Murska Sobota je na primer razvidno, da so katastrske operate novih izmer (vsaj) že davnega leta 1965 izdelovali po sistemu luknjanih kartic. To so bili začetki, ki so kasneje vodili do ključnega dosežka geodetske službe v 80. letih prejšnjega stoletja, tj. do informatizacije opisnih podatkov zemljiškega katastra. Leta 1989 smo imeli v Sloveniji kar 14 različnih programskih paketov za vodenje opisnih podatkov zemljiškega katastra, od programov na velikih računalnikih, s katerimi so bile takratne občinske geodetske uprave povezane s terminali, do programskih orodij na osebnih računalnikih (PC), ki so se takrat vse bolj uveljavljali.

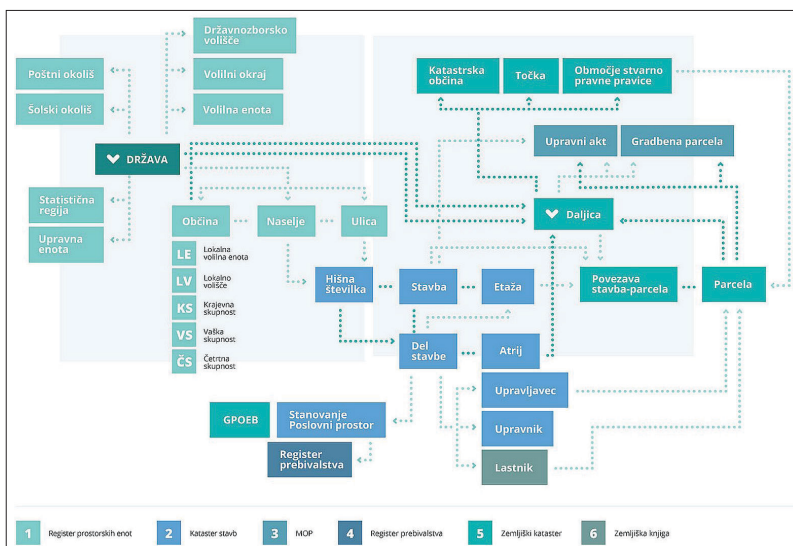
Vso to decentralizirano tehnološko in metodološko neenotnost obdelav za vodenje in vzdrževanje opisnih podatkov zemljiškega katastra je bilo treba funkcionalno poenotiti na republiški ravni in povezati z drugimi centralnimi evidencami, kot je register prebivalstva. Ta izjemni organizacijski in tehnološki podvig je uspel posebni delovni skupini. S programskim paketom INKAT, ki je bil predstavljen jeseni 1989, in s poenotenjem digitalnih obdelav opisnih katastrskih podatkov na vseh občinskih geodetskih upravah so bili vzpostavljeni pogoji za dopolnitev z enotnimi delovodniškimi in grafičnimi programskimi paketi ter za vzpostavitev državne centralne baze zemljiškega katastra nekaj let kasneje. Opisu centralne baze zemljiškega katastra je namenjeno posebno poglavje. V knjigi je na kratko omenjena tudi analogno-digitalna pretvorba grafičnega dela zemljiškega katastra, ki pa je zelo podrobno in obsežno predstavljena v drugi knjigi zbirke, zato je v tem zapisu ne obravnavam.

V nadaljevanju so v ločenih poglavjih podrobno predstavljene tudi druge državne geodetske evidence: kataster stavb, register nepremičnin (REN), register prostorskih enot (RPE), evidenca državne meje (EDM) in zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture (ZK GJI). Za vsako so opisani postopki njene nastavitve in vzdrževanja. Iz opisov je razvidna vsa raznolikost podatkovnih modelov in programskih rešitev, ki kliče po uskladitvi. Vsaka od teh geodetskih evidenc s svojimi podatki dopolnjuje in nadgrajuje podatke zemljiškega katastra. Kataster stavb in register nepremičnin brez osnove zemljiškega katastra ne moreta obstajati, zato je smiselna njihova funkcionalna združitev v kataster nepremičnin. Skladno s tem se bo prilagodil tudi register prostorskih enot. Evidenca državne meje ima poseben pomen, saj hkrati

z evidentiranjem podrobnih podatkov o mejah države s sosednjimi državami postavlja zunanje meje prostorskega območja vseh ostalih državnih evidenc. Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture pa bo poleg zagotavljanja svoje osnovne funkcije, evidentiranja gospodarske javne infrastrukture, v navezavi s katastrom nepremičnin postal tudi eden od osnovnih gradnikov določanja in evidentiranja območij stvarnopravnih pravic in javnopravnih omejitev v prostoru.

Knjigo zaključuje sistematičen opis načina bodočega vzdrževanja in informacijske prenove nepremičninskih evidenc, vključno s prenovo procesov v novem informacijskem sistemu, in opis državnega računalniškega oblaka (DRO), ki je tehnološka podlaga za reorganizacijo državne informatike. Med drugim lahko tako na strani 215 preberemo (cit.): »*Obstoječe informacijske rešitve, ki jih za vodenje nepremičninskih evidenc po ZEN uporablja geodetska uprava, ne omogočajo učinkovitega vodenja in povezovanja podatkov. Informacijske rešitve so nestabilne zaradi zastarelosti in parcialnih nadgradenj, obstaja velika stopnja tveganja, da prenehajo delovati, njihovo vzdrževanje je predrago.*«

S tem je skladen tudi podnaslov knjige, ki se glasi Informacijska prenova vodenja nepremičninskih evidenc. Slovenska geodetska služba je dejansko tik pred celovitim preходом v informacijsko prenovalo nepremičninskih evidenc. V preteklosti smo znali s skrbnim strokovnim premislekom in s skupnimi močmi prestopiti meje med analognim in digitalnim. Ni bilo vedno enostavno premagovati vseh vsebinskih ovir na tej poti, medtem ko so nam tehnološke omejitve in velik obseg naših podatkov narekovali ločen razvoj programskih aplikacij za posamezne vrste geodetskih podatkov oziroma geodetskih evidenc. Prišli pa smo do stopnje razvoja, ko je celovita prenova vodenja medsebojno skladnih evidenc nujna za nadaljnje učinkovito in kakovostno delo geodetske službe, kar nas kot službo in posameznike spet postavlja pred večplastne vsebinske, tehnološke, postopkovne in druge prelomnice, ki jih lahko s primerjavo pogledov v zgodovino in prihodnost geodetske službe razberemo in izluščimo tudi iz opisov in slikovnega gradiva v poglavjih te knjige. Ena od številnih takih ponazoritev je na primer prikaz novega podatkovnega modela katastra nepremičnin, ki je razviden iz spodnje slike 2.



Slika 2: Podatkovni model katastra nepremičnin (vir: GURS – tehnična dokumentacija).

4 ZAKLJUČEK

V opisani knjigi in njenih dveh predhodnicah je predstavljena dobri dve stoletji dolga pot od vzpostavitve zemljiškega katastra na papirnih načrtih ter ročnega vodenja in vzdrževanja grafičnih in opisnih katastrskih podatkov v papirnem katastrskem operatu do sodobnega časa, ko so vse geodetske evidence v celoti vodene in vzdrževane digitalno. Ta prehod slikovito in dobesedno ponazarja tudi naslov knjige *Od gosjega peresa do računalniškega oblaka*.

Mag. Janez Slak, ki je z izjemno energijo in vztrajnostjo predano zbral in uredil obsežno gradivo, je skoraj celotno zadnjo četrtino dolge dvestoletne poti v geodetski praksi prehodil tudi sam. Enako velja za nekatere soavtorje teh izdaj. Prav v tej zadnji četrtini poti je bil tehnološki napredek na področju geodetske znanosti in stroke ter merske in računalniške opreme najbolj intenziven in radikalen, hkrati pa v vseh pogledih izjemno razburljiv, saj smo iz povsem analognih evidenc in postopkov prešli v povsem digitalni svet. Ta intenzivnost novih tehnoloških rešitev in razvojnih možnosti nas je geodete in geodetinj v preteklih desetletjih stalno gnala naprej in spodbujala, da smo po najboljših močeh sprejemali nove tehnologije in nova znanja, jih uvajali v dnevno prakso geodetske službe ter s tem ostajali v špici družbenega tehnološkega napredka. Pomemben del tega so avtorji poskušali opisati in slikovno prikazati v tej knjigi in njenih dveh predhodnicah.

Pomembno je vedeti, da je ključni namen teh knjig trajna ohranitev vpogleda v zgodovinski razvoj geodetske službe in geodetskih evidenc na Slovenskem. Predvsem mlajšim generacijam geodetov in geodetinj bodo v tem in bodočem digitalnem času pomagale razumeti (in upoštevati), kako so katastrski podatki nastali in se spreminjali skozi čas ter zakaj so danes takšni, kot so, v dobrem in slabem. Vsi skupaj pa moramo, tako v katastru kot v geodeziji nasploh, vedno dosledno skrbeti, da stojimo strokovno podkovani trdno na tleh, tudi in celo še posebej takrat, ko bodo vsi naši geodetski podatki in evidence v (računalniških) oblakih. Četudi v ‚oblakih‘, bodo namreč naši podatki in evidence tudi v bodoče opisovali realni svet ‚tu spodaj‘ in določali raznovrstne medsebojne relacije prostorsko in časovno določljivih gradnikov tega sveta ter jih povezovali z realnimi ljudmi, predvsem z njihovimi pravno in prostorsko pogojenimi pravicami, dolžnostmi in omejitvami. Prav to pa je tudi temeljna in nenadomestljiva funkcija kakovostnega katastra nepremičnin.

dr. Joc Triglav, univ. dipl. inž. geod.

*Območna geodetska uprava Murska Sobota
Murska Sobota, Lendavska ulica 18, SI-9000 Murska Sobota
e-naslov: joc.triglav@gov.si*

SIMPOZIJ EUREF 2021 V LJUBLJANI IZVEDEN VIRTUALNO

EUREF 2021 SYMPOSIUM IN LJUBLJANA HELD VIRTUALLY

Sandi Berk, Klemen Medved, Jurij Režek

EUREF je evropska podkomisija Komisije za regionalne referenčne sestave pri Mednarodni zvezi za geodezijo. Geodetska uprava Republike Slovenije je med 26. in 28. majem 2021 gostila jubilejni 30. simpozij EUREF. Slovenija je bila doslej ena redkih držav članic, ki simpozija še ni organizirala. V Ljubljani bi ga morali izvesti že lani, vendar je bil zaradi pandemije koronavirusa sars-cov-2 preložen na letošnje leto. Žal razmere še vedno niso omogočale izvedbe v živo, zato je potekal na daljavo prek spletne platforme za avdio in video komunikacijo Zoom.

Pri organizaciji dogodka sta sodelovala Geodetski inštitut Slovenije ter Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, za prehod v virtualno okolje pa je poskrbelo podjetje Baltazar consulting. Sponzor je bilo podjetje Alberding iz Nemčije, ki ponuja tehnološke rešitve za natančno določanje položaja s sistemi globalne satelitske navigacije GNSS.

Simpozija se je udeležilo 150 prijavljenih gostov iz tridesetih držav, kar je največ doslej; skupaj z vabljenimi gosti – uvodnimi in osrednjim govornikom ter vabljenimi predavatelji – pa je bilo sodelujočih še precej več (slika 1). Več kot pol udeležencev je bilo rednih, dobra četrtina se je simpozija EUREF udeležila prvič, le manjši del pa drugič ali tretjič. Več kot dve tretjini udeležencev sta simpozij spremljali od doma, četrtina iz službe, preostali pa kombinirano ali od drugod. Bi se pa dobra polovica (55 %) anketiranih naslednjič vendarle raje spet srečala v živo, manj kot desetina daje prednost virtualnim srečanjem, preostali pa sta enako všeč oba načina.

V uvodnem delu je več uglednih gostov izreklo pozdrave udeležencem ter orisalo širši pomen EUREF-ove dejavnosti za delovanje in napredek družbe. Pozdravne nagovore so imeli Tomaž Petek, generalni direktor Geodetske uprave Republike Slovenije, Zoran Stančič, izredni svetovalec na Generalnem direktoratu za komunikacije in tehnologijo (DG CNET) pri Evropski komisiji, Ingrid Vanden Berghe, soprodsedujoča Odboru strokovnjakov za globalno upravljanje geoprostorskih informacij (GGIM) pri Združenih narodih, Zuheir Altamimi, predsednik Mednarodne zveze za geodezijo (IAG), Carine Bruyninx, predsednica Komisije IAG za regionalne referenčne sestave, in Martin Lidberg, predsednik EUREF-a. Slednji je predstavil tudi osnutek nove Eurefove strategije. Kratek pregled aktivnosti upravnega odbora EUREF (EUREF GB) je podal Wolfgang Söhne. Osrednji govornik uvodnega dela pa je bil André Bauerhin, izvršni direktor družbe Spaceopal, ki skrbi za delovanje in zagotavljanje storitev evropskega sistema globalne satelitske navigacije Galileo.



Slika 1: Galerija fotografij udeležencev simpozija (uredil: Niko Fabiani).

Osrednji del simpozija je bil razdeljen na pet tematskih sklopov:

- sistemi: ETRS89, EVRS, geoid in sorodni modeli (10 prispevkov),
- omrežja: EPN, UELN, zgoščevanje (9 prispevkov),
- tehnike: GNSS, nivelman, kombinacija (7 prispevkov),
- aplikacije: geoznanosti, geoinformacije (7 prispevkov) in
- nacionalna poročila (26 poročil).

Glede na veliko število prispevkov se vsem seveda ne moremo posebej posvetiti. Mogoče je tu vredno izpostaviti predvsem teme, ki so pomembne tudi za slovensko geodezijo. V pripravi je nova realizacija mednarodnega terestričnega referenčnega sistema ITRF2020 (predstavitev Zuheirja Altamimija). Veliko truda je v zadnjih letih vložena v gostitev točk s kakovostno določenimi vektorji hitrosti ter modeliranje polja hitrosti premikanja zemeljskega površja na območju Evrope. Projekt vzpostavitve enotnega evropskega deformacijskega modela bo dolgoročno omogočil uvedbo kinematičnega geodetskega datuma (predstavitvi Elmarja Brockmanna in Rebekke Steffen). Dopolnjena in posodobljena so bila navodila za zgotovitve EUREF (tj. za nove realizacije ETRS89) in razvito spletno orodje za klasifikacijo in izbor referenčnih GNSS-postaj za izbrano časovno obdobje, ki bo zelo koristno pri obdelavi EUREF-ovih izmer (dve predstavitvi Juliette Legrand). Tudi na področju evropskega višinskega sistema se izvajajo aktivnosti, ki bodo omogočile kakovostnejše in predvsem enotnejše določanje višin v evropskem prostoru (predstavitvi Martine Sacher in Joachima Schwabeja). Kar nekaj prispevkov je bilo na temo obdelave podatkov GNSS-omrežij (na primer predstavitvi Carine Bruyninx in Tomasza Liwosza).

Med prispevki iz osrednjega dela simpozija sta bili tudi dve vabljeni predavanji. Prvo je podal Corné Kreemer, drugo pa Athanassios Ganas. Oba se posvečata preučevanju, spremljanju in kartiranju deformacij zemeljskega površja, in sicer na podlagi GNSS, InSAR in seizmoloških meritev. Le ob poznavanju in kakovostnem modeliranju deformacij zemeljskega površja bo namreč geodezija v prihodnje zmogla zagotavljati geodetski referenčni sistem, ki bo zadovoljil vse višje tehnološke zahteve sodobnega sveta. Pri tem bo ključen multidisciplinaren pristop, kar se udejanja v okviru projekta EPOS (European Plate Observing System), pri katerem sodeluje tudi Slovenija.

Tudi Slovenija se je predstavila z dvema zanimivima prispevkoma, posvečenima izzivom pri vzpostavljanju kakovostnega geodetskega referenčnega sistema (predstavitev Oskarja Sterleta) in zagotavljanju storitev za končne uporabnike v katastru (predstavitev Polone Pavlovčič Prešeren). S podobnimi izzivi se srečujejo druge evropske države (na primer predstavitev Lennarda Huismana), kar je vzpodbudilo tudi zanimivo virtualno debato (klepet).

Kot običajno je bil del simpozija namenjen predstavitvam nacionalnih poročil, ki vedno ponudijo zanimiv vpogled v stanje po posameznih državah, s pregledom izvedenih projektov, izzivov in načrtov za prihodnost. Podanih je bilo 26 nacionalnih poročil, tudi slovensko (predstavitev Klemena Medveda). Slednje vključuje nedavno posodobitev državnega terestričnega referenčnega sistema (D96-17), novosti v državnih omrežjih GNSS-postaj ter vzpostavitev nove pasivne kontrolne GNSS-mreže, uvedbo novega višinskega referenčnega sistema (SVS2010), izvedbo regionalnih gravimetričnih izmer ter pregled tekočih raziskovalnih projektov. Na voljo je tudi obširnejša različica tega poročila v obliki članka (Medved in sod., 2021).

Izvedena sta bila tudi dva sestanka ob robu simpozija (angl. *splinter meeting*). Sestanek na temo projekta CE-GRN (Central European GNSS Research Network), pri katerem sodeluje tudi Slovenija, sta vodila Alessandro Caporali in Joaquín Zurutuza. Drugi sestanek je bil posvečen uvajanju načel FAIR (angl. *findable, accessible,*

interoperable, reusable) za podatke GNSS. Vodila ga je Carine Bruyninx, uvodno vabljeno predavanje pa je imela Stefanie De Bodt. Na obeh sestankih je bila udeležba nad pričakovanji – s po več kot 50 prisotnimi.

V zaključnem delu simpozija je Wolfgang Söhne predstavil kandidata za nova člana upravnega odbora EUREF, ki sta bila nato s prepričljivo večino potrjena na tajnem glasovanju. Sprejemanje resolucij simpozija je po tradiciji vodil Mark Greaves. Letošnje resolucije (EUREF Resolutions, 2021) so posvečene EVRS in nujnosti povezave z ETRS89, uvajanju načel FAIR za podatke GNSS, pomenu čezmejne skladnosti realizacij ETRS89 ter odpravi neskladij med koordinatami EPN-postaj iz toka podatkov v realnem času in njihovih uradnih (ETRS89) koordinat. Zadnja resolucija izraža zahvalo lokalnemu organizacijskemu odboru in vsem sodelujočim institucijam ter sponzorju za odlično organizacijo dogodka.

Program simpozija in povzetke predavanj najdete na spletnih straneh dogodka (EUREF Symposium, 2021). Vsi predstavljeni prispevki pa bodo v kratkem na voljo tudi na spletnih straneh EUREF (EUREF Symposia, 2021), kjer najdete tudi prispevke predhodnih simpozijev. Tridnevni dogodek se je zaključil z vabilom hrvaških kolegov na 31. simpozij EUREF, ki bo prihodnje leto v Zagrebu.

Letošnji simpozij EUREF je bil prvič izveden spletno. Organizacija je terjala veliko prizadevanja lokalnega organizacijskega odbora in sodelovanje upravnega odbora EUREF. Odgovornost in negotovost sta bili veliki, saj je bilo treba v en dogodek povezati veliko število udeležencev in predavateljev iz različnih držav. Kako se je izšlo, pa naj povzamemo z enim od odzivov udeležencev po zaključku simpozija: »*Vsi trije dnevi so bili naravnost odlični. Vesel sem, da sem se lahko udeležil srečanja. Res hvala za brezhibno organizacijo. Vsem nam ste pokazali, kako je treba speljati digitalni dogodek. Prosim, da mojo zahvalo posredujete vsem, ki so sodelovali pri izvedbi. Vse pohvale!*«

V imenu organizatorja se iskreno zahvaljujemo vsem sodelujočim za odlično opravljeno delo.

Literatura in viri:

EUREF Resolutions (2021). EUREF 2021 Resolutions. http://www.euref.eu/symposia/2021Online_from_Ljubljana/EUREF_2021_Resolutions.pdf, pridobljeno 1. junij 2021.

EUREF Symposia (2021). Meetings, Presentations & Resolutions. http://www.euref.eu/euref_symposia_meetings.html, pridobljeno 1. junij 2021.

EUREF Symposium (2021). EUREF 2021 Symposium, Online from Ljubljana, Slovenia.

<https://euref2021.si>, pridobljeno 1. junij 2021.

Medved, K., Berk, S., Režek, J., Fabiani, N., Triglav Čekada, M., Koler, B., Urbančič, T., Ritlop, K., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Sterle, O., Stopar, B. (2021). National Report of Slovenia to the EUREF 2021 Symposium in Ljubljana. 30. EUREF-simpozij, Ljubljana, 26.–28. maj 2021. https://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/DPKS/EUREF_porocila/Medved_et_al_2021_EUREF2021_30.pdf, pridobljeno 1. 6. 2021.

Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.
Geodetska uprava Republike Slovenije
Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: sandi.berk@gov.si

mag. Jurij Režek, univ. dipl. inž. geod.
Geodetska uprava Republike Slovenije
Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: jurij.rezek@gov.si

mag. Klemen Medved, univ. dipl. inž. geod.
Geodetska uprava Republike Slovenije
Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: klemen.medved@gov.si

NOVICE IZ STROKE NEWS FROM THE FIELD



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR

GEODETSKA UPRAVA REPUBLIKE SLOVENIJE

NOVICE GEODETSKE UPRAVE REPUBLIKE SLOVENIJE

LETNO POROČILO GEODETSKE UPRAVE RS ZA LETO 2020

Objavljeno je letno poročilo o delu Geodetske uprave RS za leto 2020. Poročilo vsebuje pregled dela po različnih področjih in na programu projektov eProstor. Kljub posameznim omejitvam, ukrepom in prilagajanju delovanja vsem uveljavljenim ukrepom za preprečevanje okužb s covidom-19 sta obseg in kakovost dela geodetske uprave v letu 2020 dosegla pričakovane rezultate, primerljive s preteklimi leti. GURS se je dobro prilagodil na nove razmere in uslužbencem zagotovil varne razmere za delo. Dobra organiziranost se kaže v uspešni realizaciji zastavljenih ciljev.



Slika 1: Letno poročilo Geodetske uprave RS 2020 (vir: Geodetska uprava RS, 2021).

V letu 2020 sta bili izvedeni dve medresorski obravnavi predloga Zakona o katastru nepremičnin (ZKN), potekalo je usklajevanje prejetih pripomb in predlogov, in pripravljeno gradivo za obravnavo na vladi Republike Slovenije. Vlada je na seji dne 7. 1. 2021 določila besedilo predloga Zakona o katastru nepremičnin in ga poslala v obravnavo državnemu zboru po rednem postopku. Marca 2021 je bil ZKN tudi sprejet ter aprila objavljen v Uradnem listu RS št. 54/2021.

V okviru programa projektov eProstor se je uspešno končal večletni projekt lokacijske izboljšave grafičnega dela zemljiškega katastra. Podatki so bili lokacijsko izboljšani v vseh katastrskih občinah na območju celotnega ozemlja Republike Slovenije. Konec leta 2020 je bila izdana knjiga z naslovom Slovenska zemlja na katastrskih načrtih, v kateri najdemo pregled aktivnosti, ki jih je državna geodetska služba skupaj z zasebnim sektorjem v Sloveniji izvajala pri pretvorbi analognih zemljiškokatastrskih načrtov v digitalni zapis.

Končana je bila obravnava vseh pripomb na modele vrednotenja nepremičnin, prejetih po njihovi javni razgrnitvi in poskusnem izračunu vrednosti v skladu s predpisanimi merili. Vlada RS je določila modele vrednotenja z Uredbo o določitvi modelov vrednotenja nepremičnin (Uradni list RS, št. 22/2020).

Na področju državnega koordinatnega sistema je bila v letu 2020 uvedena nova realizacija državnega koordinatnega sistema D96-17 in posledično posodobitev koordinat stalnih postaj omrežja SIGNAL. Nove koordinate temeljijo na stari (D96) in novi (D17) realizaciji ETRS89 in so dobile oznako D96-17. Glede na zahtevano natančnost izmere v zemljiškem katastru bodo vse dosedanje koordinate zemljiškokatastrskih točk v D96 ostale nespremenjene.

Kot obvezen dokument za vodenje prostorskih metapodatkov je bil sprejet Slovenski metapodatkovni profil za prostorske podatke, ki v celoti upošteva zahteve direktive INSPIRE in pravila za njeno izvajanje pa tudi pravila in zahteve slovenskega Zakona o dostopu do informacij javnega značaja (ZDIJZ). Metapodatkovni profil je obvezen za vse upravljavce prostorskih podatkov, ki objavljajo prostorske metapodatke v slovenskem prostorskem metapodatkovnem sistemu.

Več informacij o delu Geodetske uprave RS je na voljo na spletni strani: <https://www.gov.si/zbirke/katalog-informacij-javnega-znacaja/?org=2545>.

Vir: Geodetska uprava RS

UPORABA SREDNJIH MER ZA POJASNJEVANJE CEN NA TRGU NEPREMIČNIN

Mnogi portali (Finance, 2020; <https://fred.stlouisfed.org/series/ASPUS> ipd.) navajajo povprečne cene posamezne vrste nepremičnin v nekem obdobju. Informacije, po kakšni ceni so na posameznem območju dostopne nepremičnine, so torej izredno zanimive za širšo javnost. Največ podatkov o trgu nepremičnin je navedenih v poročilih o nepremičninskem trgu, ki jih GURS periodično izhaja od leta 2007. To je najobširnejša in najpreglednejša zbirka poročil o dogajanju na trgu nepremičnin v Sloveniji. Podlaga za izdelavo poročil so pregledane transakcije ter obdelani podatki o izvedenih poslih, za kar ažurno skrbijo zaposleni na geodetski upravi. Več o poročilih, njihovi vsebini in naboru podatkov je mogoče najti v metodoloških pojasnilih, ki so dostopna na portalu množičnega vrednotenja pod Poročila o trgu nepremičnin.

V zadnjem času se srečujemo s kar nekaj dilemami glede izdelave poročil. Med temi je najbolj pereče vprašanje, katere mere srednjih vrednosti so najprimernejše za poročanje o trgu nepremičnin. Povprečna cena v poročilih naj bi bila cena nepremičnin, za katero naj bi bila voljan kupec in voljan prodajalec pripravljena skleniti kupoprodajni posel za tipično nepremičnino na nekem območju. Na podlagi tega cilja izbiramo najustreznejšo mero srednje vrednosti. Do nedavnega sta bila v poročilih kot srednja mera za

ceno nepremičnin najpogosteje navedena povprečje in uravnoteženo povprečje. Več o tem je mogoče najti v Metodoloških pojasnilih k periodičnim poročilom (različica 3.2). Podrobnejše analize porazdelitev cen nepremičnin pa v povezavi z vsebino in namenom pojasnjevanja kličejo po nekaterih spremembah.



Slika 2: Prikaz treh naslovnih poročil o nepremičninskem trgu (vir: Portal množičnega vrednotenja, 2021).

Srednje vrednosti se uvrščajo med najpomembnejše statistike in veliko povedo o vzorcu. Kadar je vzorec slučajan, lahko iz njega sklepamo na populacijo. Med najpogostejše srednje vrednosti, ki jih uporabljamo v statistiki, spadajo povprečje oziroma aritmetična sredina, mediana, modus in geometrijska sredina. Pri srednjih vrednostih, predvsem pri povprečju, obstaja velika nevarnost, da jih uporabimo, ko to ni ustrezno. Pri tem je pomembno spomniti, da se veliko lastnosti v naravi porazdeljuje po normalni ali Gaussovi porazdelitvi. To je verjetnostna porazdelitev statističnih enot v obliki zvona, za katerega velja, da se največ vrednosti spremenljivke nahaja okrog povprečja, bolj se od povprečja oddaljujemo, manj je enot. Normalna porazdelitev ima definirana dva parametra, μ (povprečje) in σ (standardni odklon), in je simetrična glede na povprečje. Vse srednje vrednosti so pri normalno porazdeljenih podatkih enake, pri majhnih odstopanjih od normalne porazdelitve so razlike minimalne, pri večjih odstopanjih od normalne porazdelitve pa nastajajo tudi večje razlike med srednjimi vrednostmi. Pri približno normalno porazdeljenih podatkih je najustreznejša mera srednje vrednosti povprečje. O samih podatkih med srednjimi vrednostmi povprečje običajno pove največ, saj na njegov izid vpliva vsaka posamezna vrednost, medtem ko na mediano vpliva le odnos vrednosti glede na mediano. Tako je mediana števil pri vrednosti 1, 3 in 5 ter pri 1, 3 in 14 enaka, saj obakrat znaša 3. Povprečje je v drugem primeru veliko višje (3 oziroma 6). Katera srednja mera je ustreznejša, je vedno aktualno vprašanje. Zaradi tega je velika želja po podatkih, ki so porazdeljeni normalno.

Žal pa v realnem svetu pogosto analiziramo podatke, ki niso normalno porazdeljeni, kar velja tudi za cene nepremičnin. V prihodnjih poročilih o trgu nepremičnin se zato napovedujejo nekatere spremembe. Predvsem bodo preoblikovana analitična območja poročanja, dodatno pa bo povprečje oziroma uteženo povprečje zamenjala druga srednja vrednost, mediana ali geometrijska sredina. Več podrobnosti o novosti bo objavljenih v naslednjih številkah Geodetskega vestnika in poročilih Geodetske uprave RS.

*Žapisała: mag. Melita Ulbl in Andraž Muhič, za Geodetsko upravo RS
e-naslov: melita.ulbl@gov.si, andraz.muhic@gov.si*

13. REGIONALNA KONFERENCA O KATASTRU IN INFRASTRUKTURI ZA PROSTORSKE INFORMACIJE

Geodetska uprava je v torek, 1. 6. 2021, organizirala spletno regionalno konferenco o katastru in infrastrukturi za prostorske informacije, na kateri so sodelovale geodetske uprave iz regije zahodnega Balkana. 13. regionalna konferenca je bila prva, ki je potekala v virtualni obliki prek spleta. Ponudila je še eno priložnost za izmenjavo informacij in izkušenj med udeleženci.



Slika 3: Logotip 13. regionalne konference, ki jo je gostila Geodetska uprava RS.

V programu konference je sodelovalo petnajst predavateljev iz devetih geodetskih uprav zahodnega Balkana in predstavniki projektov, ki jih v regiji financirata švedska in nizozemska vlada. Predstavljeni so bili rezultati analize, ki je bila narejena na podlagi zbranih odgovorov na vprašanja na temo organizacije in stanja infrastrukture za prostorske informacije v posamezni državi. Zadnji prispevek z naslovom Metodologija za izboljšavo položajne in geometrične točnosti načrtov zemljiškega katastra so pripravili na Fakulteti za gradbeništvo in geodézijo. Na podlagi slišanih predstavitev je bilo mogoče ugotoviti velik napredek pri razvoju katastrskih sistemov in delovanju infrastruktur za prostorske informacije v celotni regiji.

Več o programu in vsebini je na voljo na spletni strani konference: <https://www.rcslo13.si/>.

Vir: Geodetska uprava RS

SKUPNO ZASEDANJE STALNEGA ODBORA ZA KATASTER V EVROPSKI UNIJI (PCC) IN SKUPINE ZA ZEMLJIŠKI KATASTER

Od 27. do 28. maja 2021 je bilo izvedeno spletno zasedanje stalnega odbora za kataster (PCC), skupaj z zasedanjem skupine za zemljiške registre in katastre, ki deluje v okviru EuroGeographicsa (CLRKEN). Tokratna konferenca je potekala pod naslovom Cadaster – contributions for a low-carbon economy and society. Konference se je udeležilo 132 predstavnikov iz 31 držav. V okviru zasedanja so bili predstavljeni

tudi rezultati ankete, ki so jo člani skupine CLRKEN izvedli v aprilu 2021. Rezultati vseh zbranih in analiziranih vprašalnikov so dostopni na spletni strani PCC (<http://www.eurocadastre.org/>).

Na povabilo organizatorja je generalni direktor geodetske uprave Tomaž Petek v programu konference sodeloval s predstavitevijo aktivnosti evropskega regionalnega odbora skupine strokovnjakov za upravljanje z geografskimi informacijami pri OZN – UN GGIM Evropa, kjer predseduje izvršilnemu odboru. Ob koncu zasedanja je bila predana zastava stalnega odbora za kataster, saj bo geodetska uprava med slovenskim predsedovanjem Svetu EU od 1. 7. 2021 do 31. 12. 2021 vodila stalni odbor za kataster v okviru EU (PCC). V začetku novembra 2021 bo tako organizirala naslednje redno polletno zasedanje PCC in CLRKEN.

Vir: Geodetska uprava RS

SPLETNA DELAVNICA O VOJAŠKI KARTOGRAFIJI

Na pobudo Agencije za kataster nepremičnin Republike Severne Makedonije je geodetska uprava dne 12. 5. 2021 organizirala spletno delavnico na temo zagotavljanja kartografskih izdelkov v skladu z Natovimi standardi. Na delavnici so sodelovali predstavniki obeh geodetskih uprav in ministrstev za obrambo Slovenije in Severne Makedonije ter predstavniki Geodetskega inštituta Slovenije in Fakultete za geodezijo iz Skopja. Sodelovanje temelji na leta 2012 podpisanem sporazumu o sodelovanju, kjer sta se podpisnika zavezala za izmenjavo informacij in izkušenj pri pripravi predpisov in vzpostavljanju institucionalne infrastrukture na področju geodetske dejavnosti, katastrov, kartografije, topografije, geoinformatike in infrastrukture za prostorske informacije v skladu z mednarodnimi sporazumi in uveljavljeno prakso.

V uvodnih nagovorih sta generalni direktor Geodetske uprave RS Tomaž Petek in direktor Agencije za kataster nepremičnin Severne Makedonije Boris Tundžev izpostavila pomen večletnega sodelovanja med institucijama. V nadaljevanju je Marijana Duhovnik predstavila slovenski državni kartografski sistem in izkušnje geodetske uprave pri sodelovanju z ministrstvom za obrambo. Predstavniki slovenskega ministrstva za obrambo Boris Kovič je udeležencem delavnice opisal aktivnosti, ki jih ministrstvo izvaja za zagotavljanje in uporabo Natovih standardiziranih kartografskih izdelkov v Sloveniji. Sledila je predstavitev izdelave in vzdrževanja topografskih kart na Geodetskem inštitutu Slovenije, ki jo je podal Primož Kete. Drugi del spletne delavnice je bil namenjen dinamični razpravi na temo predstavljenih primerov dobrih praks in obveznosti posamezne države članice Nata na področju kartografije. Delavnica je bila še en kamenček v mozaiku sodelovanja geodetskih uprav in ministrstev za obrambo obeh držav z namenom izmenjave znanstvenih in tehničnih informacij, specifikacij, standardov in izdelkov.

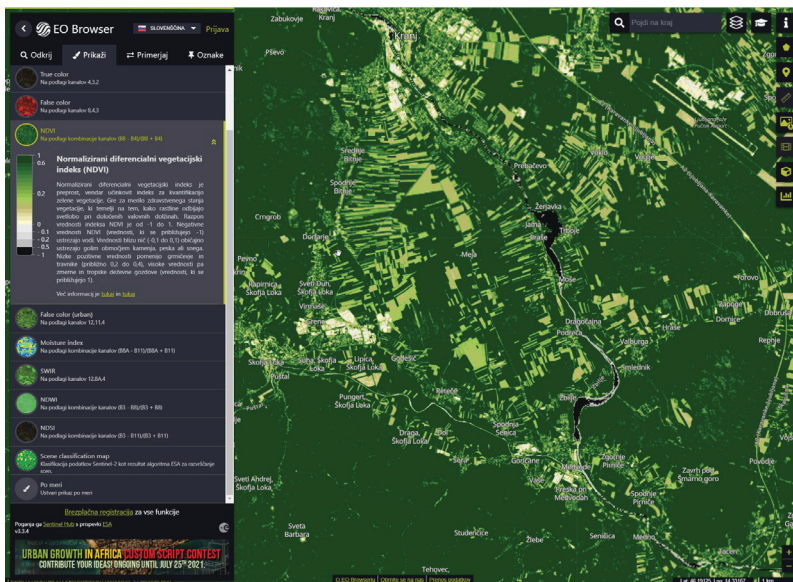
Vir: Geodetska uprava RS



NOVICE FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJU UNIVERZE V LJUBLJANI

UL FGG SODELOVALA PRI RAZVOJU SLOVENSKE RAZLIČICE EO BROWSERJA

EO Browser, najbolj priljubljen pregledovalnik satelitskih posnetkov na svetu, je od nedavnega na voljo v slovenščini. Za slovenski prevod je poskrbel prof. dr. Krištof Oštir s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo pri Univerzi v Ljubljani.



Slika 1: Pregledovanje posnetkov z različnimi vizualizacijami in opisi. Na sliki je vegetacijski indeks NDVI.

S pregledovalnikom EO Browser, ki ga je razvilo podjetje Sinergise d. o. o., lahko hitro in preprosto brskamo ter primerjamo satelitske posnetke polne ločljivosti iz velikega števila virov (Sentineli programa Copernicus, Landsat, MODIS, komercialni viri ...). Izberemo lahko območje, ki nas zanima, določimo želeno časovno obdobje in pokritost z oblaki ter pregledamo dobljene podatke. Preizkusimo lahko različne vizualizacije ali izdelamo svoje, prenesemo posnetke polne ločljivosti in ustvarimo časovne animacije.

Pregledovalnik EO Browser temelji na servisu Sentinel Hub, ki omogoča dostop do podatkov prek brskalnika, namizne aplikacije GIS ali programskega vmesnika (API). Za izobraževanje je še posebej zanimiv

izobraževalni način, v katerem lahko raziskujemo dvanajst tem z izbranimi zanimivimi lokacijami in vizualizacijami. Posnetke v brskalniku EO Browser je mogoče prikazati na podlagi uporabnikove lastne konfiguracije, ki jo določimo s preprostimi skriptami, ali pa tako, da povlečemo in spustimo spektralne pasove v kanale RGB. Pripravljenih je veliko vizualizacij z legendami in opisi, kot so prava barva, lažna barva, vegetacijski indeksi NDVI in EVI itd.

EO Browser je brezplačen za uporabo. Preizkusite ga lahko tule: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>.

Vir: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

TESNO SODELOVANJE UL FGG Z EUROSDR



Slovenija se je leta 2014 na podlagi sporazuma o sodelovanju med Geodetsko upravo RS, Geodetskim inštitutom Slovenije in Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo pri Univerzi v Ljubljani (UL FGG) kot polnopravna članica pridružila evropskemu združenju EuroSDR (angl. European Spatial Data Research, <http://www.eurosd.net>). Vse tri institucije so se zavezale k sodelovanju na področju raziskav, izobraževanja in promocije stroke v okviru združenja EuroSDR. Osnovni koncept EuroSDR je namreč ponujati mednarodni forum za razvojne projekte in prenos znanja ter dobrih praks na

prostorskem informacijskem področju med državami članicami EuroSDR, ki so v združenje vključene prek državnih geodetskih uprav in raziskovalnih oziroma akademskih institucij.

Delo združenja je organizirano v šestih komisijah. V maju 2021 je bila za dveletni mandat kot vodja komisije za prenos znanja (Commission 6: Knowledge transfer) imenovana izr. prof. dr. Anka Lisec z UL FGG. V okviru te komisije so na letni ravni organizirana izobraževanja EduServ s področja zajema ter obdelave prostorskih podatkov in geoinformacijskih storitev, krajše delavnice in tečaji, komisija pa je zadolžena tudi za promocijo stroke in izdajanje publikacij EuroSDR.

Več informacij je mogoče najti na: <http://eurosd.net/commissions/commission-6>.

Vir: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

DRUŠTVENE NOVICE NEWS FROM SOCIETIES



NOVICI ZVEZE GEODETOV SLOVENIJE

DR. BRANKO ROJC, OSEMDESETLETNIK



Dr. Branko Janez Rojc (roj. 1941 v Ljubljani) je ugleden slovenski kartograf in univerzitetni profesor v pokoju. Srednješolsko izobrazbo je pridobil na klasični gimnaziji, ki mu je dala široko humanistično in jezikoslovno izobrazbo, predvsem pa izredno človeško širino. Študij geodezije je opravil na geodetskem oddelku Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani in se kmalu zaposlil kot kartograf na takratnem Inštitutu za geodezijo in fotogrametrijo (IGF). Izkušnje in skrivnosti kartografije je pridobil v sodelovanju s pionirji sodobne kartografije, kot so bili Emil Kržan, Tomaž Banovec in Jože Rotar; kmalu jih je začel prenašati tudi na študente oddelka za geodezijo kot asistent pri predmetih s področja kartografije, kasneje pa je kot visokošolski učitelj za kartografijo nasledil prof. Alojza Podpečana.

Obenem je na fakulteti nadaljeval formalno izobraževanje in se usmeril predvsem v raziskave in študij oblikovanja in zaznave kart. Magistrsko nalogo je posvetil uporabi barv v tematski kartografiji, v doktorski disertaciji pa je celovito obdelal vidike človekovega zaznavanja kart.

Večji del kartografske kariere je uspešno povezoval znanstveno-pedagoško delo na fakulteti s strokovnim delom in vodenjem kartografskega oddelka na IGF. Kot urednik številnih kart IGF je odločilno prispeval k oblikovalskim rešitvam in prepoznavni podobi kart mest in občin, avtokart, geografskih, planinskih, šolskih kart in najrazličnejših drugih tematskih kart. Vodil je projekt izdelave prve slovenske topografske karte DTK 25. Preučeval je uporabo in oblikovanje različnih pisav in uporabil mnoge inovativne pristope pri oblikovanju kart. Največja pohvala za oblikovalske rešitve dr. Branka Rojca je zagotovo prva nagrada za oblikovanje karte mesta Maribor, podeljene na mednarodni kartografski razstavi leta 1999 v Ottawi.

Kot pedagog je bil potrpežljiv in sistematičen predavatelj, predvsem pa pozoren mentor. Njegova poudarjena skrb za splošno in strokovno izrazoslovje ter pravopisno pravilnost je marsikateremu študentu, predvsem pa njegovim številnim diplomantom, razširila obzorja uporabe maternega jezika. Skoraj dve desetletji je kot predstojnik vodil Katedro za kartografijo, fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje na UL FGG. Predaval je tudi na Biotehniški fakulteti, posebej zanimiva pa so bila njegova številna strokovna in poljudna predavanja na posvetih, konferencah, razstavah in drugih prireditvah. Bil je član komisije za

teoretično kartografijo Mednarodnega kartografskega združenja in predsednik sekcije za kartografijo pri Zvezi geodetov Slovenije. V zahvalo za uspešno delo na področju kartografije je bil imenovan za častnega člana Zveze geodetov Slovenije, prejel pa je tudi priznanje za življenjsko delo na področju kartografije ob prvem evropskem dnevu geodetov in geoinformatikov.

Kartografiji in strokovnemu delu je bil vedno predan z vsem srcem. Pri tem so izstopali njegov humanistični duh, razgledanost in narodna zavednost, s čimer je presegal golo tehnično geodetsko znanje. Mlajši smo se ob njem učili spoštovanja slovenskega jezika, tudi ko smo se trudili s pisanjem znanstvenih člankov. Prav tako smo spoznali, da kartografija ni le izdelava kart, temveč tudi njihovo skladno oblikovanje, ki karto nadgradi v vsečen umetniški izdelek. S podrobnim poznavanjem zgodovine kartografije, skladnega oblikovanja in percepcije kart je dr. Branko Rojc vidno prispeval k prepoznavnosti in dvigu kakovostne ravni slovenske kartografije, ki je že v času njegovega znanstvenega delovanja dosegala evropsko raven.

Prof. Rojc je zelo poznan tudi v športnih krogih. Bil je dolgoletni predsednik društva Partizan Vič in zaslužen, da je društvo Brazde vzdržljivosti ohranjalo in negovalo nekoč medijsko zelo podprte in množične prireditve za pridobitev naslovov kaveljc in korenina. Na vseh ravneh se trudi za razvoj in vzpodbudo prostovoljnemu rekreativnemu športu, ki le težko vztraja v koraku s pogosto izrojeno komercializacijo športa. Čas po upokojitvi v veliki meri posveča aktivni udeležbi na športnih terenih ali prireditvah, na potovanjih po svetu, pri predstavljanju slovenskih nacionalnih interesov, kot svetovalec pri zavarovanju premoženja, pogosto sodeluje in svetuje pri oblikovanju kart v različnih oblikah. Vedno uglajen, prijazen in ustrezljiv.

Ob izidu tega Geodetskega vestnika je praznoval osemdeset let, ki jih je preživel kot »kaveljc« v skladu z geslom »zdrav duh v zdravem telesu«. Želimo mu še naprej veliko zdravja in čestitamo!

Slikovno gradivo: Miha Muck, Ljubljansko geodetsko društvo

Zapisala:

doc. dr. Dušan Petrovič, UL FGG – Oddelek za geodezijo; e-naslov: dusan.petrovic@fgg.uni-lj.si

dr. Dalibor Radovan, Geodetski inštitut Slovenije; e-naslov: dalibor.radovan@gis.si



27. SREČANJE GEODETOV NA KRIMU

Letošnje tradicionalno srečanje ob obeležju koordinatnega izhodišča prve katastrske izmere na območju Slovenije je ponovno potekalo v prilagojeni obliki. Epidemija covid-19, ki nas duši že dobro leto, v tretjem valu na območju Slovenije sicer pojema, pa vendar grožnja za okužbo s koronavirusom ostaja med nami.

Veljavni ukrepi in priporočila niso omogočali priprave srečanja v nekdanji obliki, zato je izvršni odbor društva člane povabil k individualnemu pristopu k točki in ni organiziral zbiranja na predlaganih izhodiščih rekreativnih vzponov oziroma skupinskih štartov sicer vsakoletnega tekmovalnega dela. Sprememba organizatorja tako v tem letu ni bilo, prav tako ne običajnega merjenja časa tekačev in kolesarjev, ki sicer vsa leta prizadevno merijo moči na strmih krimskih klancih. Je pa organizator predlagal tradicionalne dostopne smeri:

1. POHOD (daljša različica) od Doma v Iškem vintgarju, pohod po gozdni markirani poti na vrh Krima, $\Delta h = 750$ m;
2. POHOD (krajša različica) od križišča ceste Preserje–Rakitna in ceste na Krim, pohod po gozdni cesti na vrh Krima, $\Delta h = 300$ m;
3. KOLESARJENJE, predlagan začetek pri Rakitniškem jezeru, vožnja po dveh kilometrih asfaltirane in osmih kilometrih makadamske ceste na vrh Krima, $\Delta h = 300$ m;
4. TEK, predlagan začetek na križišču ceste Preserje–Rakitna in ceste na Krim, tek po osem kilometrov gozdne makadamske ceste na vrh Krima, $\Delta h = 300$ m;

in predlagal posredovanje lastnih meritev časa dostopa (ura/minuta) po želji člana.

Prizadevna osemčlanska skupina organizatorjev je na travniku ob križu pod vrhom Krima pripravila sprejemno mesto z velikim napisom DOBRODOŠLI in tako poskrbela za dobro voljo 77 udeležencev med registracijo brez neželenih zgostitev oziroma ob ohranjanju primerne medosebne razmika. Vsak udeleženeec je prejel spominsko majico in bon za okrepčilo v Domu na Krimu, najmlajši in najstarejši pa še spominsko medaljo v obliki polžka z vgravirano letnico druženja. Poleg članov matičnega Ljubljanskega geodetskega društva so bili tam tudi predstavniki Dolenjskega geodetskega društva, Društva geodetov Gorenjske in Celjskega geodetskega društva, ki jih tudi sicer praviloma vsako leto srečujemo na Krimu.



Slika 1: Prekaljena ekipa organizatorjev na sprejemnem mestu pripravlja dobrodoščilo za udeležence.



Slika 2: Pozdravni nagovor in podelitev priznanj pohodnikom, tekačem in kolesarjem ob izhodišču krimskega koordinatnega sistema.

Pohodniki so prihajali iz dveh smeri. S prvo, daljšo različico z začetkom pri domu v Iškem vintgarju je 22 udeleženk/cev povprečno opravilo v dveh urah, ob sredinskem prihodu ob 10:38. Drugo različico od odcepa ceste na Krim s ceste na Rakitno pa so si pohodniki delili s tekači in kolesarji, ob povprečnem prihodu ob 10:47.

Poseben dostop sta izbrala dva udeleženca (družinska člana), ki sta iz Preserij hodila uro in pol, daljše možnosti pa so ubrali tudi nekateri kolesarji. V nadaljevanju objavljamo zgolj prejete lastne meritve časa dostopa:

KOLESARKA: prikolesarila iz Ljubljane na standardno startno mesto Rakitna – jezero in nadaljevala po trasi:

Božena Lipej – čas 0:39

KOLESARJI: start Preserje:

Ferid Daca, Matic Daca, Nejc Daca – čas (ure : minute) 1:05

start Rakitna – jezero:

Aljaž Peklaj – čas 0:28

Anton Kogovšek – čas 0:35

TEKAČICA: start pri odcepu ceste na Krim s ceste na Rakitno:

Amalija Rojc – čas 1:45

TEKAČI: start pri odcepu ceste na Krim s ceste na Rakitno:

Blaž Barborič – čas 0:40

Branko Rojc – čas 1:07

Po registraciji in pristrčnih pozdravih zaradi dolgih mesecev ločitve so se člani od sprejemnega mesta postopoma odpravili k samemu obeležju ob geodetski točki in v skladu s priporočili na ploščadi pred domom prevzeli zasluženjo malico. Navkljub vsem omejitvam je potekala zelo živahna izmenjava izkušenj iz minulih pa tudi želja ter načrtov za prihajajoče mesece. V »mehurčkih«, ki so se razpršili po ploščadi, je veselo »žuborelo« in glasnost (ob povečani medosebni razdalji) je kmalu precej narasla. Čas za spust je nastopil kar prehitro in vtise smo urejali šele v poznih popoldanskih in večernih urah. Prejeti klici in pisni izrazi odobranja so potrdili pravilnost organizatorjeve odločitve in tudi veliko željo vseh po skorajšnjem ponovnem snidenju na novih aktivnostih društva, ob želji po obuditvi druženja tudi na meddruštveni ravni.



Slika 3: Udeleženci v »mehurčkih« z odobranjem spremljajo podelitev priznanj.

Izvršni odbor je sicer tudi že pristopil k organizaciji drugih napovedanih aktivnosti, zato člane pozivamo, da spremljajo obvestila na spletni strani društva in so pozorni na poštna sporočila, s katerimi društvo obvešča o novostih, zaradi spreminjajočih se razmer žal s krajšim rokom od ustaljenega.

Vabljeni in kmalu nasvidenje!

Slikovno gradivo: Miha Muck, Ljubljansko geodetsko društvo

Zapisali: Lija in Miloš Šušteršič, Milan Brajnik

e-naslov: milan.brajnik@gjs.si

IN MEMORIAM ŠTEFAN GREGUR – DENIS



(1962–2021)

V teh čudnih časih nas je v sredo jutraj, ko so se dežne kapljice umaknile sončnim žarkom, pretreslo žalostno sporočilo, da nas je za vedno zapustil dolgoletni sodelavec in najboljši prijatelj Štefan Gregur. Zastal nam je dih, solze so polzele po licu in tišina kar ni minila.

Rodil se je 24. decembra 1962 v Lendavi. Že od otroških dni so ga vsi poznali po imenu Denis. Po osnovni šoli so mu starši omogočili šolanje na srednji gradbeni šoli – obiskoval je geodetski oddelek v Ljubljani. Izobraževanje za poklic geodetskega tehnika je končal leta 1981. Še istega leta je 1. julija prestopil prag geodetske uprave v Lendavi na takratni lokaciji v Partizanski ulici 7 in se zaposlil kot geodet. Na začetku poklicne poti je večino nalog in del opravljal na terenu, ki mu je bil pisan na kožo. Mejni ugotovitveni postopek, prenos posestne meje v naravo so bili zemljiškokatastrski postopki po takrat veljavni zakonodaji (Zakon o zemljiškem katastru, Zbirka predpisov s področja geodetske službe – »tista modra knjižica« jo je imenoval), v katerih je znal doseči soglasje o poteku ugotovljene posestne meje tudi najbolj sprtih sosedov. Stranke so ga poznale, iskale ter spoštovale od prekmurskih ravníc do Lendavskih goríc. Novince nas je učil terenskih veščín, ki jih ne moreš poiskati v nobeni knjigi. V vseh letih njegovega terenskega delovanja se je nabralo veliko zanimivih, nenavadnih zgodb, prigod in nezgod, ki nam bodo trajno ostale v spominu. Med službovanjem je spoznal življenjsko in poklicno sopotnico Suzano, ki mu je bila vedno v oporo in s katero si je ustvaril prijetno družino.

Po spremembi geodetske zakonodaje je opravljal pisarniško-uradniška dela in naloge pri pripravi in izdaji podatkov, arhiviranju (v šali jih je poimenoval dela salonskega geometra) ter aktivno in z veseljem sodeloval pri različnih projektih, ki so se v letih zvrstili v okviru geodetske uprave (digitalizacija, popis nepremičnin, lokacijska izboljšava ...). Z naročniki geodetskih podatkov je vzpostavil pristen in domač odnos, ki je prispeval k zadovoljstvu vseh. Zadnja leta skoraj nobena izmed odprav ekipe na terenska vzdrževalna dela na slovensko-madžarski državni meji ni potekala brez njegove udeležbe, saj je poznal vse poti ter pustil pečat na marsikaterem državnem mejniku tam na tromeji.

Nas sodelavce je vedno razveseljeval in spravljal v dobro voljo. S svojo hudomušno naravo nas je znal spravljati v smeh do solz. Sedaj pa je pisarna številka enainpetdeset ostala sama, vzela ga je nepredvidljiva bolezen tega časa. Dragi Denis, počivaj v miru, hvala ti za vse, vedno boš ostal z nami.

Tvoji sodelavci

DIPLOME IN MAGISTERIJI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG

OD 1. 2. 2021 DO 30. 4. 2021

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE PROSTORSKO NAČRTOVANJE

Ines Arh Analiza izvajanja komasacij stavbnih zemljišč v Sloveniji po letu 2010

Mentorica: izr. prof. dr. Anka Lisec

Somentorica: viš. pred. dr. Mojca Foški

URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=125350>

Matic Klun Predlog alternativnih rešitev za razbremenitev prometne infrastrukture na območju Ljubljanske urbane regije

Mentorica: doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek

Somentor: doc. dr. Gregor Čok

URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=125621>

MATEJA VOLGEMUT – NOVA DOKTORICA ZNANOSTI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG

Dne 17. decembra 2020 je na doktorskem študiju Grajeno okolje na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani doktorsko nalogo s področja načrtovanja in urejanja prostora uspešno zagovarjala Mateja Volgemut, univ. dipl. inž. arh. Nalogo je pripravila pod mentorstvom doc. dr. Alme Zavodnik Lamovšek s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in somentorstvom izr. prof. dr. Alenke Fikfak s Fakultete za arhitekturo Univerze v Ljubljani.

Avtorica: **Mateja Volgemut**

Naslov: **Vpliv lokacije storitev splošnega pomena na razvoj odprtega javnega prostora na primeru majhnih mest v Sloveniji** (angl. The impact of the location of services of general interest on the development of open public space in the case of small towns in Slovenia)

Mentorica: **doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek**

Somentorica: **izr. prof. dr. Alenka Fikfak**

URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124051&lang=slv>

Mateja Volgemut se v disertaciji osredotoča na odprti javni prostor v navezavi na centralne dejavnosti. Namen naloge je bil opisati pomen lokacije odprtega javnega prostora in centralnih dejavnosti, predvsem storitev splošnega pomena, na zaznavo mestnega središča. Preverila je hipotezo, da povezani lokaciji odprtega javnega prostora in centralnih dejavnosti določata središče mesta, opremljenost z odprtim javnim prostorom pa je povezana z zadovoljstvom z bivanjem v mestu in zaznavo podobe mestnega središča. Na podlagi meril in kazalnikov je bila opredeljena širša skupina 33 mest in ožja skupina 8 mest. Na ožji skupini je bila opravljena prostorska analiza, s katero so bili pridobljeni kvantitativni podatki glede opremljenosti mest z odprtim javnim prostorom. Anketni vprašalnik so izpolnjevali prebivalci iz širše skupine mest. Na podlagi prostorske analize in rezultatov ankete je oblikovala kazalnike, s katerimi je dodatno preverjala povezanost odprtega javnega prostora s centralnimi dejavnostmi. Rezultati prostorske analize in ankete so pokazali, da lahko mestno središče opredelimo na kraju, kjer sta lokaciji odprtega javnega prostora in centralnih dejavnosti povezani. Rezultati ankete so pokazali, da sta lokaciji ključni za zaznavo mestnega središča. Ugotovila je, da prebivalci v majhnih mestih od vseh tipov odprtega javnega prostora najpogosteje uporabljajo odprti javni prostor v navezavi na centralne dejavnosti. Delno je potrdila, da je prav opremljenost z odprtim javnim prostorom v navezavi na centralne dejavnosti povezana z zadovoljstvom z bivanjem v mestu. Ugotovila je, da opremljenost mestnega središča z odprtim javnim prostorom bistveno vpliva na zaznavo podobe mesta.

*prof. dr. Krištof Oštir, predstojnik doktorskega študija Grajeno okolje
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: kristof.ostir@fgg.uni-lj.si*

URŠKA DREŠČEK – NOVA DOKTORICA ZNANOSTI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG

Dne 15. marca 2021 je na doktorskem študiju Grajeno okolje na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani doktorsko nalogo s področja geodezije uspešno zagovarjala Urška Drešček, univ. dipl. inž. geod. Nalogo je pripravila pod mentorstvom izr. prof. dr. Anke Lisec in somentorstvom doc. dr. Mojce Kosmatin Fras, obeh s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

Avtorica: **Urška Drešček**

Naslov: **Konceptualni model za zagotavljanje kakovosti 3D-modelov stavb na temelju fotogrametričnega oblaka točk** (angl. A conceptual model for quality assurance of 3D building models based on a photogrammetric point cloud)

Mentorica: **izr. prof. dr. Anka Lisec**

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

URL: <https://repositorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=125471&lang=slv>

V doktorski disertaciji se je Urška Drešček ukvarjala s področjem spremljanja in zagotavljanja kakovosti prostorskih podatkov, natančneje s kakovostjo podatkov v procesu 3D-modeliranja stavb iz fotogrametričnega oblaka točk, pridobljenega iz fotografij, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom. Ker se daljinsko vodeni letalniki vse širše uporabljajo za zajem prostorskih podatkov, je vprašanje zagotavljanja kakovosti prostorskih podatkov pri tem aktualna raziskovalna in strokovna tema. V raziskavi je na podlagi literature podrobno analizirala postopke zajema, obdelave in modeliranja prostorskih podatkov, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, za pridobitev topološko urejenega vektorskega 3D-modela stavb. Izdelala je procesni model, s katerim je prepoznavala ključne dejavnike, ki vplivajo na kakovost izdelkov v celotnem postopku obdelave podatkov in 3D-modeliranja. Ob poznavanju teh dejavnikov je zasnovala konceptualni model za zagotavljanje kakovosti podatkov v obravnavanem procesu. Na podlagi konceptualnega modela je razširila procesni model s postopki za sprotno spremljanje kakovosti vmesnih rezultatov procesa 3D-modeliranja stavb. Razviti procesni model, ki poleg postopkov obdelave podatkov vključuje postopke preverjanja kakovosti, je pomembna novost na obravnavanem raziskovalnem področju in pregledno predstavlja vse faze od zajema UAV-podatkov do končnega 3D-modela stavbe. V eksperimentalnem delu naloge je za podatke na dveh študijskih območjih preizkusila predlagani konceptualni in procesni model. Preverila je vplive izbranih dejavnikov na kakovost vmesnih rezultatov procesa in končnega 3D-modela stavb. Pomembni prispevki disertacije so, poleg celovite obravnave procesa 3D-modeliranja stavb iz podatkov, zajetih z daljinsko vodenim letalnikom, in podrobnega procesnega modela s postopki preverjanja kakovosti, še analiza vpliva izbranih dejavnikov in verifikacija predlaganih korakov za spremljanje kakovosti rezultatov obdelave podatkov.

*prof. dr. Krištof Oštir, predstojnik doktorskega študija Grajeno okolje
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: kristof.ostir@fgg.uni-lj.si*

JERNEJ TEKAVEC – NOVI DOKTOR ZNANOSTI NA ODDELKU ZA GEODEZIJO UL FGG

Dne 19. aprila 2021 je na doktorskem študiju Grajeno okolje na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani doktorsko nalogo s področja geodezije uspešno zagovarjal Jernej Tekavec, univ. dipl. inž. geod. Nalogo je pripravil pod mentorstvom izr. prof. dr. Anke Lisec s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

Avtor: **Jernej Tekavec**

Naslov: **Model razvoja katastra nepremičnin v večnamenski 3D-kataster** (angl. The real property cadastre development model towards a multipurpose 3D cadastre)

Mentorica: **izr. prof. dr. Anka Lisec**

URL: <https://repositorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=126434&lang=slv>

V doktorski disertaciji se je Jernej Tekavec ukvarjal s tehničnimi vidiki razvoja večnamenskih 3D-katastrskih sistemov za stavbe. Razvil je zasnovo 3D-katastrskega podatkovnega modela, ki je skladen z mednarodnim standardom LADM za področje zemljiške administracije in povezljiv s standardi za prostorske podatke (IFC, CityGML, IndoorGML). Temeljno prostorsko enoto za modeliranje stavb je opredelil v obliki notranjega prostora. Na temelju rezultatov analize obstoječih 2D-katastrskih podatkov o stavbah je preučil možnosti njihove uporabe za 3D-modeliranje skladno z razvitim konceptom. Razvil je postopke za določitev topoloških odnosov med 3D-geometrijami notranjih prostorov ter opredelil grafe povezljivosti prostorov.

Težavo pomanjkanja obstoječih 3D-katastrskih podatkov je odpravil s proceduralnim modeliranjem, ki omogoča simulacijo 3D-katastrskih podatkov za večja območja. Na podlagi simuliranih podatkov je izvedel in ovrednotil izbrane 3D-prostorske analize. Ugotovil je, da tehnologije za obdelavo, shranjevanje in upravljanje 3D-prostorskih podatkov omogočajo izvedbo številnih rešitev, obenem pa izkazujejo potrebo po dodatnem razvoju in raziskavah, ki bi omogočile uporabo teh tehnologij v katastrskih sistemih. Z opravljeno raziskavo je dokazal, da je mogoče ustrezno strukturirane 3D-katastrske podatke uporabiti na področjih zunaj domene zemljiške administracije. Disertacija prinaša nova spoznanja, ki bodo lahko pomembno prispevala k razvoju večnamenskih 3D-katastrskih sistemov.

*prof. dr. Krištof Oštir, predstojnik doktorskega študija Grajeno okolje
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: kristof.ostir@fgg.uni-lj.si*



**Zveza geodetov Slovenije in Primorsko geodetsko društvo
najavljata**

49. GEODETSKI DAN

spletno konferenco
z delovnim naslovom

Izzivi digitalne preobrazbe katastra,

ki bo

v četrtek 16. septembra 2021

v prostorih Gledališča Koper, Verdijeva ulica 3, Koper-Capodistria.

Podrobnejše podatke o prireditvi in prijavi dobite na spletni strani

<https://www.primorsko-geodetsko-drustvo.si/>

Vsem predavateljem in sponzorjem se zahvaljujemo za sodelovanje in podporo.

49th SLOVENIAN LAND SURVEYING DAY

Web conference

Challenges of the Digital Renovation of Cadastre

Koper-Capodistria, September 16, 2021

dr. Joc Triglav

Predsednik programskega odbora

mag. Gregor Klemenčič

Predsednik Zveze geodetov Slovenije

Aleš Novak, dipl. inž. geod.

Predsednik organizacijskega odbora

PROGRAM / PROGRAMME

9.00 I. UVODNI POZDRAVI IN PLENARNA PREDAVANJA

Welcome speeches, plenary lectures

Pozdravni govori / Welcome speeches

Kataster v Prekmurju – pogled v zgodovino in pogled naprej

Cadastre in Prekmurje – a look at history and a look ahead

Dr. Joc Triglav (Geodetska uprava Republike Slovenije / Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia)

Katastrski sistem v Švici – dosežki v zadnjih 200 letih in prihodnji izzivi

The Cadastral System in Switzerland – achievements of the last 200 years and future challenges

Dr. Daniel Steudler (Zvezni urad za topografijo Swisstopo, Wabern, Švica / Federal Office for Topography Swisstopo, Wabern, Switzerland)

100 let inovacij v Heerbruggu: vedno v konici napredka geodezije

100 years of innovation in Heerbrugg

Metka Majerič (Leica Geosystems, Heerbrugg, Švica / Leica Geosystems, Heerbrugg, Switzerland)

11.30 PREDAVANJA II / LECTURES II

Prenova nepremičninskih evidenc

Renovation of real estate records

Mag. Ema Pogorelčnik, Franc Ravnihar, Simona Smrtnik (Geodetska uprava Republike Slovenije / Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia)

Lokacijska izboljšava – izhodišče za vzdrževanje podatkov

Location improvement – a starting point for data maintenance

Karolina Koračin, Kristina Murovec, Marko Rotar (Geodetska uprava Republike Slovenije / Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia)

Sistem dejanske rabe zemljišč

The system of land cover

Matevž Ahlin, Bernarda Berden (Geodetska uprava Republike Slovenije / Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia)

Digitalno okolje v podporo prostorskim procesom

Digital environment in support of spatial processes

Dr. Damjan Doler, Jurij Mlinar, dr. Nikolaj Šarlah (Ministrstvo za okolje in prostor RS / Ministry of the Environment and Spatial Planning)

Soglasje za spreminjanje parcelnih mej v praksi

Consent to change the boundaries of land parcels in practice

Mag. Tomaž Černe (Igea, Ljubljana), Matej Kovačič (Geodetski zavod Celje), Marinka Konečnik Kunst (ZUM, Maribor), Franc Ravnihar (Geodetska uprava Republike Slovenije / Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia)

14.30 PREDAVANJA III / LECTURES III

Kakovostna realizacija državnega koordinatnega sistema v katastrski izmeri

Qualitative realization of state coordinate system for cadastral survey

doc. dr. Oskar Sterle¹, Veton Hamza¹, Niko Fabiani², doc. dr. Miran Kuhar¹, mag. Katja Oven², dr. Dalibor Radovan¹, Klemen Ritlop^{1,2}, prof. dr. Bojan Stopar¹, Gašper Štebe¹, doc. dr. Mihaela Triglav Čekada², doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren¹

(¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo / University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, ²Geodetski inštitut Slovenije / Geodetical Institute of Slovenia)

IS Kataster: Pot do digitalne preobrazbe geodetskih izvajalcev

IS Cadastre: The way to digital transformation of land surveyors

Saška Kramar (Geodetski zavod Celje), Andrej Mesner, Miha Muck (Igea, Ljubljana), mag. Niko Čížek (Geodetska družba, Ljubljana), Mateja Ošlak (Geodetski zavod Celje)

Klasifikacija stavb z globokim učenjem

Classification of buildings with deep learning

Simon Šanca, Alen Mangafič (Geodetski inštitut Slovenije / Geodetical Institute of Slovenia), dr. Krištof Oštir (UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo / University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering)

Samodejni pristopi za analizo skladnosti dejanskih in katastrskih mej zemljišč na podlagi posnetkov UAV

Automatic approaches for analysing the overlap of land cover and cadastral boundaries based on UAV imagery

Bujar Fetaj, dr. Jernej Tekavec, izr. prof. dr. Anka Lisec (UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo / University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering)

Primeri uporabe BIM v praksi

Examples of the application of BIM in practice

Matic Kotnik, Matej Čelik (CGS Labs, Ljubljana), Jure Česnik (Elea, Ljubljana), dr. Tilen Urbančič, dr. Jernej Tekavec (UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo / University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering)

Vloga Geoportala AKOS pri pospeševanju digitalne povezljivosti v Sloveniji

The role of AKOS Geoportal in promoting digital connectivity in Slovenia



SO ORGANIZACIJSKO PODPRLI SPONZORJI

Generalni sponzor



Srebrni sponzor



Bronasti sponzor



Sponzor





Dokumentiranje | Kontrola izvedbe | 3D lasersko skeniranje | Analiza kolizij | Modeliranje | Vodenje strojev | BIM |

GEO SERVIS
 Izzive spreminjamo v rešitve

- when it has to be **right** **Leica**
 Geosystems

Merilna oprema in rešitve za zajem in obvladovanje prostorskih podatkov
 Pooblaščen prodajalec in certificirani servisni center **Leica Geosystems**
 Geoservis d.o.o. | (01) 586 38 30 | info@geoservis.si | www.geoservis.si



30 let
40 mio parcel v produkciji
4 države

30 years
40 mil cadastral parcels in production
4 countries

Upravljamo s prostorom SKUPAJ

Let's manage e-spatially TOGETHER

www.igea.si

Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Študij na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani je novim generacijam študentov odlično zagotovilo, da bodo svoje poklicne cilje uresničili z opravljanjem zanimivega dela. Izberi si enega od poklicev prihodnosti.

“V ekipi Modri planet je trenutno zaposlenih šest strokovnjakov, imamo tri zunanje sodelavce. Kar polovica pa nas je doštudirala na ljubljanski FG in prav vsak v ekipi je specialist za svoje področje.”

Marko Mesarič

univ. dipl. inž. geodezije, član ekipe Modri planet



“Med študijem geodezije sem izkoristila vse mednarodne priložnosti, ki jih nudi fakulteta. Zaradi vseh pozitivnih izkušenj v tujini sem si tudi službo poiskala izven Slovenije.”

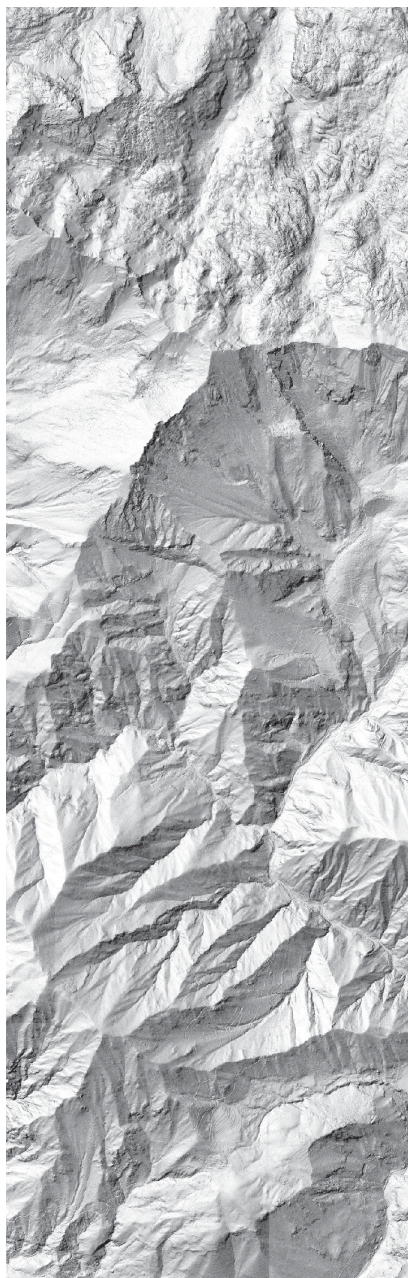
Ana Jeseničnik

univ. dipl. inž. geodezije, zaposlena v švicarskem podjetju Gemetris SA

Drugi prijavní rok za vpis v vse prvostopenjske študijske programe bo odprt od 20. do 27. avgusta 2021.

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo





Podoba analitičnega senčenja DMR1
Laserskega skeniranja Slovenije 2014-2015

GEODETSKI INŠTITUT SLOVENIJE

- Geodetski referenčni sistem, SIGNAL
- Prostorski podatki, statistike in analize
- Nepremičninske evidence in upravljanje z nepremičninami
- Daljinsko zaznavanje, fotogrametrija in lasersko skeniranje
- Hidrografija
- Kartografija
- Geografski informacijski sistemi (GIS)
- Lokacijske storitve in navigacija
- Izdelki za orientacijo in mobilnost ranljivih skupin
- Razvoj kazalnikov in večrazsežna vizualizacija
- Priprava in vodenje mednarodnih projektov
- Izobraževanje
- Izdelava prostorskih maket
- Grafične storitve

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana
tel.: 01 200 29 00, faks: 01 425 06 77, e-pošta: info@gis.si
medmrežje: www.gis.si

Spoštovani,
obveščamo vse deležnike, **da je delo s strankami** na lokacijah GI na Jamovi cesti 2 in Zemljemerski ulici 12 v Ljubljani **za čas grožnje z okužbo s koronavirusom COVID-19 omejeno na telefonsko komunikacijo in poslovanje preko spleta**. Dosegljivi smo na telefonski številki 01 200 29 00 in e-naslovu info@gis.si .



G E O D E T S K I 2021 V E S T N I K

Geodetski vestnik je odprtodostopna revija, ki izhaja štirikrat letno v tiskani in spletni različici. V *Geodetskem vestniku* objavljamo recenzirane znanstvene in strokovne članke, pregledne članke, strokovne razprave ter druga podobna dela s področij geodezije, geodetske izmere, daljinskega zaznavanja, fotogrametrije, geoinformatike, prostorske podatkovne infrastrukture in prostorskega podatkovnega modeliranja, sistemov v podporo odločanju v prostoru, upravljanja zemljišč in prostorskega planiranja. Kot glasilo *Zveze geodetov Slovenije* objavljamo tudi novice v geodetski stroki, kar vključuje novice državne geodetske uprave, novice nacionalnih in mednarodnih strokovnih združenj, poročila o projektih in dogodkih, sporočila članom zveze in podobne zapise.

Več informacij o reviji in navodila za pripravo prispevkov najdete na spletni strani revije www.geodetski-vestnik.com.

Geodetski vestnik is an open access journal, issued quarterly in print and online versions. It publishes double-blind peer-reviewed academic and professional articles, reviews, discussions, and related works from the fields of geodesy, land surveying, remote sensing, photogrammetry, geoinformatics, spatial data infrastructure and spatial data modelling, spatial decision support systems, land management, and spatial planning. As the bulletin of the *Association of Surveyors of Slovenia*, the journal also publishes news in the surveying profession, including news from the surveying and mapping authority of Slovenia, news from national and international professional societies, reports on projects and events, communications to members, and similar reports.

More information about the journal and instructions for authors is available at www.geodetski-vestnik.com.

