



**Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko**

**<http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/>**

**RAZISKAVE S PODROČJA  
GEODEZIJE IN GEOFIZIKE  
2018**

**zbornik del**

24. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 31. januar 2019

## **UREDNIŠKI ODBOR**

Miran Kuhar  
Polona Vreča  
Polona Zupančič  
Rudi Čop  
Mojca Šraj  
Polona Kralj  
Matjaž Ličer  
Gregor Skok  
Bojan Stopar  
Martina Čarman  
Mihaela Triglav Čekada

## **RECENZIJA**

Stanka Šebela  
Martin Knez  
Gregor Skok  
Mojca Šraj  
Mira Kobold  
Tjaša Pogačar  
Gregor Skok  
Nejc Bezak  
Tomaž Ambrožič  
Dušan Kogoj  
Miran Kuhar

## **ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova 2, Ljubljana

Naklada: 80 izvodov

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

SLOVENSKO združenje za geodezijo in geofiziko. Strokovno srečanje (24 ; 2019 ; Ljubljana)  
Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018 : zbornik del / 24. srečanje Slovenskega  
združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 31. januar 2019 ; [organizator srečanja Fakulteta za  
gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran Kuhar ... et al.]. - Ljubljana : Fakulteta za  
gradbeništvo in geodezijo, 2019

ISBN 978-961-6884-59-4

1. Kuhar, Miran 2. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Ljubljana)  
298343680

## Predgovor

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko (SZGG) je bilo ustanovljeno 1993 in deluje v okviru Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG). SZGG je interdisciplinarno združenje, ki povezuje slovenske strokovnjake s področja raziskav planeta Zemlje. Prvo strokovno srečanje je SZGG organiziralo leta 1995. Ob tem je izšel zbornik del, ki je bil posvečen zgodovini slovenske geodezije in geofizike. Danes lahko z zanimanjem prelistamo že štiriindvajseti zbornik del, v katerem so zbrani prispevki predstavljeni na strokovnem posvetu »Raziskave s področja geodezije in geofizike – 2018«.

V okviru SZGG deluje osem različnih sekcij s področja geodezije, seizmologije in fizike notranjosti Zemlje, vulkanizma in kemije notranjosti Zemlje, geomagnetizma, meteorologije in atmosferskih znanosti, hidrologije, fizikalne oceanografije in kriosfere. V letošnjem Zborniku boste našli 16 prispevkov iz sedmih področij delovanja SZGG in se seznanili z novimi dognanji o geodetskih meritvah za umestitev dela Županove jame v globalno koordinatno osnovo, izboru mikrolokacij geodetskih točk kombinirane geodetske mreže 0. reda, spremljanju premikov in oblikovanju poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem, evidentiranju in analiziranju sprememb plazu nad Belco, novem globinskem datumu slovenskega morja, meritvah tektonskih mikro-premikov v prelomni coni Idrijskega preloma, poletnih nevihtah na geomagnetnem observatoriju, meritvah delcev v zraku turističnih jam, avtomatizaciji procesov za sprotno ocenjevanje vpliva nuklearke na okolico, luščenju vetra iz aerosolov in vlage v 4D-Var asimilaciji opazovanj pri numeričnem napovedovanju vremena, odpravi pristranskosti v regionalnih podnebnih modelih, projekcijah sprememb temperature zraka in padavin ter pretokov rek v Sloveniji do konca 21. stoletja in karakterizaciji vodnih virov za javno oskrbo s pitno vodo v Ljubljani. Predstavljeno je tudi delo Pavla Šegule, pionirja slovenske lavinologije in nivologije, ki je preminil decembra 2017. Med prispevki pa je tudi delo mlade nagrajenke SZGG, Katarine Zabret, ki bo s sodelavci predstavila rezultate analize vpliva mikrostrukture dežnih kapljic na prepuščene padavine.

V letu 2018 smo posodobili internetno stran SZGG <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/>, kjer najdete številne zanimive informacije, tudi poročila o dosežkih posameznih sekcij.

Letošnje leto je posvečeno praznovanju stoletnice delovanja IUGG, ki je bilo ustanovljeno 1919 v Bruslju. Danes povezuje IUGG znanstvenike iz 96 držav. Najpomembnejši dogodek, kjer se bomo lahko člani družili, bo 27. generalna skupščina IUGG, ki bo potekala v Montrealu od 8. do 18. julija 2019. <http://iugg2019montreal.com/>.

Vsem, ki ste pripomogli, da je SZGG v letu 2018 uspešno delovalo, in da je pred nami ta zbornik, se iskreno zahvaljujem ter upam, da se bodo tradicionalna januarska srečanja še dolgo odvijala v tako zanimivem in prijetnem vzdušju kot do sedaj.

predsednica SZGG

dr. Polona Vreča





## Vsebina

Predgovor .....	3
Rudi Čop - Poletna nevihta na geomagnetnem observatoriju .....	7
Katarina Zabret, Jože Rakovec, Mojca Šraj - Analiza vpliva mikrostrukture dežnih kapljic na prepuščene padavine pod brezo in borom.....	15
Miloš Miler, Stanka Šebela, Nina Zupančič, Simona Jarc - Meritve delcev v zraku turističnih jam.....	25
Andrej Gosar - Meritve tektonskih mikro-premikov v prelomni coni Idrijskega preloma v dolini Učje .....	30
Marija Zlata Božnar, B. Grašič, P. Mlakar, D. Popović, J. Kocijan - Avtomatizacija procesov za sprotno ocenjevanje vpliva nuklearke na okolico.....	41
Polona Pavlovčič Prešeren, Aleš Marjetič - Geodetske meritve za umestitev dela Županove jame v globalno koordinatno osnovo: izmera do Velike dvorane.....	51
Anže Medved, Gregor Vertačnik - Odprava pristranskosti v regionalnih podnebnih modeli .....	61
Renato Bertalanič, Gregor Vertačnik, Neža Lokošek, Anže Medved, Živa Vlahovič, Mojca Dolinar - Projekcije sprememb temperature zraka in padavin v Sloveniji do konca 21. stoletja.....	75
Mira Kobold, Nejc Gačnik, Jaka Plečko, Aleksandar Vujinović, Katja Klančar - Scenariji spremembe pretokov rek v Sloveniji do konca 21. stoletja.....	89
Božo Koler, Miran Kuhar, Polona Pavlovčič-Prešeren, Tilen Urbančič, Oskar Sterle, Bojan Stopar, Mihaela Triglav-Čekada, Klemen Ritlop, Igor Karničnik, Vasja Bric, Dalibor Radovan - Novi globinski datum za slovensko morje.....	101
Polona Vreča, Tjaša Kanduč, Zdenka Šlejkovec, Stojan Žigon, Klara Nagode, Nika Močnik, Branka Bračič Železnik, Brigita Jamnik, Marjetka Žitnik - Karakterizacija vodnih virov za javno oskrbo s pitno vodo v Ljubljani s pomočjo različnih geokemičnih analiz ...	111
Andrej Mihevc, Tilen Urbančič - Spremljanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem.....	121
Katja Oven, Bojan Stopar, in dr. - Analiza kakovosti operativnega delovanja točke kombinirane geodetske mreže Kog .....	131

Dušan Petrovič, Janez Goršič, Albin Mencin, Klemen Kozmus Trajkovski, Tilen Urbančič Dejan Grigillo - Evidentiranje in analiziranje sprememb plazu nad Belco z geodetskimi metodami .....	141
Miha Pavšek - Pavle Šegula in kriosfera.....	145
Žiga Zaplotnik, Nedjeljka Žagar - Luščenje vetra iz aerosolov in vlage v 4D-Var asimilaciji opazovanj pri numeričnem napovedovanju vremena (povzetek) .....	154

# Poletna nevihta na geomagnetnem observatoriju

Rudi Čop<sup>1</sup>

## Povzetek

Na geomagnetnem observatoriju telekomunikacijsko, računalniško ali merilno opremo delno ali popolnoma uničujejo udari strel, požari, vandalizmi ali poplave. Tako materialno izgubo se da nadomestiti le v daljšem časovnem obdobju. V tem obdobju pa se zgubijo merilni podatki in se zato ne ustvarjajo tudi produktov iz njih. To pa zniža stopnjo uporabnosti observatorija in zanesljivosti njegovega delovanja.

Atmosferske razelektritve so najpogostejši vzrok uničenja opreme geomagnetnih observatorijev. V območju Srednje in Južne Evrope je zaradi strele prizadet eden od observatorijev na vsake dve leti. Zato je dobra zaščita teh objektov pred prenapetostmi tisto, kar omogoča njihovo zanesljivo obratovanje.

**Ključne besede:** geomagnetni observatorij, udari strel, posledice.

**Key words:** geomagnetic observatory, lightning's strokes, consequences.

## Geomagnetni observatorij

Magnetno polje Zemlje se zaključuje v vesolju v neposredni bližini planeta, v magnetosferi. Nanj deluje medplanetarno magnetno polje, ki ga sončni veter raznaša od Sonca po celotni heliosferi. Meritve sprememb zemeljskega magnetnega polja zato segajo od središča Zemlje do središča Sonca in zavzemajo prostor s premerom 1 astronomske enote ( $1 \text{ AU} = 149,60E6 \text{ km}$ ). V zadnjih petindvajsetih letih so se geomagnetni observatoriji zelo spremenili zaradi razvoja računalniških in telekomunikacijskih tehnologij ter merilne tehnike (Korte et al., 2009; Matzka et al., 2010). Zmanjšalo se je število sodelavcev na observatoriju, močno pa povečala količina razpoložljivih merilnih podatkov. Te je potrebno še dodatno obdelati in preoblikovati v uporabno obliko, v produkte observatorija.

Pri izbiri primernege mesta za postavitev novega geomagnetnega observatorija na ozemlju Republike Slovenije so bila izhodišča priporočila mednarodnih organizacij IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) in INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) (Paliska et al., 2010) ter izkušnje, pridobljene pri gradnji in obratovanju geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom (Čop, 2011; Čop & Deželjin, 2012; Čop et al., 2011). Zaradi večje prisotnosti šuma od pričakovanega na Gori nad Ajdovščino sem dodatno naredil ustrezne meritve od obale Jadranskega morja do Sinjega vrha na petih mestih približno enako oddaljenih med seboj in na približno enaki zemljepisni dolžini. Pri tem sem odkril geomagnetno najmirnejši predel na ozemlju Slovenije ob južni obali njenega morja, ki ga predhodne meritve (Čop & Kocen, 2009) in analize GIS (geographic information system) niso pokazale (Paliska et al., 2010).

Geomagnetni observatorij PIA (Piran, Slovenia) (v nadaljnjem besedilu: Observatorij) sem s sodelavci postavil na izbranem zemljišču pri vasi Sveti Peter (v nadaljnjem besedilu: Sv. Peter) v Občini Piran (Čop, 2017). Ta vas je značilna stara istrska gručasta vas na skrajnem robu Šavrinskega gričevja (Istra, 1988; Čop, 2003). To flišno gričevje sestavlja Slovensko

---

<sup>1</sup> Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje

Istro med rekama Rižana in Dragonja in je zaradi prevladujočih sivih laporjev tudi del sive Istre. Sleme, na katerem je vas Sv. Peter, je med dolinama potoka Drnice na severu in reke Dragonje na jugu. Sestavlja jo nekaj že združenih in nekaj ločenih zaselkov. Med njimi je tudi zaselek, ki leži na gornji tretjini pobočja nad reko Dragonjo. Na pobočju nad zaselkom sta značilna istrska kala, ki dajeta vodo v izvire v dolini reke Dragonje pod vasjo Krkavče. Vas Krkavče je na nasprotno ležečem slemenu. Njen osrednji del s cerkvijo in vaškim zvonikom je postavljen na tršo kamnito plast apnenca, ki je vrinjena med ostale plasti peščenjakov. Poleg hidroloških, meteoroloških in seizmoloških lastnost tega območja, je prav njegova geologija tista, ki je najbolj pomembno vplivala na izbiro lokacije za Observatorij in na njegovo zgradbo. Pomemben je namreč prenos potresnih valov po posameznih plasteh kamenin in potek podzemnih vod (NIB, 2003).



Slika 1 – Glavni jašek na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenija) po končani 1. fazi njegove gradnje v januarju 2015.

### **Observatorij PIA (Piran, Slovenija)**

Poleg tega, da je področje Slovenske Istre tudi potresno področje, je bilo pri postavitvi Observatorija potrebno upoštevati poplave površinskih vod in tokove podtalnice. Način njegove gradnje pa je bil v prvi vrsti pogojen z zaščito pred atmosferskimi razelektritvami in razelektritvami v ionosfero (Čop, 2015). Zato je vkopan v zemljo (Slika 1). Zaradi take nestandardne izvedbe je bilo zanj enostavneje pridobiti vsa potrebna soglasja in ustrezno mnenje upravne enote za njegovo gradnjo. Tudi njegova gradnja je bila enostavnejša in cenejša od klasične oblike geomagnetnega observatorija. Meteorološke in klimatološke razmere na Observatoriju dovoljujejo absolutne meritve geomagnetnega polja (Čop, 2016) na merilnih stebrih brez dodatnih paviljonov in ogrevanja. Dostopen je preko celega leta, ima zanesljive telekomunikacijske povezave (Čop & Deželjin, 2013 in zanesljiv vir električne energije. Je na robu kmetijskih zemljišč in v območju Nature 2000 (MOP, 2007).

Projektiranje in priprave na gradnjo Observatorija so se začele v februarju 2014. Pri tem je bilo potrebno uravnotežiti želje, znanje in izkušnje, finančne in pravne možnosti ter

politične in socialne pogoje. Odločujoči pa so bili pogoji, ki se jih v naprej točno ne da določiti. So rezultat trenutnega ekonomskega, sociološkega, psihološkega in političnega trenda v okolici. Odvisni so od ljudi, ki neposredno in posredno sodelujejo pri gradnji observatorija ali lahko vplivajo na to gradnjo. Observatorij je začel poizkusno obratovati v jeseni 2014 in 1. januarja 2015 je kot testni observatorij (TEST Observatory) začel redno pošiljati merilne podatke v mednarodno mrežo INTERMAGNET.

Lastnosti Observatorija so: a) leži na Jadranski tektonski mikroplošči (Weber et al., 2010; Cuffaro et al., 2010); b) je neposredno in redno vključen preko vozlišča GIN EDI (Edinburgh, Scotland) v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET za izmenjavo merilnih podatkov v skoraj realnem času (Technical, 2012); c) še naprej sodeluje pri razvoju magnetometrov in razvija svoj merilni instrument za elektromagnetne valove ULF (ultra low frequency) (Čop & Henigman, 2018).

Meritve sprememb lokalnega magnetnega polja na Observatoriju ter osnovni rezultati njihove obdelave (bazne vrednosti, geomagnetni indeksi) so uporabni na različnih področjih znanosti, tehnike in vsakdanjega življenja.

1) Observatorij ustreza priporočilom mednarodnih organizacij in so zato njegove meritve uporabne v geofiziki pri proučevanju geomagnetnega dinamika in vpliva sončnega vetra nanj (Čop et al. 2008). Predvsem pa je primeren za spremljanje sprememb geomagnetnega polja na svoji lokaciji zaradi posebnosti okolja, v katerem je Observatorij postavljen in v katerem živimo.

2) Nobena dosedanja civilizacija ni bila tako odvisna od stanja geomagnetnega polja kot prav sedanja. Med najbolj občutljive spadajo telekomunikacije (Čop, 2015a; Čop, 2016a) in pa radijski satelitski navigacijski sistemi.

3) Z razvojem satelitske navigacije je magnetna navigacija postala sekundarna oblika (Čop et al., 2008a). Današnje opravičilo za obstoj in nadaljnji razvoj geomagnetnih observatorijev je prav v nepopolnosti satelitskih navigacijskih sistemov (Petersen & Hurst, 2018). Za sekularne spremembe geomagnetnega polja, ki se običajno upoštevajo pri magnetni navigacije, je prvi uporabni model postavil že Friedrich Gauss v prvi polovici 19. stoletja (Glassmeier & Tsurutani, 2014; Manda et al, 2010). Uporaba sodobnih modelov globalnega geomagnetnega polja zahteva ustrezno znanje in preverjanje dobljenih rezultatov (Chulliat et al., 2015; Thébaud et al., 2015). Je pa magnetna navigacija še vedno primarna oblika za varnostne sisteme in pri geoloških vrtnanjih (Buchanan et al. 2013).

4) Biološke raziskave so na nivoju raziskave bioloških magnetnih senzorjev pri bakterijah (Blakemore, 1982; Matsunaga et al. 2007). Medicinske raziskave na tem področju so šele v začetni fazi (Campbell, 1995; Dezeljin & Cop, 2013).

5) V okviru Observatorija je bila narejena študija o vplivu cikla sončnih peg in geomagnetnih neviht na našo ekonomijo in družbo (Jere Jakulin & Čop, 2017).

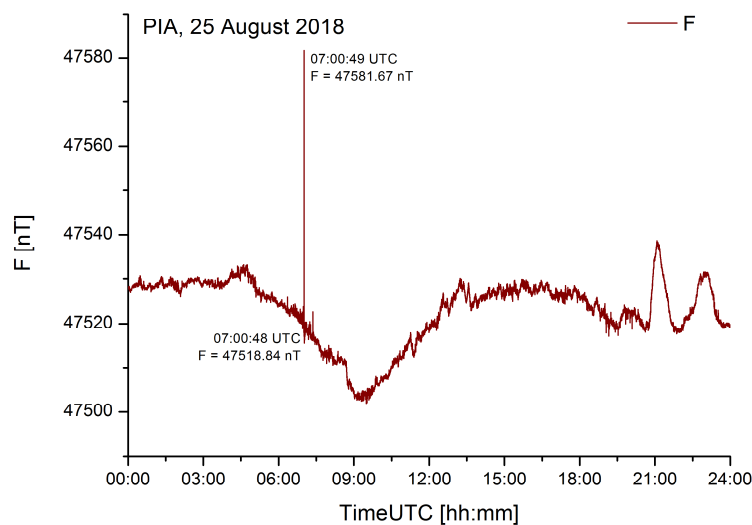
6) Lega Observatorij na Jadranski tektonski mikroplošči omogoča bazične raziskave na področju spremembe energije v geomagnetnem polju ob spremembi napetosti te plošče (Čop, 2017a).

7) Vliv cikličnih sprememb geomagnetnega polja je del raziskav za potrebe razumevanja sprememb v klimatologiji in hidrologiji (Friis-Christensen, 2018; Čop, 2015b).

### **Zaščita pred atmosferskimi razelektritvami**

Sistem zaščite pred delovanjem strele po obstoječih tehničnih smernicah mora omejiti okvare električnih, telekomunikacijskih in drugih oskrbovalnih sistemov ter zagotoviti nizke napetosti dotika in koraka (TSG-N-003, 2013). Enostavne objekte (Uredba, 2013) po teh tehničnih smernicah ni potrebno zaščititi pred strelo. Vendar ima geomagnetni

observatorij, če sodi v to skupino zgradb, svoj lastni energijski vir, od observatorija pa se zahteva visoka stopnja zanesljivosti delovanja. Glede na sprejemljiv riziko je za geomagnetni observatorij priporočljiv sistem zaščite pred delovanjem strele najzahtevnejšega razreda. Da so stroški zaščite takega objekta pred strelo v razumnih mejah, je napajalni sistem za električno energijo kot tudi komunikacijski sistem galvansko izoliran. Sami električni instalaciji, tako izmenične nizke napetosti kot tudi enosmerne male napetosti, sta zahtevni (TSG-N-002, 2013). Osnovno napajanje je iz javnega niskonapetostnega omrežja s sistemom zaščite pred strelo z neposrednimi galvanskimi povezavami in preskoki ter prenapetostnimi zaščitnimi napravami.



Slika 2 – Magnetogram izmerjen 25. avgusta 2018 na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia).

Triosni magnetometer fluxgate (v nadaljnjem besedilu: variometer) (Flux-gate, 2014) je že proizvajalec prilagodil razmeram, ki vladajo v jugozahodnem delu Slovenije, kjer se Observatorij nahaja. Na tem področju so uničujoče atmosferske razelektritve predvsem ob izteku poletja, na koncu sušnega obdobja, ko se ozemljitvena upornost ozemljil izredno poveča. V variometru je zato vgrajena galvanska ločitev sekundarne napajalne napetosti in prenapetostna zaščita vseh povezav med njegovo elektroniko in senzorjem. Napajalni sistem tega merilnega instrumenta pa mora biti pred atmosferskimi razelektritvami vseeno še dodatno zaščiten. Z vso to zaščito variometer ni zavarovan pred uničenjem v primeru neposrednega udara strele v povezovalne kable za njegovo osnovno napajanje.

Za prenapetostno zaščito napajanja Observatorija z električno energijo je bil izbran kombiniran sistem s prenapetostnimi odvodniki, galvansko izolacijo z ločilnimi transformatorji in elektrostatično zaslombo vseh žičnih vodov z neposredno ozemljitvijo te zaščite (Čop et al. 2013a; Čop et al. 2014). Ta zaslomba se je dosegla z vkopavanjem vseh povezovalnih kablov in celotnega merilnega mesta v zemljo. Komunikacijska povezava med variometrom in zapisovalcem merilnih podatkov (angl. data-logger) je galvansko izolirana z optičnim kablom. Povezava Observatorija z internetom je prav tako galvansko ločena z lokalnim informacijskim omrežjem LAN (local area network) oziroma z neposredno povezavo v omrežje mobilne telefonije.

## Poletna nevihta na Observatoriju 25. avgusta 2018

1. julija 2014 je strela udarila neposredno v telefonski kabel pred zaselkom v vasi Sv. Peter, ki leži na pobočju nad reko Dragonje. Kabel je v dolžino preko 30 m popolnoma izparel. Od poletja 2014 so prebivalci zaselka pred začetkom neviht začeli izključevati vse elektronske naprave, ki so bile neposredno priključene na električno in na telefonsko napeljavo. Tudi pred nevihto 25. avgusta 2018 so prebivalci tega zaselka izključili komunikacijske modeme, vendar po njihovi ponovni vključitvi niso vsi delovali. Do takrat uporabljen način zaščite pred udarom strele je tokrat odpovedal.

Ob udaru strele 25. avgusta 2018 je bil na Observatoriju uničen senzor za temperaturo v senzorju variometra. Variometer je do tega dne deloval nepretrgoma in brez okvare že polna štiri leta in v tem času ni bila registrirana dnevna sprememba temperature celotnega senzorja večja od 0,5 °C na dan. Dokler bo njegov senzor v dosedanem jašku, do takrat bo magnetometer še nadaljnje normalno deloval. Je pa ta merilni instrument registriral 25. avgusta 2018 ob 07:00:49 UTC udar strele z doslej največjo izmerjeno amplitudo (Slika 2).

### Poročilo o udarih strele izmerjenih s sistemom SCALAR

Sistem SCALAR so začeli razvijati leta 1997 na Elektroinštitutu Milan Vidmar v Ljubljani. Danes ga sestavlja deset senzorjev po Sloveniji in Zahodnem Balkanu in je vključen v evropsko združenje za detekcijo strel EUCLID (European Cooperation for Lightnih Detection) (SCALAR, 2018).

Poročilo o strelah 25. avgusta 2018 na območju vasi Sv. Peter, ki jih je izmeril sistem SCALAR, je izdal EiMV (Poročilo, 2018). Iz tega poročila sledi, da je na območju Observatorija trajala poletna nevihta od 06:23:55 do 07:09:15 UTC, oziroma 45 minut in 20 sekund. V tem času se je na tem območju sprostil 146 strel. Od teh strel so bile tri take (2,03 %), pri katerih so električni tok prevajali pozitivni ioni (14,2 kA; 30,3 kA; 13,4 kA). V vseh ostalih primerih so električni tok strel sestavljali negativni elektroni. Taka negativna strela z najmočnejšim električnim tokom -85,1 kA je bila od Observatorija oddaljena 4410 m.

Tabela 1 – Zaporedje strel, ki so udarile v bližini Observatorija

Številka	Datum [dd.mm.yyyy]	Čas [HH:mm:ss.### UTC]	Amplituda [kA]	Razdalja	
				SCALAR [m]	Variometer [m]
1	25.08.2018	07:00:48.864	-20,30	98,46	100,6
2	25.08.2018	07:00:48.888	-8,50	26,80	152,9
3	25.08.2018	07:00:49.198	-37,10	54,67	87,8
4	25.08.2018	07:00:49.241	-12,60	25,17	120,8

Ob času 07:00 UTC je v neposredni bližini Observatorija udaril snop strel (angl. flash) in ne le posamična strela (angl. stroke) (Tabele 1). Strela z amplitudo -37,10 kA je udarila le nekaj metrov od nezahtevnega objekta, kjer je priključek observatorija na nizkonapetostno napajanje ter vsa njegova računalniška in telekomunikacijska oprema. Razdalje udarov strel sem preračunal na mesto variometra in jih dodal na koncu tabele (Tabela 1 - Variometer). V povprečju je mesto udara snopa strel 25. avgusta 2018 ob 07:00:49 UTC oddaljeno od variometra 115,5 m.

## Zaključki

3. septembra 2018 je strela udarila v geomagnetni observatorij GCK (Grocka, Srbia) in uničila vse takrat delujoče magnetometre ter sistem za zajemanje merilnih podatkov in za neprekinjeno napajanje (Mihajlović, 2018). Mesec pred tem je strela že uničila električne kable za dovod energije hišicam za meritve na tem observatoriju, kar pa so uspešno sanirali. Atmosferske razelektritve torej uničujejo tudi observatorije na področjih Srednje in Južne Evrope, kjer je sicer letna gostota strel na kvadratni kilometer zemeljske površine nizka.

25. avgusta 2018 je snop strel udaril v neposredno bližino geomagnetnega observatorija PIA (Piran, Slovenia). Po tem udaru observatorij še vedno normalno obratuje. Način njegove prenapetostne zaščite je primer ustreznega ukrepanja za povečanje zanesljivosti delovanja takega merilnega mesta.

Z optično ločitvijo je uspešno rešljiv tudi problem zaščite v primeru neposrednega udara strele v napajalni vod, ki dovaja električno energijo merilnim instrumentom (Rosolem, 2017). Taka zaščita omogoča nemotene meritve sprememb lokalnega magnetnega polja tudi na mestih z zelo visoko letna gostota strel na kvadratni kilometer zemeljske površine. Na takih območjih običajne alternativne oblike napajanja z električno energijo ne pridejo v poštev. Alternativni viri zahtevajo obsežno, relativno drago in pogosto malo učinkovito zaščito pred delovanjem strel.

## Literatura

- Blakemore, P. R. (1982). Magnetotactic bacteria. *Annual Reviews of Microbiology*, 36, 217–238.
- Buchanan, A. Finn, A. C. Love, J. J. Worthington, E. W. Lawison, F. Maus, S. Okewunmi, S. Poedjono. B. (2013). Geomagnetic Referencing – The Real-Time Compass for Directional Drilling. *Oielfield Review*, 25 (3), 32–47.
- Campbell, H. W. (1995). *Geomagnetism Applications*. U.S. Geological Survey Circular 1109. Washington (DC, US): U.S. Geological Survey.
- Chulliat, A. MacMillan, S. Alken, P. Beggan, C. Nair, M. Hamilton, B. Woods, A. Ridley, V. Maus, S. Thomson, A. (2015). *The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020*. Technical Report. Boulder (US): NOAA National Geophysical Data; Edinburgh (UK): British Geological Survey.
- Cuffaro, M. Riguzzi, F. Scrocca, D. Antonioli, F. Carminati, E. Livani, M. Doglioni, C. (2010). On the geodynamics of the northern Adriatic plate. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, (Suppl 1), S253–S279.
- Čop, R. (2003). Additional exploitation of solar energy in ancient house of Istria. *Proceedings : ISES Solar World Congress 2003, Solar Energy for a Sustainable Future, June 14-19, Göteborg, Sweden*. Göteborg: International Solar Energy Society.
- Čop, R. (2011). Gradnja geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2010. Zbornik predavanj*. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 59–64.
- Čop, R. (2015). Razelektritve v ionosferi. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2014. Zbornih del*. Uredniški odbor. Ljubljana: Univerza v Ljubljani; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 7–14.
- Čop, R. (2015a). Zemeljsko magnetno polje in njegov vpliv na telekomunikacije. *Kritična infrastruktura in IKT. VITEL Zbornik referatov*. 31. delavnica o telekomunikacijah. Brdo pri Kranju, 11. In 12. maj 2015. Ljubljana; Slovensko društvo za elektronske komunikacije; Elektrotehniška zveza Slovenije, 29–33.
- Čop, R. (2015b). Snowstorm at the geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation Methodes and Data Systems*, 4, 155–159.



- Čop, R. (2016). Absolutne meritve zemeljskega magnetnega polja. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015. Zbornih del. Uredniški odbor. Ljubljana: Univerza v Ljubljani; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 73–84.
- Čop, R. (2016a). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. Impact of the Sun on the transmission of measuring data in real time by a mobile telephone network. In Slovenian language. Geodetski vestnik, 2016, 60 (2), 197–211.
- Čop, R. (2017). Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016. Zbornik predavanj. Uredniški odbor. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 69–80.
- Čop, R. (2017a). Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju. Elektrotehniški vestnik, 84 (4), 148–154.
- Čop, R. Bilc, A. Beguš, S. Fefer, D. Radovan, D. (2008). Magnetne nevihte in njihov vpliv na navigacijo. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2007. Zbornik predavanj. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 71–80.
- Čop, R. Mihajlović, S. Cander, R. L. (2008a). Magnetic Storms and their Influence on Navigation. Pomorstvo, 22 (1), 89–99.
- Čop, R. Kocen, J. (2009). Geomagnetne meritve na geomagnetni referenčni točki na Predmeji. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008. Zbornik predavanj. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 69–76.
- Čop, R. Deželjin, D. Mihajlović, J. S. Kosovac, P. (2011). Začetne meritve variacij geomagnetnega polja v Sloveniji. Elektrotehniški vestnik, 78 (3), 96–101.
- Čop, R. Deželjin, D. (2012). Preizkusno obratovanje geomagnetnega observatorija Sinji vrh. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. Zbornik predavanj. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 57–62.
- Čop, R. Deželjin, D. (2013). Transmission of the measurement data from the Sinji vrh geomagnetic observatory. HEJDA, Pavel (editor). Proceedings of the XVth IAGA workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition, and processing, June 4th - 14th, 2012, Real instituto y observatorio de la armada San Fernando, Cádiz, Spain : extended abstract volume. San Fernando: Ministerio de defensa, 160–164.
- Čop, R. Milev, G. Deželjin, D. (2013a). Vpliv neviht na geomagnetne meritve na Gori nad Ajdovščino. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012. Zbornik predavanj. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 105–110.
- Čop, R. Milev, G. Deželjin, D. Kosmač, J. (2014). Protection against lightning at a geomagnetic observatory. Geoscientific Instrumentation Methodes and Data Systems, 3, 135–141.
- Čop, R. Henigman, F. (2018). Sprejemnik za elektromagnetne valove frekvenc pod 50 Hz. Elektrotehniški vestnik, 86, 155–161.
- Deželjin, D., Čop, R. (2013). IT systems for Alarming of Possible Health Risks Caused by Geomagnetic Storms. Global Telemedicine and eHealth Updates: Knowledge Resources, Editors Malina Jordanova and Frank Lievens. Luxemburg; International Society for Telemedicine & eHealth (ISfTeH), 6, 512–515.
- Flux-gate Magnetometer LEMI-022. (2014). User Manual Rev.1. Quality control: A. Prystai. Lviv (Ukraine): KMS Technologies; LEMI Laboratory for Electromagnetic Innovations, 15 April 2014.
- Friis-Christensen, E. (2018). Global Change, Space Weather, and Climate. Global Change and Future Earth: The Geoscience Perspective. Edited by Tom Beer, Jiaping Li and Keith Alverson. Special Publications of the International Union of Geodesy and Geophysics. Cambridge (UK): Cambridge University, 28–39.
- Glassmeier, K.-H. Tsurutani, B. T. (2014). Carl Friedrich Gauss – General Theory of Terrestrial Magnetism – a revised translation of the German text. History of Geo- and Space Sciences, 5, 11–62.
- Istra. (1988). Ljubljana; Mladinska knjiga, 1988.
- Jere Jakulin, T. Čop, R. (2017). Sunspot Cycles Impacts on Tourism and Quality of Life. International Journal for Quality Research, 11 (3), 717–728.
- Korte, M. Manda, M. Linthe, H.-J. Hemshorn, A. Kotzé, P. Ricaldi, E. (2009). New geomagnetic field observations in the South Atlantic Anomaly region, Annals of Geophysics, 52 (1), 65–81.

- Mandea, M. Korte, M. Soloviev, A. Gvishiani, A. (2010). Alexander von Humboldt's charts of the Earth's magnetic field: an assessment based on modern models. *History of Geo- and Space Sciences*, 2010, 1, 63–76.
- Matsunaga, T. Suzuki, T. Tanaka, M. Arakaki, A. (2007). Molecular analysis of magnetotactic bacteria and development of functional bacterial magnetic particles for nano-biotechnology. *Trends Biotechnology*, 25 (4), 182–188.
- Matzka, J. Chulliat, A. Mandea, M. Finlay, C. C. Qamili, E. (2010). Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space. *Space Science Reviews*, 155 (1), 29–64.
- Mihajlović, S. (2018). Subject: Obavestjenje-Geomagnetska opservatorija Grocka (GCK). From: Spomenko Mihajlović <mih@orion.rs>; To: rudi <rudi@artal.si>; Date: Sep 18, 2018 at 8:07 AM (22.09.2018)
- MOP. (2007). Natura 2000 in Slovenia. The Treasures of Slovenian Nature. Ministrstvo za okolje in prostor. <http://www.natura2000.si/en/publications/> (24.7. 2016).
- NIB. (2003). Poročilo o sledilnih poskusih ze ugotovitev virov fekalnega onesnaženja izvira Lokva v Sv. Petru nad Dragonjo. 2. faza. Nosilec naloge dr. Mihael Breclj. Ljubljana; Nacionalni inštitut za biologijo; Laboratorij za toksikologijo, 2003.
- Paliska, D. Čop, R. Fabjan, D. Drobne, S. (2010). Izbira lokacije za postavitev geomagnetnega opservatorija v Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 54 (3), 469–480.
- Petersen, T. Hurst, T. (2018). The Scott Base Geomagnetic Observatory. Poster. XVIIIth IAGA WorkShop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, 2018. Conrad Observatory (Austria): Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – ZAMG, 24–29 June 2018.
- Poročilo o atmosferskih razelektritvah št SLO-2018-09-11-9. (2018). Report of atmospheric discharges No. SLO-2018-09-11-9. SCALAR. Ljubljana; Elektroinštitut Milan Vidmar EiMV, 11. september 2018.
- Rosolem, B. J. (2017). Power-Over-Fiber Applications for Telecommunications and for Electric Utilities. *Optical Fiber and Wireless Communications*. Chapter 13. Edited by Rastislav Róka. London (UK): IntechOpen.
- SCALAR. (2018). EIMV – Elektroinštitut Milan Vidmar. <https://www.scalar.si/sl/>; <https://www.scalar.si/en/>. (27.09. 2018)
- Technical Reference Manual. (2012). Version 4.6. Edited by: Benoît St-Louis. Edinburgh (UK): INTERMAGNET c/o British Geological Survey.
- Thébault et al. ( 2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67, 79.
- TSG-N-002. (2013). Nizkonapetostne električne inštalacije. Tehnična smernica za graditev. Izdaja 2. Ljubljana: Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, 2013.
- TSG-N-003. (2013). Zaščita pred delovanjem strele. Tehnična smernica za graditev. Izdaja 2. Ljubljana: Ministrstvo za infrastrukturo in prostor.
- Uredba o razvrščanju objektov glede na zahtevnost gradnje. (2013). Uradni list Republike Slovenije, 18, 2483–2493.
- Weber, J. Vrabec, M. Pavlovčič-Prešeren, P. Dixon, T. Jiang, Y. Stopar, B. (2010). GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 483, 214–222.

# Analiza vpliva mikrostrukture dežnih kapljic na prepuščene padavine pod brezo in borom

Katarina Zabret<sup>\*</sup>, Jože Rakovec<sup>\*\*</sup>, Mojca Šraj<sup>\*</sup>

## Povzetek

Delež prepuščenih padavin, ki dosežejo tla pod vegetacijo, je odvisen od različnih vplivnih spremenljivk, med katerimi je mikrostruktura padavin pogosto prezrta. Mikrostruktura padavin podaja število, velikost in hitrost dežnih kapljic ter se spreminja s časom in prostorom. Meritve padavin na prostem in prepuščenih padavin smo izvedli na raziskovalni ploskvi v Ljubljani, ki je bila vzpostavljena leta 2014. Tekom razvoja treh izbranih padavinskih dogodkov s podobnim trajanjem in različnimi količinami ter intenzitetami padavin smo analizirali vpliv mikrostrukture dežnih kapljic na delež prepuščenih padavin pod navadno brezo (*Betula pendula* Roth) in črnim borom (*Pinus nigra* Arnold). Ugotovili smo, da povečanje velikostnega spektra dežnih kapljic opazno vpliva na povečanje prepuščanja padavin pod borom, ki v primeru zasičenosti drevesne krošnje lahko tudi preseže količino padavin na prostem. Podobnega odziva za primer breze nismo opazili. V primeru obeh drevesnih vrst pa je pojav večjih dežnih kapljic pri majhnih količinah padavin na prostem spodbudil začetek prepuščanja padavin.

**Ključne besede:** prestrežene padavine; prepuščene padavine; mikrostruktura padavin; breza; bor

**Key words:** rainfall interception; throughfall; rainfall microstructure; birch tree; pine tree

## Uvod

Padavine, ki padajo nad vegetacijo, zaradi procesa prestrežanja padavin v celoti ne dosežejo tal. Ob stiku z drevesi se namreč padavine razdelijo na prestrežene padavine, prepuščene padavine in odtok po deblu. Prestrežene padavine ostanejo v drevesni krošnji, postopoma izhlapijo v ozračje in ne dosežejo tal, kar bistveno vpliva na vodno bilanco z gozdom poraščenih območij (Šraj in sod., 2008). Odtok po deblu tvorijo padavine, ki se po vejah ter deblu stekajo do tal. Prepuščene padavine pa so tiste, ki tla dosežejo tako, da padejo neposredno skozi odprtine v drevesni krošnji, postopoma prikapljujejo na tla z zasičenih listov in vej ali pa tla dosežejo zaradi škropljenja prestreženih padavin, ki ga povzroča tresenje krošnje (Nanko in sod., 2006; Bassette in Bussiere, 2008). Posamezne komponente prepuščenih padavin lahko med seboj ločimo glede na njihovo mikrostrukturo. Neposredne prepuščene padavine ohranijo porazdelitev velikosti dežnih kapljic padavin na prostem (Brandt, 1989), premeri kapljic zaradi škropljenja so po navadi manjši od 1,5 mm, medtem ko imajo tiste, ki tla dosežejo s kapljanjem, večje premere (Nanko in sod., 2006).

Mikrostruktura padavin opisuje število dežnih kapljic, njihov premer in hitrost (Uijlenhoet in Sempere Torres, 2006). Kot ena izmed lastnosti padavin je mikrostruktura pomembna spremenljivka, ki poleg količine, intenzitete in trajanja padavin vpliva na deleže prestreženih in prepuščenih padavin ter odtoka po deblu (Zabret in sod., 2018).

---

<sup>\*</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

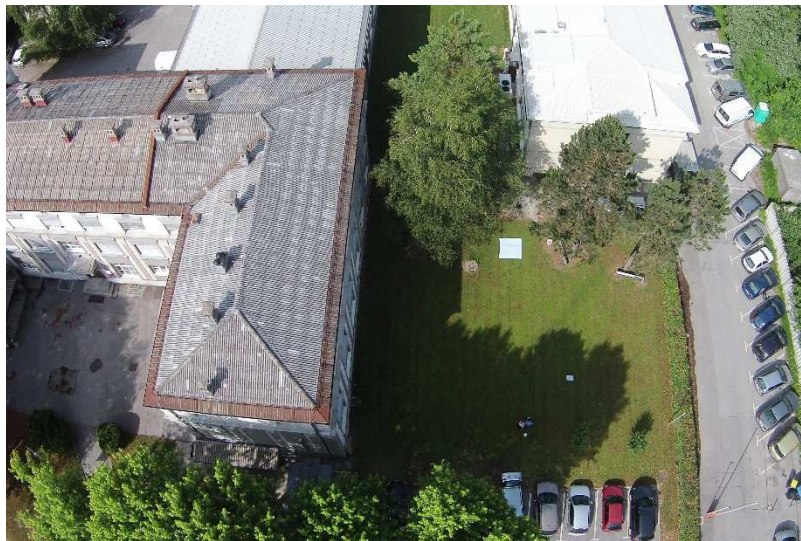
<sup>\*\*</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana

Kljub temu pa so število, velikost in hitrost dežnih kapljic le redko upoštevani pri analizah procesa prestrežanja padavin (Zabret in sod., 2017). Raziskovalci na tem področju so do sedaj upoštevali predvsem mikrostrukturo prepuščenih padavin, med tem ko je bila mikrostruktura padavin na prostem pri analizah prestrežanja padavin zanemarjena. Tako so na primer nekateri raziskovalci primerjali velikostno porazdelitev dežnih kapljic na prostem in pod vegetacijo ter določili značilnosti mikrostrukture prepuščenih padavin (Nanko in sod., 2006; Frasson in Krajewski, 2011), iz katere so poskušali definirati posamezne komponente prepuščenih padavin, to sta kapljanje in škropljenje (Nanko in sod., 2006; Bassette in Bussiere, 2008). Primerjali so tudi mikrostrukturo prepuščenih padavin v posameznih fenofazah in pod različnimi drevesnimi vrstami, da bi analizirali vpliv prisotnosti listja oziroma različnih lastnosti listja in iglic (Nanko in sod., 2013; Nanko in sod., 2016). Zaradi spremenjenih lastnosti dežnih kapljic pod drevesom, ki so predvsem zaradi kapljanja po navadi večje, je bilo kar nekaj raziskav usmerjenih tudi v analizo vpliva velikostne porazdelitve prepuščenih padavin na erozijo pod drevesi (Calder in sod., 1993; Geißler in sod., 2012; Goebes in sod., 2015).

Velikost, hitrost in število dežnih kapljic so pomembne lastnosti padavin, ki vplivajo na številne procese hidrološkega kroga, vendar so v raziskavah pogosto prezrte (Uijlenhoet in Sempere Torres, 2006). Najpogosteje njihovo upoštevanje zasledimo na področju raziskav erozivnosti zemljine. Zaradi spremenjene mikrostrukture prepuščenih padavin glede na padavine na prostem je bilo nekaj študij usmerjenih tudi na to področje, vendar pri tem ni bil upoštevan vpliv mikrostrukture padavin na prostem na delež prestreženih padavin. Namen te raziskave je upoštevati vpliv mikrostrukture padavin na prostem na potek prepuščanja padavin. Ker pa na prepuščanje padavin vplivajo še številne druge spremenljivke, bomo v analizi upoštevali meritve pod listavcem in iglavcem ter različno intenzivne padavinske dogodke.

### Metode in podatki

Osnova za predstavljeno analizo so bili rezultati meritev, ki jih od leta 2014 izvajamo na raziskovalni ploskvi ob stavbi Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG v Ljubljani. Travnata površina z dvema skupinama dreves se nahaja v manjšem mestnem parku in obsega 600 m<sup>2</sup>. Na severo-zahodnem delu raste skupina borovih dreves (črni bor, *Pinus nigra* Arnold), na jugo-zahodnem delu skupina brezovih dreves (navadna breza, *Betula pendula* Roth), na vzhodnem delu pa najdemo čistino, poraslo s travo (slika 1).



Slika1: Raziskovalna ploskev

Raziskovalna ploskev je opremljena z merilniki za merjenje količine padavin na prostem, prepuščenih padavin in odtoka po deblu pod drevesi ter mikrostrukture padavin na prostem. Padavine na prostem smo merili z dvema avtomatičnima dežemeroma (Onset RG2-M), ki sta postavljena na čistini ob vzhodnem robu ploskve. Dežemera imata prekucnik, umerjen na 0,2 mm na tip, ter avtomatični zapisovalec podatkov (Onset HOBO Event). Prepuščene padavine smo merili s kombinacijo nepremičnih korit in premičnih lijakastih merilnikov. Pod vsako skupino dreves stojita dve ostrorobi koriti s površino 0,75 m<sup>2</sup>. Eno korito je opremljeno s prekucnikom (Unidata 6506G; 50 ml/tip) in z avtomatskim zapisovalnikom podatkov (Onset HOBO Event), drugo pa z zbiralno posodo (60 l), ki smo jo praznili ročno. Poleg tega je pod drevesi razporejenih še 11 lijakastih merilnikov z zbirno površino 78,5 cm<sup>2</sup> in ročnim praznjenjem, katerih lokacijo smo spreminjali na 10 dogodkov. Odtok po deblu smo prestrezali z gumijasto polcevko, ovito okrog debela ene breze in enega bora, pritrjeno z žebli in silikonom, ki se steka v zbiralni posodi. V primeru bora smo jo praznili ročno, pri brezi pa smo zaradi večje količine odtoka po deblu namestili prekucnik (Onset RG2-M, 0,2 mm/tip) z avtomatskim zapisovalnikom podatkov (Onset HOBO Event). Mikrostrukturo padavin pa smo spremljali z disdrometrom (Ott Parsivel), postavljenim na strehi bližnje stavbe. Merilna površina disdrometra znaša 54 cm<sup>2</sup> in je pokrita z laserskim žarkom, vsako minuto pa so zaznani padavinski delci razvrščeni v 32 razredov hitrosti (od 0 m/s do 22,4 m/s) in velikosti (od 0,25 mm do 26 mm).

Ker sta hitrost in velikost dežnih kapljic med seboj odvisni ( $v = v(D)$ ) (Gunn in Kinzer, 1949), smo pri analizi rezultatov za večjo preglednost obravnavali le velikost dežnih kapljic. Spreminjanje števila različno velikih dežnih kapljic tekom razvoja padavinskega dogodka smo prikazali na kartah jakosti. Za njihov izris smo uporabili paket lattice (Sarkar, 2017) in pripadajočo funkcije levelplot v programu R (R core team, 2015). Vhodni podatki so bili pripravljani v matrikah velikih približno 32 X 77 celic (odvisno od trajanja dogodka), v katerih je bilo podano število dežnih kapljic v določenem velikostnem razredu (vodoravno) za vsako minuto trajanja dogodka (navpično).

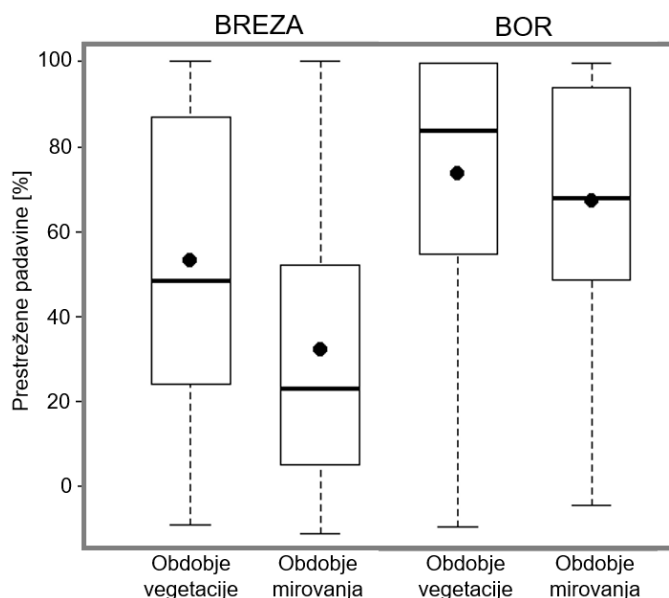
## Rezultati in analiza

### Prepuščene padavine, odtok po deblu in prestrežene padavine

Med 1. januarjem 2014 in 30. junijem 2017 smo na raziskovalni ploskvi zabeležili 468 padavinskih dogodkov. V nadaljnji analizi nismo upoštevali snežnih dogodkov ter dogodkov, pri katerih smo opazili večje napake v delovanju katerega izmed merilnikov. Tako smo analizirali 413 padavinskih dogodkov, katerih vsota je bila 4.110,8 mm padavin. Na dogodek smo zabeležili med 0,2 mm in 167,4 mm padavin. V povprečju je bila intenziteta padavinskih dogodkov enaka 2,3 mm/h ( $\pm 3,6$  mm/h). Povprečno trajanje dogodkov je bilo enako 8,5 ure; najkrajši zabeležen dogodek je bil dolg le 6 minut, najdaljši pa skoraj 5 dni (119 ur).

Količina izmerjenih prepuščenih padavin v obdobju meritev je pod brezo znašala 3.039,0 mm oziroma 74 % vseh na prostem izmerjenih padavin. Pod borom pa smo v celotnem obdobju meritev namerili 2.192,7 mm prepuščenih padavin oziroma 53 % vseh na prostem izmerjenih padavin. Odtoka po deblu pri brezi nismo zabeležili pri 196 dogodkih s količino padavin med 0,2 mm in 29,0 mm, v celoti izmerjen odtok po deblu pa je znašal 130,9 mm, kar predstavlja 3,2 % vseh padavin, izmerjenih na prostem. V primeru bora pa je bil odtok po deblu zanemarljiv, saj smo v celotnem obdobju meritev namerili le 2,7 mm oziroma 0,07 % padavin na prostem. Tako je breza v celoti prestregla 23 %, bor pa 47 % padavin na prostem. Izmerjene vrednosti smo analizirali tudi glede na posamezne

fenofaze, ki smo jih določili glede na olistanost drevesne krošnje breze kot obdobje vegetacije (povsem olistana drevesna krošnja) in obdobje mirovanja (gola drevesna krošnja). Povprečno na dogodek je breza prestregla 45 % ( $\pm 44$  %) padavin, največ v obdobju vegetacije (51 %  $\pm 47$  %) in najmanj v obdobju neolistane krošnje (32 %  $\pm 32$  %). V povprečju je bor na dogodek prestregel 72 % ( $\pm 35$  %) padavin z majhnimi razlikami glede na fenofaze (slika 2).



Slika 2: Prestrežene padavine breze in bora v obdobjih vegetacije in mirovanja

### Vpliv mikrostrukture padavin na prostem na prepuščanje padavin

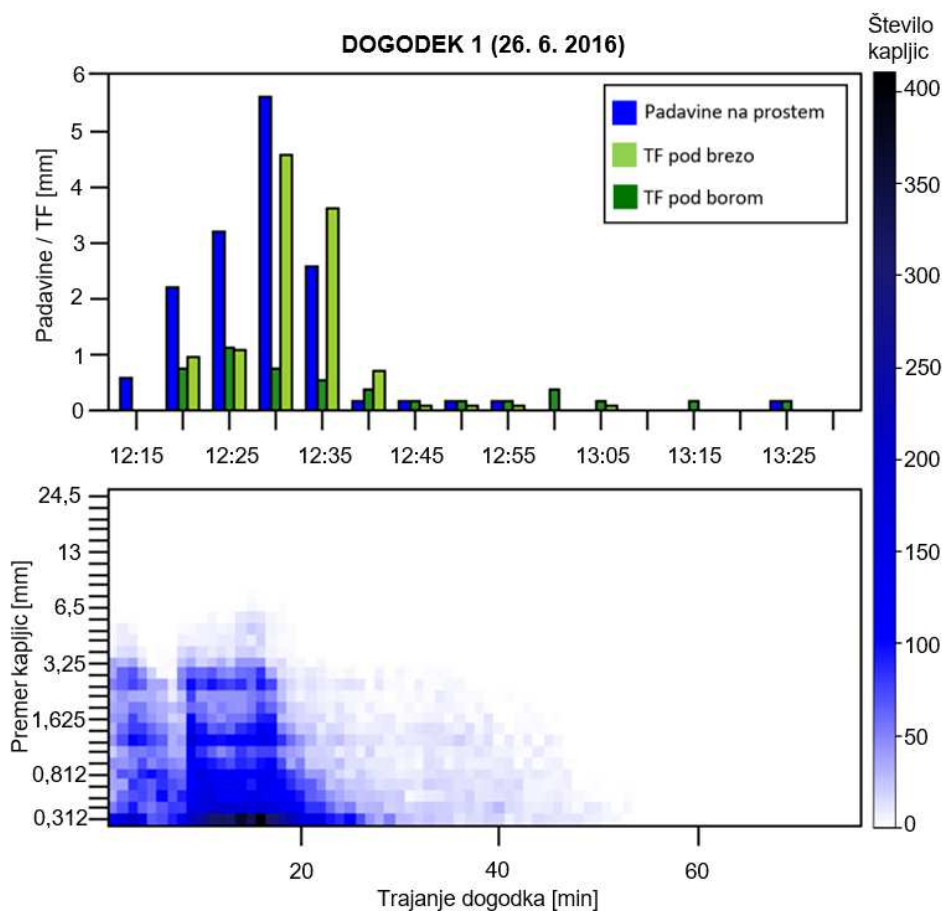
Izmed vseh zabeleženih dogodkov smo izbrali tri dogodke s podobnim trajanjem vendar različno količino, intenziteto in časovno spremenljivostjo mikrostrukture padavin (preglednica 1). Vsi dogodki so bili izmerjeni v obdobju vegetacije, spremembe lastnosti drevesne krošnje, ki jih lahko opišemo z indeksom listne površine (LAI), pa so bile med dogodki zanemarljive (Zabret, 2018). Zaradi različnih lastnosti padavinskih dogodkov smo tako lahko na podobni časovni skali s 5-minutnim časovnim korakom primerjali razvoj prepuščanja padavin pod drevesoma v odvisnosti od velikosti dežnih kapljic.

Preglednica 1: Lastnosti izbranih padavinskih dogodkov

Dogodek	Trajanje padavin [min]	Količina padavin [mm]	Povprečna intenziteta padavin [mm/h]	Prepuščene padavine breza	Prepuščene padavine bor	Premer kapljic* [mm]
Dogodek 1 26. 6. 2016	69	15,2	13,2	62 %	77 %	0,99 ( $\pm 0,32$ )
Dogodek 2 21. 8. 2016	71	33,4	28,2	64 %	70 %	0,92 ( $\pm 0,23$ )
Dogodek 3 22. 5. 2017	54	8,0	8,89	69 %	31 %	1,11 ( $\pm 0,30$ )

\* Podan je povprečen premer dežnih kapljic  $\pm$  standardna deviacija

Večina vseh padavin (95 %) pri prvem dogodku 26. 6. 2016 je padla v 30 minutah od začetka dogodka, ko so bile kapljice tudi večje kot v nadaljevanju. Premer dežnih kapljic je v povprečju v prvem delu dogodka znašal 1,09 mm in v drugem delu dogodka 0,78 mm. Največje kapljice padavin na prostem smo zabeležili med 13. in 18. minuto dogodka, ko so njihovi premeri dosegli 9,5 mm. Večje dežne kapljice so vplivale tudi na povečano prepuščanje padavin pod borom, ki je najprej naraslo s 34 % na 81 %, v nadaljevanju (12:35) pa celo preseгло količino padavin na prostem (slika 3). Spremembe v velikosti dežnih kapljic tekom dogodka na prepuščanje padavin pod brezo niso imele vidnega vpliva.

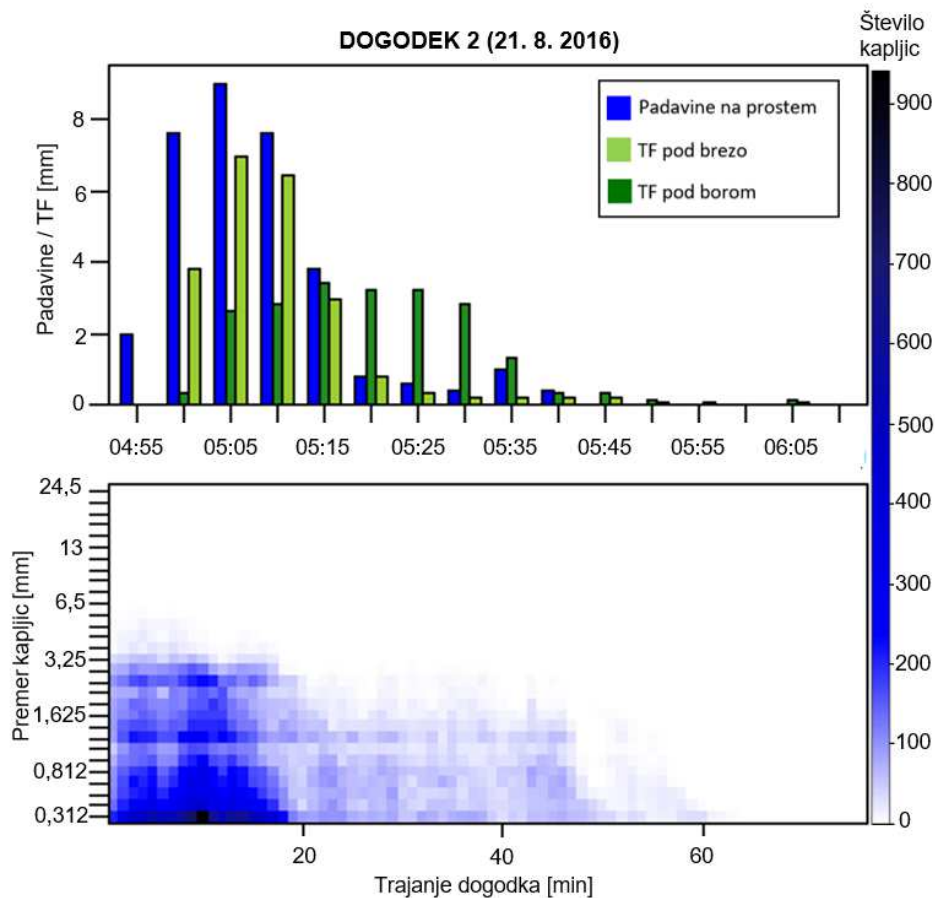


Slika 3: Vsota padavin na prostem ter prepuščenih padavin (TF) pod brezo in borom na 5 minut (zgoraj) in minutni prikaz velikosti ter števila dežnih kapljic na prostem (spodaj) za prvi dogodek

Drugi dogodek (21. 8. 2016) je bil najbolj intenziven in z največjo količino padavin (preglednica 1). Večina padavin (78 %) je padla v prvih 20 minutah od začetka dogodka, ko so bili izmerjeni tudi največji premeri dežnih kapljic do 7,5 mm. V nadaljevanju dogodka pa so bili izmerjeni premeri dežnih kapljic manjši; dosegli so 3,75 mm, v povprečju pa so znašali 0,75 mm. Pod borom se je prepuščanje padavin začelo po 5 minutah od začetka dogodka, sledilo pa je trendu padavin. Tako je v obdobju velikih dežnih kapljic prepuščanje padavin takoj doseglo 51 % in naraščalo, v drugem delu dogodka pa je pričelo upadati (slika 4). Intenzivne in obilne padavine ter velike dežne kapljice na začetku dogodka pa so imele na prepuščanje padavin pod brezo manjši vpliv. Odziv breze je bil počasnejši, saj so v prvem delu dogodka (do 5:10) celotne izmerjene



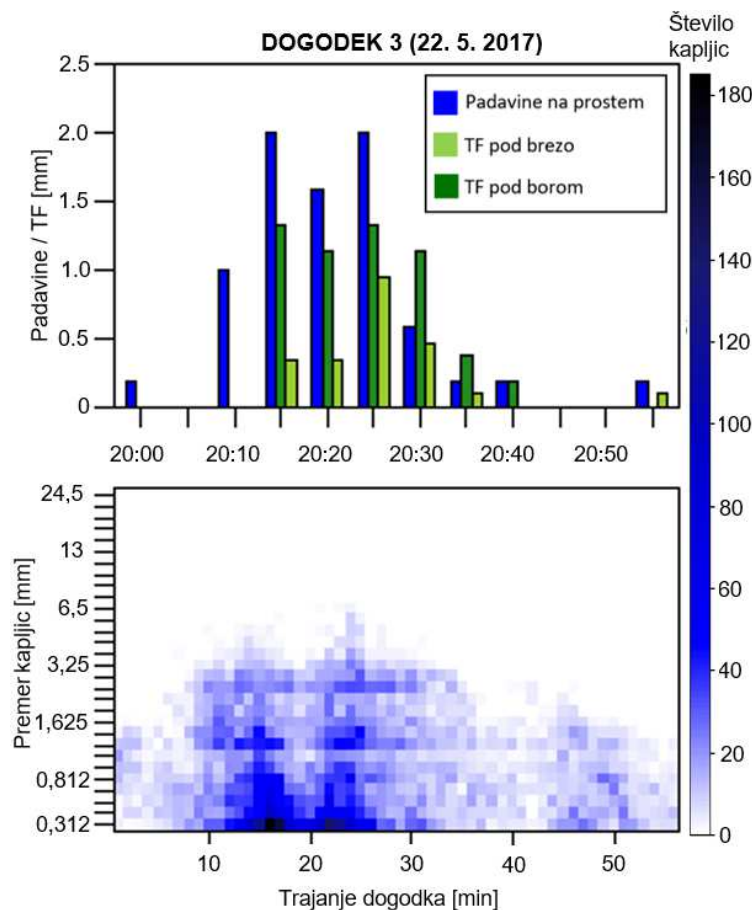
prepuščene padavine znašale le 28 % vseh prepuščenih padavin, izmerjenih tekom dogodka (slika 4).



Slika 4: Vsota padavin na prostem ter prepuščenih padavin (TF) pod brezo in borom na 5 minut (zgoraj) in minutni prikaz velikosti ter števila dežnih kapljic na prostem (spodaj) za drugi dogodek

Najkrajši dogodek z najmanjšo količino padavin pa je bil tretji dogodek (22. 5. 2017), pri katerem so padavine s stalno porazdelitvijo kapljic prevladoval v sredini dogodka. Podobna je bila tudi sama porazdelitev količine padavin, ki je v času od 20:00 do 20:10 naraščala, do 20:30 ostajala približno enaka in se proti koncu dogodka zmanjševala. Večje dežne kapljice s premeri do 7,5 mm smo zabeležili med 13. in 17. minuto ter med 20. in 25. minuto od začetka dogodka. S pojavom večjih dežnih kapljic se je pričelo prepuščanje padavin pod borom in brezo (20:15). Prepuščene padavine pod borom so takoj dosegle 23 % padavin na prostem, večje kapljice v nadaljevanju dogodka pa so vplivale še na dodatno povečanje prepuščenih padavin na 48 % in 80 % (slika 5). Tudi delež prepuščenih padavin pod brezo je narasel zelo hitro in takoj po pojavu večjih dežnih kapljic dosegel 67 % padavin na prostem.





Slika 5: Vsota padavin na prostem ter prepuščenih padavin (TF) pod brezo in borom na 5 minut (zgoraj) in minutni prikaz velikosti ter števila dežnih kapljic na prostem (spodaj) za tretji dogodek

## Razprava

Vpliv mikrostrukture padavin na prostem na proces prestrežanja padavin so na ravni dogodkov že potrdili nekateri raziskovalci (Nanko in sod., 2006; Zabret in sod., 2018), vendar pa se število, hitrost in velikost dežnih kapljic znatno spreminjajo tudi tekom samega dogodka. Analiza razvoja prepuščenih padavin in sprememb v velikosti dežnih kapljic tekom treh izbranih padavinskih dogodkov je pokazala, da večje dežne kapljice spodbudijo prepuščanje padavin pod borom, med tem ko v primeru breze tega pojava nismo opazili (slike 3 – 5). V primeru vseh treh dogodkov je bil delež prepuščenih padavin pod brezo enakomeren od začetka padavin do njihovega pojemanja, ko je presegel količino padavin na prostem. Tako je bil večji delež prepuščenih padavin v tem primeru najverjetneje posledica zasičenosti krošnje in ne sprememb v velikosti kapljic. Razliko v odzivu teh dveh drevesnih vrst lahko pripišemo različnim vegetacijskim lastnostim. Raziskovalci so namreč pokazali, da listje na svoji površini zadrži več vode kot iglice (Nanko in sod., 2006), poleg tega pa je skladiščna zmogljivost listja večja pri večjih dežnih kapljicah (Keim in sod., 2006; Bassette in Bussiere, 2008). Posledično je listje v krošnji breze pri pojavu večjih dežnih kapljic sposobno te uskladiščiti, kar je najverjetneje razlog, da nismo opazili sprememb v prepuščenih padavinah pod brezo ob spremembi mikrostrukture padavin na prostem.

Vpliv večjih kapljic na povečano prepuščanje padavin pod borom je izrazito opazen pri prvem in tretjem dogodku (sliki 3 in 5). Povečanje dežnih kapljic smo opazili po vsaj 10 minutah od začetka dogodka, kar je vplivalo na povečanje deleža prepuščenih padavin za 57 % oziroma 32 % (preglednica 2). S tem je delež prepuščenih padavin pod drevesom pri prvem dogodku v tem 5-minutnem intervalu znatno presegel 100 % in s tem znašal več kot padavine na prostem. Poleg vseh padavin so tla namreč dosegle še sicer zadržane padavine, ki so zaradi dodatnih tresljajev pričele kapljati s krošnje. Pri drugem dogodku pa so bile večje dežne kapljice prisotne prej, od 4. do 7. minute od začetka dogodka (slika 4). Tudi v tem primeru je prišlo do povečanja prepuščenih padavin, ki pa je bilo z 26 % malo manjše kot pri drugih dveh dogodkih (preglednica 2).

Preglednica 2: Spreminjanje lastnosti padavinskega dogodka in deleža prepuščenih padavin s 5-minutnim časovnim korakom za intervale z opaznim povečanjem velikosti dežnih kapljic

Dogodek	Čas	Intenziteta padavin [mm/5min]	Povprečen premer dežnih kapljic [mm]	Prepuščene padavine bor	Prepuščene padavine breza
Dogodek 1	12:30	1,12	1,10	81 %	14 %
	12:35	0,52	0,94	138 %	22 %
	12:40	0,04	0,77	360 %	190 %
Dogodek 2	5:15	0,76	0,99	79 %	90 %
	5:20	0,16	0,85	105 %	404 %
	5:25	0,12	0,83	60 %	538 %
Dogodek 3	20:25	0,4	1,26	48 %	67 %
	20:30	0,12	1,35	80 %	67 %
	20:35	0,04	1,11	60 %	190 %

Prvi in drugi dogodek sta si po trajanju in razporeditvi padavin zelo podobna, razlikujeta pa se po količini in intenziteti padavin (preglednica 1). V obeh primerih je bil odziv prepuščenih padavin pod borom na povečan premer dežnih kapljic podoben, le da je pri prvem dogodku presegel količino padavin na prostem (slika 3), pri drugem pa ne (slika 4). Pri drugem dogodku so bile večje dežne kapljice prisotne že po le 2 mm padlih padavin v 4. minuti po začetku dogodka. Skladiščna zmogljivost krošnje iglastih dreves je bila ocenjena med 2,7 in 2,9 mm padavin (Hutchings in sod., 1988; Llorens in Gallart, 2000; Zabret, 2018), torej ta v trenutku pojava večjih dežnih kapljic pri drugem dogodku še ni bila dosežena. Pri prvem dogodku pa smo dvig vrednosti v velikostnem spektru kapljic zabeležili, ko je padlo 6 mm padavin, ki so že zasičile krošnjo. Podobno kot veter tudi velike dežne kapljice povzročajo tresljaje drevesne krošnje (Nanko in sod., 2006), kar pospeši kapljanje z zasičene krošnje in vpliva na povečanje prepuščenih padavin (Xiao in sod., 2000; Andre in sod., 2008; Zabret in sod., 2017).

Ne glede na različna odziva prepuščenih padavin pod brezo in borom na pojav večjih dežnih kapljic, pa to v primeru obeh drevesnih vrst vpliva na začetek prepuščanja padavin. Pri prvem dogodku se je prepuščanje padavin pod brezo in borom začelo pri le 2 mm padavin, ki so padle v prvih 5 minutah dogodka (slika 3). Prepuščanje padavin se je kmalu po začetku dogodka pojavilo tudi pri drugem dogodku; pod borom se je začelo v 4. minuti ob zapadlih 3 mm, pod brezo pa po 7 minutah in 7,8 mm padavin (slika 4). Začetek prepuščanja padavin pri tretjem dogodku je sovpadal s pojavom večjih in hitrejših dežnih kapljic, kljub majhni količini do tedaj padlih padavin. Pod brezo smo prepuščanje padavin

namreč zaznali pri le 1,2 mm padavin po 12 minutah in pod borom pri 1,8 mm po 14 minutah (slika 5). V obeh primerih skladiščna zmogljivost krošnje še ni bila dosežena. O podobnem pojavu začetka prepuščanja padavin ob zaznanem povečanju velikostnega spektra kapljic so poročali tudi Nanko s sodelavci (2006) in Zabret s sodelavci (2017).

## Zaključki

Mikrostruktura padavin je pomembna vendar pogosto prezrta lastnost padavin, ki vpliva na različne procese hidrološkega kroga. Zaradi načina interakcije med dežnimi kapljicami in vegetacijo, ki znatno vpliva na proces prestrezanja padavin, je pri tem smiselno upoštevati tudi lastnosti kapljic. Podrobna analiza posameznih razvojnih faz padavinskega dogodka je omogočila vpogled v vpliv sprememb v velikostnem spektru dežnih kapljic na delež prepuščenih padavin. Z upoštevanjem dveh različnih drevesnih vrst smo poudarili tudi pomen upoštevanja raznolikih vegetacijskih lastnosti. Večje in hitrejše dežne kapljice hipoma vplivajo na povečanje prepuščanja padavin pod borom, njihov vpliv na prepuščanje padavin pri brezi pa je zanemarljiv. Spremembe v mikrostrukturi padavin na prostem med drugim vplivajo tudi na začetek prepuščanja padavin ter v določenih fazah dogodka tudi na njihovo preseganje količine padavin na prostem. Z dodatnimi analizami raznolikih padavinskih dogodkov in z upoštevanjem novih drevesnih vrst pa bomo vpliv mikrostrukture padavin na prostem na proces prestrezanja padavin lahko razumeli še bolje, saj le-ta bistveno vpliva na vodno bilanco naravnih in urbanih gozdov (Šraj in sod., 2008; Zabret in Šraj, 2015; Zabret, 2018).

## Literatura

- Andre, F., Jonard, M., Ponette, Q. 2008. Precipitation water storage capacity in a temperate mixed oak-beech canopy. *Hydrological Processes* 22: 4130–4141.
- Bassette, C., Bussiere, F. 2008. Partitioning of splash and storage during raindrop impacts on banana leaves. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 991–1004.
- Brandt, C.J. 1989. The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena* 16: 507–524.
- Calder, I.R., Hall, R.L., Prasanna, K.T. 1993. Hydrological impact of Eucalyptus plantation in India. *Journal of Hydrology* 150: 635–648.
- Frasson, R., Krajewski, W. 2011. Characterization of the drop-size distribution and velocity – diameter relation of the throughfall under the maize canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1244–1251.
- Geißler, C., Lang, A.C., von Oheimb, G., Härdtle, W., Baruffol, M., Scholten, T. 2012. Impact of tree saplings on the kinetic energy of rainfall - The importance of stand density, species identity and tree architecture in subtropical forests in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 156: 31 - 40.
- Goebes, P., Seitz, S., Kühn, P., Li, Y., Niklaus, P.A., von Oheimb, G., Scholten, T. 2015. Throughfall kinetic energy in young subtropical forests: Investigation on tree species richness effects and spatial variability. *Agricultural and Forest Meteorology* 213: 148 - 159.
- Gunn, R., Kinzer, G. D. 1949. The terminal fall velocity for water droplets in stagnant air. *Journal of the Atmospheric Sciences* 6, 243–248.
- Hutchings, N.J., Milne, R., Crowther, J.M. 1988. Canopy storage capacity and its vertical distribution in a Sitka spruce canopy. *Journal of Hydrology* 104: 161–171.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., Weiler, M. 2006. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity. *Advances in Water Resources* 29: 974–986.

- Llorens, P., Gallart, F. 2000. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology* 240: 131–144.
- Nanko, K., Hotta, N., Suzuki, M. 2006. Evaluating the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution. *Journal of Hydrology* 329: 422–431.
- Nanko, K., Watanabe, A., Hotta, N., Suzuki, M. 2013. Physical interpretation of the difference in drop size distributions of leaf drips among tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* 169: 74–84.
- Nanko, K., Hudson, S.A., Levia, D.F. 2016. Differences in throughfall drop size distributions in the presence and absence of foliage. *Hydrological Sciences Journal* 61: 620–627.
- R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Dunaj, Avstrija. <http://www.R-project.org/> (Pridobljeno 4. 10. 2017).
- Sarkar, D. 2017. Package 'lattice'. <http://lattice.r-forge.r-project.org/> (Pridobljeno 25. 10. 2017)
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2008. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 121–134.
- Uijlenhoet, R., Sempere Torres, D. 2006. Measurement and parameterization of rainfall microstructure. *Journal of Hydrology* 328: 1–7.
- Xiao, Q., McPherson, E.G., Ustin, S.L., Grismer, M.E., Simpson, J.R. 2000. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes* 14: 763–784.
- Zabret, K. 2018. Vpliv meteoroloških in vegetacijskih parametrov na prestrezanje padavin. Doktorska disertacija. Ljubljana, UL FGG.
- Zabret, K., Rakovec, J., Mikoš, M., Šraj, M. 2017. Influence of raindrop size distribution on throughfall dynamics under pine and birch trees at the rainfall event level. *Atmosphere* 8: 240.
- Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M. 2018. Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area. *Journal of Hydrology* 558: 29–41.
- Zabret, K., Šraj, M. 2015. Can Urban Trees Reduce the Impact of Climate Change on Storm Runoff? *Urbani izziv*, 26: S165–S178.

# Meritve delcev v zraku turističnih jam

Miloš Miler<sup>\*</sup>, Stanka Šebela<sup>\*\*</sup>, Nina Zupančič<sup>\*\*\*</sup>, Simona Jarc<sup>\*\*\*</sup>

## Povzetek

V Postojnski jami (Črna jama in Pisani rov) ter v Škocjanskih jamah (Tiha jama) smo v poletnem in zimskem obdobju zvezno izvajali sedemdnevne meritve količine PM<sub>10</sub> v zraku z merilnim intervalom 5 minut. Hkrati smo merili tudi temperaturo zraka in koncentracijo CO<sub>2</sub>. V zimskem obdobju leta 2017 smo v južnem delu Pisanega rova, predvsem v nočnem času, opazili močno povečane koncentracije delcev PM<sub>10</sub> do 60 µg/m<sup>3</sup>, ki so antropogenega izvora. Poletno obdobje 2017 je v Pisanem rovu pokazalo precej manjše koncentracije delcev (največ 10,9 µg/m<sup>3</sup>). V Tihi jami v Škocjanskih jamah je bila v zimskem obdobju leta 2018 količina delcev PM<sub>10</sub> majhna. Najvišje koncentracije, ki so < 4 µg/m<sup>3</sup> povezujemo s turističnim obiskom. V poletnem obdobju 2018 so bili v Tihi jami doseženi viški koncentracije PM<sub>10</sub> do 25 µg/m<sup>3</sup>. Tudi te so posledica dnevnih turističnih obiskov. Na to kažejo tudi viški poletnih koncentracij CO<sub>2</sub> (3.300 ppm), ki so lahko kar 5x višji od zimskih vrednosti.

**Ključne besede:** delci v zraku, Postojnska jama, Škocjanske jame, Slovenija.

**Keywords:** particulate matter, Postojna Cave, Škocjan Caves, Slovenia.

## Uvod

Trdni delec (PM-particulate matter) je izraz za prah, ki je prisoten v zraku. Najpogosteje se izvajajo meritve delcev premera 10 (PM<sub>10</sub>) in 2,5 (PM<sub>2,5</sub>) µm, ki so zdravju najbolj škodljivi (<http://www.okolje.info/index.php/kakovost-zraka/trdni-delci>). Dnevna mejna vrednost za delce PM<sub>10</sub> znaša 50 µg/m<sup>3</sup> in ne sme biti presežena več kot 35-krat v letu. Za delce PM<sub>2,5</sub> je predpisana letna mejna vrednost 25 µg/m<sup>3</sup>. V Sloveniji je glavni vir onesnaženja z delci PM<sub>10</sub> cestni promet in izpusti iz kurilnih naprav (Celjska in Zasavska kotlina). Najpomembnejši vir PM<sub>2,5</sub> so mala kurišča (74%), sledi cestni promet (9%). Približno 70% mase PM<sub>10</sub> in PM<sub>2,5</sub> predstavljajo sekundarni delci (aerosoli), elementarni C, dviganje usedlin s tal in morski aerosoli. Preostalih 30% lahko pripišemo vodi.

Meritve delcev v zraku so v obeh turističnih jamah že opravljali. Tako so v Postojnski jami na najnižji točki turistične poti v jutranjih urah izmerili koncentracije ne-radioaktivnih aerosolov med 600 in 2.750 cm<sup>-3</sup>, od tega je bilo 90% delcev manjših od 50 nm (Iskra in drugi, 2010). Nadaljne raziskave v Postojnski jami ob turistični poti (Bezek in drugi, 2013) so pokazale, da je bila koncentracija aerosolov poleti nižja (700 cm<sup>-3</sup>) kot pozimi (2.800 cm<sup>-3</sup>). Poleti so prevladovali delci velikosti <50 nm, pozimi >50 nm, kar so razložili z zimskim vdorom hladnega zunanega zraka in prinosom zunanjih delcev v jamsko okolje.

Vplivi turizma na Škocjanske jame so bili prikazani tudi s spremljanjem aerosolov v zraku (Grgić in drugi, 2014). Najvišje koncentracije delcev PM<sub>10</sub> so določili v obdobju od 8. do 20. avgusta 2012, in sicer 15,3 µg/m<sup>3</sup>.

Delce v zraku v kraških jamah so raziskovali tudi drugod po svetu. Tako so v turistični jami Ingleborough v Veliki Britaniji za avtogeni izvor aerosolov ob aktivnem vodnem toku

<sup>\*</sup> Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>\*\*</sup> ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija

<sup>\*\*\*</sup> Univerza v Ljubljani, NTF, Oddelek za geologijo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

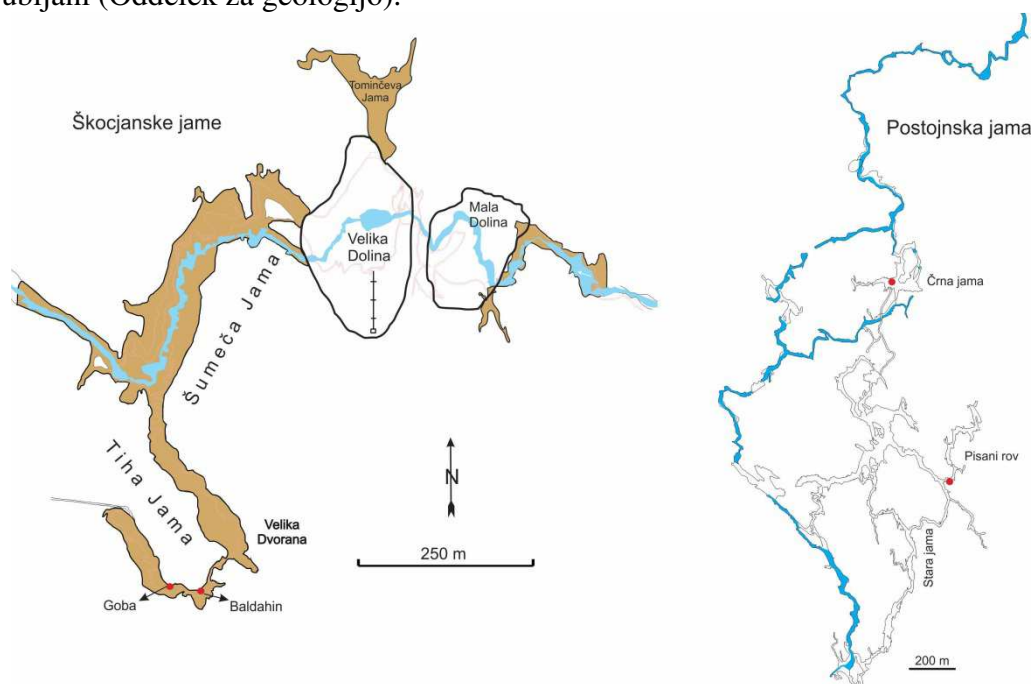
izmerili povišanje  $PM_{10}$  za  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Prisotnost turistov je koncentracije aerosolov tudi povišala, in sicer za  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Smith in drugi, 2013).

Meritve delcev so izvajali tudi v povezavi z jamami, ki jih uporabljajo za speloterapijo. V jami Szemplőhegy pod Budimpešto so ugotovili, da se koncentracija aerosolov zmanjšuje z oddaljenostjo od vhoda v jamo in da onesnažena voda in atmosferski zrak predstavljata nevarnost za jame, ki so v UNESCOvi dediščini (Kertész in drugi, 1999).

Namen naše raziskave je bil primerjava meritev delcev v zraku s klimatskimi parametri (temperatura zraka,  $CO_2$  in smer gibanja zraka) v dveh obdobjih (zima in poletje) ob turistično obremenjeni in manj turistično obremenjeni poti v dveh kraških jamah. Izbrali smo najbolj obiskani jami v Sloveniji: Postojnsko jamo in Škocjanske jame. Zanimala nas je koncentracija in velikost delcev v zraku ter izvor delcev (prinos delcev iz zunanosti v jamo ali prenašanje delcev po jami).

## Metode

Na podlagi dovoljenja Agencije RS za okolje št. 35602-6/2018-2 z dne 14. marec 2018, smo v Postojnski jami in Škocjanskih jamah izvajali 2x7 dni zimskih in 2x7 dni poletnih meritev. Uporabljali smo inštrument za merjenje in vzorčenje delcev v zraku velikosti med  $0,25$  in  $32 \mu\text{m}$  in določanje masnih koncentracij  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  in  $PM_1$  Portable Laser Aerosolspectrometer Grimm 1.109 s konstantnim pretokom zraka  $1,2 \text{ l}/\text{min}$ . Raziskava se opravlja v sodelovanju med ZRC SAZU, Geološkim zavodom Slovenije in Univerzo v Ljubljani (Oddelek za geologijo).



Slika 1 – Mesta meritev delcev v zraku v Postojnski jami (Črna jama in Pisani rov) in v Škocjanskih jamah (Baldahin in Goba v Tihi jami).

Meritve delcev v zraku Postojnske jame (Slika 1) so se v Črni jami opravljale od 16.1.2017 do 23.1.2017 in od 28.8.2017 do 4.9.2017, v Pisanem rovu pa od 23.1.2017 do 31.1.2017 in od 4.9.2017 do 11.9.2017. V Škocjanskih jamah smo meritve izvajali na lokaciji Baldahin od 29.1.2018 do 5.2.2018 in od 30.8.2018 do 6.9.2018, na lokaciji Goba

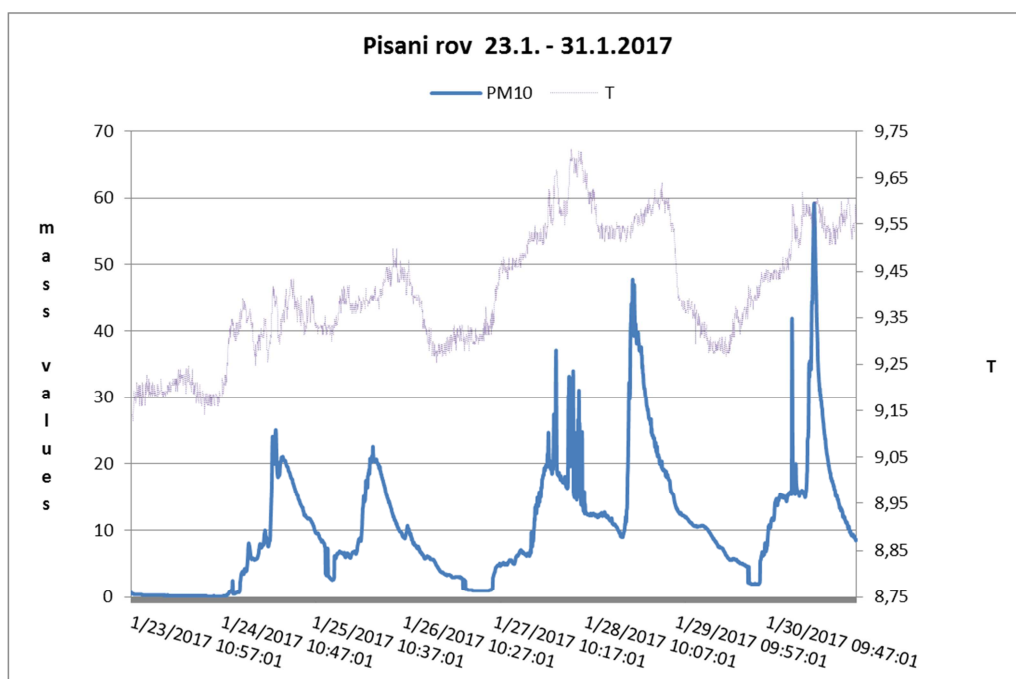
pa od 5.2.2018 do 12.2.2018 in od 6.9.2018 do 13.9.2018. Sočasno z meritvami delcev (merilni interval 5 minut) smo opravljali meritve temperature zraka (merilni interval 5 minut) in koncentracije CO<sub>2</sub> (merilni interval 30 minut).

## Rezultati

Čeprav smo meritve zvezno izvajali na štirih mestih (Slika 1) v tem prispevku podajamo prve rezultate le za dve merilni mesti, in sicer za Pisani rov v Postojnski jami in Baldahin v Škocjanskih jamah ter le za meritve delcev PM<sub>10</sub>.

### Postojnska jama

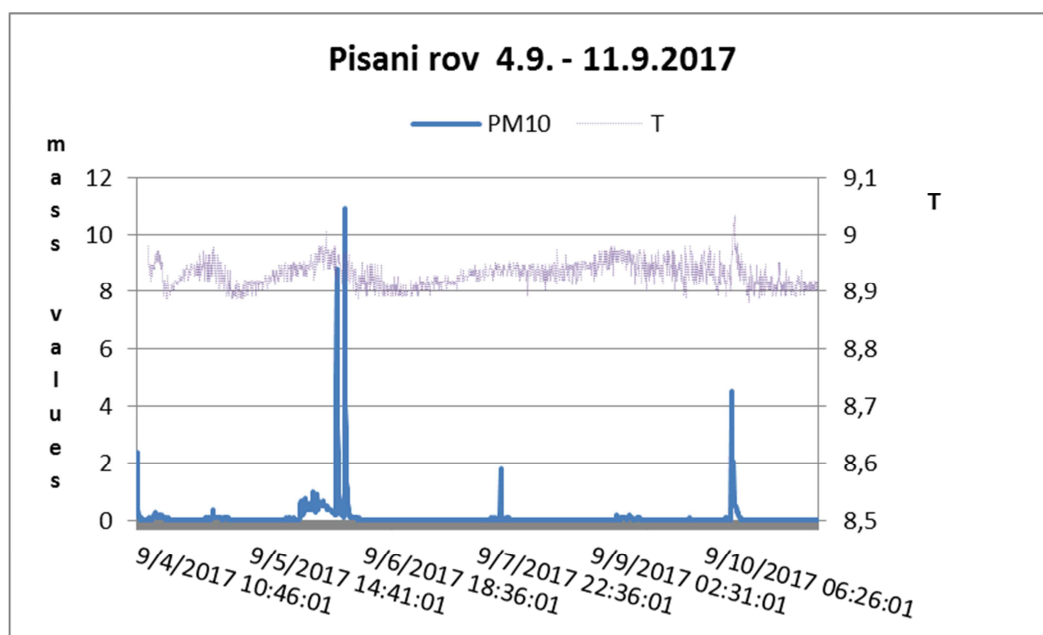
Na južnem vhodu v Pisani rov smo v zimskem obdobju zaznali povišanje koncentracij delcev v zraku v nočnem času (Slika 2). Glede na meteorološke razmere v jami je to obdobje, ko lahko zrak prihaja iz Pisanega rova v glavni rov (Stara jama) ali obratno. Ko piha iz Pisanega rova v Staro jama zaznamo povišane koncentracije CO<sub>2</sub> (24.1.2017 je bila koncentracija 1.320 ppm, 26.1.2017 pa 890 ppm). V tem obdobju nismo zaznali največjega povišanja količine delcev v zraku. Ko je smer vetra obrnjena, hladen zimski zrak prihaja skozi glavni vhod v Postojnsko jama, teče po Stari jami in vdira tudi v Pisani rov. V tem obdobju smo v Pisanem rovu predvsem v nočnem času opazili izredno povišane koncentracije delcev PM<sub>10</sub> do 60 µg/m<sup>3</sup>. Ker so v tem obdobju potekala obnovitvena dela na vhodnem železniškem peronu, so višje koncentracije delcev verjetno povezane prav s tem.



Slika 2 – Masne koncentracije [µg/m<sup>3</sup>] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [°C], Pisani rov pozimi, Postojnska jama.

Poletno obdobje (Slika 3) je pokazalo precej nižje koncentracije delcev (največ 10,9 µg/m<sup>3</sup> za PM<sub>10</sub> dne 6.9.2017 ob 13:50) ter bistveno bolj stalno temperaturo z majhnim

nihanjem. Ker je bila med meritvami koncentracija CO<sub>2</sub> v zraku precej visoka (povprečno 2.500 ppm), gre za verjetni doprinos delcev iz Pisanega rova v Staro jamo. Viški PM<sub>10</sub> bi bili lahko povezani tudi z vplivom turizma, zaradi posipanja tirnic s peskom za boljši oprijem pogonskih koles turističnega vlaka.



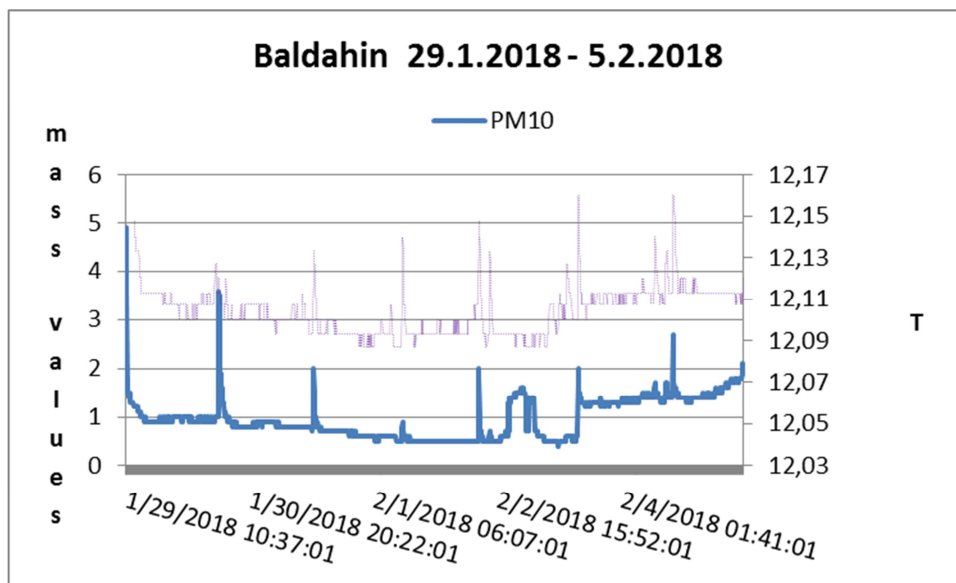
Slika 3 – Masne koncentracije [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ], Pisani rov poleti, Postojnska jama.

### Škocjanske jame

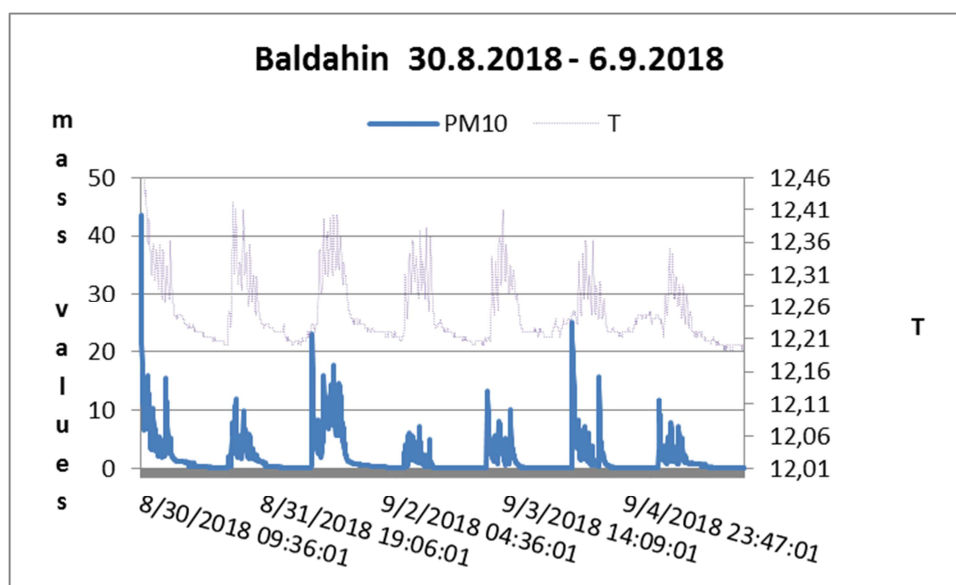
V Tihi jami v Škocjanskih jamah smo v zimskem obdobju (Slika 4) izmerili majhne vsebnosti delcev v zraku, vendar je ozadje pozimi nekoliko višje kot poleti (pozimi: 0,5 – 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , poleti: 0,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Viški PM<sub>10</sub> < 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se ujema z urnikom turističnih obiskov. Zimske koncentracije CO<sub>2</sub> v zraku so bile 560 – 660 ppm z nekaterimi odstopanji do 860 ppm. Količine CO<sub>2</sub> v zimskem obdobju so nizke, kar kaže na dobro zračenje v jami. Pozimi se zrak premika iz Tihe jame proti površju skozi umetni tunel, ko je zunanja temperatura nižja od jamske.

V poletnem obdobju (Slika 5) so najvišje koncentracije PM<sub>10</sub> do 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tudi poleti so povečane količine delcev v zraku povezane z dnevnimi turističnimi obiski, kar potrjuje tudi ujemanje nihanja temperature in količine delcev. Poletne koncentracije CO<sub>2</sub> v zraku so glede na zimske precej višje. Pri Baldahinu so poletne koncentracije do 3.300 ppm in sovpadajo s turističnimi obiski, ko se vsebnost CO<sub>2</sub> poveča zaradi prisotnosti ljudi. Brez prisotnosti ljudi bi bile poletne vrednosti CO<sub>2</sub> pri Baldahinu 2.000 – 2.600 ppm, kar je 3x višje kot pozimi. Če upoštevamo viške poleti (3.300 ppm) so poletne vrednosti kar 5x višje od zimskih. Poleti (Tzunaj>Tjama) topel zunanji zrak vdira skozi odprta vrata umetnega tunela do Baldahina.





Slika 4 – Masne koncentracije [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ], Baldahin pozimi, Škocjanske jame.



Slika 5 – Masne koncentracije [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] delcev v zraku in primerjava s temperaturo zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ], Baldahin poleti, Škocjanske jame.

### Zaključek

Meritve delcev v zraku Postojnske jame in Škocjanskih jam so pokazale, da se glede na jamsko ventilacijo prašni delci lahko prenašajo daleč v notranjost jame (tudi 1,5 km ali več, npr. Pisani rov pozimi, Slika 2). Opazen je bil tudi velik vpliv obnovitvenih del na visoke koncentracije delcev, zaradi česar bi morali obnovitvena dela v turističnih jamah prilagoditi tudi razmeram jamske ventilacije.

Analize ob turistično obremenjeni poti v Škocjanskih jamah so pokazale odvisnost tako koncentracije delcev v zraku kot temperature od turističnega obiska (Slika 5).

Koncentracija delcev PM<sub>10</sub> je v zunanjem zraku višja kot v jami. V jamah je le dvajsetina tiste, ki jo zaznamo zunaj. To je najverjetneje zato, ker je v jami vlaga visoka in ne dovoljuje delcem PM<sub>10</sub>, da bi prosto potovali po jamskem prostoru. V splošnem pa povišane koncentracije delcev v zunanjem zraku vplivajo na povišano raven koncentracij v jamskem zraku.

Poleg zveznih meritev jamske meteorologije v turističnih jamah bi bilo priporočljivo tudi redno spremljanje količine delcev v zraku in občasno podrobno preverjanje, za kakšne vrste snovi gre.

Raziskava je del programa *Raziskovanje krasa (P6-0119) in projekta Krasoslovne raziskave za trajnostno rabo Škocjanskih jam kot svetovne dediščine (L7-8268) ter programa Mineralne surovine (P1-0025)*.

## Literatura

- Bezek, M., Gregorič, A. in Vaupotič, J. 2013. Radon decay products and 10-1100 nm aerosol particles in Postojna Cave. *Nat. Hazards. Earth Syst. Sci.*, 13, 823-831, doi: 10.5194/nhess-13-823-2013.
- Grgič, I., Iskra, I., Podkrajšek, B. in Debevec Gerjevič, V. 2014. Measurements of aerosol particles in the Škocjan Caves, Slovenia. *Environmental science and pollution research international*, 21/3, 1915-1923, doi: [10.1007/s11356-013-2080-4](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2080-4).
- <http://www.okolje.info/index.php/kakovost-zraka/trdni-delci> (15.9.2018).
- Iskra, I., Kávási, N. in Vaupotič, J. 2010. Nano aerosols in the Postojna Cave. *Acta Carsologica*, 39/3, 523-528.
- Kertész, Z., Borbély-Kiss, I. in Hunyadi, I. 1999. Study of aerosols collected in a speleotherapeutic cave situated below Budapest, Hungary. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 150, 384-391.
- Smith, A.C., Wynn, P.M. in Baker, P.A. 2013. Natural and anthropogenic factors which influence aerosol distribution in Ingleborough Show Cave, UK. *International Journal of Speleology*, 42/1, 49-56, doi: 10.5038/1827-806X.42.1.6.

# Meritve tektonskih mikro-premikov v prelomni coni Idrijskega preloma v dolini Učje

Andrej Gosar\*

## Povzetek

Dolina Učje poteka prečno na Idrijski prelom, zaradi česar je bila izbrana kot najbolj primerna za namestitev ekstenziometra TM 71 na tem prelomu, ki je dolg preko 120 km. Meritve tektonskih mikro-premikov na razpoki v notranji prelomni coni potekajo od leta 2004. V 14 letih opazovanj je bilo ugotovljeno sistematično vodoravno zmikanje s povprečno hitrostjo 0,21 mm/leto in podrejeno vertikalni premiki s hitrostjo 0,06 mm/leto, kar dokazuje aktivnost preloma. Podan je pregled različnih metod raziskovanja recentnih premikov ob aktivnih prelomih ter novejših raziskav Idrijskega preloma. Ocene hitrosti premikov so poleg geodinamike pomembne predvsem za izboljšanje seizmotektonskih modelov in s tem boljše ocenjevanje potresne nevarnosti.

**Ključne besede:** tektonika, geodinamika, prelom, ekstenziometer, Idrijski prelom, Učja

**Keywords:** tectonics, geodynamics, fault, ekstensometer, Idija fault, Učja

## Idrijski prelom

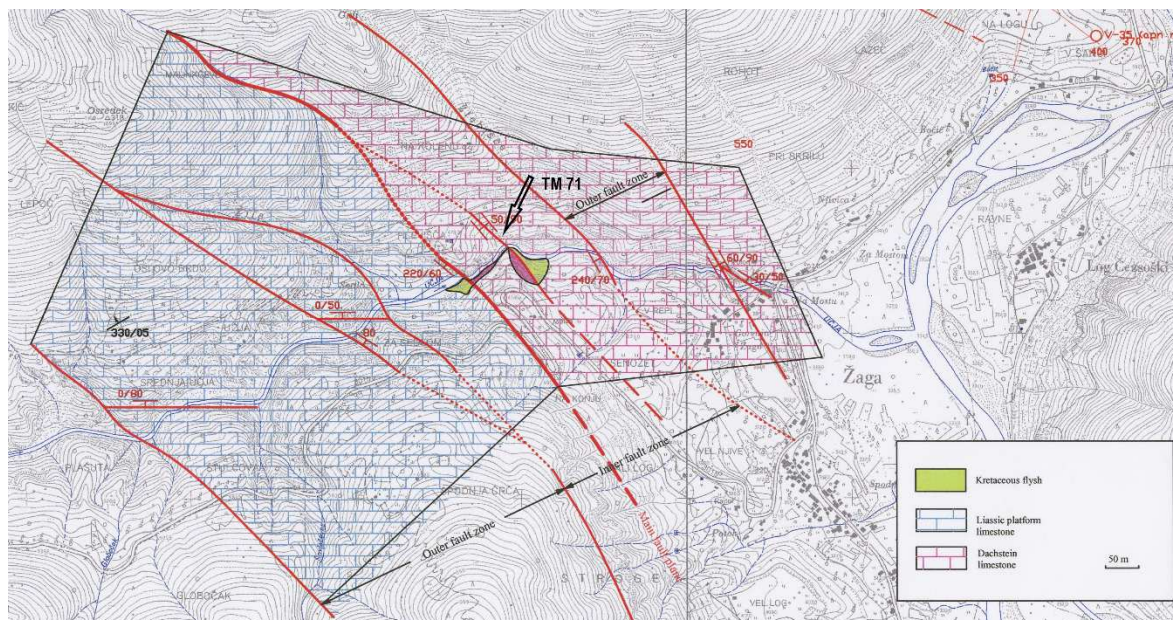
Idrijski prelom je geomorfološko najbolj izražen prelom v zahodni Sloveniji, ki je jasno viden na satelitskih in letalskih posnetkih ter na digitalnih modelih višin različne ločljivosti. Prelom se lahko sledi v dolžini več kot 120 km od Furlanije v bližini Kaninskega pogorja na SZ do Gorskega Kotarja na Hrvaškem na JV (Buser, 1986). Povprečna smer preloma je  $310^\circ$ , naklon vpada pa  $85^\circ$  (Atanackov et al., 2014). V južnem delu se ob njem nahaja več kraških polj porečja Ljubljaniče, v severnem delu pa prelom poteka vzdolž dolin Idrijce, Kanomljice in Soče. Zgodovina njegovega raziskovanja je zelo dolga (Čar in Gosar, 2011), tudi zaradi pomena idrijskega rudišča, saj je v geološki zgodovini bil del orudenja (Ljubevč) ob Idrijskem prelomu odrezan in premaknjen na današnje mesto za okoli 2500 m. Na podlagi tega je Placer (1971), ob upoštevanju, da naj bi bil prelom star od 10 do 12 milijonov let, izračunal, da je bila skozi celotno obdobje povprečna hitrost premikov od 0,25 do 0,16 mm/leto, premik pa je poševen z navpičnim skokom 480 m (Placer, 1982). Novejše raziskave povezane s podrobnim kartiranjem za izdelavo geološke karte idrijsko-cerkljanskega ozemlja so pokazale, da izkazuje Idrijski prelom res poševni premik, ki pa je posledica dveh ločenih tektonskih dogajanj (Čar, 2010). V srednjem miocenu pred 12 milijoni let, je bilo ozemlje pod vplivom močnih natezih sil in nastali so normalni prelomi v smeri SZ-JV in vpadom proti SV. Ob Idrijskem prelomu se je SV blok spustil za do 480 m. V novjšem času so se napetostni pogoji spremenili v kompresijske v približni smeri S-J in prelom se je reaktiviral v desnozmičnega. Pri tem so delno nastale nove prelomne trase, zaradi česar je prelomna cona Idrijskega preloma zelo zapletena. Ponekod so vidni nespremenjeni odseki iz časa normalnih premikov, drugod reaktivirane cone normalnih prelomov s horizontalnimi premiki in v veliki večini najmlajše, skoraj navpične prelomne ploskve z značilnimi strukturami, ki nastajajo ob zmičnih prelomih (Čar, 2010; Čar in Gosar, 2011). V novejši razpravi Placer et al. (2010) ocenjujejo, da je navidezni premik ob Idrijskem prelomu na

---

\* Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija in Univerza v Ljubljani, Naravoslovnohemiška fakulteta, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

Tolminskem okrog 10 km. Ker poteka Idrijski prelom večinoma vzdolž rečnih dolin ali kraških polj, je ob njem razmeroma malo izdankov primernih za podrobnejše tektonske analize. Najlepše je celotna prelomna cona razgaljena v dolini Učje na skrajnem SZ, saj poteka prečno na smer preloma in prav na območju prelomne cone tvori manjši kanjon z navpičnimi stenami (Čar in Pišljari, 1993). V njem so dobro vidne strukture zunanje in notranje prelomne cone. Z metodami tektonske geomorfologije na podlagi natančnega digitalnega modela višin iz LiDARskega snemanja površja, so recentno kinematiko Idrijskega preloma v zadnjih letih raziskovali Moulin et al. (2014). Kasneje so uporabili še metode datiranja na podlagi izpostavljenosti izdankov kozmičnim žarkom (izotop  $^{36}\text{Cl}$ ) in ocenili povprečno hitrost premikanja ob Idrijskem prelomu na 1,15 mm/leto za obdobje od poznega pleistocena (Moulin et al., 2016). V okviru seizmotektonske parametrizacije aktivnih prelomov Slovenije za izdelavo nove karte potresne nevarnosti so Atanackov et al. (2014) recentno hitrost premikanja ocenili na 1 mm/leto.

Predpostavlja se, da je Idrijski prelom potresno dejaven, čeprav je število potresov zaznanih vzdolž njega razmeroma majhno (Živčič et al., 2011). K nezanesljivosti seizmoloških opazovanj največ prispeva dejstvo, da so bile v preteklosti potresne opazovalnice, razen tiste na Vojskem, precej oddaljene, kar zmanjšuje natančnost lociranja žarišč potresov. Na širšem območju okrog Idrijskega preloma je domnevno nastal t.i. idrijski potres leta 1511, ki je z ocenjeno magnitudo 6,8 najmočnejši znan potres na območju Slovenije. Vendar pa je dejanska lokacija tega potresa še predmet raziskav (Fitzko et al., 2005), ki dopuščajo da se je potres zgodil na zelo širokem območju v zahodni Sloveniji ali celo v Furlaniji. V novejšem času so med raziskavami najpomembnejše paleoseizmološke. V 20. stoletju sta se na širšem območju Idrijskega preloma zgodila dva močna potresa, cerkniški leta 1926 in potres v Krnskem pogorju leta 1998 (Živčič et al., 2011). Za slednjega je dokazano, da je nastal na Ravenskem desnozmničnem prelomu, ki poteka vzporedno z Idrijskim.

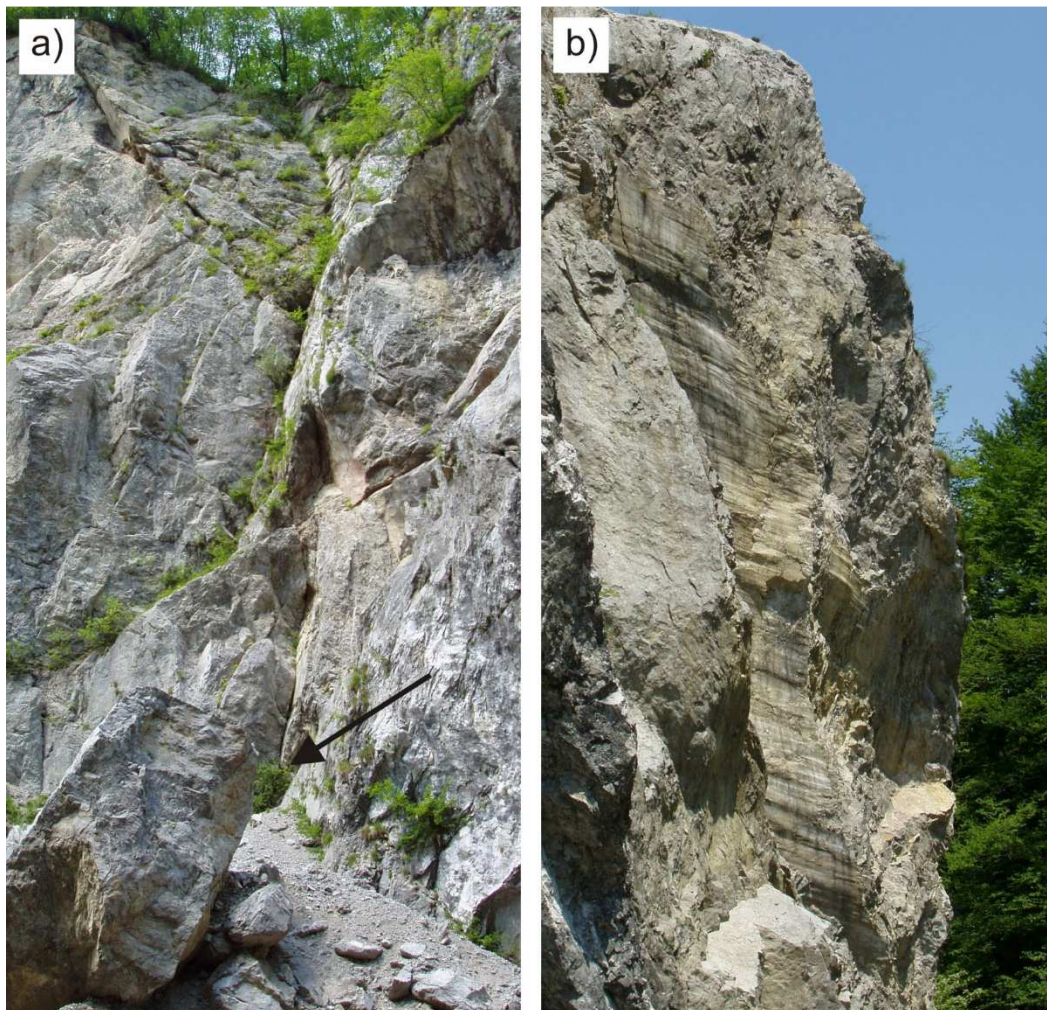


Slika 1 – Geološka karta prelomne cone Idrijskega preloma v dolini Učje. Puščica kaže lokacijo ekstenziometra TM 71. (avtor Igor Rižnar).

Na območju doline Učje je Idrijska prelomna cona široka okoli 750 m. V okviru projekta COST 625 *3D monitoring of active tectonic structures* jo je podrobno skartiral



Igor Rižnar (neobjavljeno) in izdelal strukturno-geološko karto (slika 1). Na tem območju je ozemlje pretežno zgrajeno iz zgornjetriasnega dachsteinskega apnenca. Nekoliko severno poteka glavni nariv Kaninskega pogorja proti jugu, v katerem je dachsteinski apnenec narinjen na kredni fliš (Buser, 1986). JZ od glavne prelomne ploskve v dolini Učje je manjše območje jurskega apnenca liasne starosti, v dnu samega kanjona pa na nekaj mestih izdanja kredni fliš. Notranja prelomna cona je široka okoli 260 m in obsega dva robna preloma, ter glavno in stransko prelomno ploskev. Na območju glavne prelomne ploskve nismo našli nobene primerne razpoke za meritve mikropremikov, saj poteka nekoliko zahodneje od začetka samega kanjona. Zato pa stranska prelomna ploskev, ki poteka 70 m vzhodnejše prek okoli 50 m visoke stene kanjona, predstavlja zelo izrazito razpoko (slika 2a), ki se je izkazala za najprimernejšo za namestitev ekstenziometra. Nizvodno je 50 m proti vzhodu še ena lepo razgaljena prelomna ploskev, na kateri drse jasno kažejo na subvertikalne premike (slika 2b). Ker pa se nahaja v najožjem deli kanjona, dostop do nje s težko vrtno opremo, potrebno za namestitev ekstenziometra ni bil mogoč. Od zunanjih prelomnih con je širša tista na zahodni strani (okoli 350 m), ki sega do Srednje Učje in je vzdolž samega toka reke v celoti v liasnem apnenecu. Na vzhodni strani je zunanja preloma cona široka okoli 140 m in sega skoraj do naselja Žaga. Ta del je v celoti zgrajen iz dachsteinskega apnenca.



Slika 2 – a) Razpoka v notranji prelomni coni Idrijskega preloma v dolini Učje. Puščica kaže lokacijo ekstenziometra TM 71. b) Izdanek prelomne ploskve 50 m vzhodno od razpoke na sliki (a) z izrazitimi drsami, ki kažejo na subhorizontalne premike.

## Meritve tektonskih premikov ob prelomih

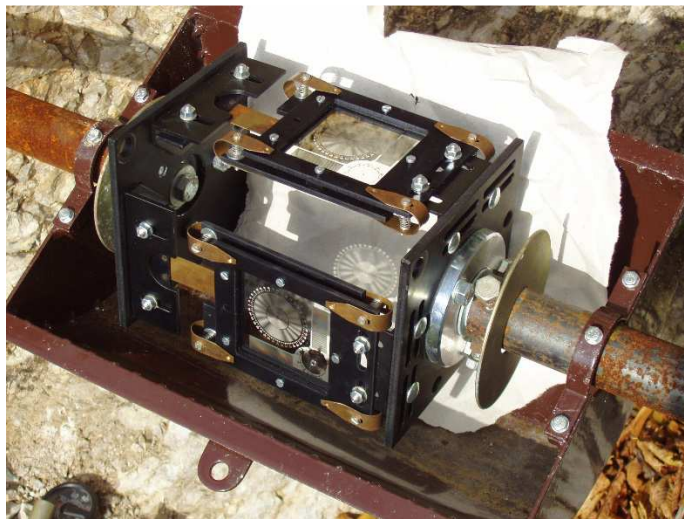
Ocene hitrosti recentnih premikov tektonskih blokov ob prelomih so zelo pomembne za razumevanje geodinamike in aktivne tektonike ter s tem za ocenjevanje potresne nevarnosti. Žal pa je na ozemljih za katere so značilne zmerne hitrosti tektonskih deformacij, med katerimi je tudi Slovenija, ustrezne meritve večinoma težko izvesti, še posebej, če so za močnejše prelome značilne razmeroma široke prelomne cone. Pri tem se uporabljajo metode terestične ali satelitske (GNNS) geodezije. Dokaj pogoste so ponavljajoče se meritve vzdolž nivelmanskih vlakov (npr. vzdolž železniških prog), ki so navadno omejene na vertikalne deformacije, lahko pa merijo tudi horizontalne. Za zahodno Slovenijo so takšno analizo naredili Rižnar et al. (2007). Za natančnejše analize aktivnosti posameznih prelomov, pa geodetskih meritev ne moremo opraviti kjerkoli ob prelomu, pač pa tam, kjer dobro poznamo strukturne razmere in kjer celotna prelomna cona ni preširoka. Na Idrijskem prelomu se ocenjuje, da je za terestične geodetske meritve primeren odsek med Dolenjo Trebušo in Kanomeljskim Razpotjem (Čar in Gosar, 2011). V dolini Kanomljice je bila sicer leta 1977 že postavljena geodetska mreža s štirimi točkami, vendar je žal bila opravljena le ničelna izmera, kasneje pa se meritve niso nikoli več ponovile (Kogoj, 1997), zato nimajo pomena za razumevanje geodinamike. Placer in Koler (2007) sta za geodetske spremljave aktivnih prelomnih con v Sloveniji predlagala vzpostavitev geodetskih mrež točk postavljenih v prelomnih krilih izven prelomne cone in njihovo dolgoletno opazovanje. Premik prelomnih kril se bo odrazil z deformacijo geodetske mreže.

Danes imajo metode satelitske geodezije večinoma prednost pred terestičnimi. Na območju zahodne Slovenije so se že izvedle nekatere raziskave s ponovljenimi GNNS meritvami, ki so podale vektorje premikov širšega območja (npr. Weber et al., 2010), žal pa je gostota točk, ki so bile uporabljene v teh študijah večinoma premajhna, da bi omogočala tudi oceno premikov ob posameznih prelomih. Poleg GNSS meritev se za meritve vertikalnih premikov površja uporablja tudi InSAR (Synthetic Aperture Radar) metoda permanentnih sipalcev, ki je bila uporabljena tudi na širšem območju Julijskih Alp (Žibret et al., 2012). Ker pa v zahodni Sloveniji prevladuje zmična tektonika s horizontalnimi premiki ob prelomih, so za geodinamske namene meritve le vertikalnih premikov premalo. Metoda InSAR omogoča tudi ugotavljanje premikov, ki se zgodijo naenkrat ob zelo močnih potresih, saj lahko z njo zelo natančno primerjamo relief pred in po potresu. Velika prednost InSAR meritev je, da je vedno na voljo dolgoleten niz meritev za naknadno primerjavo in analizo, tudi ko se zgodi močan potres, saj nam pri terestičnih in GNNS meritvah pogosto manjkajo predhodne referenčne meritve. Na povsem drugi strani kot satelitska geodezija pa so meritve mikropremikov ob posameznih prelomnih ploskvah ali razpokah znotraj prelomnih con (Stemberk et al., 2003), ki so opisane v tem prispevku. Z njimi lahko ugotovimo aktivnost posamezne prelomne ploskve, kar je lahko pomembno dokazovanje aktivnosti prelomov, ne moremo pa oceniti deformacije prek celotne prelomne cone.

### Ekstenziometer TM 71

TM 71 je mehanski ekstenziometer (slika 3) namenjen namestitvam na razpoke za merjenje relativnih mikro-premikov med dvema blokoma, ki ju razpoka ločuje. Deluje na principu mehanske interference - Moire optični učinek. Premiki se izmerijo s pomočjo interferenčnega vzorca (Košťak, 1991), ki ga oblikujeta optični mreži vgravirani na dveh steklenih ploščicah, ki se medseboj premakneta. Instrument podaja premike v treh smereh in sicer vektor premika v dveh medseboj pravokotnih ravninah (vodoravna in navpična) in

kotne spremembe oziroma rotacijo. Občutljivost merilnega sistema je 0,05-0,0125 mm v vseh treh prostorskih koordinatah in  $3,2 \cdot 10^{-4}$  rad pri kotnih spremembah (Stemberk et al., 2003; Stemberk et al., 2010). Glavna prednost tega popolnoma mehanskega inštrumenta je, da nima električnih komponent in je zato zelo robusten za delovanja v zahtevnih pogojih na prostem in tako primeren za dolgoletno opazovanje premikov. Pomankljivost pa je, da zahteva ročno odčitavanje, kar pa se na nekaterih lokacijah (predvsem v kraških jamah) v novejšem času rešuje z avtomatiziranim fotografiranjem interferenčnega vzorca v izbranem časovnem intervalu (Briestensky et al., 2010; Šebela et al., 2009). Ekstenziometer TM 71 so razvili na Inštitutu za strukturo kamnin in mehaniko Češke akademije znanosti v Pragi (Košťak, 1977) in ga tudi patentirali. Danes je po celem svetu nameščenih že skoraj 300 teh inštrumentov. Poleg meritev aktivnih tektonskih premikov, se uporabljajo tudi v inženirski geologiji za spremljanje stabilnosti kamninskih blokov in morebitnega plazanja.

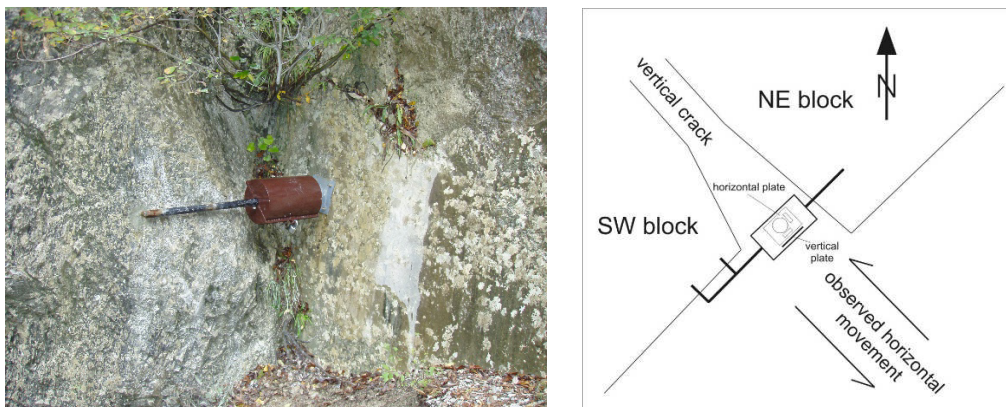


Slika 3 – Ekstenziometer TM 71 za meritve mikro-premikov v treh smereh.

### **Meritve tektonskih mikro-premikov v dolini Učje**

Po podrobnem pregledu celotnega dostopnega dela prelomne cone Idrijskega preloma v dolini Učje, smo za namestitev ekstenziometra kot najbolj primerno izbrali izrazito razpoko v začetnem delu kanjona v okoli 50 m visoki steni, ki je obrnjena proti jugu. Razpoka poteka vzdolž celotne stene, namestitev pa smo izvedli v njenem vznožju na vrhu podornega stožca gruščnatega materiala (sliki 2 in 4). Na tem območju je prišlo do skalnih podorov tako ob potresu 1976 v Furlaniji, kot v manjšem obsegu tudi ob potresu 1998 v Krnskem pogorju. Namestitev ekstenziometra TM 71 je novembra 2004 izvedla usposobljena ekipa Inštituta za strukturo kamnin in mehaniko Češke akademije znanosti iz Prage (Šebela et al., 2005; Gosar et al., 2007). Že sam transport vrtalne opreme do delovišča je predstavljal velik izziv, saj je bilo za spust v sam kanjon in prečkanje reke potrebno uporabiti vrhno tehniko. Zaradi konfiguracije razpoke je v zahodnem bloku jeklen drog sidran v dveh točkah, ne vzhodnem bloku pa v eni sami (slika 4). Za zagotovitev trajnosti namestitve je zelo pomembno, da se inštrument nahaja pod manjšim previsom, ki ga ščiti pred padajočim kamenjem. Tega je zaradi zmrzali in drugih dejavnikov precej, kar dokazuje nenehno višanje nasipnega stožca grušča. Ob namestitvi se je inštrument nahajal okoli 1 m nad tlemi (slika 4), danes pa je zaradi nasipanja praktično že na samih tleh in ja občasno potrebno del grušča celo odstraniti.





Slika 4 – Levo: fotografija nameščenega ekstenziometra na razpoki v Idrijski prelomni coni. Desno: skica namestitve z ugotovljenim premikom.

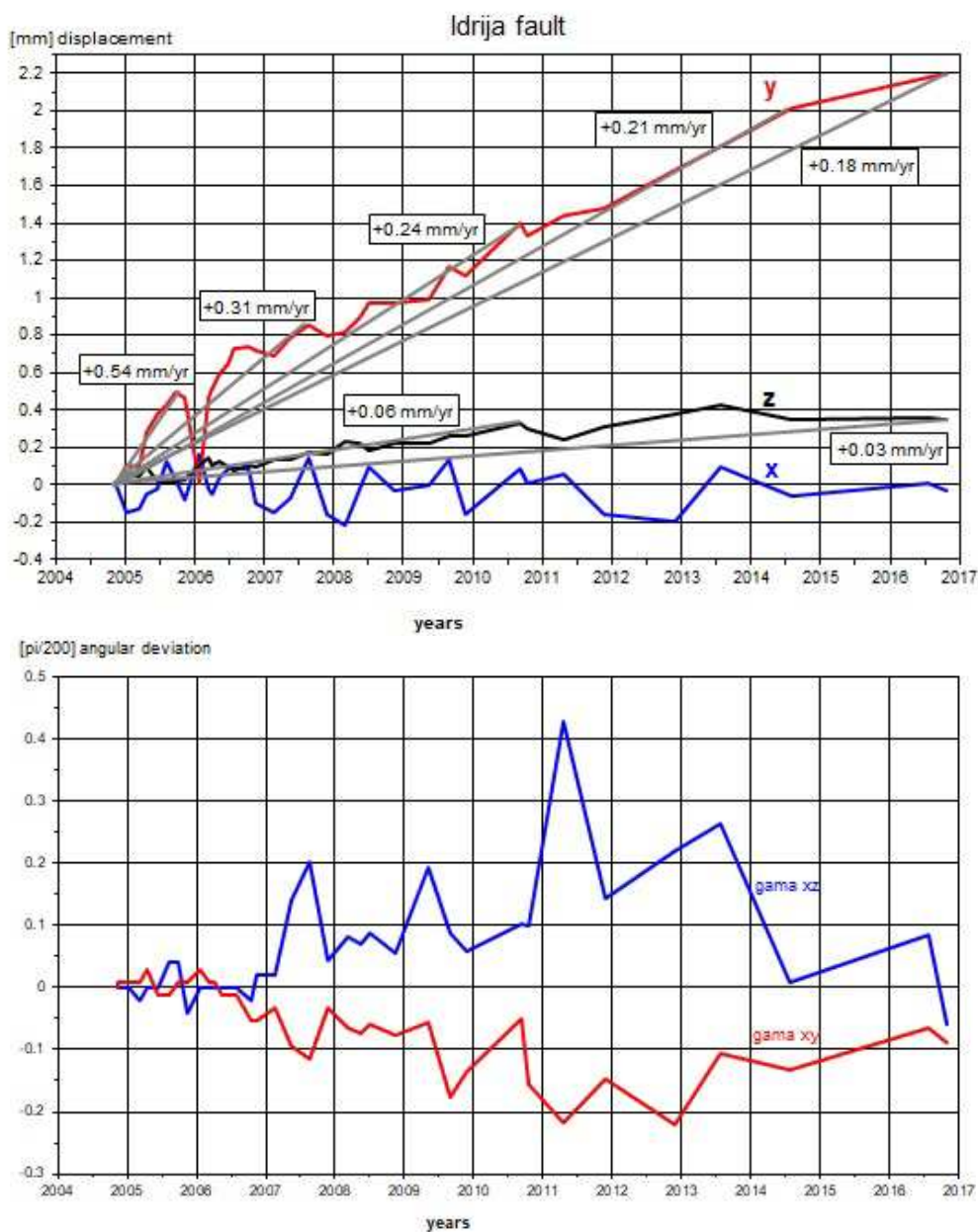
Ekstenziometer TM 71 nepretrgoma beleži premike že 14 let od novembra 2004 do konca leta 2018, ker je dovolj dolgo obdobje, da je mogoče sklepati na reprezentativnost v daljšem obdobju. V prvih letih smo izvajali odčitke na 3-4 mesece, kasneje pa na 6-12 mesecev (Gosar et al., 2009; Gosar et al., 2011). Seveda bi bilo zaželeno nadaljevati s pogostejšim odčitavanjem, vendar je zaradi velike oddaljenosti od Ljubljane to težko zagotoviti. Po drugi strani pa se kaže dovolj jasen in konsistenten trend premikov tudi iz redkejših odčitkov. V primeru izrazitejše potresne dejavnosti na tem območju, pa bomo frekvenco odčitovanja povečali, saj bi nam to omogočilo analizo morebitne korelacije premikov in potresov.

Rezultati meritev (slika 5) kažejo predvsem sistematični trend horizontalnih premikov (y-os) in zelo majhne premike v navpični smeri (z-os). To se ujema s tem, da je Idrijski prelom danes predvsem zmičen prelom z le majhno vertikalno komponento. To vemo iz geoloških podatkov, saj se v novejšem obdobju na prelomu ni zgodil tako močan potres, da bi lahko zanj izračunali žariščni mehanizem ali celo podrobno analizo koseizmičnih zdrsov ob prelomni ploskvi, kar je mogoče le za močne potrese. Takšne analize so bile narejene za potresa 1998 in 2004 v Krnskem pogorju, kjer žariščni mehanizmi kažejo na skoraj čisti desni zmik ob Ravenskem prelomu, z le manjšo vertikalno komponento (Živčić et al., 2011). Ker sta Ravenski in Idrijski prelom vzporedna in se nahajata v enakem napetostnem režimu (kompresija v smeri približno sever-jug), lahko sklepamo, da so tudi na Idrijskem prelomu recentni premiki predvsem desnozmični. To pa ne velja nujno za vse razpoke znotraj široke prelomne cone. Tako kažejo meritve z ekstenziometrom v dolini Učje na razpoki, ki je vzporedna glavni prelomni ploskvi, na skoraj čisti levi zmik. Čeprav je to morda presenetljiv rezultat, razprava o njem zaenkrat ni mogoča, dokler ne bomo imeli na razpolago drugih terestričnih ali satelitskih geodetskih meritev v takšni gostoti točk in dovolj dolgim nizom, da bodo nedvoumno ugotovljeni recentni premiki med blokoma, ki ju ločuje celotna prelomna cona Idrijskega preloma, kakor tudi morebitne premike med manjšimi bloki znotraj prelomne cone. Lokalne permutacije smeri napetosti znotraj kompleksno zgrajene prelomne cone, zaradi katere prihaja do neenakih premikov posameznih blokov, so vedno možne in lahko pojasnijo leve zmike ob posamezni razpoki znotraj nje.

Povprečna hitrost levega zmičanja v prvih desetih letih (2004-2014) je 0,21 mm/leto (slika 5). V prvih desetih mesecih po postavitvi je bila hitrost zmičanja še bistveno večja ( $y=+0,54$  mm/leto). Sledila je anomalna vrednost odčitka na začetku leta 2006. Čeprav ni dokazov, je ta izstopajoča vrednost verjetno posledica kakšnega mehanskega vpliva na



inštrument, ki bi ga lahko povzročilo padajoče kamenje, led ali podobno. Tako sklepamo tudi zato, ker se je z naslednjimi odčitki, ta anomalija popolnoma odpravila. V prvih 2,5 letih je bila povprečna hitrost premikov 0,31 mm/leto, v prvih šestih letih pa 0,24 mm/leto. To sicer kaže na postopno zmanjševanje hitrosti premikov s časom. Kaj bi lahko bil temu razlog seveda ni znano. Dejstvo pa je, da se je 12.7.2004 v Krnskem pogorju na oddaljenosti 10-12 km od Učje zgodil močan potres z navorno magnitudo 5,2, ki je imel zaradi prenosa napetosti dolgotrajnejši vpliv na napetostno polje tudi na sosednjih prelomih (Ganas et al., 2008). Ta potres pa se je zgodil le pet mesecev pred namestitvijo ekstenziometra. Kasneje pa ves čas opazovanja, na tem območju ni bilo več nobenih močnih potresov, ki bi presegli magnitudo 3,5. V času med sredino 2014 in sredino 2016 smo izmerili zmanjšano hitrost premikov na 0,08 mm/leto. Če vzamemo celotno 12-letno obdobje opazovanj med 2004 in 2016, je povprečna hitrost premikov 0,18 mm/leto.

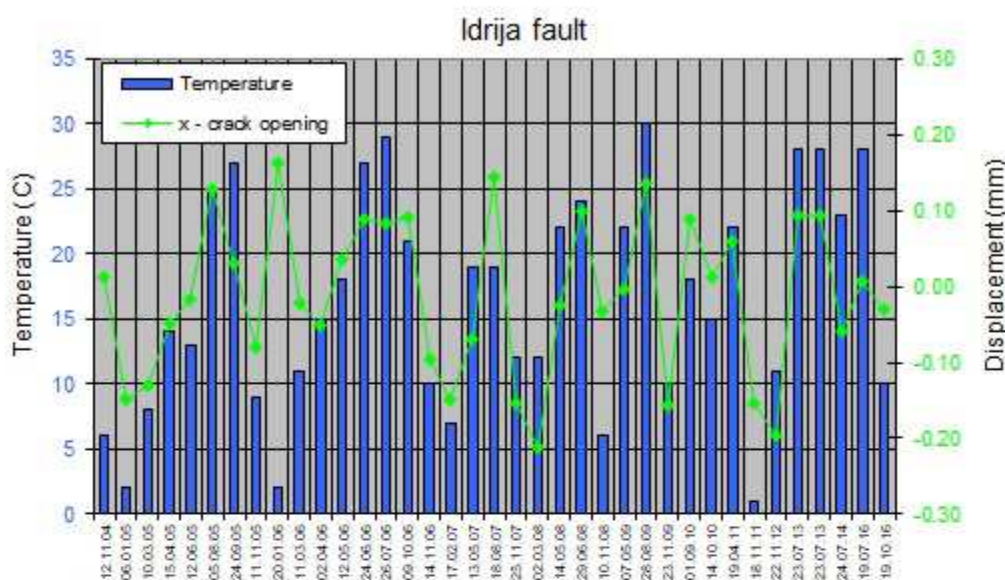


Slika 5 – Premiki (zgoraj) in kotne deformacije (spodaj) izmerjeni s TM 71 na Idrijskem prelomu. +x zapiranje razpoke, +y levo horizontalno zmikanje, +z spuščanje JZ bloka.

Na navpični osi (z-os) smo v prvih šestih letih opazovanja izmerili zelo stabilno pozitivno hitrost premikov +0,06 mm/leto, ki pomeni relativno spuščanje JZ bloka glede na SV blok (slika 5). Hitrost se po letu 2010 zmanjša in za celotno 12-letno obdobje je hitrost premikov le +0,03 mm/leto. Prevladujoča zmična tektonika, s podrejeno vertikalno komponento premikov je pričakovana.

Vodoravna x-os, usmerjena prečno na razpoko, ki odraža odpiranje ali zapiranje razpoke, kaže le sezonske spremembe, ki večinoma zelo dobro korelirajo z izmerjenimi temperaturami v času meritev (sliki 5 in 6). Pozitivne vrednosti (kompresija) sovpadajo z višjimi temperaturami v poletnih mesecih in negativne vrednosti (ekstenzija) z nižjimi temperaturami v zimskih mesecih. Izmerjeni premiki ne presegajo 0,2 mm.

Kotne deformacije (rotacije) v obeh ravninah so majhne in na dolgi rok ne kažejo kakšnih sistematičnih trendov (slika 5). V xz ravnini so največ +0,4  $\pi/200$  in v xy ravnini največ -0,2  $\pi/200$ . Največji odkloni v xz ravnini so bili v letih 2007, 2009 in 2009, vendar so se vedno vrnili v prejšnje stanje. Vzroki zanje niso znani.



Slika 6 – Korelacija med temperaturnimi spremembami in odpiranjem (-x ekstenzija) ali zapiranjem (+x kompresija) razpoke na Idrijskem prelomu.

## Zaključek

Meritve premikov ob razpoki v notranji prelomni coni Idrijskega preloma v dolini Učje kažejo na njegovo recentno aktivnost. Premiki v celotnem obdobju opazovanja so konsistentni, čeprav se hitrost premikanja s časom nekoliko manjša, kar je verjetno povezano s povečanimi napetostmi v začetnem obdobju opazovanja po močnem potresu leta 2004 v Krnskem pogorju. Prevladujejo levozmični premiki s povprečno hitrostjo 0,21 mm/leto, medtem ko je vertikalna komponenta premikov podrejena s hitrostjo 0,06 mm/leto. Za izmerjene leve premike znotraj sicer desnozmičnega preloma, lahko le domnevamo, da so posledica permutacije smeri napetosti znotraj kompleksne in zelo široke prelomne cone. Izmerjene hitrosti premikov lahko le generalno primerjamo z geološko ocenjenimi premiki, ki za 10-12 milijonov let znašajo 0,25 do 0,16 mm/leto (Placer, 1971). Na podlagi tektonske geomorfologije in datiranja na podlagi izpostavljenosti izdankov kozmičnim žarkom pa je hitrost premikov ob Idrijskem prelomu za obdobje od poznega

pleistocena ocenjena na 1,15 mm/leto (Moulin et al., 2016). GNNS meritve v zahodni Sloveniji sicer kažejo na premike ozemlja v smeri proti severu velikostnega reda 2-3 mm/leto (Weber et al., 2010). Z njimi povezane deformacije ozemlja pa so razporejene prek številnih prelomov dinarske smeri (Moulin et al., 2016). Kljub intenzivnim raziskavam aktivne tektonike Dinarskega prelomnega sistema v zadnjem obdobju, ki segajo od tektonske geomorfologije, paleoseizmologije in satelitske geodezije, bi jih bilo torej potrebno nagraditi predvsem s sistematičnimi in dolgoletnimi meritvami terestične in satelitske geodezije v dobro izbrani in dovolj gosti mreži merskih točk lociranih zunaj cone Idrijskega preloma (Placer in Koler, 2007). Realni podatki o recentni hitrosti premikov ob Idrijskem in drugih dinarskih prelomih v zahodni Sloveniji, so poleg geodinamike zelo pomembni za izboljšanje seizmotektonskih modelov in s tem boljše ocenjevanje potresne nevarnosti na tem potresno zelo izpostavljenem območju.

### Zahvala

Postavitev ekstenziometra TM 71 je bila izvedena v okviru projekta COST 625 *3D monitoring of active tectonic structures*, ki ga je vodil Inštitut za strukturo kamnin in mehaniko Češke akademije znanosti iz Prage. Avtor se zahvaljuje Josefu Stemberku, Blahoslavu Košťaku in Stanki Šebela (ZRC SAZU IZRK) za ves trud pri vzpostavitvi monitoringa mikro-premikov v Sloveniji in Milošu Briestensky za vzdrževanje inštrumentov v zadnjih letih. Zahvaljujem se tudi Igorju Rižnarju za izdelavo geološke karte prelomne cone Idrijskega preloma v dolini Učje na sliki 1.

### Literatura

- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. (2014). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije. 1. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Briestenský, M., Košťák, B., Stemberk, J., Petro L., Vozár, J., Fojtíková, L. (2010). Active tectonic fault microdisplacement analyses: a comparison of results from surface and underground monitoring in western Slovakia. *Acta Geodyn. Geomater.*, 7/4, 387-397.
- Buser, S. (1986). Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, lista Tolmin in Videm. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Čar, J., Pišljari, M. (1993). Presek Idrijskega preloma in potek doline Učje glede na prelomne strukture. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 40/1-2, 79-91.
- Čar, J. (2010). Geološka zgradba idrijsko-cerkljanskega hribovja. Tolmač h Geološki karti idrijsko-cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami v merilu 1 : 25 000. 1-127, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Čar, J., Gosar, A. (2011). Idrijski prelom in premiki ob njem. *Idrijski razgledi*, 56/1, 105-118.
- Fitzko, F., Suhadolc, P., Aoudia, A., Panza, G.F. 2005. Constraints on the location and mechanism of the 1511 Western-Slovenia earthquake from active tectonics and modeling of macroseismic data. *Tectonophysics*, 404, 77-90.
- Gosar, A., Šebela, S., Košťák, B., Stemberk, J. (2007). Micro-deformation monitoring of active tectonic structures in W Slovenia. *Acta Geodyn. Geomater.*, 4/1, 87-98.
- Gosar, A., Šebela, S., Košťák, B., Stemberk, J. (2009). Surface versus underground measurements of active tectonic displacements detected with TM 71 extensometers in western Slovenia. *Acta Carsologica*, 38/2-3, 213-226.
- Gosar, A., Šebela, S., Košťák, B., Stemberk, J. (2011). On the state of the TM71 extensometer monitoring in Slovenia: Seven years of micro-tectonic displacement measurements. *Acta Geodyn. Geomater.*, 8/4, 389-402.

- Ganas, A., Gosar, A., Drakatos, G., (2008). Static stress changes due to the 1998 and 2004 Krn Mountain (Slovenia) earthquakes and implications for future seismicity. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8/1, 59-66.
- Kogoj, D. (1997). Geodetske meritve stabilnosti tal ob tektonskih prelomih na območju Slovenije. Novejši dosežki na področju geodezije in geofizike v Sloveniji - zbornik predavanj. SZGG, 133-144.
- Košťák, B. (1977). Terčové měřidlo TM-71 a jeho užití pro měření velmi pomalých pohybů na poruchách a trhlinách. *Inž. Stavby*, 25, 5, 213-218.
- Košťák, B. (1991). Combined indicator using Moire technique. *Proc. 3rd int. symp. on field measurements in geomechanics*. Oslo, 53-60.
- Moulin, A., Benedetti, L., Gosar, A., Jamšek Rupnik, P., Rizza, M., Bourles, D., Ritz, J.F. (2014). Determining the present-day kinematics of the Idrija fault (Slovenia) from airborne LiDAR topography. *Tectonophysics*, 628, 188-205.
- Moulin, A., Benedetti, L., Rizza, M., Jamšek Rupnik, P., Gosar, A., Bourles, D., Keddadouche, K., Aumaitre, G., Arnold, M., Guillou, V., Ritz, J.-F. (2016). The Dinaric fault system: Large-scale structure, rates of slip, and Plio-Pleistocene evolution of the transpressive northeastern boundary of the Adria microplate. *Tectonics*, 35, 2258-2292.
- Placer, L. (1971). Nekaj osnovnih podatkov o idrijskem prelomu. *Idrijski razgledi*, 16/1, 51-56.
- Placer, L. (1982). Tektonski razvoj idrijskega rudišča. *Geologija*, 25/1, 7-94.
- Placer, L., Koler, B. (2007). Predlog geodetske spremljave aktivnih prelomnih con. *Geologija*, 50/2, 445-454.
- Placer, L., Vrabec, M., Celarc, B. (2010). The bases for understanding of the NW Dinarides and Istria Peninsula tectonics. *Geologija* 53/1, 55-86.
- Rižnar, I., Koler, B., Bavec, M. (2007). Recent activity of the regional geologic structures in western Slovenia. *Geologija*, 50, 1, 111-120.
- Šebela, S., Gosar, A., Košťák, B., Stemberk, J. (2005). Active tectonic structures in the W part of Slovenia - setting of micro-deformation monitoring net. *Acta Geodyn. Geomat.*, 2/1, 45-57.
- Šebela, S., Turk, J., Mulec, J., Košťák, B., Stemberk, J. (2009). Statistical evaluation of the 3D monitoring of displacements of Dinaric Fault Zone in Postojna Cave, Slovenia. *Acta Geodyn. Geomater.*, 6/2, 163-176.
- Stemberk, J., Košťák, B., Vilimek, V. (2003). 3D monitoring of active tectonic structures. *J. of Geodynamics*, 36/1-2, 103-112.
- Stemberk, J., Košťák, B., Cacon, S. (2010). A tectonic pressure pulse and geodynamic activity recorded from long-term monitoring of faults in Europe. *Tectonophysics*, 487/1-4, 1-12.
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčič-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B. (2010). GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po plain, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 483, 214-222.
- Žibret, G., Komac, M., Jemec Auplič, M. (2012). PSInSAR displacements related to soil creep and rainfall intensities in the Alpine foreland of western Slovenia. *Geomorphology*, 175-176, 107-114.
- Živčič, M., Čarman, M., Gosar, A., Jesenko, T., Zupančič, P. 2011. Potresi ob Idrijskem prelomu. *Idrijski razgledi*, 56/1, 119-126.

# Avtomatizacija procesov za sprotno ocenjevanje vpliva nuklearne elektrarne na okolico

Marija Zlata Božnar<sup>\*</sup>, Primož Mlakar<sup>\*</sup>, Boštjan Grašič<sup>\*</sup>, Borut Breznik<sup>\*\*</sup>, Juš Kocijan<sup>\*\*\*</sup>

## Povzetek

V članku opisujemo komponente Okoljskega ekspertnega sistema Nuklearne elektrarne Krško (NEK). NEK uporablja sistem za izračun doz prebivalcev zaradi rednih neznatnih izpustov radionuklidov iz NEK v ozračje in za hipotetične nezgodne dogodke. Popisujemo predvsem to, kako so posamezne komponente povezane v avtomatsko delujoč sistem, ki vse meritve in izračune izvede sprotno v realnem času. Zbiranje meritev in izračuni delujejo avtomatsko v desetminutnih ali polurnih intervalih in to vse dni v letu. Opisani sistem je kompleksen in za več desetletno dolgoročno dobro delovanje zahteva najprej vsebinsko večnivojsko vzdrževanje in predvsem sprotno redno uporabo ter nadgrajevanje.

**Ključne besede:** avtomatizacija, okoljski merilni sistem, ekspertni sistem, sočasno sprotno izvajanje, meritve, ocena doz prebivalstva

**Key words:** automatization, environmental measuring system, expert system, simultaneous online running, measurements, population dose estimation

## Uvod

Nuklearna elektrarna Krško (NEK) zgledno skrbi za oceno svojega vpliva na okolico. Ob normalnem obratovanju nuklearne elektrarne je njen radiološki vpliv na okolico zelo majhen v primerjavi z vplivom, ki ga imajo na prebivalstvo naravna ionizirajoča sevanja in sevanja umetnih radionuklidov, ki ne izvirajo iz NEK. Za oceno vpliva NEK na okolico se redno izvajajo vzorčenja in analize vode, zemlje, zraka in hrane. Vpliv pa ocenjujemo tudi z uporabo modelov, tako ob normalnem obratovanju kot v primeru pripravljenosti na morebitni izredni dogodek z izpusti radionuklidov v ozračje. V NEK tak izračun lahko kadarkoli izdelata usposobljen operater z uporabo programa DOZE (Mlakar et al., 2015, Breznik et al., 2018) delujočega v okolju Ekspertnega okoljskega sistema NEK. To pomeni, da za področje 25 km x 25 km s središčem v NEK lahko za tekoči, pretekli ali prihodnji čas do 7 dni vnaprej oceni doze prebivalstva glede na lokacijo bivanja in glede na merjeno, ocenjeno ali predvideno emisijo radionuklidov iz NEK v ozračje. Z izjemo nekaj končnih korakov in odločitev, ki jih mora vnesti operater, je vsa priprava zahtevanih podatkov za izračun doz v največji možni meri avtomatizirana. Če izračunavamo dozo prebivalca na osnovi meritve v izbrani vasi na eni lokaciji, potem je izračun preprost in ga ob znanih konstantah (doznih pretvorbenih faktorjih) lahko izračunamo celo »peš na papirju« ali pa z ustreznim programom za obdelavo razpredelnic kot je naprimer Excel. Ko pa preidemo na izračune za ploskovno področje ali pa celo želimo izračun vnaprej, ki bo temeljil le na predvideni emisiji iz NEK, pa potrebujemo: najprej tridimenzionalni meteorološki popis stanja atmosfere, potem ustrezen model za disperzijo, ki omogoča izračun koncentracij radionuklidov v ozračju v okolici vira in na osnovi tega izračun doze

---

<sup>\*</sup> MEIS storitve za okolje, d.o.o., Mali Vrh pri Šmarju 78, SI-1293 Šmarje-Sap, Slovenija

<sup>\*\*</sup> Nuklearna elektrarna Krško, Vrbina 12, 8270 Krško, Slovenija

<sup>\*\*\*</sup> Institut Jožef Stefan, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenija in Univerza v Novi Gorici, Vipavska cesta 13, SI-5000 Nova Gorica, Slovenija

sevanja iz oblaka, doze zaradi inhalacije radionuklidov, doze zaradi sevanja iz depozicije in kombinacije teh doz (efektivne doze). Vse to pa ne gre več z ročnim izračunom, neuporaben pa postane tudi program za razpredelnice, ker nima na voljo posebnih namenskih vmesnikov za dostop do večdimenzionalnih baz podatkov, ki so kodirane v nestandardiziranih formatih in stisnjene (kompresirane).

V članku bomo razložili kako potekajo ključni koraki za pripravo avtomatsko zbranih podatkov, ki operaterju prihranijo zamudno delo in omogočijo zanesljiv izračun doz z uporabo kar največ vnaprej zbranih podatkov.

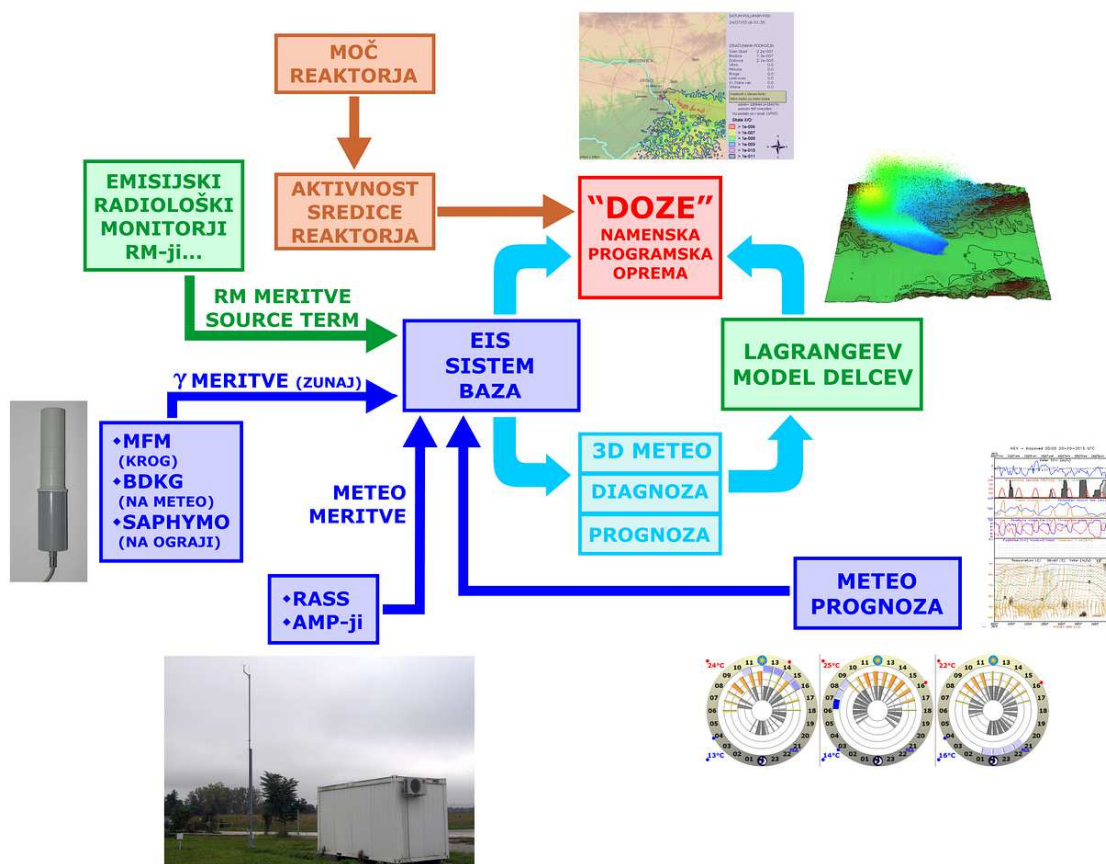
Ključne komponente in podatki, ki smo jih avtomatizirali do največje možne mere, so:

- **Ocena planirane ali potencialne emisije radionuklidov** (rednega izpusta ali nezgodnega izpusta (na osnovi ocene nesreče v reaktorju),
- **Ocena poteka širjenja onesnaženja v ozračju** na osnovi, meteoroloških meritev ali numeričnih vremenskih napovedi, rekonstrukcije vremenskega dogajanja in ustreznega modela za disperzijo onesnaževal v ozračju.
- **Zbiranje vseh krajevno in časovno porazdeljenih podatkov v namenski bazi** (krajevno tridimenzionalno in ploskovni meteorološki in disperzijski izračuni, linijske meritve vertikalnega profila vetra in temperatur, točkovne meritve osnovnih meteoroloških parametrov, pri čemer se vsi podatki potem še časovno spreminjajo).
- **Avtomatska priprava vseh podatkov iz baze v program »DOZE«** za časovni interval in situacijo, ki ju izbere operater.
- **Matematično fizikalni izračun doz prebivalcev**, za talno področje okoli NEK.
- **Prikaz rezultatov z namenskim prilagojenim GIS orodjem** in z dodatnimi orodji za pregled in analizo.

### **Opis ključnih značilnosti posameznih komponent sistema**

V tem poglavju bomo opisali ključne komponente Okoljskega ekspertnega sistema NEK. Sistem je prikazan na Sliki 1. Slike 2 do 4 prikazujejo obdelane rezultate zahtevnejših meritev, Slika 5 pa primer izračunanih doz prebivalstva.

# OKOLJSKI EKSPERTNI SISTEM NEK



Slika 1 - Okoljski ekspertni sistem NEK, posamezne komponente so prikazane slikovno ali shematsko, s puščicami pa so nakazane zgolj najbolj bistvene povezave in pretoki podatkov

## Ocena emisije ob rednem izpustu ali ob nezgodnem izpustu

Emisija radionuklidov je vsota aktivnosti posameznih vrst radionuklidov, ki so spuščeni v ozračje. Ob rednem delovanju NEK je izpuščenih snovi zelo malo. Predpisi pa zahtevajo, da se vseeno izračuna posledično dozo prebivalcev. Varnostni predpisi za nuklearne elektrarne pa nadalje zahtevajo, da se vnaprej preigra vse možne nesreče (na primer močne potrese, izjemne poplave, itd, vse kar je bolj verjetno kot padec kometa na Zemljo) V program DOZE smo vgradili posebne postopke, ki operaterju omogočajo oceno emisije ob potencialni nesreči. Sistem avtomatsko pripravi podatke, ki jih operater potrebuje za te postopke (od meteorologije do radioloških podatkov in stanja reaktorja). Opis teh postopkov zelo presega ta članek in je na voljo v literaturi (Mlakar et al., 1997, Breznik et al., 2003, Mlakar et al., 2014, Breznik et al., 2018).

## Od okoljske avtomatske meteorološke meritve do podatka v urejeni bazi

Ročna ali pol avtomatska meritev na primer temperature zraka ali zračnega pritiska za znanstveni eksperiment je načeloma skoraj trivialna zadeva. Izberemo ustrezen merilnik,



ga odnesemo na izbrano lokacijo, vključimo izvajanje meritve in po določenem času iz spominskega medija merilnika prenesemo zbrane meritve na svoj računalnik in jih obdelamo na primer v Excelu. Popolnoma druga zgodba pa je krajevno porazdeljen avtomatsko v sprotnem načinu prenosa podatkov delujoč merilni sistem. V tem primeru moramo poskrbeti za ustrezno fiksno namestitev računalniške enote merilnika in samega senzorja, primerno energetska oskrba, ustrezno komunikacijsko linijo in potem programsko opremo, ki samostojno v predpisanih intervalih zbira najprej posamezne vzorce (naprimer vsako sekundo), iz teh periodično izračunava statistično obdelane podatke na primer vsake pol ure in jih potem prenese preko komunikacijske linije v oddaljeni center. V taki oddaljeni centralni enoti pa mora biti najprej izdelana (opredeljena in nastavljena) ustrezna baza za vsako lokacijo, za krajevno porazdeljene podatke (na primer meritev temperature z enim senzorjem je točkovna, ploskovni rezultat pa je na primer rezultat efektivne doze za talni nivo), ki se potem še časovno spreminjajo v predpisanih enakomernih ali pa neenakomernih intervalih. Največji izziv pri takih okoljskih bazah je hkratna obravnava zelo različnih vrst meritev, komunikacij in dimenzij podatkov, ki jih moramo za resno uporabo še sproti avtomatsko statistično obdelati in avtomatsko kontrolirati (kontrola za smiselnost izvedene meritve, kontrole merilnih pogojev...). V okoljskem sistemu NEK tako avtomatsko zbiramo meritve iz 4 večjih in dveh manjših talnih meteoroloških postaj, meritve profila vetra s SODARjem in dodatno še profila temperature (kar se potem skupaj imenuje RASS) na eni lokaciji ob NEK (od 0 m do 500 m vertikalno nad kotlino). Vsi podatki se sproti avtomatsko kontrolirajo in uvrstijo v več baz na različnih lokacijah (redundanca), kjer je potem vsaka baza na voljo svojemu krogu pooblaščenih uporabnikov.

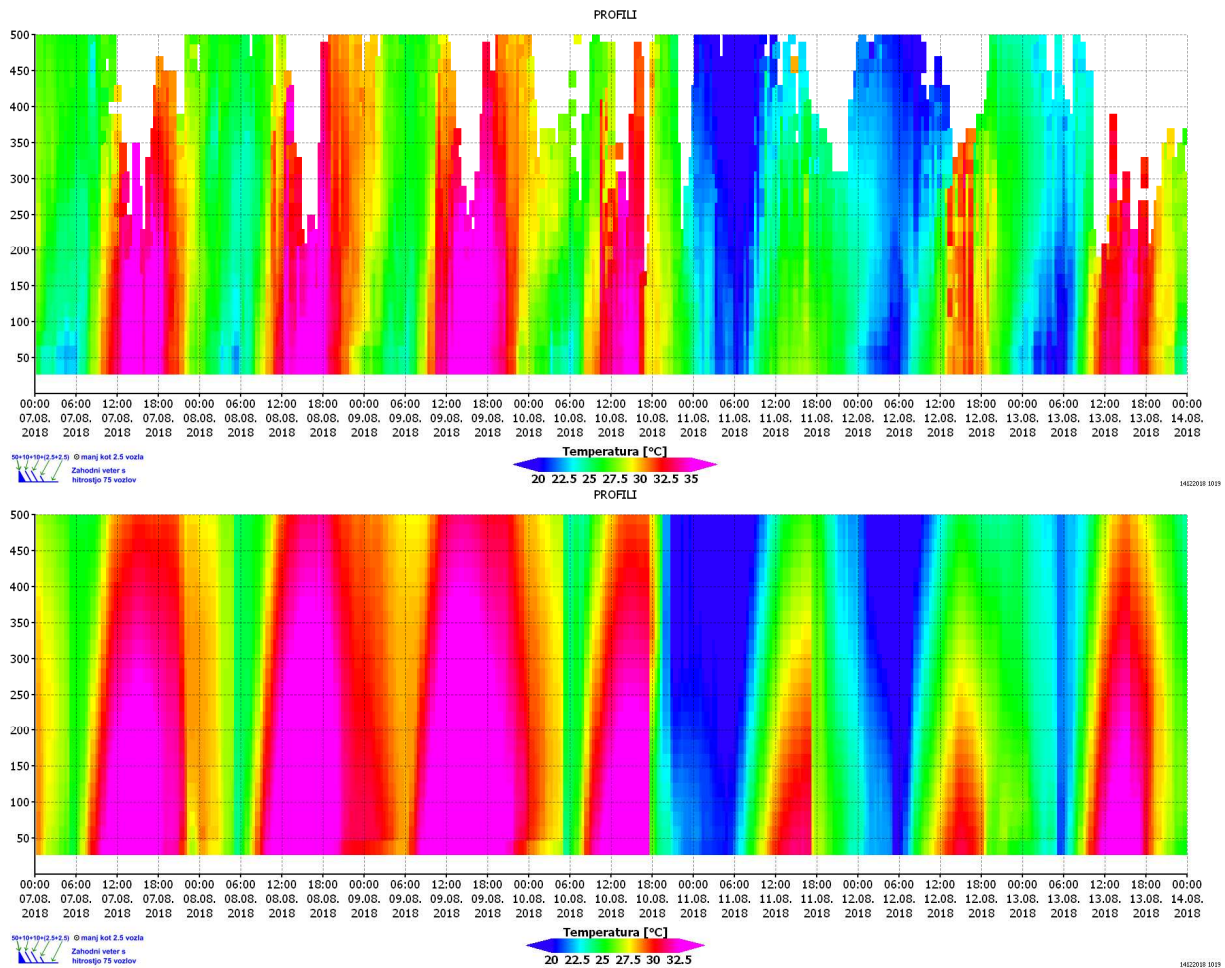
### **Meteorološka napoved namesto meritev za preračune za čase v prihodnosti (do 7 dni)**

Če želimo vnaprej predvideti razvoj radiološkega dogodka z izpustom v ozračje, moramo nujno vedeti, kakšno bo vreme v bližnji prihodnosti. Zato je zadolžena posebna prav tako v celoti avtomatizirana komponenta Izračun numerične vremenske napovedi v fini krajevni in časovni resoluciji (Mlakar et al., 2015). Tudi vremenske modele lahko zaženemo ročno in ročno predpripravimo vhodne datoteke z začetnimi in robnimi pogoji. V Okoljskem Ekspertnem sistemu NEK pa smo poskrbeli za popolnoma avtomatizirano periodično izvajanje izračuna vremenske napovedi. To pomeni, da ustrezna programska oprema vsak dan enkrat na dan poskrbi za to izvedbo izračunavanja. Naši namensko izdelani programi morajo zaporedoma vsakič izvesti naslednje vsebinsko zelo različne naloge: najprej se morajo povezati na strežnik, kjer so na voljo sveže globalne vremenske napovedi (uporabljamo podatke iz ZDA, »GFS«), po protokolu prenesemo zgolj podatke za našo ciljno področje (širši okoliš Slovenije), potem zaženemo WRF vremenski model, prestrežemo njegove izračune, izračun večkrat gnezdeno ponovimo, da pridemo do krajevne resolucije celice 2 km za področje Krškega s širšo okolico). Iz končnega rezultata s posebnim programom preberemo rezultate, ki nam nadomestijo meritve in jih uvrstimo v namensko izdelano bazo, podobno kot sicer naredimo z meritvami. Ker so v celotni verigi izračuna tako dimenzije kot formati podatkov zelo različni, smo morali izdelati svoje namenske programe za vse pretvorbe, ki nam na koncu omogočajo uporabo meritev ali napovedi na skoraj enak način.



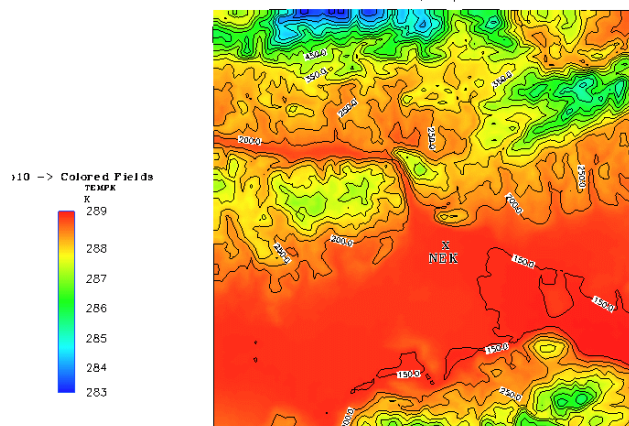
## Ponazoritev dogajanja v atmosferi

Naslednji skupek naših namenskih programov za izbrani časovni interval prebere iz baze podatke o meteoroloških meritvah (diagnostičen način) ali nadomestne podatke iz meteorološke napovedi (prognostičen način) in zažene masno konsistentni model za veter ter meteorološki predprocesor, ki v resoluciji, ki je skoraj 10 x krajevno bolj podrobna od tiste pri vremenski napovedi, ponazorita tridimenzionalna polja vetra, temperatur, ploskovno polje globalnega sončnega obseva in še številne druge spremenljivke. Rezultate seveda avtomatsko zapišemo v ustrezno novo namensko bazo.



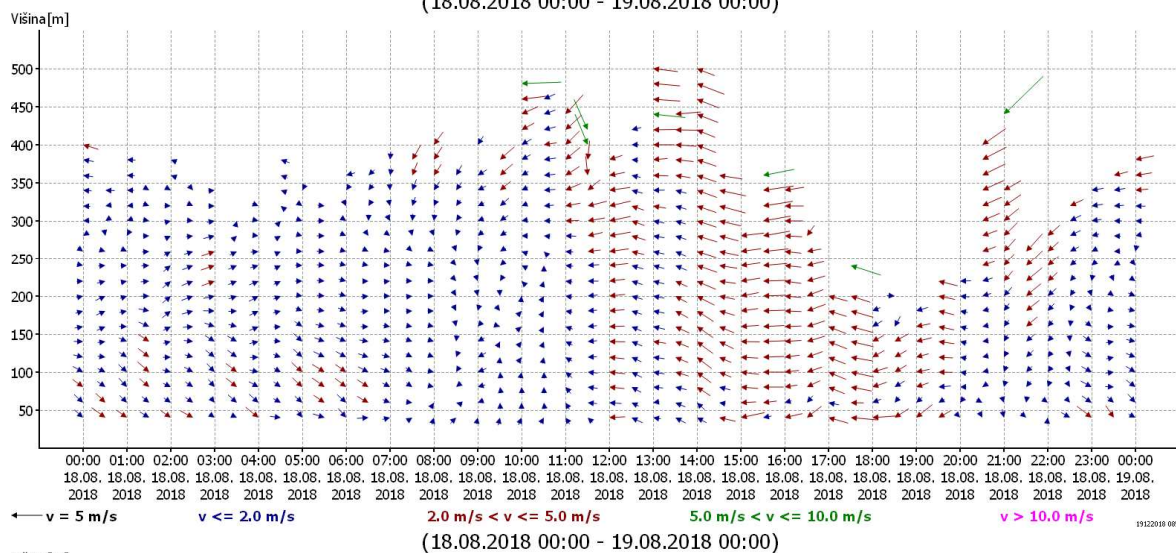
Slika 2 - RASS izmerjen profil temperatur po višini in času (zgoraj) in izračunani profil za isto obdobje iz naše vremenske napovedi izdelane z WRF programom (spodaj) – primer krajevno linijskega podatka prikazanega še po časovni dimenziji

KRSKO NPP 06/14/2018 12:00:0.00

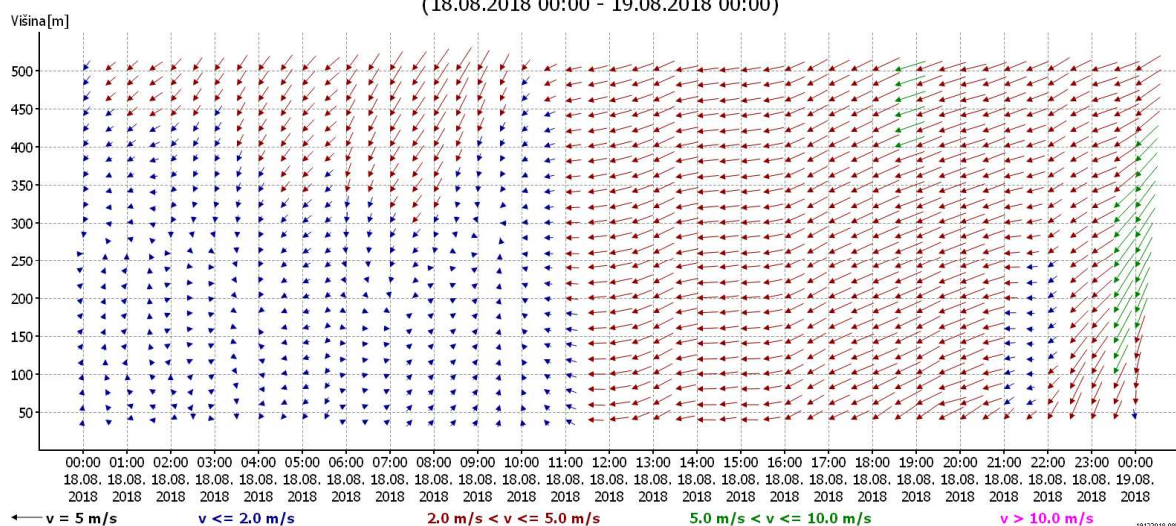


Slika 3 - Globalni sončni obsev za izbrani časovni interval - primer ploskovnega vmesnega rezultata za en časovni interval

(18.08.2018 00:00 - 19.08.2018 00:00)



(18.08.2018 00:00 - 19.08.2018 00:00)



Slika 4 - SODAR izmerjen profil vetra po višini in času (zgoraj) in izračunani profil za isto obdobje iz naše vremenske napovedi izdelane z WRF programom (spodaj) – primer kompleksno sestavljenega podatka - krajevno linijski podatek prikazan še po časovni dimenziji (od tega pa je vsaka komponenta dodatno tridimenzionalni vektor vetra za vsak izbrani nivo)

## **Avtomatski izračun disperzije v ozračju**

V to izračunano tridimenzionalno meteorološko polje, pa naslednji skupek kontrolnih programov in program za izračun disperzije vnesejo normirano enotsko emisijo iz večih možnih različnih izpusnih odprtih NEK in potem to hipotetično emisijo porazdelijo po okolici glede na to kakšna sta transport z vetrom in redčenje v atmosferi v odvisnosti od izračunanega meteorološkega polja. V NEK za disperzijski model uporabljamo numerični Lagrangeev model delcev, ki z validacijami dokazano daje ene najboljših ujemanj rezultatov z dejanskim stanjem nad zelo kompleksnim terenom kakršen je v Sloveniji.

Rezultati so polja relativnih koncentracij (razredčitvenih koeficientov  $X/Q$ ,  $C/Q$  ali  $D/Q$ , glede na to ali obravnavamo koncentracije, sevanje iz oddaljenega oblaka ali pa depozicijo). Izračune izdelujemo prostorsko, v bazo pa zapisujemo končne rezultate ploskovno pri tleh, časovno pa v korakih po pol ure, tako za diagnostične kot za prognozične preračune.

Posebej pomembna v celotnem sistemu je inovativna kontrolna komponenta. Izdelali smo namenski program, ki za vsak izračun avtomatsko preveri ali so na voljo vsi predpisani vhodni podatki ali pa kateri izpadejo (na primer ne deluje SODAR) in potem kar z lahko razumljivo šolsko oceno od 1 – 5 oceni kvaliteto rezultata, ki je operaterju vodilo koliko sme zaupati posameznemu izračunu.

Tudi za vse te ploskovne baze smo izdelali programe, ki rezultate preberejo in prevedejo v formate nujne za končni izračun doz s programom DOZE.

### **Baza ploskovnih polj relativnih koncentracij in končni izračun doz ter prikaz v namenskem »GIS« programu**

Kot je opisano v prejšnjem podpoglavju posebni programi poskrbijo, da se za vsak polurni interval (na dva načina, diagnostično ali prognozično) avtomatsko pripravi vse vhodne podatke, izračuna disperzijo v ozračju za več potencialnih možnih virov emisij, da se potem rezultati (relativne koncentracije) prekontrolirajo in zapišejo v namensko bazo (Mlakar et al., 2019). Ta del Okoljskega Ekspertnega sistema je pravzaprav ključni povezovalni del, ki iz meritev na terenu ali iz prognoze vremena poskrbi za pretvorbo »ponazoritve atmosferskega dogajanja« v izračun relativnih koncentracij za vsako od talnih 250 m x 250 m velikih celic za okolico NEK. Za vsako od teh celic imamo tako na voljo vse podatke za vsak polurni časovni interval za preteklost ali do 7 dni vnaprej, ki jih program »DOZE« na zahtevo operaterja za izbrani časovni interval pobere iz namenske baze in v ozadju programa DOZE zopet avtomatsko uporabi za izračun vseh vrst doz, ki jih mora pregledati operater. Operater se tako najprej odloči za kateri časovni interval želi pregledati posledice morebitnih izpustov v okolici. Potem pa sledi izračun doz za izbrane pogoje.

Največji izziv poleg samih algoritmov programa DOZE nam je bil konceptualen razvoj komunikacijskih baznih in prikazovalnih ter analiznih programov, ki hkrati uporabljajo tako zelo različne podatke kot so to na primer:

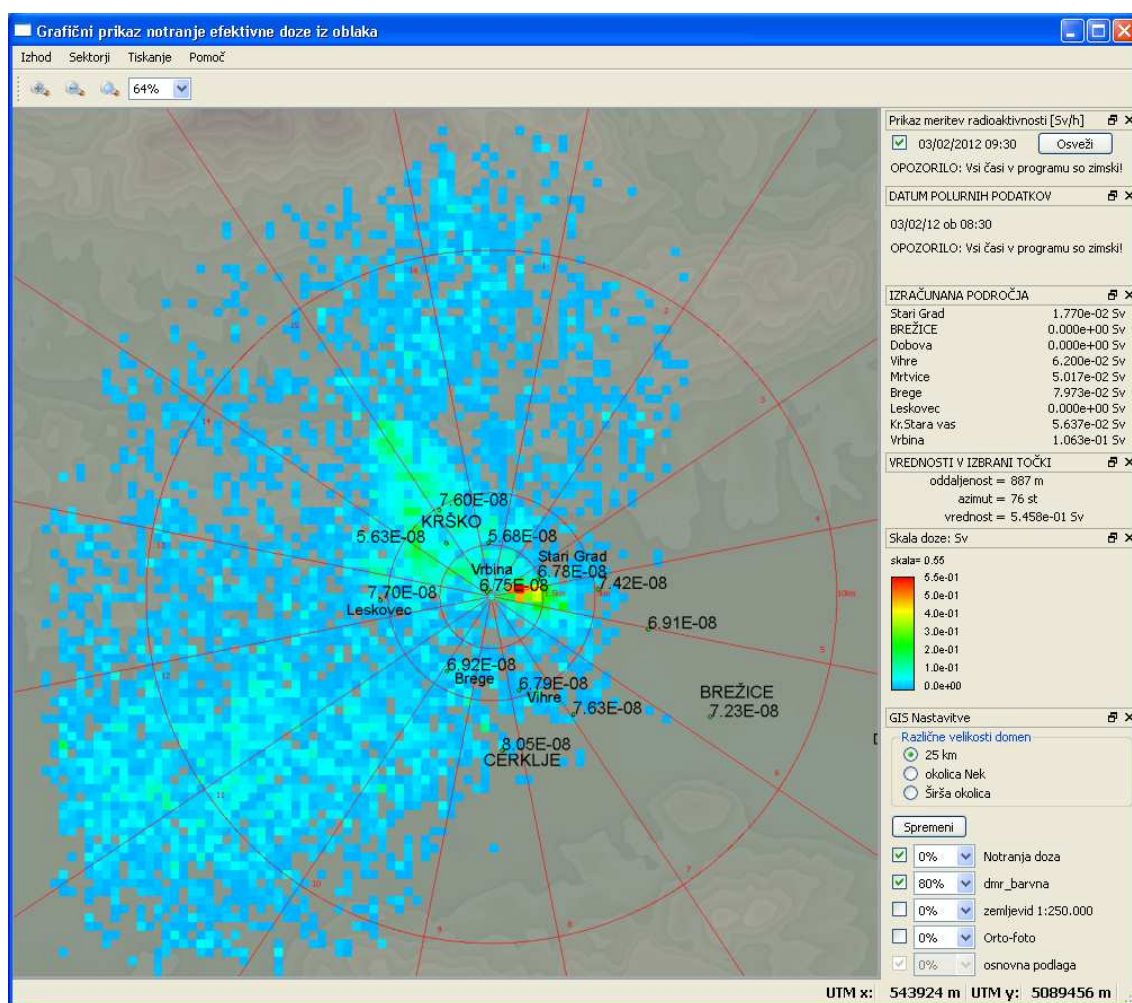
- podatek o točkovni meritvi temperature (eno število za en časovni interval, skalar) ali
- linijski meritvi vertikalnega temperaturnega profila (serija števil, vektor za vsak časovni interval posebej) ali pa
- ploskovni rezultati vremenskega modela (dvodimenzionalna matrika vrednosti, po ena za vsak tip rezultata in vsak časovni interval) ali



- rezultat disperzijskega modela – relativne koncentracije (spet krajevno prostorsko, in časovno).

Program DOZE je zasnovan tako, da te vhodne podatke v obliki matrik (dvodimenzionalne matrike krajevno in časovno) uporabi drugo za drugo in izračuna končno matriko z rezultati – dozami prebivalcev v vsaki krajevni celici posebej. Program DOZE ima dodatne analizne programe, ki potem dvodimenzionalno polje rezultatov pregledajo in poiščejo maksimume na različnih oddaljenostih od lokacije NEK in izpišejo osnovno statistiko ali pa operaterju omogočijo ročno izbiranje z lokatorjem (miško) po zemljevidu in pregledovanje vrednosti na lokacijah izbranih vasi ali mest.

### Uporaba programa doze in celotnega sistema



Slika 5 - Prikaz efektivne doze prebivalcev za izbrane pogoje, ploskovni podatek za izbrani čas prehoda radioaktivnega oblaka čez področje Krške kotline

Program DOZE pooblaščenim operaterjem NEK uporabljajo za izračun doze, ki nastane zaradi rednih neznatnih izpustov iz NEK. Kljub temu, da je taka doza bistveno manjša od doze iz naravnih ionizacijskih sevanj pa je še vedno obvezno, da se dozo zaradi izpusta predhodno pred začetkom izpusta preračuna in sporoči nadzorni instituciji Upravi za jedrsko varnost.

Če pa bi prišlo do nezgodnega dogodka ali če bi bil ta realno predviden v razvoju nesreče nekaj ur ali dni vnaprej, pa so operaterji usposobljeni, da za že izveden nezgodni izpust ali za potencialen pričakovan izpust ocenijo vrednost aktivnosti izpuščenih radionuklidov, uporabijo ustrezne redno avtomatsko vnaprej izračunane relativne koncentracije ter s programom DOZE izračunajo doze prebivalstva v okolici v krajevni resoluciji 250 m za 25 km x 25 km veliko področje. Tak izračun zadošča za začetno obvladovanje situacije in odločitve o evakuaciji, jedni profilaksi ali zaklanjanju.

## Zaključki

V članku smo opisali Okoljski ekspertni sistem NEK, ki omogoča izračun doz prebivalstva ob rednih izpustih radionuklidov v ozračje ali ob nezgodnem dogodku. Osredotočili smo se na opise avtomatizacije vseh procesov, ki privedejo do relativno elegantnega in enostavnega končnega izračuna. Sam odločitveni algoritem vgrajen v rutine programa DOZE pridobi izjemno uporabnost prav zato, ker je v celoti avtomatsko povezan z vsemi različnimi bazami za podatke, ki jih potrebuje v posameznem koraku izračuna. Operater le z nekaj kliki in vpisi (izbira časa, opis nesreče...) skoraj rutinsko opiše dogajanje, program DOZE pa iz baz v ozadju prebere vse ostale več dimenzionalne podatke pred-izračunov, izvede matrične izračune, shrani matrike rezultatov, jih analizira, izpiše ali izriše ploskovne ali točkovne rezultate in operaterju omogoči pregledovanje vseh rezultatov na različne načine, nad zemljevidom, tabelarično, združeno ploskovno po krožnih izsekih ali pa v obliki običajnih časovnih grafov za eno točko.

Posebej pomemben koncept opisanega sistema v NEK pa je ta, da se vsi vremenski in disperzijski preračuni ter preračun aktivnosti v reaktorju, izvajajo avtomatsko, po predpisanem in v programe vgrajenem urniku redno za vsake pol ure, tudi za bližnjo prihodnost. Na ta način je ob katerem koli času večina numerično zelo zahtevnih izračunov (vremena in disperzije tridimenzionalno in depozicije dvodimenzionalno) pripravljena vnaprej. Ob nezgodnem dogodku sistem deluje tako kot ob običajnem mirnodobnem času. Izračuni so praktično vedno sproti na razpolago in jih ob nezgodi program DOZE zgolj prebere iz baze, operater z nekaj kliki in vpisi oceni razsežnost nezgode, program pa potem v trenutku iz vseh vnaprej pripravljenih vhodnih podatkov in ocene, ki jo naredi operater, izračuna doze prebivalcev ter jih prikaže in da na voljo za analizo in odločitve.

Namenska baza v ozadju, ki smo jo izdelali za vse te zelo različne komponente, je bistveni povezovalni del med meritvami, izračuni modelov in izračunanimi rezultati.

Tak pristop redno vnaprej pripravljenih izračunov je najboljše zagotovilo, da bo sistem pravilno deloval tudi ob morebitni nezgodi in nervozi, ki jo bo spremljala. Numerično zahtevni izračuni takrat ne bodo zažirali dragocenega časa, ki bo tako koristno uporabljen za odločanje in ne za čakanje na izračun.

Da pa tak koncept deluje, je treba sistem na vseh nivojih od merilnikov do zahtevnih modelov, baz in nenazadnje žal spremenljivih Windows operacijskih sistemov vseskozi vzdrževati, nadgrajevati izrabljene komponente, večnivojsko smiselno kontrolno preverjati in vsebinsko nadgrajevati glede na razvoj merilnih tehnik, modelnih tehnik, verzij modelov in nenazadnje novih koeficientov in algoritmov za oceno nesreč in izračun doz.

Če želimo, da sistem deluje, moramo tudi sproti ročno pregledovati izmerjene in izračunane vrednosti, avtomatsko preverjati razpoložljivost vseh meritev in izračunov ter pristojnim vzdrževalcem preko SMS in emailov avtomatsko sporočiti izpade, da se omogoči čim hitrejšo ukrepanje.

S takim pristopom vsa leta novejšega modernega obratovanja sistema zagotavljamo večinoma krepko nad 90% razpoložljivost vseh meritev in izračunov. Sistem sta kot primer dobre prakse (»good practice«, najvišja možna pohvala, unikaten zgleden primer ostalim nuklearkam po svetu) in kot primer dobrega delovanja (»good performance«) ocenili dve zaporedni IAEA OSART inšpekciji (International Atomic Energy Agency, 2003, 2017).

### **Zahvala**

Projekt (Metoda za lokalno napovedovanje radiološkega onesnaženja atmosfere z uporabo modelov na podlagi Gaussovih procesov, L2-8174 (B)) je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

### **Literatura**

- Breznik, B., Božnar, M.Z., Mlakar, P., Tinarelli, G. (2003). "Dose projection using dispersion models" in *Int. J. Environ. Pollut.* 20, 278–285. doi:10.1504/IJEP.2003.004291
- Breznik, B., Mlakar, P., Božnar, M.Z. (2018). "Expert system for calculation of doses due to airborne emission" in: *Book of Abstracts, 27th International Conference Nuclear Energy for New Europe, NENE2018, September 10-13, 2018, Portorož.* Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana, p. 49.
- International Atomic Energy Agency (2003). *Draft report of the OSART (Operational Safety Review Team) mission to the Krško nuclear power plant Slovenia 20 October to 6 November 2003.* Vienna, Austria.
- International Atomic Energy Agency (2017). *Report of the Operational Safety Review Team (OSART) mission to the Krsko nuclear power plant Slovenia 15 May to 1 June 2017.* Vienna, Austria.
- Mlakar, P., Božnar, M.Z., Breznik, B., Kovač, A. (1997). "Modelling of air pollutant releases from the Krško Nuclear Power Plant" in: *4th Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe, Bled, Slovenia, 7-10 September 1997.* Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana, pp. 137–144.
- Mlakar, P., Božnar, M.Z., Breznik, B. (2014). "Operational air pollution prediction and doses calculation in case of nuclear emergency at Krško Nuclear Power Plant" in *Int. J. Environ. Pollut.* 15 54, 184–192. doi:10.1504/IJEP.2014.065119
- Mlakar, P., Grašič, B., Božnar, M.Z., Breznik, B. (2015). "On-line relative air dispersion concentrations one week forecast for Krško NPP prepared for routine and emergency use" in *B. Abstr. 24th Int. Conf. Nucl. Energy New Eur. NENE 2015, Portorož, Sept. 14-17, 2015* 58–59.
- Mlakar, P., Božnar, M.Z., Grašič, B. (2019). "Relative doses instead of relative concentrations for the determination of the consequences of the radiological atmospheric releases" in *J. Environ. Radioact.* 196, 1–8. doi:10.1016/J.JENVRAD.2018.10.005

# Geodetske meritve za umestitev Županove jame v globalno koordinatno osnovo: izmera do Velike dvorane

Marjetič Aleš\*, Polona Pavlovčič Prešeren\*

## Povzetek

Določitev podzemnih pojavov v globalnem koordinatnem sistemu je pomembna z več vidikov. Na ta način lahko prikažemo potek jam na izbrani kartografski podlagi in določimo njihovo umestitev glede na površje. Rezultate lahko uporabimo za izhodišče planiranja posegov v prostor, da v čim manjši meri vplivamo na vzpostavljeno naravno ravnovesje med površjem in podzemljem. Koordinatno osnovo lahko vzpostavimo na različne načine in z različno kakovostjo. V prispevku opisujemo geodetska dela pri vzpostavitvi globalne koordinatne osnove za izmero dela kraške Županove jame, ki se nahaja v bližini Turjaka. Z metodami izmere GNSS smo na površju vzpostavili izhodiščno mrežo točk. Te so služile za nadaljnjo terestrično določitev koordinat ostalih točk na površju in v jami, od Ledenice do Velike dvorane. Točke nam bodo v prihodnje služile za nadaljevanje izmere v ostale dvorane in za položajno umestitev kraških pojavov v posameznih dvorinah v globalnem koordinatnem sistemu.

**Ključne besede:** globalni koordinatni sistem, GNSS in terestrična izmera, kraška jama

**Keywords:** global coordinate system, GNSS and terrestrial measurements, Karst cave

## Uvod

Kraško jamo v bližini Turjaka je leta 1926 odkril takratni župan občine Št. Jurij, Josip Perme. Tako so jamo poimenovali Županova jama, čeprav jo poznamo tudi pod imenom Taborska jama. Jamo je naredil tok potoka Podlomščice, ki se danes ne nahaja več na ožjem območju jame. V kataster jam so jo vpisali leta 1990 in od tod lahko razberemo, da je dolga okoli 700 m in gre v globino 70 m pod zemeljskim površjem (eKataster jam, 2018).

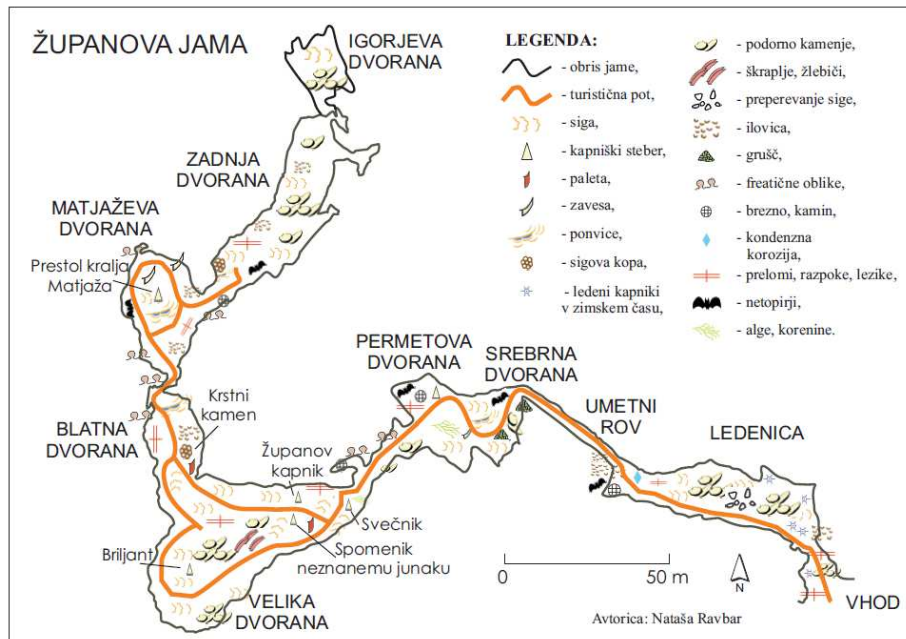
Najprej so v jamo vstopali preko brezna, ki je takoj vodilo v današnjo Permetovo dvorano. Tam se še danes 13 m navzgor vidi vhod v jamo. Danes v jamo vstopamo 100 m stran, kjer je vhod v jamo Ledenica. To so z umetnim rovom povezali s Srebrno in naprej Veliko dvorano (slika 1). Zanimivo je, da je Ledenico v *Slavi Vojvodine Kranjske* omenil že Janez Vajkard Valvazor.

Geodetske meritve Županove jame smo izvedli od Ledenice do Velike dvorane, čeprav se jama nadaljuje preko Blatne, Matjaževe in Zadnje dvorane do v letu 2008 odkrite Igorjeve dvorane. Cilj izmere je bil umestiti jamo v globalno koordinatno osnovo in vzpostaviti izhodišče za nadaljnje geodetske meritve v jami. To pomeni, da smo v globalnem koordinatnem sistemu določili koordinate točk v jami. Pri tem smo izven jame najprej vzpostavili mrežo točk, kjer smo izvedli meritve GNSS (angl. *Global Navigation Satellite System*) za določitev položajev točk v slovenski realizaciji koordinatnega sistema ETRS89, v koordinatnem sistemu D96/TM. Točke so služile za izhodišče terestričnih meritev poligona, ki je s površja potekal v Ledenico vse do Velike dvorane. Tako vzpostavljena koordinatna osnova nam bo v prihodnje služila za izmero ostalih delov jame in kraških pojavov v njej. Na osnovi vzpostavljene mreže točk bo mogoče določiti globino

---

\* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, Ljubljana

preostalih delov jame ter proučevati druge geofizikalne značilnosti območja, na primer anomalije težnosti, kot to opisujejo Breitenberg et al. (2016) ter Breitenberg et al. (2017).



Slika 1 – Dvorane v Županovi jami (Turistično in okoljsko društvo Grosuplje, 2018).

Podroben opis dokumentiranja jam v Sloveniji ter izvedbe meritev opisujejo Urankar et al. (2001) v slovenskem jamarskem priročniku. Opisanih je več možnih postopkov določitve koordinat, tudi z uporabo tehnologije GPS (angl. *Global Positioning System*). Podoben postopek določitve koordinatne osnove, kot smo ga uporabili v dani nalogi, je opisan pri izmeri ledene jame Dobšinská na Slovaškem (Gašinec et al., 2014) ter Grapčeve jame na hrvaškem otoku Hvaru. Tu so avtorji (Redovniković et al., 2016) naredili tudi primerjavo kakovosti različnih merskih tehnik.

### Terenska izmera

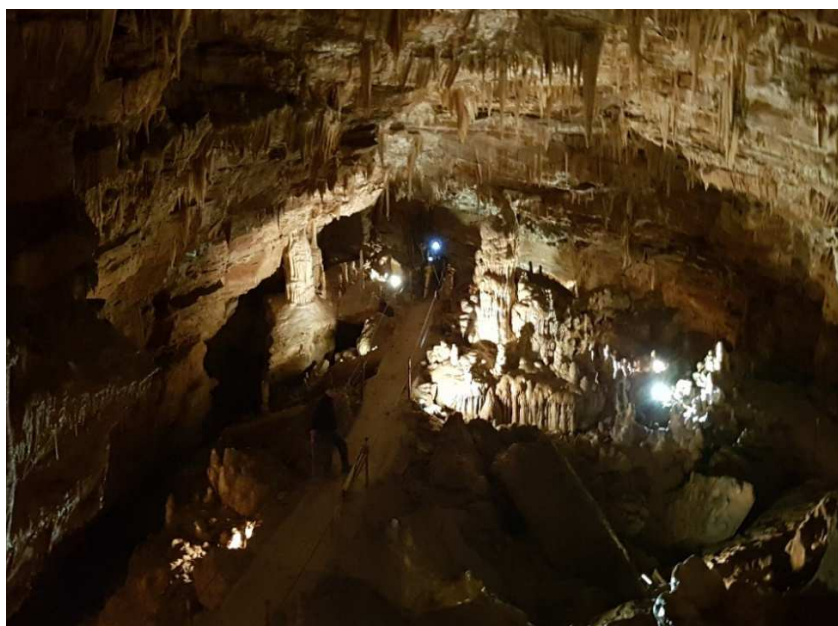


Slika 2 – Instrument GNSS (levo) in klasična terestrična izmera s tahimetrom (desno).



Za vzpostavitev delovišča v globalni koordinatni osnovi smo na štirih točkah izvedli statično izmero GNSS (slika 2 desno). Točke so bile od vhoda jame precej oddaljene, saj se ožje območje jame nahaja na zaraščenem terenu, ki ni primerno za kakovostno izvedbo izmere GNSS. Opazovanja na posameznih točkah so trajala 120 minut ali več.

Klasično terestrično izmero (slika 2 levo) smo naredili v obliki poligona, ki je najprej potekal po površini in se preko vhoda v Ledenico nadaljeval v notranjost jame (slika 3). Točke, določene z GNSS, so bile vključene v geodetsko mrežo in so služile za to, da smo tudi ostale točke določili v koordinatnem sistemu ETRS89 (oziroma D96/TM). Točkam, kjer smo naredili izmero GNSS, smo določili nadmorske višine z GNSS-višinomerstvom ob uporabi modela geoida AMG2000 in testnega izračuna modela geoida Slovenije iz leta 2010. Višinske razlike med ostalimi točkami v mreži smo določili s trigonometričnim višinomerstvom. To pomeni, da smo z meritvami mrežo točk umestili tako v horizontalno kot v višinsko osnovo.



Slika 3 –Terestrične meritve v Veliki dvorani.

### **Obdelava opazovanj statične izmere GNSS**

Opazovanja GNSS smo obdelali z navezavo na državno omrežje postaj GNSS, SIGNAL, in sicer z navezavo na:

- najbližji stalni postaji omrežja (Trebnje, Ljubljana) in
- na virtualno referenčno točko VRS, vzpostavljeno v bližini geodetske mreže.

Vsako izmero smo obdelali na več načinov in sicer, ko:

- so se vsi vektorji navezovali na isto referenčno točko omrežja SIGNAL (t.i. radialna izmera),
- ko smo opazovanja celotne serije razdelili v dve oziroma tri serije enakega trajanja in v vsaki obdelali poligon z linearno neodvisnimi vektorji in
- ko smo v obdelavi uporabili različne modele troposferske refrakcije.

V obdelavo smo vključili precizne efemeride ter kalibracijske protokole anten službe NGS (angl. *National Geodetic Survey*). Z različnimi načini upoštevanja vpliva troposfere

na opazovanja smo po ugotavljanju kakovosti zapiranja figur v mreži GNSS ter na osnovi primerjava višinskih razlik, ki smo jih določili s terestrično izmero, določili končne rezultate (preglednica 1).

Preglednica 1 – Koordinate točk v ETRS89 ter D96/TM, ki smo jih določili z izmero GNSS.

Točka	$\varphi$	$\lambda$	h [m]	e [m]	n [m]
B	45° 54' 48,28798" N	14° 38' 16,05119" E	514,154	471.901,256	86.016,927
C	45° 54' 49,80948" N	14° 38' 19,50319" E	487,779	471.975,855	86.063,561
H	45° 54' 34,48029" N	14° 38' 19,67943" E	529,440	471.977,511	85.590,304
I	45° 54' 32,97113" N	14° 38' 17,98669" E	530,354	471.940,820	85.543,879

Razlike v geoidnih višinah, izračunanih iz modelov AMG2000 in testnega izračuna novejšega modela geoida, so na obravnavanem območju reda velikosti sedem centimetrov (preglednica 2).

Preglednica 2 – Geoidne višine iz modelov AMG2000 in testnega izračuna modela geoida.

Točka	N [m] AMG2000	N [m] Testni model	H [m] Testni model
B	46,412	46,483	467,671
C	46,411	46,482	441,297
H	46,419	46,488	482,952
I	46,419	46,489	483,865

### Obdelava terestričnih meritev

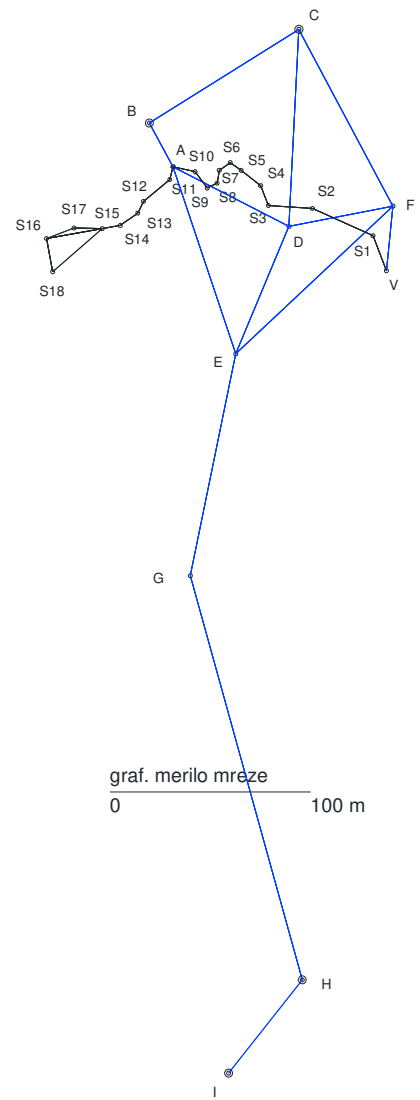
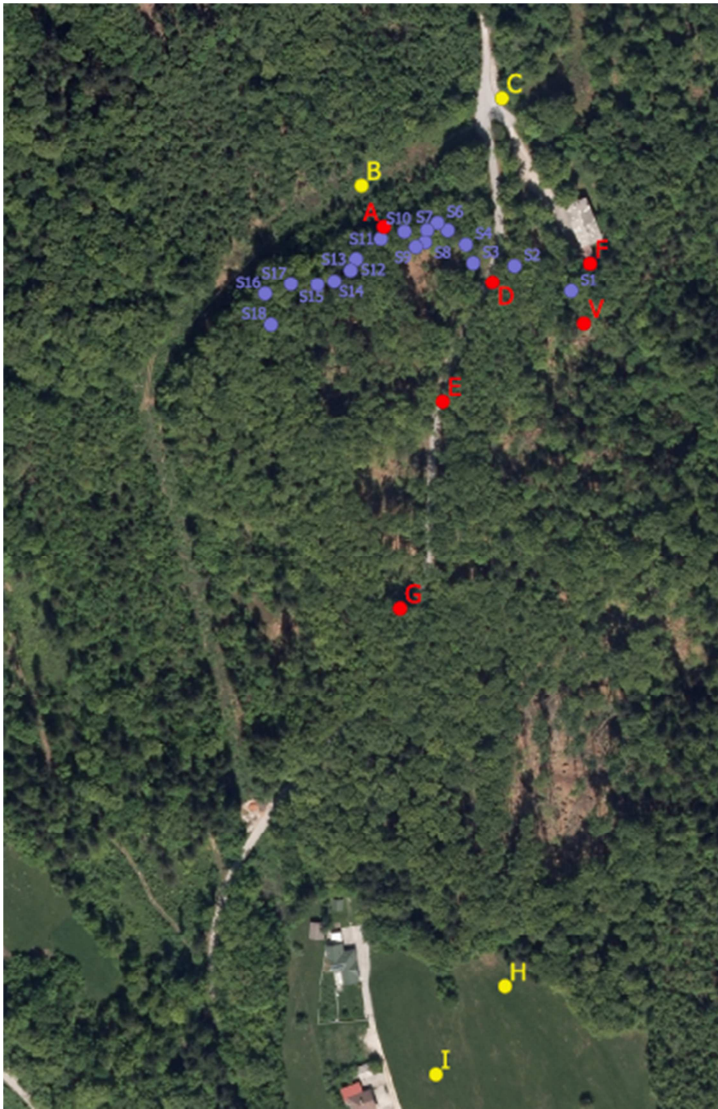
Mrežo štirih točk GNSS na površini (B, C H in I) smo z gostili z dodatnimi točkami, da smo lahko povezali točki B in C ter I in H ter mrežo pripeljali neposredno pred vhod v jamo. V tako razširjeni mreži smo izvedli klasične terestrične meritve, in sicer meritve kotov in poševnih dolžin med točkami mreže. Celotna geodetska mreža je bila tako v osnovi sestavljena iz dveh delov, in sicer iz (slika 4):

geodetske mreže na površini (točke A – I) in

- poligona od vhoda, preko dvorane Ledenica do Velike dvorane (točke S1 – S18).

Na sliki 4 so rumeno obarvane točke določene z GNSS (B, C, I, H), rdeče s terestričnimi meritvami (A, D, E, F, V) in modro točke v notranjosti jame (oznaka S in zaporedna številka). Točki S1, S2 (pred vhomom v jamo) ter točke v Veliki dvorani (S15 – S18) so tudi trajno stabilizirane.

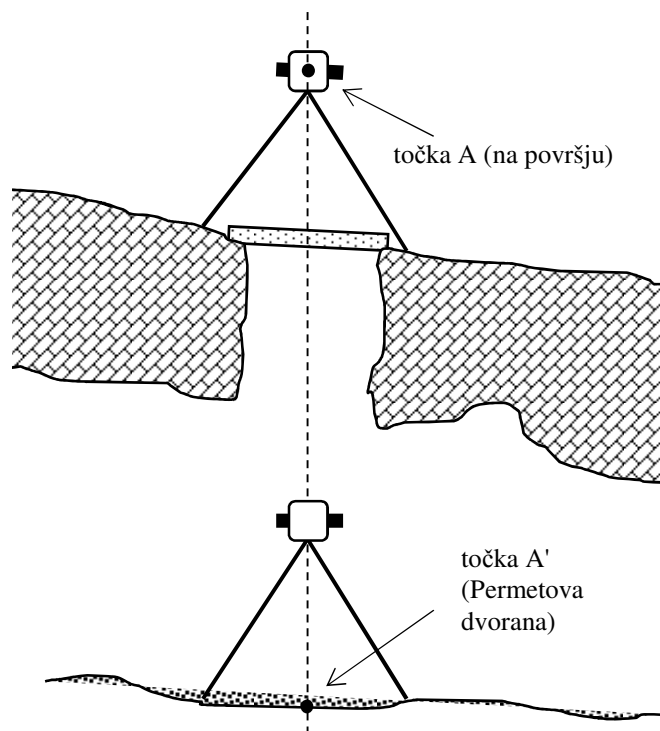
Geodetska mreža, skupaj z mrežo na površini in poligonom v notranjosti, je predstavljala velik geodetski strokovni izziv. S slike 4 je vidno, da mreža ni optimalne geometrijske oblike, da bi omogočala kakovostno določitev položajev točk. Prav tako ni bilo mogoče vnaprej oceniti kakovost določitve koordinat točk v jami.



Slika 4 – Razporeditev točk na območju (levo) ter oblika geodetske mreže (desno).

Poševno merjene dolžine smo popravili za meteorološke vplive in jih pred izravnavo reducirali v horizontalne dolžine na ničelnem nivoju. Naprej smo jih skupaj z merjenimi koti vključili v izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Izravnavo smo naredili ločeno za horizontalno in višinsko mrežo.

Geodetska mreža za umestitev Županove jame v globalno koordinatno osnovo je imela poleg zahtevne oblike še dodatno posebnost. Točko A na površini smo postavili nad vertikalnim jaškom nad Permetovo dvorano, skozi katero je potekal geodetski poligon z začetkom na površju pred vhomom v jamo. Zaradi oblike in vertikalne usmerjenosti jaška smo lahko izvedli vertikalno grezenje točke A s pomočjo laserskega grezila (slika 5). Na ta način smo naredili navezavo (vpetje) sredine slepega poligona na zunanji del geodetske mreže. Vpetje geodetskega poligona, ki je potekalo od vhoda do Velike dvorane, je posledično izboljšalo natančnost položajev točk poligona v horizontalni ravnini.



Slika 5 – Vertikalno grezenje točke A.

V izračunu smo mrežo razdelili na zunanjo mrežo in mrežo v jami. Vsako smo najprej izravnali kot prosto mrežo, brez danih točk. Z rezultati izravnave proste mreže smo dejansko samo ocenili kakovost meritev v mreži. Nam pa zaradi lastnosti izravnave proste mreže ti rezultati niso podali koordinat, vezanih na določitev koordinatnega sistema, kot bi ga želeli, da ga določajo dane točke. Zato je bilo celotno mrežo potrebno vpeti na "dane" točke, ki so bile za zunanjo mrežo predhodno določitev z izmero GNSS.

Izravnava vpete mreže splošno ne dopušča spreminjanja koordinat danih točk. Vemo pa, da se tahimetrične meritve kotov in dolžin navadno ne ujemajo z geometrijo mreže točk GNSS, predvsem zaradi slabše natančnosti določitve položajev točk z metodami izmere GNSS. Zato smo iskali odgovor na vprašanje, kako rešiti problem tako, da bi dopustili možnost, da se z izračunom na podlagi bolj kakovostnih tahimetričnih meritev na nek način izravnajo tudi "dane" količine. To smo naredili s pomočjo S-transformacije (Marjetič in Stopar, 2007), ki nam omogoča, da izravnamo tudi "dane" koordinate pod pogojem minimalne vsote kvadratov popravkov le-teh.

Rezultati S-transformacije zunanje mreže za točke A, F in V so predstavljale koordinatno osnovo za računanje poligona. Postopek izračuna zunanje mreže smo ponovili za izračun koordinat točk v jami. Rezultati izravnave se nahajajo v preglednicah 3 in 4. Točke B, C, H in I so določene z GNSS, A, F, in V so točke poligona na površju, ostale točke se nahajajo v jami.

Preglednica 3 – Rezultati izravnave in S-transformacije za zunanjo mrežo s parametri standardnih elips pogreškov.

Točka	Opis	Prosta mreža					S-transformacija				
		<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	$\vartheta$ [°]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	$\vartheta$ [°]
B	GNSS	471.901,2676	86.016,9289	0,0004	0,0002	1	471.901,2584	86.016,9316	0,0003	0,0002	140
C	GNSS	471.975,8611	86.063,5519	0,0004	0,0003	124	471.975,8518	86.063,5562	0,0002	0,0002	147
H	GNSS	471.977,5175	85.590,3091	0,0006	0,0003	8	471.977,5156	85.590,3097	0,0004	0,0002	33
I	GNSS	471.940,8161	85.543,8741	0,0009	0,0004	16	471.940,8146	85.543,8737	0,0004	0,0002	39
A	navezava v jamo	471.913,1102	85.995,1077	0,0004	0,0002	169	471.913,1014	85.995,1105	0,0004	0,0002	137
D		471.970,8662	85.965,4125	0,0003	0,0002	13	471.970,8584	85.965,4159	0,0004	0,0003	147
E		471.944,4010	85.901,9754	0,0003	0,0003	88	471.944,3939	85.901,9779	0,0006	0,0004	171
F	navezava v jamo	472022,7280	85.975,5816	0,0004	0,0002	10	472.022,7204	85.975,5859	0,0005	0,0003	32
G		471.921,7353	85.791,5420	0,0005	0,0004	89	471.921,7298	85.791,5433	0,0007	0,0005	172
V	navezava v jamo	472.019,4800	85.943,3511	0,0006	0,0003	16	472.019,4729	85.943,3551	0,0008	0,0004	26

Preglednica 4 – Rezultati izravnave in S-transformacije za poligon v jami s parametri standardnih elips pogreškov. Odebeljeno so označene trajno stabilizirane točke.

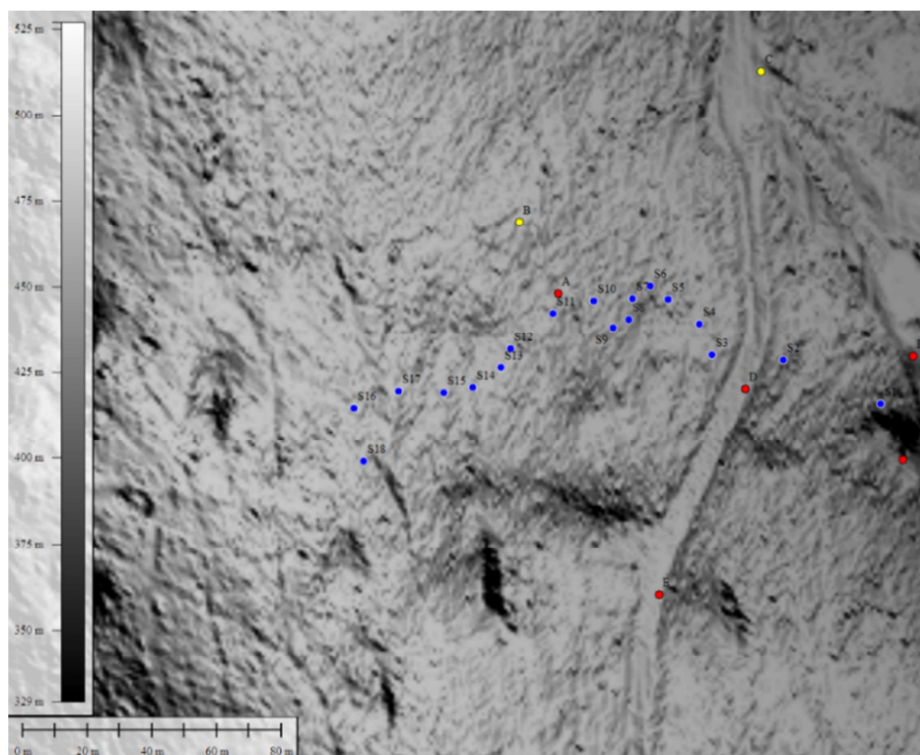
Točka	Opis	Prosta mreža					S-transformacija				
		<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	$\vartheta$ [°]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	$\vartheta$ [°]
A	zunaj	471.913,1172	85.995,1295	0,0010	0,0008	85.	471.913,1015	85.995,1113	0,0002	0,0001	30
F	zunaj	472.022,7311	85.975,5807	0,0016	0,0011	104	472.022,7176	85.975,5854	0,0006	0,0003	10
V	zunaj	472.019,4823	85.943,3503	0,0018	0,0009	90	472.019,4755	85.943,3549	0,0005	0,0003	25
S1	v jami	472.012,7389	85.960,7996	0,0016	0,0007	93	472.012,7287	85.960,8025	0,0009	0,0003	164
S2	v jami	471.982,6223	85.974,3740	0,0013	0,0006	98	471.982,6098	85.974,3704	0,0011	0,0008	138
S3	v jami	471.960,6351	85.975,8817	0,0012	0,0008	109	471.960,6226	85.975,8736	0,0012	0,0010	43
S4	v jami	471.956,7421	85.985,7090	0,0011	0,0008	97	471.956,7276	85.985,6999	0,0013	0,0010	39
S5	v jami	471.947,0695	85.993,2731	0,0011	0,0008	76	471.947,0536	85.993,2619	0,0013	0,0011	26
S6	v jami	471.941,6368	85.997,2265	0,0011	0,0008	62	471.941,6202	85.997,2141	0,0012	0,0011	173
S7	v jami	471.936,1473	85.993,3516	0,0010	0,0008	45	471.936,1316	85.993,3381	0,0011	0,0010	33
S8	v jami	471.935,0271	85.986,9623	0,0009	0,0008	33	471.935,0127	85.986,9487	0,0011	0,0008	16
S9	v jami	471.930,1139	85.984,5010	0,0009	0,0008	19	471.930,1001	85.984,4864	0,0010	0,0006	32
S10	v jami	471.924,0951	85.992,6203	0,0009	0,0009	112	471.924,0798	85.992,6044	0,0008	0,0003	15
S11	v jami	471.911,4938	85.988,7644	0,0009	0,0008	85	471.911,4795	85.988,7459	0,0009	0,0002	13
S12	v jami	471.898,3500	85.977,9058	0,0010	0,0007	70	471.898,3381	85.977,8848	0,0012	0,0007	30
S13	v jami	471.895,4932	85.972,0085	0,0011	0,0006	66	471.895,4826	85.971,9870	0,0016	0,0008	28
S14	v jami	471.886,7810	85.965,9243	0,0013	0,0005	69	471.886,7718	85.965,9011	0,0018	0,0011	35
S15	v jami	471.877,7702	85.964,2934	0,0014	0,0005	74	471.877,7615	85.964,2684	0,0020	0,0014	43
S16	v jami	471.850,0056	85.959,4153	0,0015	0,0008	82	471.849,9983	85.959,3846	0,0024	0,0021	22
S17	v jami	471.863,7311	85.964,6269	0,0015	0,0006	78	471.863,7225	85.964,5990	0,0022	0,0017	39
S18	v jami	471.853,1036	85.942,8722	0,0016	0,0009	87	471.853,0997	85.942,8425	0,0024	0,0024	24



Mrežo smo izravnali tudi višinsko in pri tem obravnavali vse točke, na površju in v jami, hkrati. Tukaj poligona v notranjosti nismo uspeli navezati na dano točko, kot smo to naredili v primeru horizontalne situacije. Natančnost določitve višin točk so bile do 5 mm. Pri taki obliki mreže in dokaj strmih vizurah v jami lahko rečemo, da so rezultati dobri. V preglednici 5 predstavljamo rezultate izravnave višinske situacije, kjer je točka A določena na površju (stari vhod v Permetovo dvorano) in Ax z grezenjem določena točka v Permetovi dvorani.

Preglednica 5 – Rezultati izravnave in S-transformacije za višinsko mrežo. Odebeljeno so označene trajno stabilizirane točke.

Točka	H [m]	$\sigma_H$ [m]	Točka	H [m]	$\sigma_H$ [m]
A	467,0856	0,0012	S7	452,1543	0,0037
Ax	453,9746	0,0041	S8	453,4513	0,0038
D	453,7348	0,0015	S9	454,2249	0,0038
E	460,8078	0,0018	S10	455,4095	0,0039
F	440,8055	0,0018	S11	455,4513	0,0041
G	472,7770	0,0026	S12	444,2567	0,0043
V	434,7532	0,0024	S13	441,7929	0,0043
<b>S1</b>	<b>425,6783</b>	<b>0,0026</b>	S14	449,1999	0,0044
<b>S2</b>	<b>423,8274</b>	<b>0,0031</b>	<b>S15</b>	<b>452,0113</b>	<b>0,0045</b>
S3	432,2182	0,0033	<b>S16</b>	<b>454,7929</b>	<b>0,0046</b>
S4	435,1229	0,0035	<b>S17</b>	<b>450,6147</b>	<b>0,0046</b>
S5	441,7136	0,0036	<b>S18</b>	<b>447,4938</b>	<b>0,0047</b>
S6	446,7435	0,0037			



Slika 6 – Izris točk na lidarskem DMV (rdeče GNSS-točke, zeleno, točke izven jame (ARSO, 2018)).

Potek izmere zunaj in v notranjosti jame prikazujemo na lidarskem DMV (slika 6). Od tu naprej Županova jama poteka proti severu (slika 1). Za bolj natančno umestitev nadaljevanja jame v globalnem koordinatnem sistemu bo izmero potrebno nadaljevati s podobnim postopkom, kot smo ga uporabili do sedaj, in uporabo koordinat trajno stabiliziranih točk v jami.

## Zaključek

Glavni namen prispevka je bil pokazati geodetski način vzpostavitve mreže v globalnem koordinatnem sistemu za izmero v jami. Koordinatna osnova Županove jame je trenutno kakovostno določena le do Velike dvorane, zato imamo v prihodnje namen z izmero nadaljevati. Točke, ki smo jih določili v jami, lahko služijo kot izhodišče 3D-modeliranja kraških pojavov v jami in pri njihovi umestitvi v globalni koordinatni sistem. Njihov horizontalni položaj bo služil za osnovo pri drugih geodetskih meritvah na površju za proučevanje geofizikalnih značilnosti danega območja.

## Zahvale

Izmera je nastala tekom magistrske naloge *Aljaža Peklaja, dipl. inž. (UN)*. Pri izmeri je sodeloval tudi *Andrej Peklaj, univ. dipl. inž. geod.* Obema se zahvaljujema za pomoč pri izvedbi meritev.

Zahvala gre tudi *ga. Lučki Jere* in upravljavcu jame, *g. Damjanu Viršku*, ter *Turističnemu in okoljskemu društvu Grosuplje*, ki so nam omogočili izmero v jami.

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa *Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227)* Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

## Literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO) (2018). LIDAR.  
[http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas\\_voda\\_Lidar@Arso/](http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso/) (18. 12. 2018).
- Breitenberg, C., Pivetta, T., Rossi, G., Ventura, P., Batic, A. (2018). Karst caves and hydrology between geodesy and archeology: Field trip notes. *Geodesy and geodynamics* 9, 262–269. DOI: 10.1016/j.geog.2017.06.004
- Breitenberg, C, Sampietro, D., Pivetta, T., Zuliani, D., Barbagallo, A., Fabris, P., Rossi, L., Fabbri, J., Mansi, A. H. (2016). Gravity for detecting caves: airborne and terrestrial simulations based on a comprehensive karstic cave benchmark. *Pure Applied Geophysics* 173, 1–22. DOI: 10.1007/s00024-015-1182-y
- Gašinec, J., Gašincová, S., Zelizňaková, V., Palková, J., Kuzevičová, Ž. (2014). Analysis of geodetic network established inside the Dobšinská ice cave space. *Geoscience Engineering* 1, 45–54. <http://gse.vsb.cz/2014/LX-2014-1-45-54.pdf/> (17. 12. 2018).
- eKataster jam. <https://www.katasterjam.si/> (17. 12. 2018).
- Marjetič, A., Stopar, B. (2007). Geodetski datum in S-transformacija. *Geodetski vestnik* 51 (3), 549–564.
- Redovniković, L., Stančić, B., Cetl, V. (2016). Comparison of different methods of underground survey. *International Symposium on Engineering Geodesy, "GNSS and Indoor Navigation"*, Varaždin, 465–473.  
[http://www.geof.unizg.hr/pluginfile.php/7437/mod\\_book/chapter/173/TS5\\_4.pdf/](http://www.geof.unizg.hr/pluginfile.php/7437/mod_book/chapter/173/TS5_4.pdf/) (18.12. 2018).
- Urankar, R., Šušteršič, F., Simić, M., Praprotnik, A. (2001). Ne hodi v jame brez glave. Društvo za raziskovanje jam Ljubljana, 131 p.  
[http://www.dzrl.si/wp-content/uploads/2015/07/2001\\_Urankar\\_et\\_al\\_Ne\\_hodi\\_v\\_jame\\_brez\\_glave.pdf/](http://www.dzrl.si/wp-content/uploads/2015/07/2001_Urankar_et_al_Ne_hodi_v_jame_brez_glave.pdf/)

(18.12. 2018).

Turistično in okoljsko društvo Grosuplje (2018).

<http://www.zupanovajama.si/wp/zupanova-jama/interaktivni-sprehod/> (18. 12. 2018).



# Odprava pristranskosti v regionalnih podnebnih modelih

Anže Medved<sup>\*</sup>, Gregor Vertačnik<sup>\*</sup>

## Povzetek

Za analizo ocene podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja smo uporabili rezultate regionalnih podnebnih modelov. Zaradi različnih vzrokov vsebujejo rezultati teh modelov statistične napake. Pred nadaljnjo uporabo je smotno te napake odpraviti oziroma omiliti. Za odpravo teh napak smo pri padavinah uporabili metodo preslikave kvantilov (angl. *quantile mapping*). Ostale spremenljivke smo popravili z metodo preslikave kvantilov odklonov (angl. *quantile delta mapping*, QDM). Upoštevali smo logično ali statistično povezanost nekaterih spremenljivk. Pri popravljanju vrednosti temperature zraka smo definirali štiri padavinske razrede, znotraj katerih so se popravki razlikovali.

**Ključne besede:** podnebni scenarij, odprava pristranskosti, preslikave kvantilov, preslikave kvantilov odklonov, padavine, temperatura zraka, referenčna evapotranspiracija, padavinski razred, odklon

**Keywords:** climate change scenario, bias-correction, quantile mapping, quantile delta mapping, precipitation, air temperature, reference evapotranspiration, precipitation class, deviation

## Uvod

Pri analizi vpliva podnebnih sprememb znotraj projekta *Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja*, smo analizirali modelske podatke regionalnih podnebnih modelov. Podatke smo pridobili iz podatkovne baze projekta EURO-CORDEX (angl. *Coordinated Downscaling Experiment – European Domain*) (Benestad in sod., 2018), znotraj katerega sodelujejo vodilne ustanove na področju regionalnih podnebnih raziskav v Evropi. V projektu so in še bodo simulirali podnebje na množici dinamičnih in tudi empirično-statističnih regionalnih podnebnih modelov, katerih vhodni podatki so izračuni globalnih podnebnih modelov (angl. *Global Climate Model* oz. *General Circulation Model*, GCM) projekta *Primerjava sklopljenih modelov, 5. stopnja* (angl. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*, CMIP5) do leta 2100. Ti modeli so uporabni za preučevanje podnebnih sprememb na svetovni ravni. Opisujejo različne sestavine podnebnega sistema, njihove medsebojne nelinearne vplive in povratne vezi med njimi. Vodoravna prostorska ločljivost modelov je trenutno od 100 do 500 km, kar ni dovolj za oceno podnebne spremenljivosti na lokalni ravni.

Za opis lokalnih posledic podnebnih sprememb je potreben preračun rezultatov GCM na lokalno raven (angl. *downscaling*). Eden od načinov je preračun z uporabo regionalnih podnebnih modelov (RCM, angl. *Regional Climate Models*). Ti uporabljajo rezultate simulacij GCM kot vhodne podatke oziroma robne pogoje. Njihova vodoravna prostorska ločljivost je navadno 10–50 km. RCM nekatere pomembne procese upoštevajo neposredno (**npr. parametrizacijske sheme, prilagojene večji ločljivosti, kroženje zraka v gorah, medsebojno vplivanje kopnega in morja**), zato bolje simulirajo značilnosti regionalnega in lokalnega podnebja. Podatki regionalnih modelov v projektu EURO-CORDEX so v

---

<sup>\*</sup> Agencija RS za okolje, Vojkova cesta 1b, Ljubljana

pravilni mreži v dveh ločljivostih; podrobnejša ima razmik med računskimi točkami  $0,11^\circ$  (na geografski širini Slovenije približno 12,5 km) in splošna razmik med računskimi točkami  $0,44^\circ$  (na geografski širini Slovenije približno 50 km). Uporabili smo podatke v finejši resoluciji.

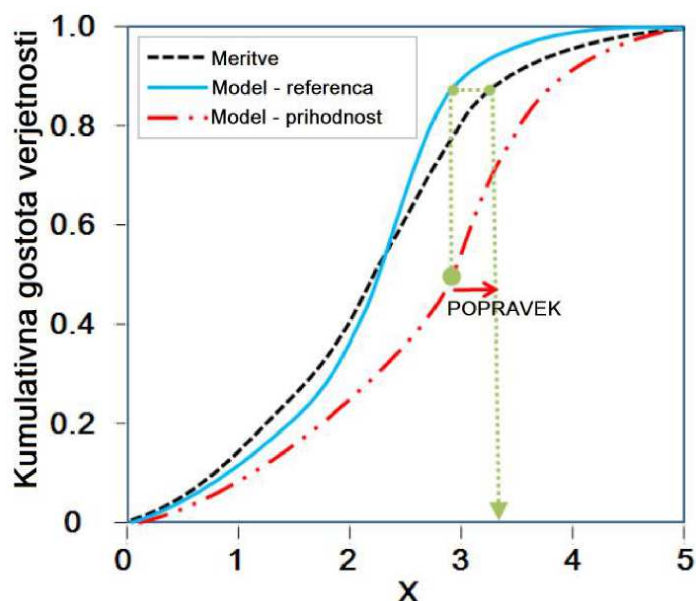
Za pripravo podnebnih scenarijev v Sloveniji smo analizirali naslednje spremenljivke: povprečna temperatura zraka (*tas*), dnevna najvišja in najnižja temperatura zraka (*tasmax* in *tasmin*), višina padavine (*pr*) in referenčna evapotranspiracija (*evspsblpot*), ki je izračunana iz polj temperature, specifične vlažnosti, hitrosti vetra in gostote moči kratkovalovnega sevanja. Omenjene spremenljivke vsebujejo sistematične napake, ki so posledica omejene modelske ločljivosti, poenostavljenih enačb za nekatere fizikalne procese, numeričnih shem, nepopolnega razumevanje vseh podnebnih procesov itn. V splošnem je potrebno sistematične napake modelskih rezultatov popraviti. Pri tem si največkrat pomagamo s preteklimi meritvami in ustreznimi modelskimi simulacijami. Na ARSO smo kot pretekle meritve uporabili dnevne podatke prizemnih meritev, interpolirane na modelsko mrežo. Za to primerjavo obeh vrst podatkov in odpravo statističnih napak modelskih rezultatov obstaja več različnih metod. Na ARSO smo uporabili prirejeno metodo preslikav kvantilov (angl. *quantile mapping*) (Themeßl in sod., 2011; Wilcke in sod., 2013; Switanek in sod., 2016; Cannon, 2016; Cannon in sod., 2015). Izračunali smo statistične napake za primerjalno obdobju 1981–2010 in na podlagi teh rezultatov pripravili podnebne scenarije do leta 2100.

## Postopek

Odpravljanja pristranskosti modelskih podatkov smo se lotili za vsako spremenljivko posebej. Na začetku smo vse spremenljivke popravili z isto metodo, po pregledu člankov (Switanek in sod., 2016; Cannon, 2016; Cannon in sod., 2015) pa smo se odločili, da bomo nekatere spremenljivke popravili z drugimi metodami. Najprej smo izvedli metodo odpravljanja pristranskosti (angl. *bias correction*, BC) pri padavinskih podatkih z metodo preslikave kvantilov (angl. *quantile mapping*). To smo naredili s programom R, z uporabo knjižnice *qmap* (Gudmundsson, 2016). Na podlagi članka avtorja paketa (Gudmundsson in sod., 2012), v katerem je primerjava različnih metod, smo se odločili za uporabo metode neparametrične preslikave kvantilov z uporabo empiričnih kvantilov (angl. *non-parametric quantile mapping using empirical quantiles*) z linearno ekstrapolacijo. Popravljanje se je vršilo za vsako modelsko celico neodvisno od drugih. Splošni postopek je naslednji. Primerjamo porazdelitvi modelskih podatkov in meritev v primerjalnem obdobju ter ocenjujemo razlike po kvantilih te porazdelitve (

Slika 1). Ocenjene razlike uporabimo kot popravke modelskih podatkov za prihodnost pri izbranem kvantilu. Popravke smo izračunali za vsak dan v letu z uporabo drsečega časovnega okna (angl. *moving window*) (Wilcke in sod., 2013). Pri padavinah smo se odločili za 61-dnevno časovno okno in 100 razredov kvantilov.

Razliko med popravljenimi in prvotnimi padavinskimi podatki za modelsko celico, v kateri je Ljubljana, prikazuje Tabela 1. Podatki so predstavljeni po decilih. Vidimo lahko, da nam pri manjših vrednostih metoda zmanjša količino padavin, pri višjih vrednostih pa poveča.

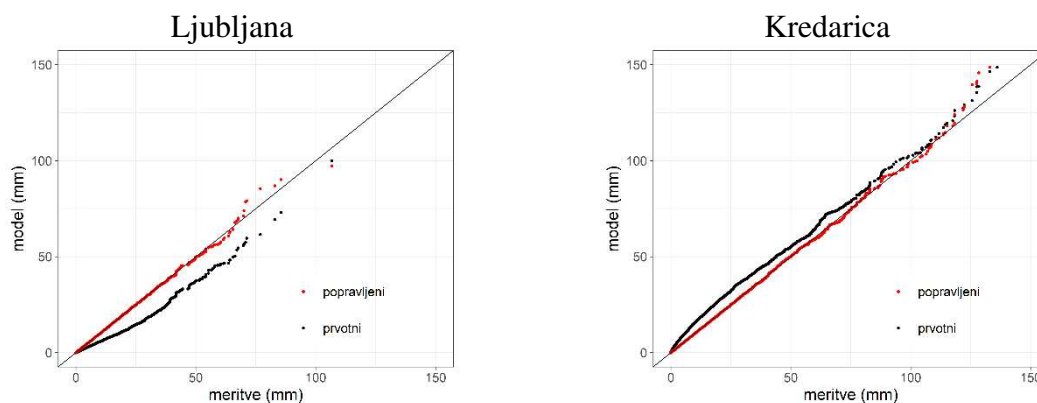


Slika 1 - Postopek odpravljanja pristranskosti. Pri izbrani vrednosti X (na grafu označeno z zeleno točko) pogledamo, kolikšen je popravek modela v primerjalnem obdobju glede na meritve (sledijo zelenim pikicam). To vrednost popravka nato pripišemo modelu.

Tabela 1 - Razlika popravkov med prvotnimi in popravljenimi modelskimi vrednostmi za modelsko celico modela EC-EARTH\HIRHAM5, v kateri je Ljubljana

Decil	Prvotni (mm)	Popravljeni (mm)	Velikost popravka (%)
1	0,21	0,18	-14,7
2	0,40	0,33	-17,2
3	0,71	0,63	-11,7
4	1,21	1,27	5,1
5	1,97	2,18	10,6
6	3,12	3,89	24,8
7	4,95	6,76	36,5
8	7,91	11,77	48,7
9	13,37	21,33	59,6
10	121,55	158,93	30,7

Končni rezultat prikazuje Slika 2



Slika 2 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno povprečno temperaturo za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana in Kredarica. Primer prikazuje nabor vseh dnevnih vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolj prilegajo podatkom meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

Vse ostale spremenljivke smo popravljali z metodo preslikave kvantilov odklonov (angl. *quantile delta mapping*, v nadaljevanju QDM) (Switanek in sod., 2016; Cannon, 2016; Cannon in sod., 2015). Upoštevali smo odvisnost obravnavane spremenljivke (npr. dnevne povprečne temperature) od višine padavin. Ohraniti smo namreč želeli modelske trende za obravnavano spremenljivko ter povezavo med višino padavin in spremenljivko, ki sledi iz meteoroloških meritev. Za obravnavano spremenljivko smo za štiri razrede padavin popravljali odmike te spremenljivke od povprečnega letnega hoda v primerjalnem obdobju z metodo preslikave kvantilov. Pri tem smo uporabljali knjižnico *MBC* (funkcijo *QDM*) statističnega in programskega paketa R (Cannon, 2018). Popravljanje se je vršilo za vsak padavinski razred in za vsako modelsko celico neodvisno od drugih ter po 30-letnih obdobjih (2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100). Takšna obdobja smo izbrali zaradi tega, ker smo vse popravke računali glede na referenčno obdobje 1981–2010 in smo tako imeli vedno enak nabor podatkov. Po popravkih odklonov smo s prištetjem povprečnega letnega hoda dobili absolutne vrednosti obravnavane spremenljivke.

Padavinske razrede smo določili na podlagi meritev. Ker se padavinski procesi in s tem napake v modelskih izračunih skozi leto spreminjajo, smo padavinske razrede določili na mesečnih vrednostih merjenih podatkov. Določili smo štiri razrede glede na dnevno višino padavin. V najnižji razred sodijo podatki, kjer je dnevna višina padavin manjša od 0,01 mm. V ta razred sodi največ podatkov. Ostale tri razrede smo ločili po tercilih, da so bili razredi karseda enako veliki. Isto število podatkov v razredih pri meritvah in modelu smo zagotovili tako, da smo modelske podatke razvrstili po velikosti in jih nato razvrstili v štiri razrede z istim številom podatkov kot pri meritvah. Pogostost pojavljanja vseh štirih razredov pri modelskih podatkih je bila tako enaka kot pri izmerjenih podatkih.

Ker se posamezne spremenljivke skozi leto po absolutni vrednosti močno spreminjajo, smo pred odpravljanjem pristranskosti za vsak razred posebej ločili povprečni sezonski potek spremenljivke in odstopanje od tega poteka. Povprečni sezonski potek smo izračunali z glajenjem podatkov s funkcijo lokalno uteženega glajenja (LOESS, angl. *locally weighted scatterplot smoothing*). Za okno glajenja smo vzeli 61 dni in pri tem pazili na gladek prehod na robovih leta (december, januar). Zglajeni časovni potek označimo s  $\bar{T}$  (razred, dan).

Pri popravljenih podatkih smo želeli ohraniti skladnost med vrednostmi različnih spremenljivk, zato smo za posamezne spremenljivke (razen za padavine) opisano splošno metodo odpravljanja pristranskosti modelskih podatkov nekoliko priredili.

### Dnevna povprečna temperatura

Dnevna povprečna temperatura ima velik letni hod, zato smo v tem primeru popravljali odmike dnevne povprečne temperature od povprečnega letnega hoda, ki smo ga določili za vsak padavinski razred posebej (primera prikazuje Slika 3).

Odmike izračunamo kot razliko obeh vrednosti:

$$\Delta T_{pov}[\text{razred}, \text{dan}] = T_{pov}[\text{razred}, \text{dan}] - \tilde{T}_{pov}[\text{razred}, \text{dan}]$$

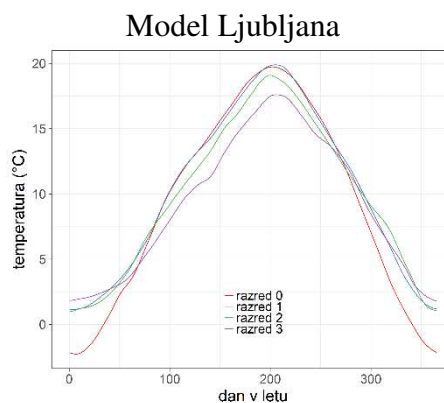
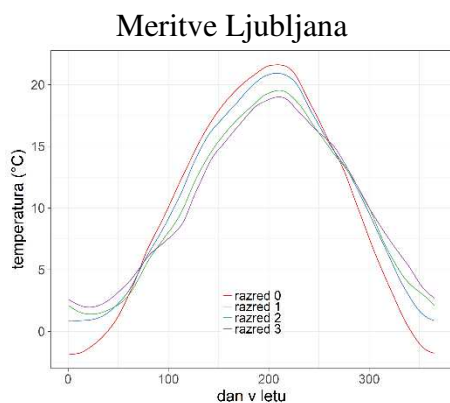
kjer smo z  $\Delta T_{pov}$  označili odmik dnevne vrednosti povprečne temperature ( $T_{pov}$ ) od zglajenega časovnega poteka ( $\tilde{T}_{pov}$ ).

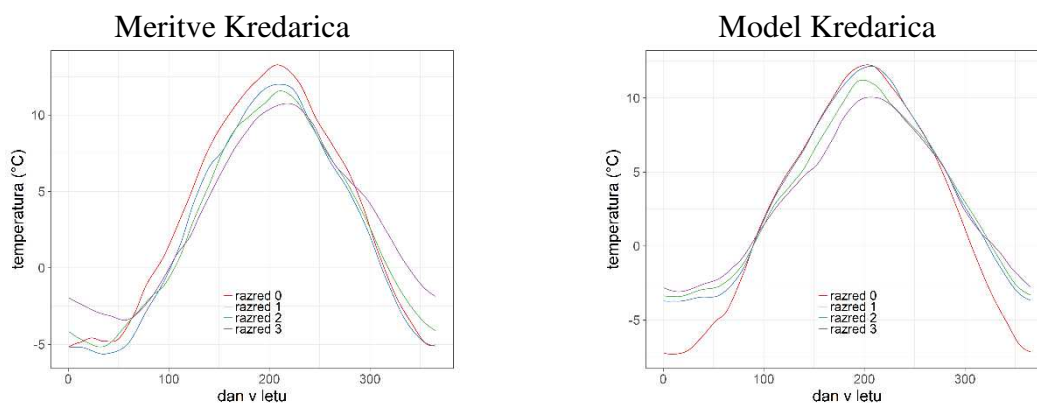
Odmiki so po velikosti skoraj neodvisni od letnega časa, zato so primernejši za izračun popravkov. Odmike smo izračunali glede na padavinski razred in dan v letu. Ves postopek smo izvedli ločeno za meritve in modele, ter za posamezna tridesetletna obdobja.

Da ohranimo zvezno prehajanje odmikov med zaporedni dnevi, ki jih želimo popraviti z metodo QDM, smo uporabili 31-dnevno centrirano drseče okno (Wilcke in sod., 2013). S tem smo zaradi večjega nabora vrednosti povečali zanesljivost izračuna popravkov v primerjavi z metodo, ki pri popravljanju upošteva zgolj podatke točno določenega dne v letu.

Popravke odmikov smo izračunali s pomočjo funkcije *QDM* v programskem okolju R. S funkcijo uskladimo statistični porazdelitvi odmikov (meritev in modela) v primerjalnem obdobju. Popravke iz primerjalnega obdobja nato uporabimo za popravek porazdelitve odmikov modela v projekcijskem obdobju. Za izračun potrebuje funkcija podatke meritev in modela v kalibracijskem obdobju ( $t_{kal}$ ) in modela v projekcijskem obdobju ( $t_{proj}$ ):

$$\Delta T'_{pov}(t, \text{model})[\text{razred}, \text{dan}] = QDM \left( \begin{array}{l} \Delta T_{pov}(t_{kal}, \text{meritve})[\text{razred}, \text{dan}], \\ \Delta T_{pov}(t_{kal}, \text{model})[\text{razred}, \text{dan}], \\ \Delta T_{pov}(t_{proj}, \text{model})[\text{razred}, \text{dan}] \end{array} \right)$$





Slika 3 - Zglajeni letni hod za dnevno povprečno temperaturo ( $\tilde{T}_{pov}$ ) v modelskih celicah modela EC-EARTH HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana in Kredarica. Najnižji razred predstavlja skupino dni brez padavin, ostali trije razredi pa so terciili padavinskih dogodkov, pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.

Rezultat te funkcije so popravljene vrednosti odmikov za model v primerjalnem obdobju  $\Delta T'(t_{kal}, model)[razred, dan]$  in v projekcijskem obdobju  $\Delta T'(t_{proj}, model)[razred, dan]$ . Na koncu je potrebno te popravljene odmike prišteti nazaj k zglajenemu časovnemu poteku za meritve, da dobimo popravljeno vrednost za absolutno vrednost povprečne temperature  $T'$  za projekcijska obdobja pa še razliko zglajenih modelskih časovnih potekov med projekcijskim in primerjalnim obdobjem

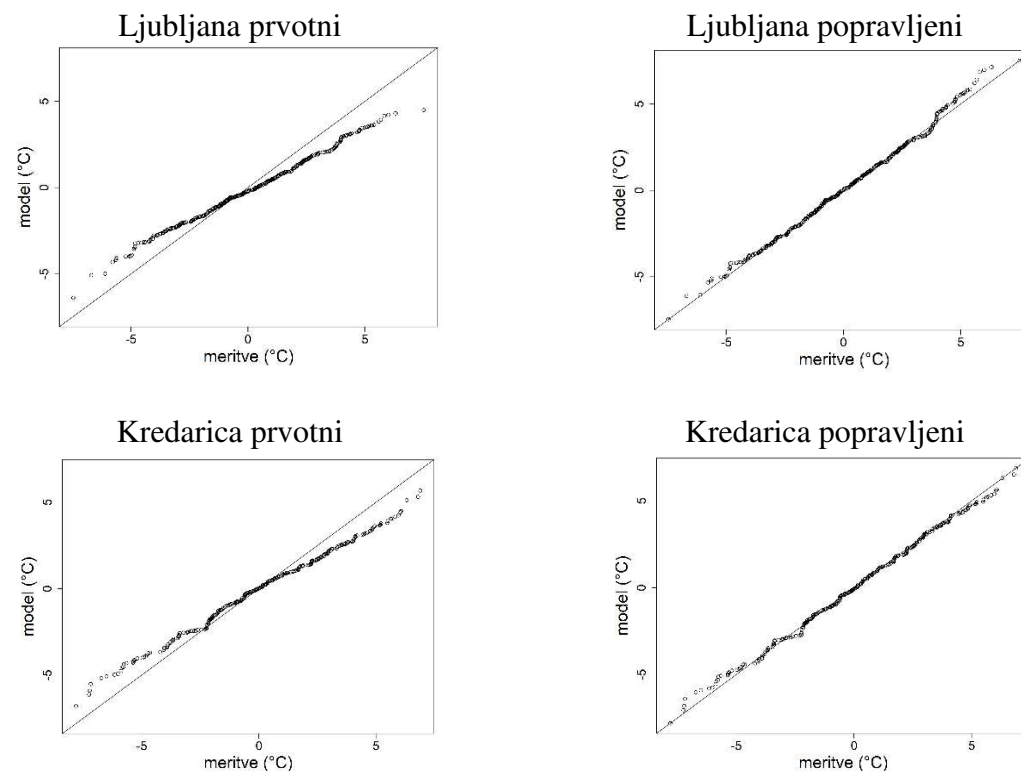
Primerjavo med popravljenimi in originalnimi vrednostmi odmikov prikazuje primer na Slika 4. Prikazane so vrednosti za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno, centrirano na izbrani majski dan. Vidimo lahko, da prvotno izračunani odmiki odstopajo od odmikov pri meritvah, medtem ko popravljene odmiki lepo sovpadajo z meritvami.

V primerjalnem obdobju popravljeno vrednost dnevne povprečne temperature ( $T'_{pov}$ ) izračunamo kot:

$$T'_{pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] = \Delta T'(t_{kal}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan]$$

Za projekcijsko obdobje je postopek podoben, prištejemo le še razliko v povprečnem letnem poteku za posamezni padavinski razred v projekcijskem in primerjalnem obdobju:

$$T'_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] = \Delta T'_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] + \{ \tilde{T}_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] - \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] \}$$



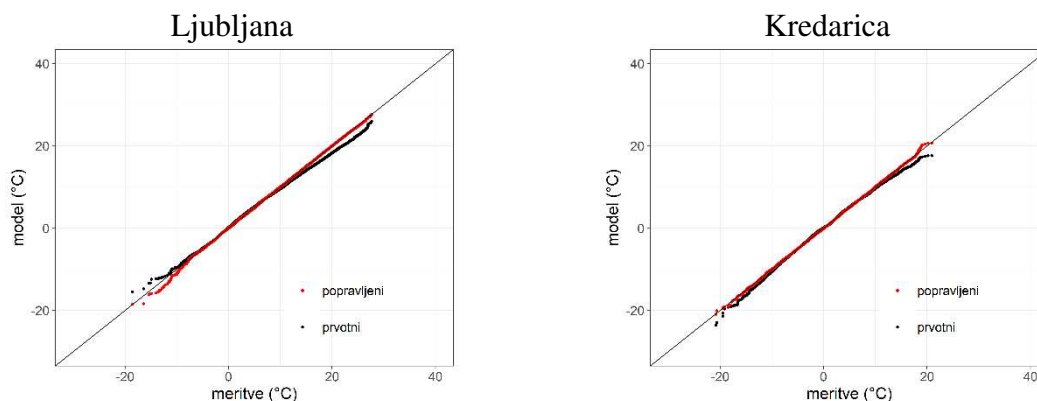
Slika 4 - Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) odmiki od časovnega poteka za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno pri dnevni povprečni temperaturi, za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj).

S tem postopkom zagotovimo, da se v časovni vrsti popravljenih podatkov ohranja trend, ki je prisoten v prvotnih modelskih podatkih. Poglejmo si postopek na konkretnem primeru. Izberemo modelske vrednosti dne 16. 7. 1999. Podatki sodijo v najvišji padavinski razred. Prvotna modelska vrednost temperature znaša  $T_{pov}(model) = 17,1\text{ °C}$ . Vrednost zglajenega letnega hoda za ta dan v letu in padavinski razred znaša  $\tilde{T}_{pov}(model) = 14,7\text{ °C}$ . Izračunamo odklik  $\Delta T_{pov} = 2,4\text{ °C}$ . Vrednost popravka, ki ga dobimo iz funkcije QDM znaša  $\Delta T'_{pov} = 3,8\text{ °C}$ . Ta popravek nato prištejemo zglajenemu letnemu hodu meritev za najvišji padavinski razred in dan v letu  $\tilde{T}_{pov}(meritve) = 15,3\text{ °C}$  in dobimo končni rezultat

$$T'_{pov}(model) = 3,8\text{ °C} + 15,3\text{ °C} = 19,1\text{ °C}$$

Vidimo lahko, da popravek za temperaturo znaša  $2\text{ °C}$ . Končni rezultat postopka za povprečno temperaturo v obdobju 1981–2010 prikazuje Slika 5.





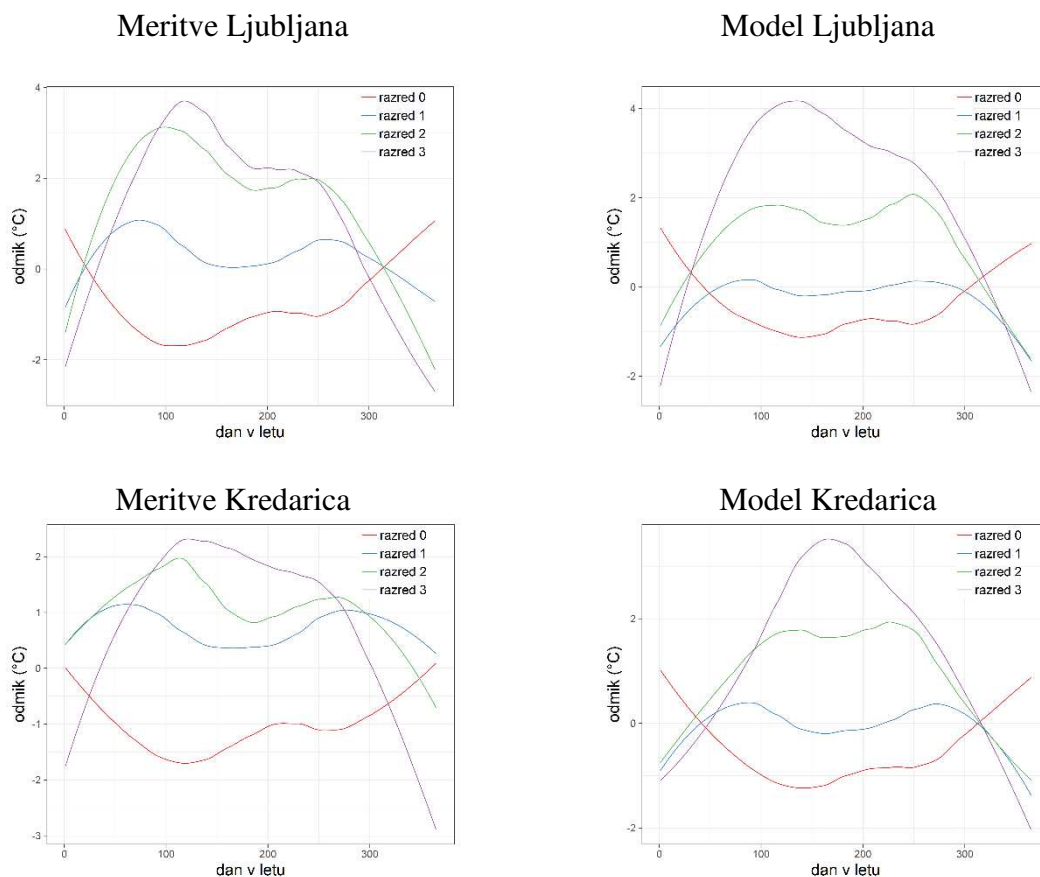
Slika 5 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno povprečno temperaturo za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana in Kredarica. Primer prikazuje nabor vseh dnevnih vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolje prilegajo podatkom meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

Prvotni modelski podatki na obeh skrajnostih precej odstopajo od meritev, pri popravljenih vrednostih pa je ujemanje mnoge boljše.

### Dnevna najvišja in najnižja temperatura

Dnevne najvišje in najnižje temperaturo nismo popravljali povsem neodvisno, ampak smo ju vezali na vrednost povprečne temperature. Če tega ne bi napravili, bi bila lahko kakšen dan najnižja temperatura višja od povprečne ali najvišje in analogno za najvišjo temperaturo. Zato smo izvedli popravke na odklonih dnevne najvišje in najnižje temperature od dnevne povprečne temperature. Prirejeno metodo preslikave kvantilov glede na štiri padavinske razrede smo uporabili za te odklone, na koncu pa smo odmike preračunali v absolutne vrednosti s prištevanjem dnevne povprečne temperature.

Postopek za izračun popravkov pri dnevni najvišji in najnižji temperaturi je enak, zato je opisan samo primer za najvišjo temperaturo. Glede na povprečno temperaturo zraka smo v tem primeru naredili še en dodaten računski korak. Od dnevne najvišje temperature zraka ( $T_{maks}$ ) smo odšteli povprečno temperaturno posameznega dne  $T_{pov}$ . Razliko označimo z  $T_{maks-pov}$ . Nadaljnji postopek je enak kot pri povprečni temperaturi zraka, le da računamo z odkloni od povprečne temperature. Izračunamo vrednosti povprečnega letnega poteka po padavinskih razredih za te razlike  $\tilde{T}_{maks-pov}$  (Slika 6) in jih odštejemo od dnevne vrednosti odklona. Ponovno dobimo odmike  $\Delta T_{maks-pov}$  (Slika 7), ki jih popravimo z metodo QDM. Postopek izračuna končnih vrednosti se ponovno loči na primerjalno in projekcijsko obdobje.



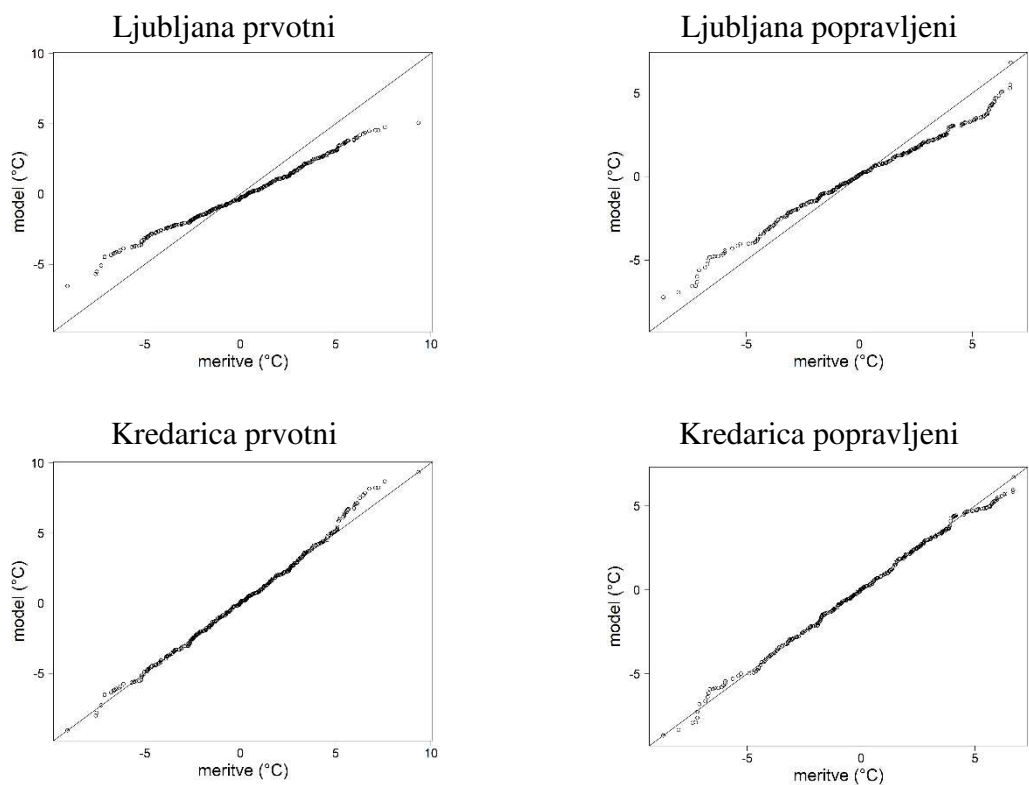
Slika 6 - Zglajeni letni poteki odnikov najvišje temperature od povprečne temperature v modelskih celicah interpoliranih meritev (levo) in modelskih simulacij modela EC-EARTH\HIRHAM5 (desno), v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Najnižji razred predstavlja primere brez padavin, ostali trije razredi pa so ločeni po višini padavin (tercili), pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.

Ker smo na začetku naredili razliko najvišje ( $T_{maks}$ ) in povprečne temperature ( $T_{pov}$ ), je sedaj popravljenemu odmiku ( $\Delta T'_{maks-pov}$ ) potrebno prišteti vrednost povprečne temperature. Prištejemo popravljeno vrednost za povprečno temperaturo  $T'_{pov}$ , da se nam ohranja trend. Končni izračun predstavlja enačba:

$$\begin{aligned}
 & T'_{maks}(t_{kal}, model)[razred, dan] \\
 & = \Delta T'_{maks-pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{maks-pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] \\
 & + T'_{pov}(t_{kal}, model)[dan]
 \end{aligned}$$

Tudi v tem primeru je postopek enak, kot je bil opisan za dnevno povprečno temperaturo v projekcijskem obdobju in dnevno najvišjo temperaturo v primerjalnem obdobju. Potrebno je paziti, da prištejemo popravljeno vrednost za povprečno temperaturo ( $T'_{pov}$ ) in razliko med letnima hodoma v projekcijskem in primerjalnem obdobju. Končni izračun predstavlja enačba:

$$T'_{maks}(t_{proj}, model)[razred, dan] = \Delta T'_{maks-pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{maks-pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] + T'_{pov}(t_{proj}, model)[dan] + \{ \tilde{T}_{maks-pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] - + \tilde{T}_{maks-pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] \}$$



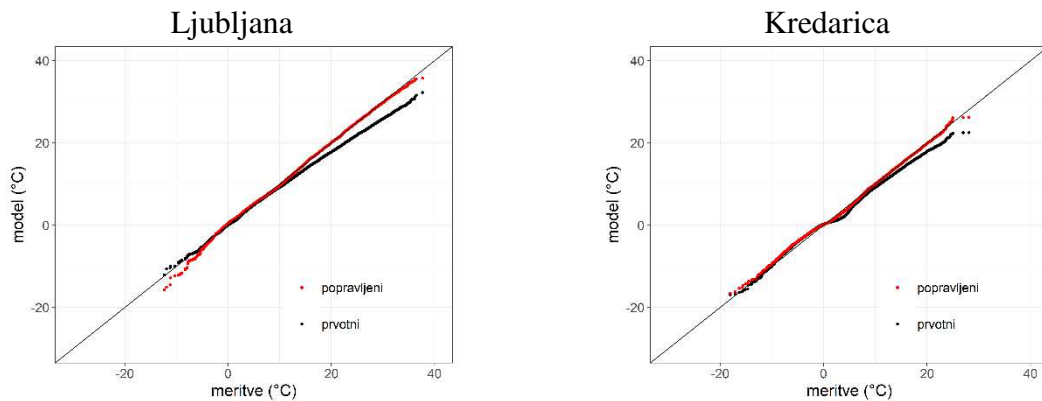
Slika 7 - Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) odmiki od letnega hoda za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno pri dnevni najvišji temperaturi zraka za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Največje odstopanje je vidno pri Kredarici, kjer prvotni modelski podatki zelo odstopajo od meritev.

Lahko se zgodi, da so vrednosti popravkov odmikov tako velike, da so popravljene vrednosti najvišje temperature manjše od povprečne temperature in obratno pri najnižji temperaturi. V teh primerih te popravke zanemarimo in imajo končni popravki obliko:

$$T'_{maks} = T'_{pov} \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Positivni predznak se nanaša na najvišje dnevne temperature, negativni pa na najnižje. S tem se izognemo ne fizikalnim vrednostim. Takšnih primerov je bilo v obdobju 1981-2100 okoli deset za obe spremenljivki skupaj.

Končni popravki so za izbrani primer prikazani na Slika 8.



Slika 8 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno najvišjo temperaturo za modelski celici modela EC-EARTH HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (levo) in Kredarica (desno). Primer prikazuje nabor vseh dnevnih vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolje prilagajajo na podatke meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

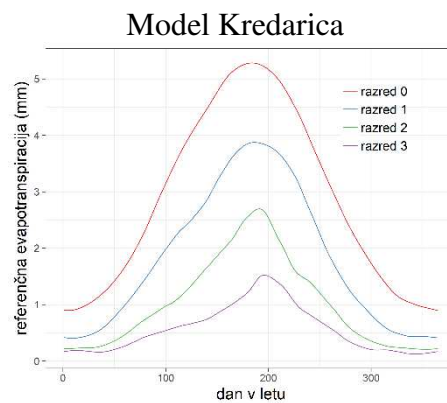
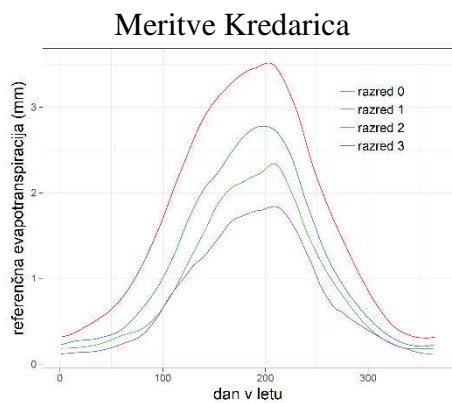
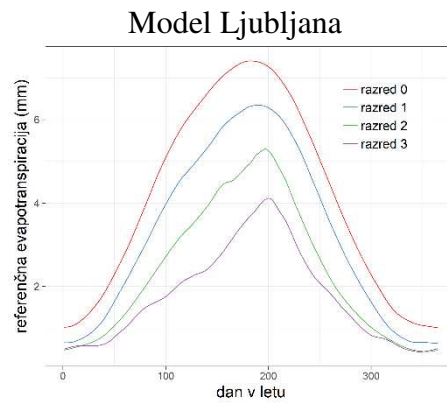
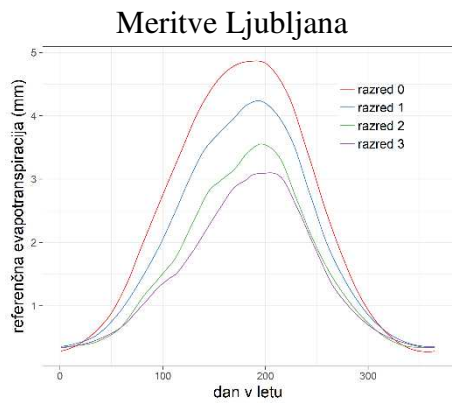
### Referenčna evapotranspiracija

Tudi vrednosti referenčne evapotranspiracije ( $ET_0$ ) smo popravljali s prirejeno metodo preslikave kvantilov. Popravljanje te spremenljivke se od ostalih razlikuje v tem, da ne popravljamo odnikov  $ET_0$  od povprečnega letnega hoda, ampak absolutne vrednosti. Z odniki ne računamo, ker je porazdelitev vrednosti evapotranspiracije izrazito nesimetrična in so številne vrednosti blizu fizikalne spodnje meje (0 mm). Tudi tukaj popravljamo vrednosti za vsak padavinski razred posebej. Primer zglajenega letnega hoda ( $\tilde{ET}_0$ ) prikazuje Slika 9 in posamezne popravke Slika 10.

Popravki za referenčno evapotranspiracijo ( $ET'_0$ ) imajo obliko:

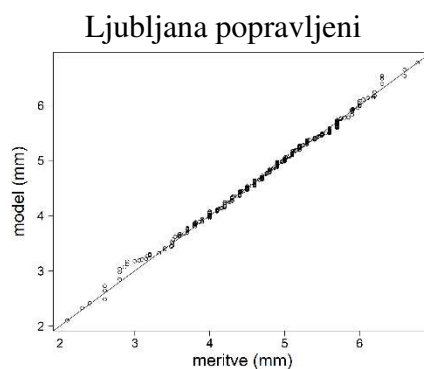
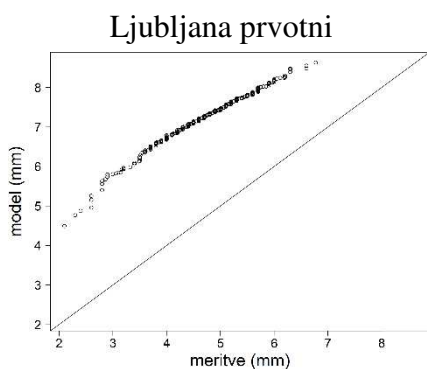
$$ET'_0(t, model)[razred, dan] = QDM \left( \begin{array}{l} ET_0(t_{kal}, meritve)[razred, dan], \\ ET_0(t_{kal}, model)[razred, dan], \\ ET_0(t_{proj}, model)[razred, dan] \end{array} \right)$$

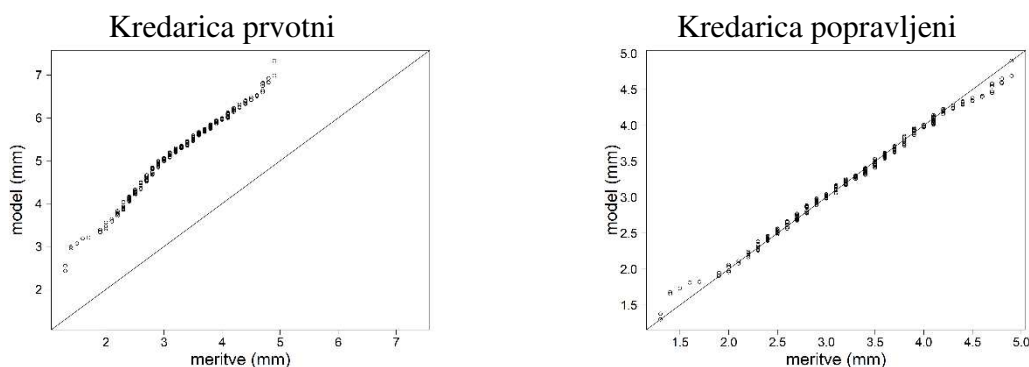
Kjer  $ET_0(t_{kal}, meritve)$  predstavlja vrednosti referenčne evapotranspiracije v primerjalnem obdobju za meritve,  $ET_0(t_{kal}, model)$  vrednosti modela v primerjalnem obdobju in  $ET_0(t_{proj}, model)$  vrednosti modela v projekcijskem obdobju.



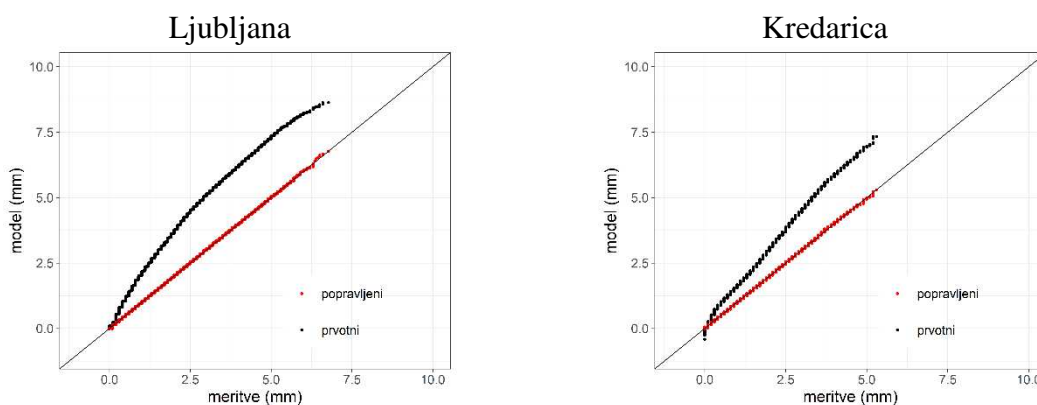
Slika 9 - Zglajeni letni hod za referenčno evapotranspiracijo ( $\tilde{E}T_0$ ) v modelskih celicah modela EC-EARTH\HIRHAM5, v kateri sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Najnižji razred predstavlja primere brez padavin, ostali trije razredi pa so ločeni po višini padavin (tercili), pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.

Ponovno se popravki ločijo za primerjalno ( $t_{kal}$ ) in projekcijsko ( $t_{proj}$ ) obdobje. Končni popravki so za izbrani primer prikazani na Slika 11.





Slika 10 - Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) vrednostmi referenčne evapotranspiracije za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj).



Slika 11 - Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za referenčno evapotranspiracijo za modelski celici modela EC-EARTH\HIRHAM5, v katerih sta Ljubljana (levo) in Kredarica (desno). Primer prikazuje nabor vseh dnevni vrednosti v primerjalnem obdobju. Popravljeni modelski podatki (rdeče točke) se bolje prilagajajo na podatke meritev kot prvotni modelski podatki (črne točke).

Lahko se zgodi, da z omenjenim postopkom popravljanja referenčne evapotranspiracije dobimo negativne vrednosti, kar je fizikalno nemogoče. V takšnih primerih vse negativne vrednosti postavimo na nič.

### Zaključek

Za odpravljanje pristranskosti modelskih rezultatov regionalnih podnebnih modelov obstaja več metod z različnimi prednostmi in slabostmi. Pri metodi preslikave kvantilov, ki smo jo uporabili na višini padavin, se malce spremeni časovni trend v ekstremnih padavinah. Prednosti te metode pa sta hitrost in nezahtevnost. Druga uporabljena metoda, preslikava kvantilov odklonov, ohrani dolgoletni časovni trend, vendar je računsko zelo zahtevna in dolgotrajna. Pri odpravljanju statističnih napak je smotno upoštevati povezanost spremenljivk, npr. temperaturnih ali temperature zraka in višine padavin, kar še

dodatno zaplete proces odpravljanja napak. Kljub vsemu pa se lahko končni rezultat v kakšnem statističnem pogledu še vedno pomembno razlikuje od stvarnosti. Zaradi hitrega razvoja podnebnih modelov, računskih metod za odpravljanje pristranskosti in vse bolj zmogljivih računalnikov lahko že čez nekaj let pričakujemo podnebne scenarije z večjo ločljivostjo. To bo nedvomno dobrodošlo za mnoge končne uporabnike. Pri oceni prihodnjih podnebnih sprememb se tako utegne negotovost zaradi nepopolnih podnebnih modelov precej zmanjšati, po drugi strani pa povečati pomembnost izbire scenarija izpustov toplogrednih plinov.

## Literatura

- Benestad, R., Haensler, A., Hennemuth, B., Illy, T., Jacob, D., Keup-Thiel, E., . . . Zsebeház, G. (2018). Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use (EURO-CORDEX Guidelines Version 1.0 - 2017.08). EURO-CORDEX: <https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf> (Pridobljeno 10.09.2018)
- Themeßl, M. J., Gobiet, A., Heinrich, G. (2011). Empirical-statistic downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climate Change* 112, 2, 449-468. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0224-4> (Pridobljeno 08.01.2019)
- Wilcke, R., Mendlik, T., Gobiet, A. (2013). Multi-variable error correction of regional climate models. Springer. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0845-x> (Pridobljeno 05.01.2019)
- Switanek, M., Troch, P., Castro, C., Leuprecht A., Chang H., Mukherjee R., Demaria, E. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 2649-2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017> (Pridobljeno 22.10.2018)
- Cannon, A. (2016). Multivariate Bias Correction of climate Model Output: Matching Marginal Distributions and Intersample Dependence Structure. *Journal of Climate*, October 2016. <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-15-0679.1> (Pridobljeno 10.01.2019)
- Cannon, A., Sobie, S., Murdock, T. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, September 2015. <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-14-00754.1> (Pridobljeno 05.01.2019)
- Gudmundsson, L. (2016). Package `qmap`. <https://cran.r-project.org/package=qmap> (Pridobljeno 11.01.2019)
- Gudmundsson, L., Bremnes, J., Haugen, J., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* (8), 3383–3390.
- Cannon, A. J. (2018). Package 'MBC'. <https://cran.r-project.org/packages=MBC> (Pridobljeno 11.01.2019)



# Projekcije sprememb temperature zraka in padavin v Sloveniji do konca 21. stoletja

Renato Bertalaníč\*, Gregor Vertačnik\*, Neža Lokošek\*, Anže Medved\*,  
Živa Vlahovič\*, Mojca Dolinar\*

## Povzetek

Projekcije sprememb temperature zraka in padavin so bile pripravljene v okviru projekta Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo do konca 21. stoletja (OPS21). Spremembe obeh spremenljivk so ocenjene za tri 30-letna obdobja v prihodnosti (2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100) glede na primerjalno obdobje 1981–2010. Projekcije kažejo smer in velikost sprememb ter oceno njihove zanesljivosti za tri scenarije izpustov toplogrednih plinov RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5. Temperatura zraka bo v prihodnosti še naprej rasla, velikost dviga pa je odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov in znaša od 0,8 do 6,1 °C. Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev, znatno se bo povečalo število vročih dni, vročinski valovi bodo daljši in bolj pogosti. Višina padavin na letni ravni in pozimi se bo po scenarijih izpustov RCP4.5 in RCP8.5 sredi ali konec 21. stoletja znatno povečala. Kazalniki, s katerimi merimo izjemne padavine, kažejo, da se bosta povečali tako jakost kot pogostost izjemnih padavin, povečanje pa bo najbolj izrazito v primeru scenarija izpustov RCP8.5.

**Ključne besede:** podnebne spremembe, spremembe temperature zraka, spremembe padavin, negotovost podnebnih projekcij

**Key words:** climate change, temperature change, precipitation change, uncertainty of climate projections

## Uvod

Podnebje vpliva na procese v okolju in na mnoga področja človekove dejavnosti. Spreminjanje je splošna značilnost podnebja, vendar je hitrost spreminjanja v zadnjem stoletju izjemna, v zgodovini Zemlje poznamo le nekaj podobnih primerov. Na podlagi dolgoletnih meritev smo ugotovili, da se podnebje v Sloveniji spreminja nekoliko hitreje kot na svetovni ravni (Vertačnik in Bertalaníč, 2017). Posamezne panoge so se tako v preteklih desetletjih že soočale z vplivi podnebnih sprememb. Ker teh ne moremo ustaviti čez noč niti z zelo močnimi omejitvami izpustov toplogrednih plinov, bodo v prihodnosti nujni ukrepi prilagajanja. Za pripravo in izvajanje ukrepov niso dovolj podatki o že zaznanih spremembah podnebja, ampak je potrebno poznati, kako se bo to spreminjalo v prihodnosti. Kakovostni podatki so temelj za učinkovito načrtovanje ukrepov prilagajanja spremenjenim podnebnim razmeram, da se tako hitreje in učinkoviteje odzivamo na potrebe naše družbe ter prispevamo k večji varnosti in blaginji ljudi, zaščiti okolja, narave in premoženja, trajnostni oskrbi z naravnimi viri ter učinkovitejšemu gospodarstvu. Že pretekle spremembe podnebja kažejo, da lahko zaradi reliefne in podnebne pestrosti Slovenije pričakujemo različne podnebne spremembe med posameznimi območji Slovenije (Vertačnik in Bertalaníč, 2017). Teh pa iz podnebnih projekcij, ki so bile pripravljene na

---

\* Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova cesta 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

ravni Evrope (EEA, 2017; Kirtman et al., 2013), zaradi nizke prostorske ločljivosti ne moremo razločiti.

Slovenija leži na prehodnem območju med Sredozemljem z velikim povečanjem izredno vročih poletnih dni in severnim ter vzhodnim delom Evrope z izrazitim popuščanjem mraza v najhladnejših zimskih dneh (Kirtman et al., 2013). Prav tako smo pri padavinah na prehodu med Sredozemljem z verjetnim zmanjšanjem letne višine padavin in pogostejšimi sušami ter severnejšimi kraji s povečanjem letne višine padavin (Kirtman et al., 2013). Zato je bila potreba po podnebnih projekcijah na lokalni ravni še toliko večja. To je bila ena glavnih motivacij, da smo leta 2016 na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) začeli obsežen projekt priprave podnebnih projekcij za Slovenijo, ki smo ga poimenovali Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo v 21. stoletju (OPS21). V okviru projekta smo ocenili spremembe najpomembnejših podnebnih spremenljivk ter vpliv teh sprememb na rastne in hidrološke razmere (Bertalanič et al., 2018). Projekt je podprlo Ministrstvo za okolje in prostor s sredstvi Sklada za podnebne spremembe.

Spremembe temperature zraka in padavin so temelj za proučevanja vplivov vseh ostalih spremenljivk. V prvem delu projekta smo analizirali spremembe teh dveh spremenljivk, njunih izjemnih vrednosti in izpeljanih podnebnih kazalnikov, rezultate pa povzemamo v nadaljevanju članka. V začetnem delu članka so predstavljeni podatki, na katerih temeljijo projekcije temperature in padavin. Sledi kratek povzetek metodologije, ki smo jo uporabljali za analizo sprememb podnebnih spremenljivk. V tem delu predstavljamo tudi metodologijo, ki smo jo razvili za prikaz zanesljivosti sprememb. Članek zaključujemo z ločenim pregledom sprememb temperaturnih in padavinskih spremenljivk.

## Podatki

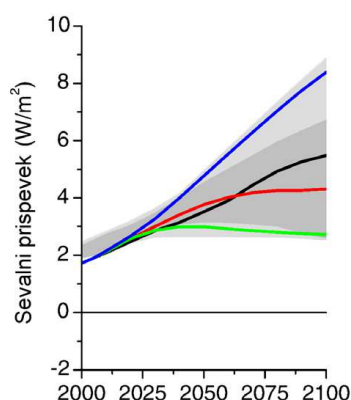
### Scenariji izpustov toplogrednih plinov

Ocena podnebnih sprememb zahteva podatke o prihodnjih vsebnostih toplogrednih plinov v ozračju. Naraščanje njihove vsebnosti velja za glavni dejavnik sprememb podnebja od industrijske revolucije naprej. Vsebnost toplogrednih plinov v ozračju je močno odvisna od razvoja družbe in gospodarstva v 21. stoletju. V letih 2007–2010 je svetovna znanstvena skupnost določila štiri scenarije značilnih potekov vsebnosti toplogrednih plinov (ang. *Representative Concentration Pathway*, RCP; Van Vuuren et al., 2011). Ti zagotavljajo dosledno rabo začetnega stanja podnebja, zgodovinskih podatkov in projekcij vsebnosti toplogrednih plinov v različnih raziskovalnih skupinah in zato omogočajo dopolnjujoče, predvsem pa primerljive rezultate raziskav prihodnjega podnebja. V nasprotju s preteklimi scenariji izpustov, ki niso ustrezno proučili možnosti, kot so blažnje podnebnih sprememb, ranljivost in prilagajanje nanje, scenariji značilnih potekov vsebnosti toplogrednih plinov vključujejo posodobljene podatke o nedavnih izpustih in upoštevajo vpliv različnih podnebnih politik na poteke vsebnosti v 21. stoletju. Ločimo jih po številčni oznaki neto sevalnega prispevka leta 2100, ki pomeni merilo spremembe Zemljinega energetskega ravnovesja glede na predindustrijsko dobo (oziroma podnebja okrog leta 1750). To merilo je razlika energije sevanja na vrhu Zemljinega ozračja in energije, izsevane nazaj v vesolje. Scenariji izpustov skupaj obsegajo razpon možnih vrednosti sevalnega prispevka v letu 2100 od 2,6 do 8,5 W m<sup>-2</sup> (slika 1). Temeljijo na celotnem razponu možnih podnebnih strategij v 21. stoletju, povzetih po uporabljeni literaturi: scenarij z vključenim hitrim in izrazitim blaženjem podnebnih sprememb (RCP2.6), dva stabilizacijska scenarija (RCP4.5 in RCP6.0) in scenarij z zelo visokim izpustom toplogrednih plinov (RCP8.5).

Scenarij RCP2.6 predvideva aktivno politiko blaženja podnebnih sprememb in posledično zelo nizke izpuste toplogrednih plinov, z viškom na začetku 21. stoletja in kasnejšim znatnim upadom. Skladno s tem sevalni prispevek doseže vrh v prvi polovici 21. stoletja pri  $3,0 \text{ W m}^{-2}$ , do konca stoletja pa upade na  $2,6 \text{ W m}^{-2}$ . Za doseg te ravni sevalnega prispevka bi bilo potrebno takojšnje občutno zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov.

Stabilizacijski scenarij RCP4.5, ki na podlagi trenutnega stanja velja za zmerno optimističnega, z začetkom druge polovice 21. stoletja predvideva postopno zmanjševanje izpustov in ustalitev sevalnega prispevka kmalu po letu 2100 pri vrednosti  $4,5 \text{ W m}^{-2}$ . Podobno se tudi pri stabilizacijskem scenariju RCP6.0 sevalni prispevek z uporabo različnih tehnologij in strategij za zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov ustali kmalu po letu 2100, ko doseže vrednost  $6,0 \text{ W m}^{-2}$ .

Najskrajnejši scenarij, brez predvidenega blaženja podnebnih sprememb, je RCP8.5, ki predvideva visok izpust toplogrednih plinov in posledično naraščanje njihove vsebnosti tudi po letu 2100, ob koncu stoletja pa sevalni prispevek znaša  $8,5 \text{ W m}^{-2}$ . Scenarij je energetsko intenziven, kar je posledica predvidene visoke rasti prebivalstva in nižje stopnje tehnološkega razvoja.



Slika 1: Značilni poteki vsebnosti toplogrednih plinov (RCP). Zelena: RCP2.6, rdeča: RCP4.5, črna: RCP6 in modra: RCP8.5. Številka izraža neto sevalni prispevek konec 21. stoletja. Scenarija RCP4.5 in RCP2.6 se stabilizirata pri označenem sevalnem prispevku po letu 2100.

Podnebne projekcije za Slovenijo smo pripravili za tri različne scenarije značilnih potekov vsebnosti, RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5, s poudarkom na zmerno optimističnem RCP4.5. Izbrani scenariji podajajo večji del možnega razpona podnebnih sprememb v Sloveniji, dejanske spremembe pa bodo odvisne od družbenogospodarskega razvoja in podnebnih politik v 21. stoletju na svetovni ravni.

#### Podatki modelskih simulacij

Podnebne projekcije, ki smo jih pripravili v okviru OPS21, temeljijo na simulacijah regionalnih podnebnih modelov. Zaradi negotovosti podnebnih simulacij je bilo potrebno za izdelavo podnebnih projekcij upoštevati simulacije večjega števila modelov. Zaradi sistematičnega in usklajenega pristopa k modeliranju podnebja so bili za naš namen najprimernejši podatki projekta EURO-CORDEX (ang. *Coordinated Downscaling Experiment – European Domain*). EURO-CORDEX je evropska veja mednarodne pobude

CORDEX, projekta *Svetovni program za raziskave podnebja* (ang. *World Climate Research Programme*), ki naj bi organiziral mednarodno usklajeno mrežo za izračun regionalnih projekcij podnebnih sprememb za vse dele sveta. Projekt EURO-CORDEX je prostovoljen. V projektu so in še bodo izračunali ansambelske simulacije podnebja na množici dinamičnih in empirično-statističnih regionalnih podnebnih modelov, katerih vhodni podatki so izračuni globalnih podnebnih modelov (ang. *Global Climate Model* oz. *General Circulation Model*, GCM) projekta *Primerjava sklopljenih modelov, 5. stopnja* (ang. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*, CMIP5) do leta 2100.

GCM oziroma modeli splošne cirkulacije so globalni numerični modeli podnebnega sistema, uporabni za proučevanje podnebnih sprememb na svetovni ravni. Opisujejo različne dele podnebnega sistema, njihove medsebojne nelinearne vplive in povratne vezi med njimi. Za izračun projekcij prihodnjega podnebja uporabljajo kot robne pogoje podatke izbranih scenarijev izpustov toplogrednih plinov, za simulacije preteklega podnebja pa v preteklosti izmerjene vrednosti meteoroloških spremenljivk. Računsko so ti modeli zelo zahtevni. Vodoravna prostorska ločljivost modelov je trenutno od 100 do 500 km, časovna ločljivost pa 6 ur. Zaradi sorazmerno grobe prostorske in časovne ločljivosti GCM niso dovolj za oceno podnebne spremenljivosti na regionalni in lokalni ravni. Za opis lokalnih posledic svetovne spremembe podnebja je potreben preračun rezultatov GCM na lokalno raven, eden od načinov je z uporabo regionalnih podnebnih modelov (ang. *Regional Climate Models*, RCM). Ti uporabljajo rezultate simulacij GCM kot vhodne podatke oziroma robne pogoje. Njihova vodoravna prostorska ločljivost je približno 10–50 km. RCM nekatere pomembne procese upoštevajo neposredno (npr. parametrizacijske sheme, prilagojene večji ločljivosti, kroženje zraka v gorah, medsebojno vplivanje kopnega in morja), zato simulirajo podrobnejše značilnosti regionalnega in lokalnega podnebja.

Projekt EURO-CORDEX še poteka. Regionalne podnebne projekcije za Evropo so ne glede na izbrani regionalni podnebni model izračunane nad enotnim območjem, v enaki modelski mreži in v dveh vodoravnih ločljivostih:

- podrobnejša EUR-11 – pravilna mreža z razmikom med računskimi točkami  $0,11^\circ$  (na geografski širini Slovenije približno 12,5 km) in
- splošna EUR-44 – pravilna mreža z razmikom točk  $0,44^\circ$  (na geografski širini Slovenije približno 50 km).

Podatki so predstavljeni v zavrteni geografski projekciji (ang. *rotated pole coordinate system*). Modelska mreža zajema območje približno med  $27^\circ$  in  $72^\circ$  severne geografske širine ter od  $22^\circ$  zahodne do  $45^\circ$  vzhodne geografske dolžine. Simulacije upoštevajo novejšje scenarije izpustov toplogrednih plinov RCP.

Izračuni različnih modelov v projektu EURO-CORDEX se razlikujejo predvsem zaradi razlik v parametrizacijskih shemah, ki simulirajo fizikalne procese na ravni, manjši od prostorske ločljivosti modelov (npr. kratkovalovno sevanje ter nastanek oblakov in padavin). Pomembne so tudi razlike v modelski predstavitvi Zemljinega površja (npr. digitalni model višin, modeli značilnosti površja, informacije o rabi tal itd.), številu navpičnih nivojev, numeričnih shemah reševanja diferencialnih enačb itd.

Na začetku leta 2016, ko smo začeli pripravljati podnebne projekcije za Slovenijo, je bilo na voljo po 14 simulacij za scenarija RCP4.5 in RCP8.5 ter dve za scenarij RCP2.6. Simulacije za scenarij RCP6.0 niso bile na voljo. Za oceno negotovosti podnebnih projekcij smo analizirali zbirko, ansambel izračunov različnih modelov. Zaradi zahtevnosti analize velikega števila podnebnih modelov in da nesorazmerna zastopanost različnih modelov ne bi popačila rezultatov analize, smo izbrali nekaj regionalnih modelov, ki prikazujejo podoben razpon odziva podnebnega sistema kot ansambel vseh modelov, ki so bili na voljo. Pri izboru je bilo pomembno tudi to, da so se rezultati posameznih modelov

dobro ujemali z meritvami v primerjalnem obdobju 1981–2010. Od 14 kombinacij globalnih in regionalnih podnebnih modelov smo jih izbrali šest (preglednica 1). V izbranih ansamblih nastopa v različnih kombinacijah 5 globalnih in 5 regionalnih modelov.

Preglednica 1: Seznam simulacij, katerih izračune smo uporabili za pripravo projekcij. Podani so: ustanova, ki je izvedla simulacijo, ter imeni globalnega (GCM) in regionalnega (RCM) modela. Če smo simulacijo za določeni scenarij RCP uporabili pri analizi, je v ustreznem polju križec.

Ustanova	GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMcom	CNRM-CM5-LR	CCLM4-8-17		x	x
CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17		x	x
DMI	EC-EARTH	HIRHAM5	x	x	x
IPSL-INERIS	IPSL-CM5A-MR	WRF331F		x	x
KNMI	HadGEM2-ES	RACMO22E	x	x	x
SMHI	MPI-ESM-LR	RCA4		x	x

## Metodologija

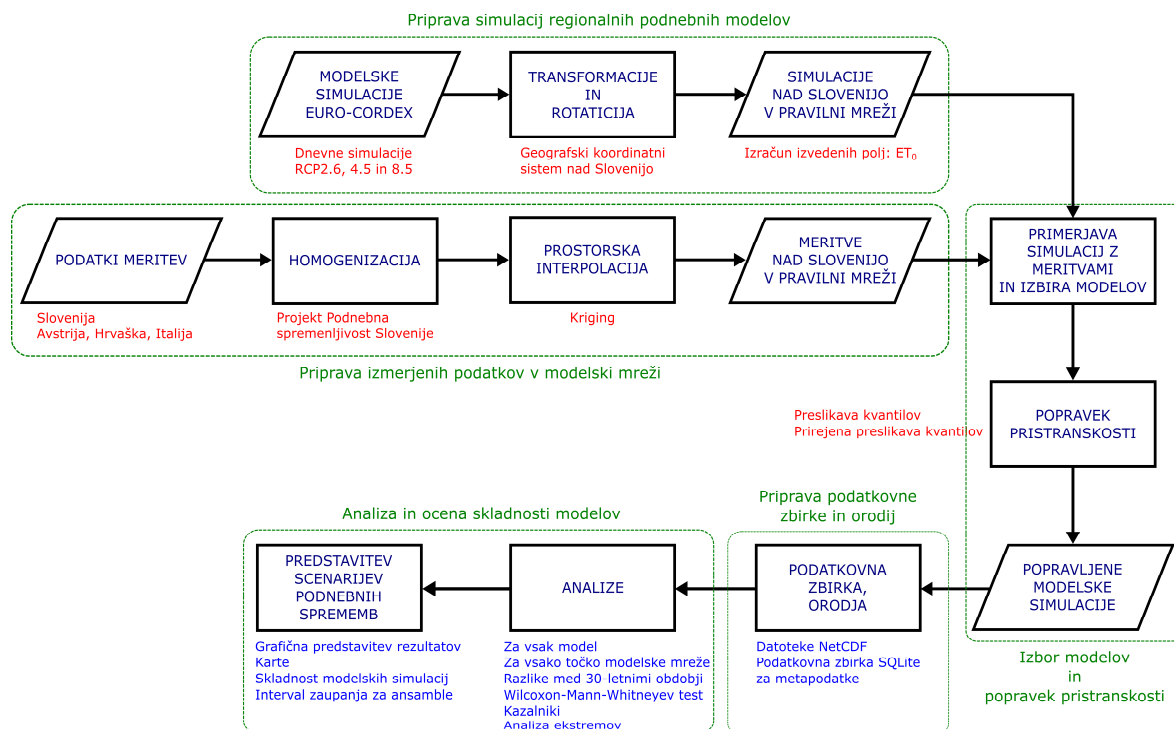
### Modelske simulacije podnebja

Kot je opisano že v poglavju o podatkih, smo za pripravo projekcij uporabili ansambel simulacij podnebnih modelov, s pomočjo katerih nismo ocenili le sprememb posamezne spremenljivke, ampak tudi njeno zanesljivost. Ker smo poleg analize povprečnega podnebja želeli analizirati tudi spremembe v izjemnih vremenskih dogodkih na lokalni ravni, smo uporabili dnevne modelske podatke. V prvem koraku, še pred izborom modelov iz baze EURO-CORDEX, smo morali preveriti, kako uspešni so posamezni modeli pri simulaciji podnebja nad Slovenijo. Na podlagi teh ocen smo izbrali manjši ansambel najboljših modelov in analizirali njihove rezultate. Metodologija ocene podnebnih sprememb projekta OPS21 je bila tako sestavljena iz naslednjih korakov (slika 2):

- Priprava izmerjenih podatkov v modelski mreži (Bertalanič et al., 2018).
- Priprava izračunov simulacij regionalnih podnebnih modelov za različne scenarije izpustov toplogrednih plinov (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5).
- Izbor primernih regionalnih podnebnih modelov in popravki njihovih pristranskosti (Medved in Vertačnik, 2019).
- Priprava ustrezne podatkovne zbirke podnebnih scenarijev in orodij za dostop do podatkov.
- Analiza podatkov izbranih regionalnih podnebnih modelov in ocena skladnosti ugotovljenih sprememb oz. združevanje rezultatov modelov ansambla v enotno oceno podnebnih sprememb za posamezni scenarij toplogrednih plinov.

Metodološko najzahtevnejši del je bil popraviljanje pristranskosti modelov, ki je podrobno opisan v ločenem članku (Medved in Vertačnik, 2019). Popravljenе modelske simulacije smo nato analizirali za vsak model ansambla posebej in po točkah modelske mreže. Za izbran scenarij izpustov smo za vsak model in vsako točko modelske mreže ocenili spremembo v prihodnosti. Spremembo smo analizirali s primerjavo rezultatov s preteklim primerjalnim obdobjem (1981–2010) za enega od treh projekcijskih obdobj:

- *bližnjo prihodnost* (2011–2040),
- *sredino stoletja* (2041–2070) in
- *konec stoletja* (2071–2100).



Slika 2: Shematski prikaz priprave podnebnih projekcij projekta OPS21

Statistično zanesljivost spremembe povprečnih vrednosti smo ocenili s testiranjem ničelne hipoteze, da do spremembe ni prišlo. Spremembe smo ocenili na letni ravni, ker pa so pri nekaterih spremenljivkah bistvene razlike v spremembah med letnimi časi, smo jih ocenili tudi na ravni meteoroloških letnih časov. Letne čase smo opredelili kot naslednja tromesečja:

- *pomlad* (marec, april, maj),
- *poletje* (junij, julij, avgust),
- *jesen* (september, oktober, november) in
- *zimo* (december, januar, februar).

### Ocena zanesljivosti sprememb

Statistične teste oz. preverjanje hipotez smo naredili po modelskih točkah za vsak model in vsak scenarij izpustov posebej. Rezultat je statistična zanesljivost ugotovljene spremembe za vsak model ansambla v vsaki točki modelske mreže. Statistično zanesljivost izračunanih sprememb smo izračunali z Mann–Whitney–Wilcoxonovim testom pri stopnji značilnosti 10 %. Rezultati v izbrani modelski točki se med modeli ansambla razlikujejo. Uporaba ansamblov podnebnih modelov lahko zato vodi do širokega razpona ocene podnebnih sprememb. Da bi zgoščili informacijo bodočih sprememb, smo uvedli skladnost ansamblske projekcije. *Skladnost* je definirana kot soglasnost modelskih simulacij bodočih sprememb, še posebej, če so te spremembe statistično značilne.

Za oceno skladnosti ansambla smo vzeli naslednje merilo: ocena ansambla je označena kot skladna, če je statistično značilna za vsaj polovico modelov ansambla, pri čemer morajo značilne spremembe imeti isti predznak. Če kažejo modeli ansambla značilno spremembo z obema predznakoma, je ocena ansambla skladna le, če je absolutna razlika

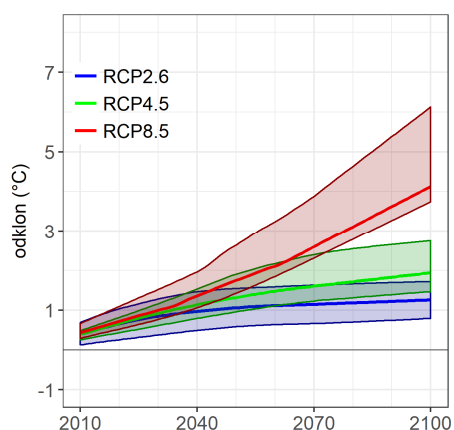
med številom modelov z značilno spremembo različnih predznakov večja ali enaka polovici modelov v ansamblu.

Na opisani način smo za posamezno spremenljivko in podnebni scenarij ocenili zanesljivost sprememb na podlagi statistične zanesljivosti za vseh šest modelov ansambla. Ločili smo med tremi vrstami zanesljivosti. Skladna ocena ansambla, kjer se večina modelov ujema v predznaku statistično značilne spremembe, je definirana kot *visoka zanesljivost spremembe*. Neskladno oceno, kjer si modeli nasprotujejo glede smeri spremembe, spremembe v obe smeri pa so statistično značilne in lahko tudi zelo velike, smo označili kot *nizko zanesljivost spremembe*. Primere, ko večina modelov ansambla kaže statistično neznačilne spremembe, pa smo označili, da so *brez spremembe*, saj so v teh primerih zaznane spremembe manjše od naravne spremenljivosti.

## Rezultati

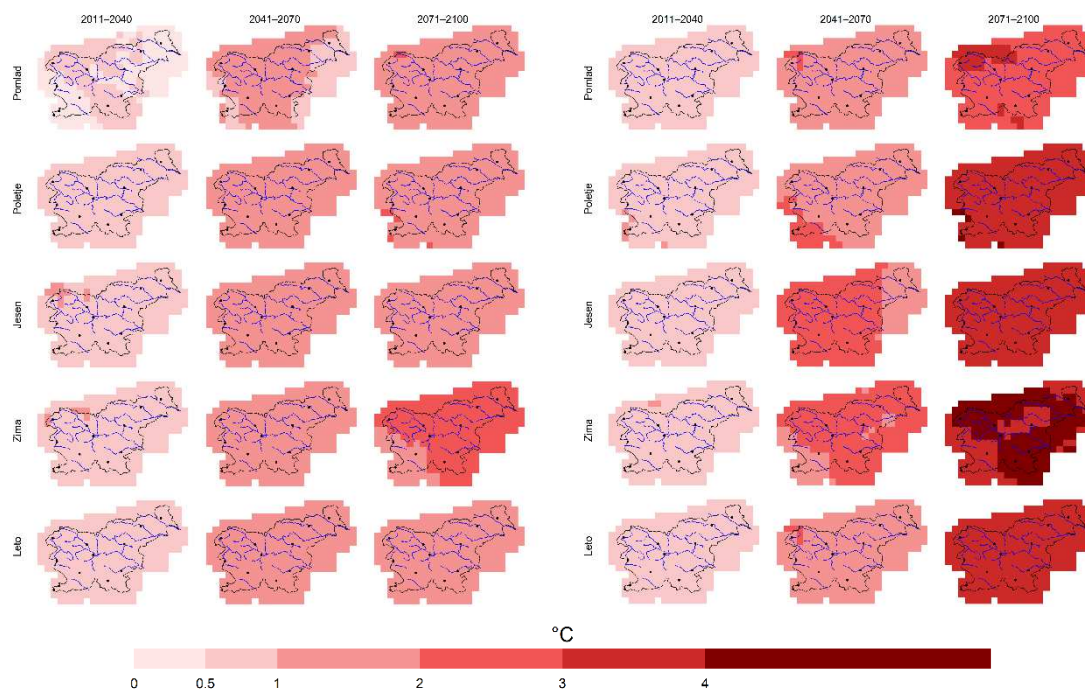
### Spremembe temperature

Temperature zraka v Sloveniji bo skozi 21. stoletje naraščala, velikost dviga pa je zelo odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov (slika 3). V primeru optimističnega scenarija izpustov (RCP2.6) bo temperatura do konca stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 zrasla za približno 1,3 °C, v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov (RCP4.5) za približno 2 °C, v primeru pesimističnega scenarija izpustov (RCP8.5) pa za približno 4,1 °C. Po prvih dveh scenarijih, ki predvidevata zmanjšanje izpustov, temperatura sprva narašča in se konec 21. stoletja ali kmalu po njem ustali, po pesimističnem scenariju pa se naraščanje temperature proti koncu stoletja stopnjuje. Proti koncu 21. stoletja se stopnjuje tudi negotovost. V bližnji prihodnosti so temperaturna odstopanja od primerjalnega obdobja med posameznimi scenariji izpustov še primerljiva, potem pa se časovni poteki ločijo.



Slika 3: Časovni potek odklona povprečne temperature zraka od primerjalnega obdobja 1981–2010 za Slovenijo na letni ravni za tri scenarije izpustov. Debele črte prikazujejo glajen signal, ovojnice pa glajen razpon negotovosti.



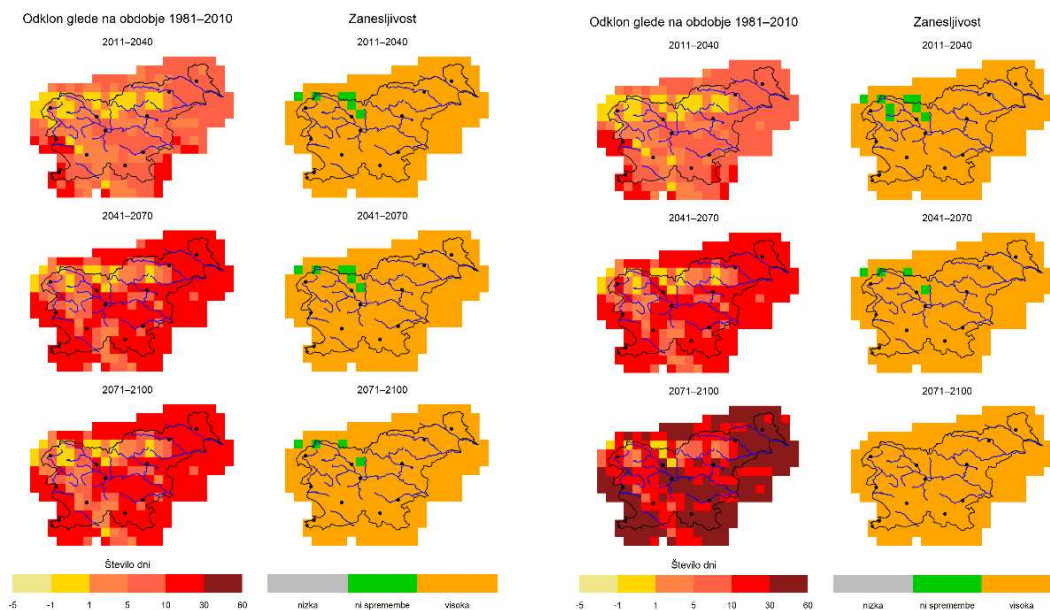


Slika 4: Srednja sprememba povprečne temperature po letnih časih in na letni ravni glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij.

Vse spremembe temperature imajo visoko stopnjo zanesljivosti (Bertalanič et al., 2018). Naraščanje temperature je prostorsko precej enakomerno, razlikuje pa po letnih časih (slika 4). Naraščanje temperature je za Slovenijo predvideno v vseh letnih časih, vendar je za zimo podnebni signal ob koncu stoletja tako na državni kot na regionalni ravni izrazitejši od povprečnega letnega podnebnega signala. Predvsem v severnem in vzhodnem delu Slovenije bo temperatura pozimi naraščala hitreje od letnega povprečja. Izrazitejša sprememba se kaže predvsem pri pesimističnem scenariju.

Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev. Izjemne razmere spremljamo s temperaturnimi kazalniki, npr. kazalniki izjemne vročine ali mraza. Analiza kazalnikov kaže, da bodo spremembe povprečnih razmer spremljale spremembe v skrajnostih (vroči dnevi, ledeni dnevi ipd.). Obeta se nam veliko večje število vročih dni (z najvišjo temperaturo nad 30 °C) kot doslej (slika 5), v primeru zmerno optimističnega scenarija za približno 11 dni, v primeru pesimističnega scenarija izpustov pa za približno 27 dni v slovenskem povprečju. V vseh scenarijih izpustov se bo povečalo število in trajanje vročinskih valov. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov bomo imeli konec stoletja povprečno vsaj en vročinski val letno, ki bo po jakosti primerljiv ali hujši od vročinskega vala, ki smo ga imeli poleti 2003. Vroči dnevi se utegnejo pojaviti precej više kot doslej, na meji visokogorja.

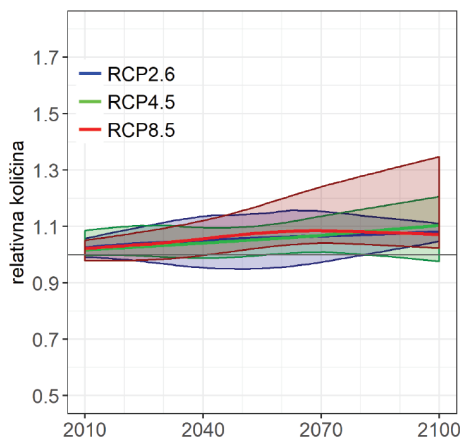
Število hladnih (dnevna najnižja temperatura pade pod 0 °C) in ledenih (dnevna najvišja temperatura ne preseže 0 °C) se bo precej zmanjšalo (Bertalanič et al., 2018). Največji upad števila ledenih oziroma hladnih dni v prihodnosti pričakujemo v visokogorju in na prehodu med Primorsko in osrednjo Slovenijo.



Slika 5: Sprememba števila vročih dni (nad 30 °C) na leto glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe števila vročih dni, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da so spremembe znotraj naravne spremenljivosti, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.

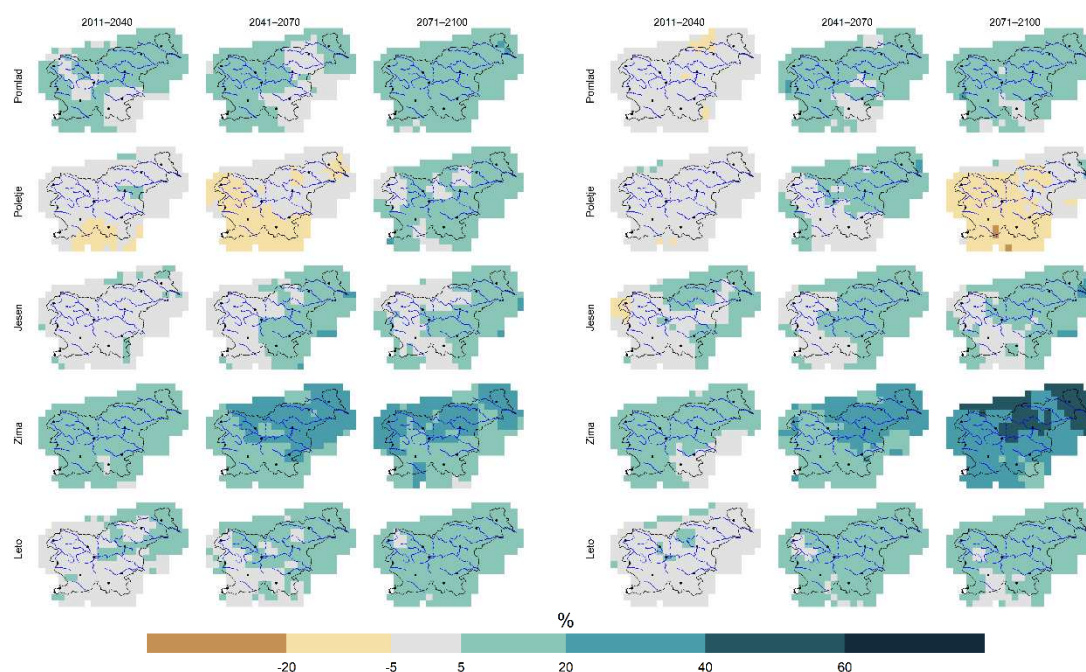
### Spremembe padavin

V nasprotju s temperaturo so scenariji za spremembe padavin manj zanesljivi, saj so te časovno in prostorsko bolj raznolike. Optimistični scenarij izpustov (RCP2.6) na letni in državni ravni v nobenem obdobju ne predvideva statistično značilnih sprememb. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov (RCP4.5) višina padavin vseskozi raste, v začetnem obdobju na letni ravni so spremembe zelo majhne, vendar se signal z odmikom v prihodnost stopnjuje (slika 6). Pesimistični scenarij izpustov (RCP8.5) sprva predvideva naraščanje padavin po vsej državi, v drugi polovici 21. stoletja pa se negotovost signala močno poveča.



Slika 6: Časovni potek kazalnika višine padavin glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za Slovenijo na letni ravni za tri scenarije. Debele črte prikazujejo glajen signal, ovojnice pa glajen razpon negotovosti.

Tudi prostorsko so projekcije manj homogene kot pri temperaturi (slika 7). Z začetkom sredine stoletja se bo območje relativnega naraščanja padavin na letni ravni začelo širiti z vzhoda na zahod, vendar je sprememba zanesljiva le na skrajnem severovzhodu. Do leta 2100 je na celotnem območju Slovenije z izjemo Julijskih Alp pričakovan porast povprečnih letnih padavin za približno 10 % glede na obdobje 1981–2010, pri čemer je sprememba bolj zanesljiva v vzhodni polovici Slovenije.



Slika 7: Srednja sprememba povprečne višine padavin po letnih časih in za obdobje celega leta v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični (levo) in pesimistični scenarij (desno). Prikazan je relativni odklon višine padavin od povprečja v primerjalnem obdobju 1981–2010.

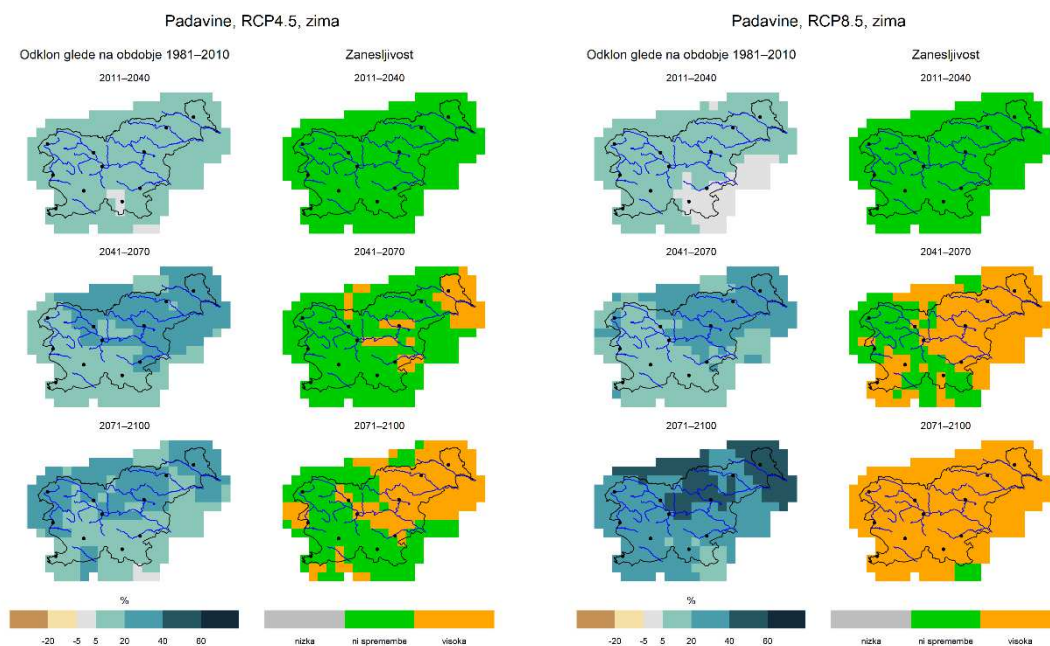
Na sezonski ravni je signal spremembe padavin po velikosti bolj izražen. V primeru zmerno optimističnega scenarija (RCP4.5) bo naraščanje padavin najbolj izrazito pozimi, za kar je zanesljivost deloma visoka (slika 8). Spomladi in jeseni signal prav tako kaže naraščanje padavin, vendar manj zanesljivo. Poleti različni modeli kažejo bodisi majhne spremembe bodisi spremembe v različni smeri, zato je signal spremembe majhen ali negotov (slika 9).

Po pesimističnem scenariju (RCP8.5) so signali sprememb za pomlad, jesen in zimo podobni kot v zmerno optimističnem scenariju, pri čemer je signal za povečanje zimskih padavin še bolj izražen in zanesljiv kot v zmerno optimističnem scenariju (slika 8). Tudi za pesimistični scenarij izpustov je podobno kot za zmerno optimistični scenarij signal spremembe padavin poleti v začetnih obdobjih zelo majhen, proti koncu stoletja pa zelo negotov (slika 9). Z izjemo poletja je v drugih letnih časih ob koncu stoletja predvidena večja višina padavin, vendar z gotovostjo lahko potrdimo le signal za zimo.

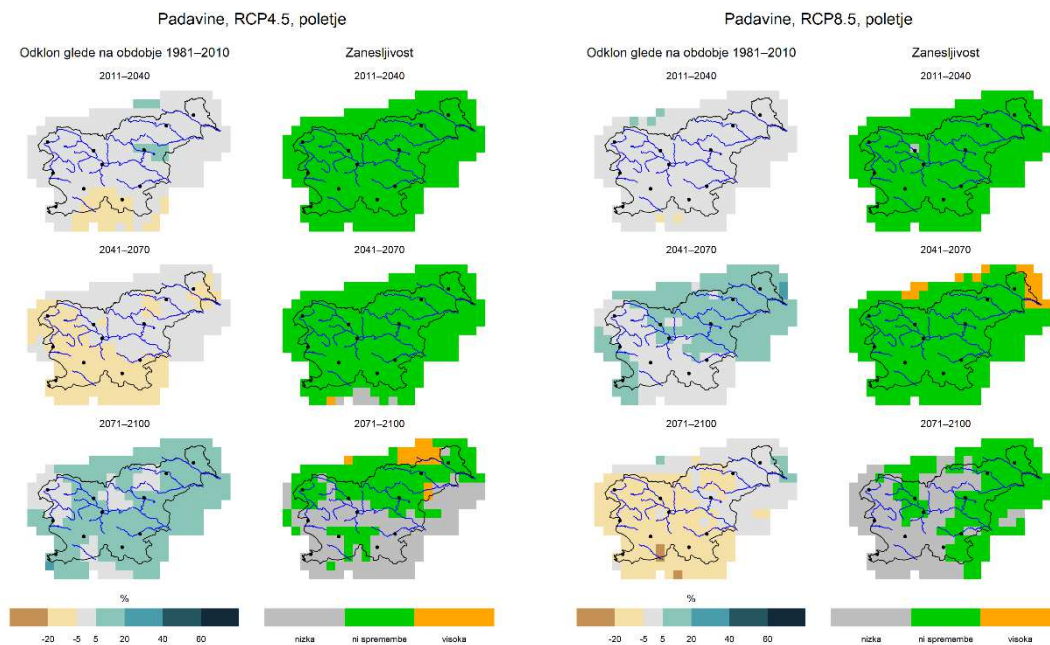
Jakost in pogostost izjemnih padavin se bosta povečali, bolj po pesimističnem scenariju (RCP8.5) (Bertalanič et al., 2018). Nalivi z danes izjemno jakostjo bodo postali običajnejši. Število padavinskih dni se bo po zmerno optimističnem scenariju (RCP4.5)



zmanjšalo samo sredi stoletja in to poleti, po pesimističnem scenariju pa na letni ravni že sredi stoletja, do konca stoletja pa se bo signal še stopnjeval.



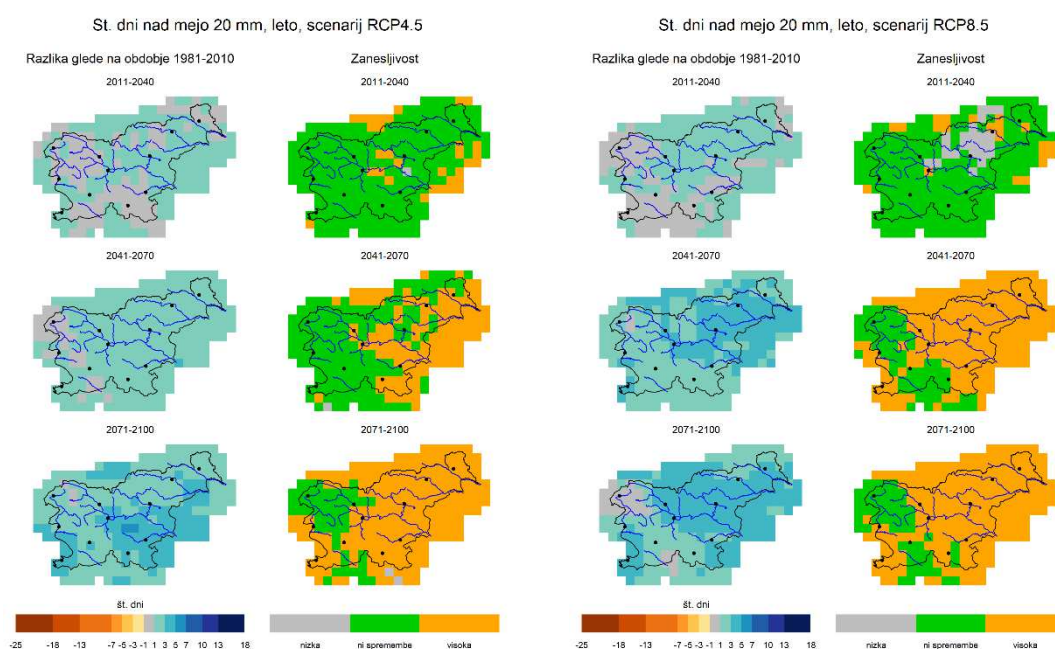
Slika 8: Sprememba višine zimskih padavin glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe padavin, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da je sprememba manjša ali enaka naravni spremenljivosti zimskih padavin, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.



Slika 9: Sprememba višine poletnih padavin glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe padavin, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da je sprememba manjša ali enaka naravni spremenljivosti poletnih padavin, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.

Dnevi s srednje intenzivnimi dnevnimi padavinami (več kot 10 mm), ki so danes precej pogosti na alpsko-dinarski pregradi, bodo na vzhodu pogostejši (Bertalanč et al., 2018). Po zmerno optimističnem scenariju (RCP4.5) se bo njihovo število občutno povečalo šele ob koncu stoletja, medtem ko se v primeru pesimističnega scenarija (RCP8.5) občutno povečanje kaže že sredi stoletja.

Dnevi z intenzivnejšimi padavinami (nad 20 mm), ki se danes v večini Slovenije ne pojavljajo pogosto, bodo po zmerno optimističnem scenariju (RCP4.5) pogostejši že sredi stoletja, do konca stoletja pa se bo povečanje še stopnjevalo (slika 10, levo). Spremembe so statistično zanesljive najprej na vzhodu Slovenije, do konca stoletja pa po vsej državi, z izjemo alpsko-dinarske pregrade. Največji del povečanja takšnih dni gre na račun povečanja jeseni in pozimi. Še večje spremembe so predvidene za pesimistični scenarij (RCP8.5), ko se bo število takšnih dni povečalo sredi in konec stoletja po celotni državi, z izjemo alpsko-dinarske pregrade (slika 10, desno).



Slika 10: Sprememba števila dni na leto s padavinami nad 20 mm glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za zmerno optimistični RCP4.5 (levo) in pesimistični RCP8.5 (desno) scenarij. Levi stolpec vsakega scenarija prikazuje srednjo vrednost spremembe števila dni, desni pa značilnost spremembe. Zelena pomeni, da je sprememba manjša ali enaka naravni spremenljivosti števila dni s padavinami nad 20 mm, oranžna, da so spremembe zanesljive, siva pa, da so nezanesljive.

## Zaključki

Za pripravo strokovnih podlag za prilagajanje na podnebne spremembe v Sloveniji je ključno poznavanje pretekle podnebne spremenljivosti in ocenjevanje prihodnjih podnebnih razmer. Projekcije sprememb temperaturnih in padavinskih razmer kažejo, da se bodo te ne glede na scenarij izpustov toplogrednih plinov izrazile v tolikšni meri, da bo prilagajanje nanje nujno.

Naraščanje temperature zraka se bo v Sloveniji v 21. stoletju nadaljevalo, velikost dviga pa je odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov. Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev. Višina padavin na letni ravni in pozimi se bo po zmerno optimističnem in pesimističnem scenariju izpustov sredi ali konec 21. stoletja znatno povečala. Kazalniki, s katerimi merimo izjemne padavine, kažejo, da se bosta povečali tako jakost kot pogostost izjemnih padavin, povečanje pa bo najbolj izrazito v primeru pesimističnega scenarija izpustov.

## Literatura

- Bertalanič, R., Dolinar, M., Draksler, A., Honzak, L., Kobold, M., Kozjek, K., Lokošek, N., Medved, A., Vertačnik, G., Vlahovič, Ž., Žust, A. (2018). Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Sintezno poročilo - prvi del. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 156 p.
- EEA. (2017). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report. Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg, 420 p.
- Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, J. A., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., . . . Wang, H. J. (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, . . . (Ed.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge in New York, 953–1028.
- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5–31.
- Vertačnik, G., Bertalanič, R. (2017). Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011: Značilnosti podnebja v Sloveniji. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 198 p.
- Medved, A., Vertačnik, G. (2019). Odprava pristranskosti v regionalnih podnebnih modelih. Zbornik raziskave s področja geodezije in geofizike 2018, Ljubljana, 61-74.





# Scenariji spremembe pretokov rek v Sloveniji do konca 21. stoletja

Mira Kobold\*, Nejc Gačnik\*\*, Jaka Plečko\*\*, Aleksandar Vujinović\*\*, Katja Klančar\*\*

## Povzetek

Scenariji bodočih sprememb hidroloških razmer so pripravljene v okviru projekta Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo do konca 21. stoletja (OPS21), ki ga finančno podpira Ministrstvo za okolje in prostor iz Sklada za podnebne spremembe. Spremembe hidroloških razmer za srednje, male in velike pretoke so prikazane za letni nivo za tri 30-letna obdobja v prihodnosti (2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100) v primerjavi z referenčnim obdobjem 1981–2010. Projekcije sprememb kažejo smer sprememb in velikostno stopnjo teh sprememb za tri scenarije izpustov toplogrednih plinov: optimistični scenarij, zmerno optimistični in pesimistični scenarij. Večjih sprememb srednjih letnih pretokov v Sloveniji v primerjavi z obdobjem 1981–2010 po vseh omenjenih scenarijih ni pričakovati, z izjemo severovzhoda, kjer bi se pretoki pri zmerno optimističnem scenariju izpustov do konca stoletja lahko povečali do 30 %. Srednje letne konice se bodo po vseh treh scenarijih v primerjavi z obdobjem 1981–2010 povečale povsod po državi, v povprečju od 20 do 30 %. Spremembe srednjih malih pretokov so prostorsko neenotne in signali sprememb nezanesljivi, le ponekod v severni polovici Sloveniji kažejo na značilno povečanje malih pretokov.

**Ključne besede:** podnebne spremembe, hidrološki model, spremembe pretokov rek, negotovost

**Key words:** climate change, hydrological model, changes in river flows, uncertainty

## Uvod

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) od leta 2016 izvaja projekt Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo do konca 21. stoletja (OPS21). V letu 2018 so bili v sinteznem poročilu (Bertalanič in sod., 2018) zbrani prvi rezultati projekta OPS21. Ti se nanašajo na oceno povprečne spremembe najpomembnejših podnebnih spremenljivk in vpliv teh sprememb na rastne razmere in hidrološke spremenljivke. Sredstva za izvajanje projekta in vključevanje zunanjih sodelavcev zagotavlja Ministrstvo za okolje in prostor iz Sklada za podnebne spremembe. V okviru projekta so že bile poleg ocen sprememb najpomembnejših podnebnih spremenljivk izdelane tudi ocene sprememb za hidrološke spremenljivke, saj imajo podnebne spremembe vpliv na celoten vodni krog in s tem tudi na odtok površinskih voda.

Ocene predvidenih sprememb za posamezne spremenljivke so bile narejene za tri različne scenarije izpustov toplogrednih plinov oziroma značilne poteke vsebnosti toplogrednih plinov (RCP – Representative Concentration Pathways, Van Vuuren in sod., 2011): optimistični scenarij RCP2.6, zmerno optimistični RCP4.5 in pesimistični scenarij RCP8.5. Scenarij RCP2.6 predvideva, da bo politika omejevanja izpustov zelo hitra in uspešna, RCP4.5 predvideva, da se bodo izpusti toplogrednih plinov sprva še počasi povečevali, nato pa sredi in proti koncu 21. stoletja zmanjševali. Scenarij RCP8.5 večjih uspehov pri omejevanju izpustov ne predvideva, zato se po tem scenariju izpusti skozi celotno 21. stoletje povečujejo.

---

\* Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

\*\* zunanji sodelavci

Scenariji podnebnih sprememb (Bertalanič in sod., 2018) za temperaturo zraka z visoko gotovostjo kažejo, da bo ta v Sloveniji do konca 21. stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 še naprej naraščala, v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov RCP4.5 za približno 2 °C, v primeru pesimističnega scenarija izpustov RCP8.5 pa za približno 4,1 °C. Za padavine podnebni scenariji kažejo večjo negotovost, se pa signali z odmikom v prihodnost stopnjujejo. V primeru obeh scenarijev izpustov RCP4.5 in RCP8.5 bo povprečno povečanje letnih padavin konec stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 do 20 %. Še bolj se bodo padavine povečale pozimi, nekoliko bolj na vzhodu države. Pri izjemnih padavinah se bosta povečali tako jakost kot pogostost padavin.

Vplive podnebnih sprememb na pretok površinskih voda smo izvedli s simulacijo pretokov s hidrološkim modelom. Vhodni podatki v model so bili modelski parametri (padavine, temperatura zraka in evapotranspiracija) šestih regionalnih podnebnih modelov projekta EURO-CORDEX, ki so bili izbrani za območje Slovenije (preglednica 1) in zaradi sistematičnih napak pred uporabo ustrezno popravljeni (Bertalanič in sod., 2018). Za optimistični scenarij RCP2.6 so bile na voljo simulacije samo dveh modelov, za ostala dva scenarija, RCP4.5 in RCP8.5, pa simulacije podnebnih spremenljivk vseh šestih modelov (preglednica 1).

Preglednica 1: Seznam podnebnih modelov, katerih podatke smo uporabili v hidrološkem modelu (Bertalanič in sod., 2018).

Globalni podnebni model (GCM)	Regionalni podnebni model (RCM)	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5-LR	CCLM4-8-17		x	x
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17		x	x
EC-EARTH	HIRHAM5	x	x	x
IPSL-CM5A-MR	WRF331F		x	x
HadGEM2-ES	RACMO22E	x	x	x
MPI-ESM-LR	RCA4		x	x

x - simulacija za določeni scenarij RCP

V projekcijah podnebnih sprememb so simulacije prihodnjega podnebja obremenjene z negotovostmi, ki izvirajo iz lastnosti podnebja in njegove naravne spremenljivosti. Druga negotovost je posledica orodij in modelov, ki jih uporabljamo za raziskovanje prihodnjega podnebja (Bertalanič in sod., 2018).

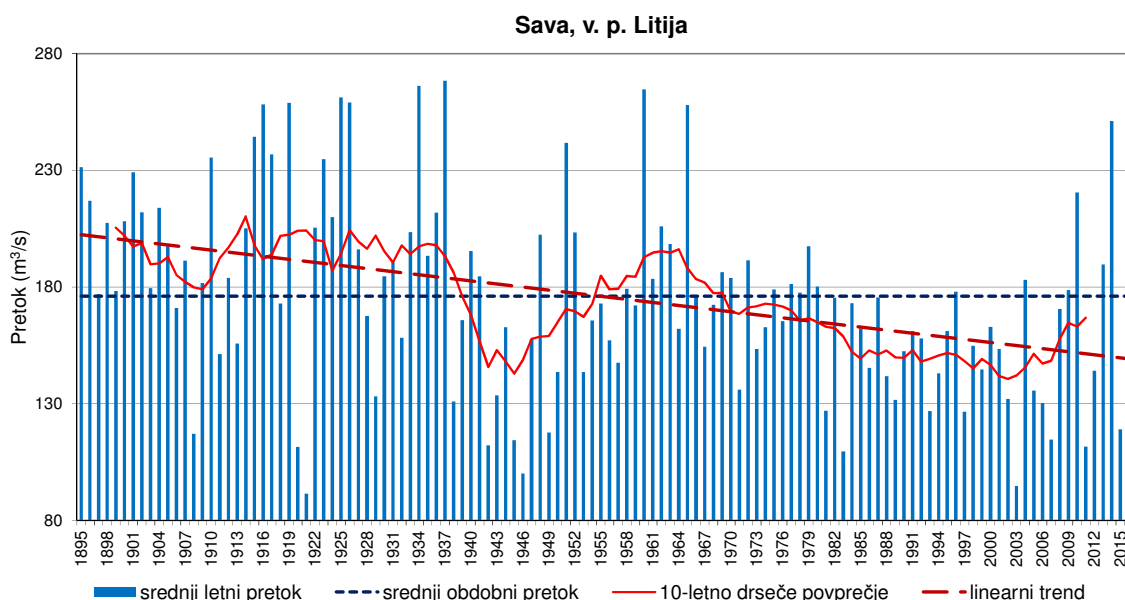
Rezultati projekta OPS21 so podani v obliki sprememb za tri 30-letna obdobja v prihodnosti (2011–2040, 2041–2070 ter 2071–2100) glede na primerjalno obdobje 1981–2010. To je obdobje, ki ga za referenčno obdobje priporoča Svetovna meteorološka organizacija. Za projekcije sprememb hidroloških razmer smo iz modelskih podatkov srednjih dnevni pretokov izbrali letne statistike srednjih, malih in velikih pretokov, ki se najpogosteje uporabljajo v hidroloških analizah. Srednji letni pretok ( $Q_s$ ) predstavlja povprečno letno količino vode, ki teče skozi določen profil vodotoka. Srednji pretok v določenem obdobju ( $sQ_s$ ) je povprečje srednjih letnih vrednosti pretoka v obdobju na določenem profilu vodotoka. Izraža se v  $m^3/s$ . Male pretoke zaznavamo v strugi vodotoka, ko dalj časa ni padavin ali taljenja snežne odeje in so odtoki posledica izcejanja podzemnih voda. S kazalniki malih pretokov opisujemo sušno obnašanje posameznih vodotokov. Srednji mali pretok v obdobju ( $sQ_{np}$ ) je večletno povprečje najnižje vrednosti srednjega dnevnega pretoka v letu ( $Q_{np}$ ) na določenem profilu vodotoka. Ob večji količini padavin začne pretok vode v vodotokih naraščati, precej hitro doseže maksimum in nato postopoma

upada. Za kazalnik največjih letnih vrednosti, ki služi za analize poplavnih pretokov in poplav, se običajno vzame največji pretok v letu (visokovodna konica).

### Pretoki rek in trendi v obdobju meritev

Pretoki rek se s časom neprestano spreminjajo. Časovna spremenljivost pretokov rek v Sloveniji je velika. Dejavniki, ki vplivajo na hidrološko dogajanje in pretočni režim so številni, od podnebja, reliefa, tal, geološke sestave, vegetacije in rabe vode. V Sloveniji je najpomembnejši dejavnik podnebje, saj so pretoki rek v glavnem odvisni od časovne in prostorske razporeditve padavin, temperature zraka in trajanja snežne odeje. Zmanjševanje višine padavin, najbolj spomladi in poleti, spremembe trajanja in višine snežne odeje, rast povprečne temperature zraka in posledično povečana evapotranspiracija so glavni dejavniki, ki vplivajo na spreminjanje pretočnih režimov slovenskih rek (Kobold in sod., 2011). Podatki merilnih mest, ki jih hranimo v podatkovni zbirki Agencije RS za okolje, izkazujejo veliko sezonsko in medletno spremenljivost pretokov.

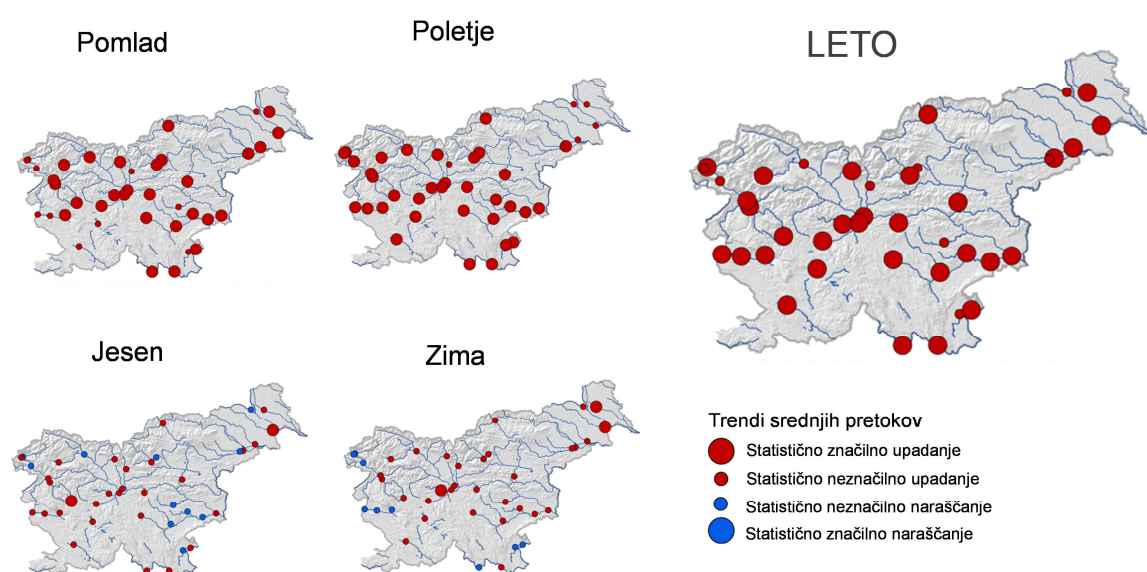
Z analizo časovnega zaporedja pretokov proučujemo dogajanje v preteklosti, ocenjujemo izrazitost in značilnost časovnega spreminjanja ter ugotavljamo spremembe v hidrološkem režimu. Nihanje srednjih letnih pretokov v zadnjih 122 letih je dobro vidno na reki Savi v Litiji (slika 1), kjer imamo neprekinjen niz podatkov od leta 1895. Primerjava letnih podatkov z obdobjim povprečjem na sliki 1 pokaže, da so bila konec 19. in v prvi polovici 20. stoletja pretežno mokra leta, z izjemo posameznih sušnih let. V drugi polovici 20. stoletja pa se je vodnatost proti koncu stoletja postopno zmanjševala, srednji letni pretoki so bili večinoma pod obdobjim povprečjem. Iz kazalca letne rečne bilance za obdobje 1961–2016 (ARSO, 2018) znaša po linearnem trendu upad neto odtoka Slovenije 2,5 % na desetletje.



Slika 1: Srednji letni pretoki, obdobjno povprečje in pripadajoče 10-letno drseče povprečje in linearni trend Save na vodomerni postaji Litija

Pri analizah trendov na rezultate močno vplivata obravnavano obdobje in dolžina časovnega niza podatkov. V zadnji analizi trendov za območje Slovenije, ki jo je izdelal Oblak (2017), je bil obravnavan 52-letni niz podatkov obdobja 1961–2013 za male, srednje in velike pretoke.

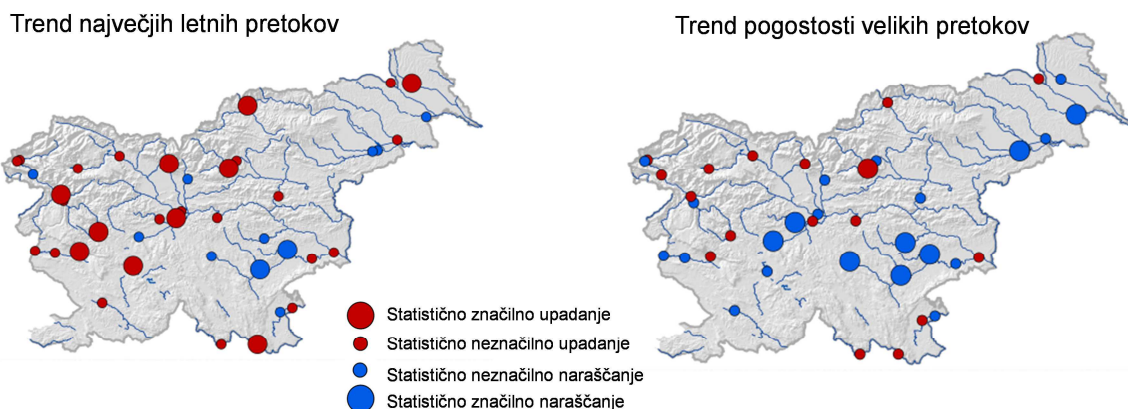
Srednji letni pretoki upadajo na vseh obravnavanih vodomernih postajah in na večini je trend za obdobje 1961–2013 statistično značilen pri stopnji značilnosti 0,1 (slika 2). So pa razlike med letnimi časi. Srednji pomladni in poletni pretoki upadajo povsod po državi in pri večini postaj je zaznan statistično značilen upadajoči trend. Srednji jesenski pretoki v glavnem nimajo statistično značilnih trendov, so pa v zahodni polovici države trendi večinoma negativni, v vzhodni pa pozitivni. Srednji zimski pretoki upadajo večinoma povsod po državi, razen na porečjih Soče, Vipave in Kolpe, kjer je trend pozitiven. Vendar pa trendi z izjemo treh vodomernih postaj niso statistično značilni.



Slika 2: Trend srednjih sezonskih in letnih pretokov na vodomernih postajah po Sloveniji (povzeto po Oblak, 2017).

Pri malih pretokih je trend povsod po državi negativen podobno kot pri srednjih letnih pretokih (Oblak, 2017).

Trend največjih letnih srednjih dnevni pretokov (slika 3) izkazuje manjšo statistično značilnost kot trend srednjih letnih pretokov. Na več kot polovici postaj je trend negativen, na nekaterih tudi statistično značilen. Postaje v vzhodni Sloveniji imajo večinoma pozitiven trend, ki pa v glavnem ni statistično značilen. Trend pogostosti velikih pretokov (v povprečju trikrat na leto) kaže na večanje števila visokovodnih dogodkov zlasti v osrednjem in vzhodnem delu države, kjer je trend marsikje statistično značilen (slika 3). Upadajoči trend pojavljanja visokovodnih dogodkov je zaznan na postajah z gorskim zaledjem v severnem delu države in na porečju Kolpe, vendar ni statistično značilen.



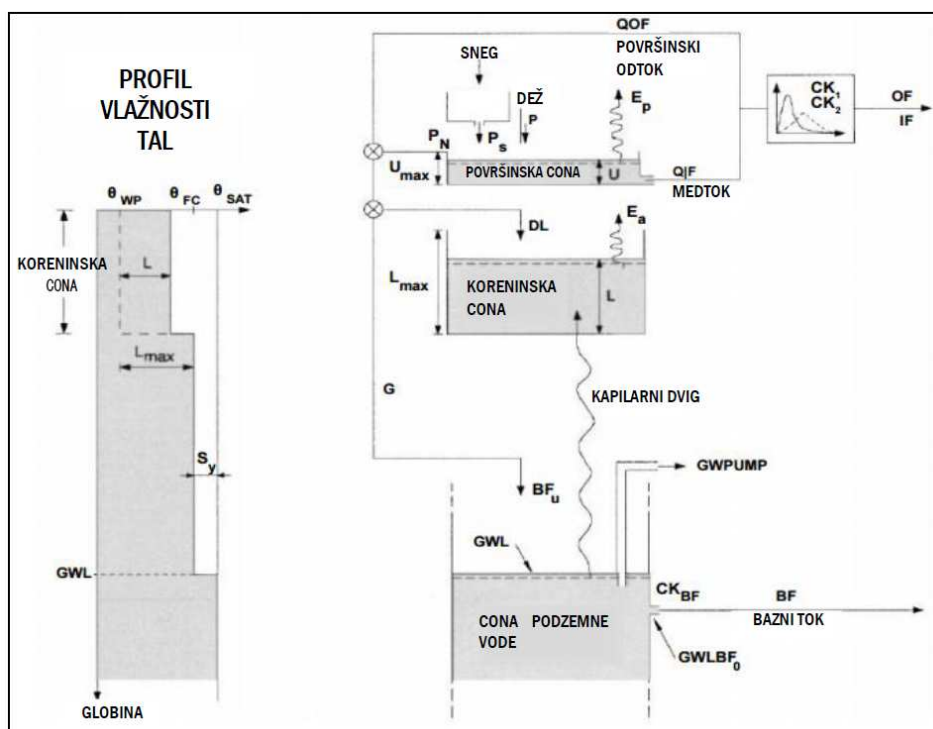
Slika 3: Trend največjih letnih pretokov (levo) in trend pogostosti velikih pretokov v povprečju trikrat letno (desno) na vodomernih postajah po Sloveniji (povzeto po Oblak, 2017).

### Hidrološki model

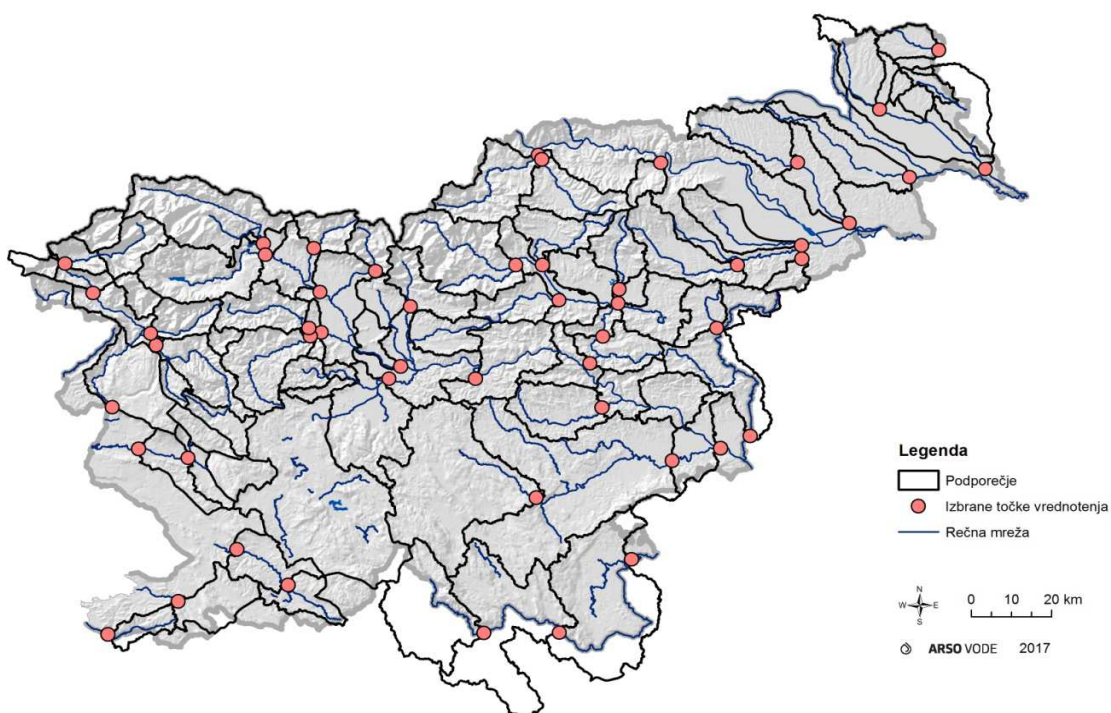
Za oceno sprememb hidroloških razmer do konca 21. stoletja smo uporabili programsko orodje MIKE 11, ki ga ARSO uporablja v sklopu hidrološkega prognostičnega sistema (Petan in sod., 2016). MIKE 11 je orodje za enodimenzijsko modeliranje toka vode, ki ga tvorita dve osnovni komponenti: hidrološki model NAM, ki vključuje snežni modul, in enodimenzijski hidrodinamični model (DHI, 2014). Hidrološki model NAM je deterministični, konceptualni in združeni (ang. lumped) model odtoka padavin (Nielsen in Hansen, 1973), ki simulira kroženje vode na zemeljskem površju. Model računa površinski in podpovršinski odtok s prispevnih površin. Osnovna računski enota modela je podporečje, ki predstavlja prispevno območje posameznega vodotoka do izbrane točke, kar je praviloma lokacija vodomerne postaje, ali pa prispevno območje za posamezen odsek vodotoka med dvema vodomernima postajama. Podporečje je v modelu opredeljeno z velikostjo in topografijo, ki je v snežnem modulu opisana s površinami stometrskih višinskih pasov. Snežni modul za vsak višinski pas simulira skladiščenje vode v snežni odeji in sproščanje snežnice v površinski odtok. Model izračuna hidrograme površinskega odtoka iz vsakega višinskega pasu in jih nato združi po podporečjih. Struktura hidrološkega modela NAM je prikazana na sliki 4. Vhodni podatki v model so časovni nizi padavin, temperature zraka, referenčna evapotranspiracija in pretok rek. V postopku umerjanja modela je treba za vsako podporečje določiti parametre fizikalnih in semi-empiričnih enačb, ki so v modelu uporabljene za računanje hidrograma odtoka, spremljanje uskladiščene vode v snežni odeji, na površini tal, v koreninski coni in vodonosniku.

Osnova za izgradnjo hidrološkega modela za oceno hidroloških razmer v prihodnosti so bili v sklopu hidrološkega prognostičnega sistema že izdelani hidrološki modeli za porečja Slovenije (Petan in sod., 2016). Na osnovi teh smo izdelali hidrološki model za območje Slovenije z 81 podporečji s srednjo velikostjo okoli 226 km<sup>2</sup>, ki smo jih določili na osnovi 52 vodomernih postaj (slika 5) (Gačnik in Plečko, 2018). Vodomerne postaje so bile izbrane na podlagi reprezentativnosti, pokritosti porečij in vodotokov, čim manjšega človekovega vpliva na hidrološki režim in popolnosti niza podatkov za primerjalno obdobje 1981–2010. Za te postaje smo v nadaljevanju vrednotili rezultate.





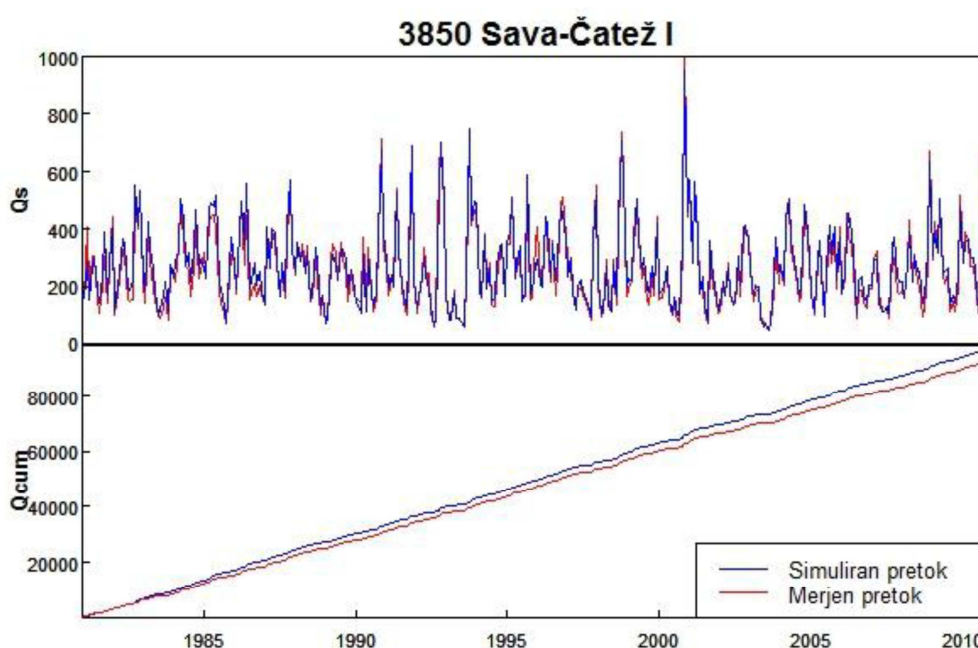
Slika 4: Struktura hidrološkega modela NAM (povzeto po DHI, 2014).



Slika 5: Prikaz podporečij hidrološkega modela in točk vrednotenja modela.

Model smo predhodno umerili in nastavili vrednosti parametrov modela za vsako podporečje. Za umerjanje in vrednotenje modela smo vzeli primerjalno obdobje 1981–2010. Vhodni meteorološki podatki so bili pripravljene v pravilni prostorski mreži (Bertalanič in sod., 2018). V postopku umerjanja smo simulirane dnevne pretoke primerjali

z merjenimi na vodomernih postajah (Gačnik in Plečko, 2018). Ujemanje simuliranih z merjenimi pretoki smo ocenili vizualno (grafično) in numerično z različnimi kriteriji: razlika v vodni bilanci, Nash-Sutcliffov koeficient učinkovitosti modela (NSE), determinacijski koeficient ( $R^2$ ) in delež pristranskosti (PBIAS). Osredotočili smo se na napako v vodni bilanci, ki je razmerje med povprečnim simuliranim in merjenim pretokom, ter na koeficient učinkovitosti modela (NSE) in determinacijski koeficient ( $R^2$ ), ki kažeta na skladnost oblike hidrograma simulacije in meritev. Pristranskost v vodni bilanci smo zmanjšali s korekcijskim faktorjem za padavine, določenim za vsako posamezno podporečje (Gačnik in Plečko, 2018). Za večino podporečij izkazujejo vrednosti NSE in  $R^2$  dobro ujemanje simuliranih pretokov z merjenimi. Primer ujemanja simuliranega in merjenega pretoka za vodomerno postajo Čatež na reki Savi v obdobju 1981–2010 je prikazan na sliki 6.



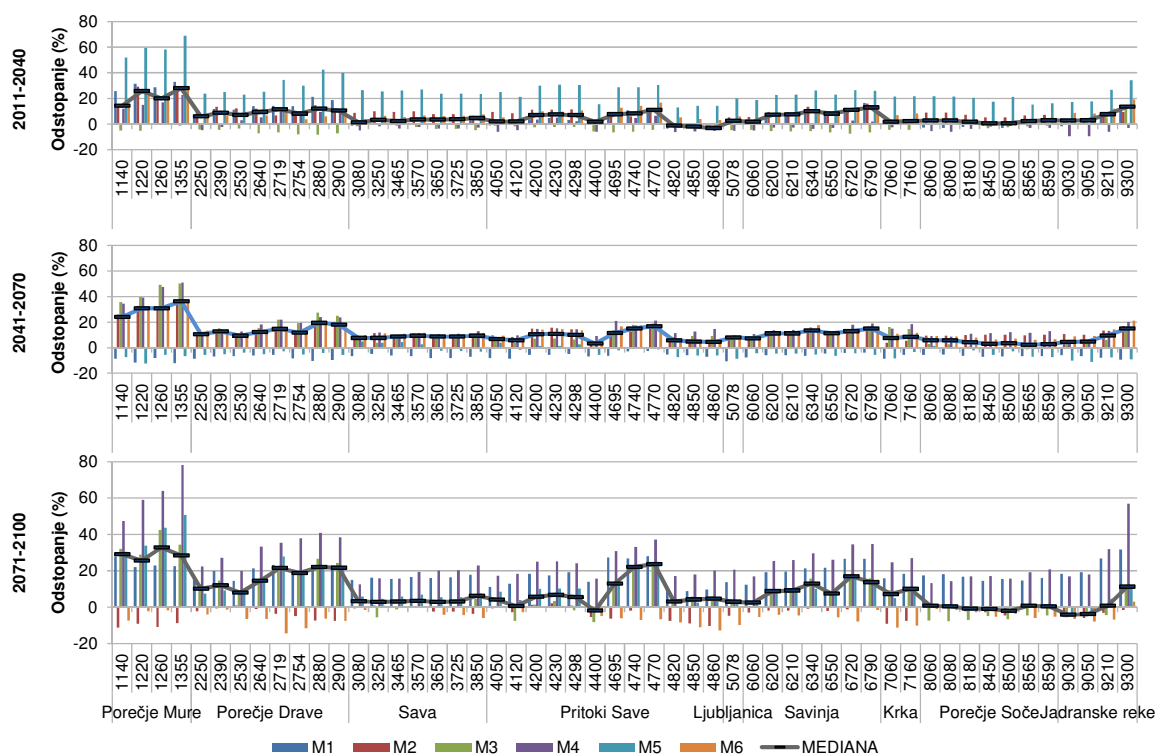
Slika 6: Primerjava simuliranih in merjenih mesečnih pretokov (v  $m^3/s$ , zgoraj) ter akumuliranega pretoka (v  $m^3/s$ , spodaj) za postajo Čatež na Savi za obdobje 1981–2010.

Za simulacijo pretokov do konca 21. stoletja so bili vhod v umerjen hidrološki model popravljene dnevni podatki šestih regionalnih podnebnih modelov (Bertalanč in sod., 2018) za tri scenarije izpustov toplogrednih plinov (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5).

## Rezultati

Rezultate podnebnih projekcij podajamo z velikostjo spremembe spremenljivke in ne z njeno absolutno vrednostjo v prihodnjem obdobju. Za vsak scenarij izpustov toplogrednih plinov smo za vsako točko vrednotenja (vodomerno postajo) izračunali modelsko odstopanje od primerjalnega obdobja 1981–2010 za vsak model, kot je prikazan primer za odstopanja srednjih pretokov na sliki 7. Razlike med modeli so lahko velike in po predznaku spremembe celo nasprotujoče. Zato smo spremembe značilnih pretokov podali kot odstopanje srednjih vrednosti (mediane) modelskih simulacij za prihodnja 30-letna

obdobja (2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100) od primerjalnega obdobja 1981–2010. Razpon modelskih rezultatov podaja negotovost, ki izhaja iz podnebni modelov in razlik med njimi kot tudi iz hidrološkega modela. Hidrološki modeli so občutljivi na vhodne podatke padavin in je sprememba pri simuliranem odtoku zaradi nelinearnosti naravnih procesov večja kot pri padavinah (Kobold in Brilly, 2006).



Slika 7: Odstopanja modelskih srednjih pretokov (sQs) od vrednosti obdobja 1981–2010 za vodomerne postaje po scenariju izpustov RCP4.5

Končni rezultati analiz so velikost in smer pričakovane spremembe srednjih, malih in velikih pretokov za obdobja v prihodnosti 2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100 glede na primerjalno obdobje 1981–2010 za vse tri upoštevane scenarije izpustov toplogrednih plinov. Zelo pomemben del informacije je tudi, kako zanesljiva je ta sprememba. Zanesljivost sprememb v primerjavi z negotovostjo smo ocenjevali s statističnimi testi (Bertalančič in sod., 2018).

### Spremembe srednjih pretokov

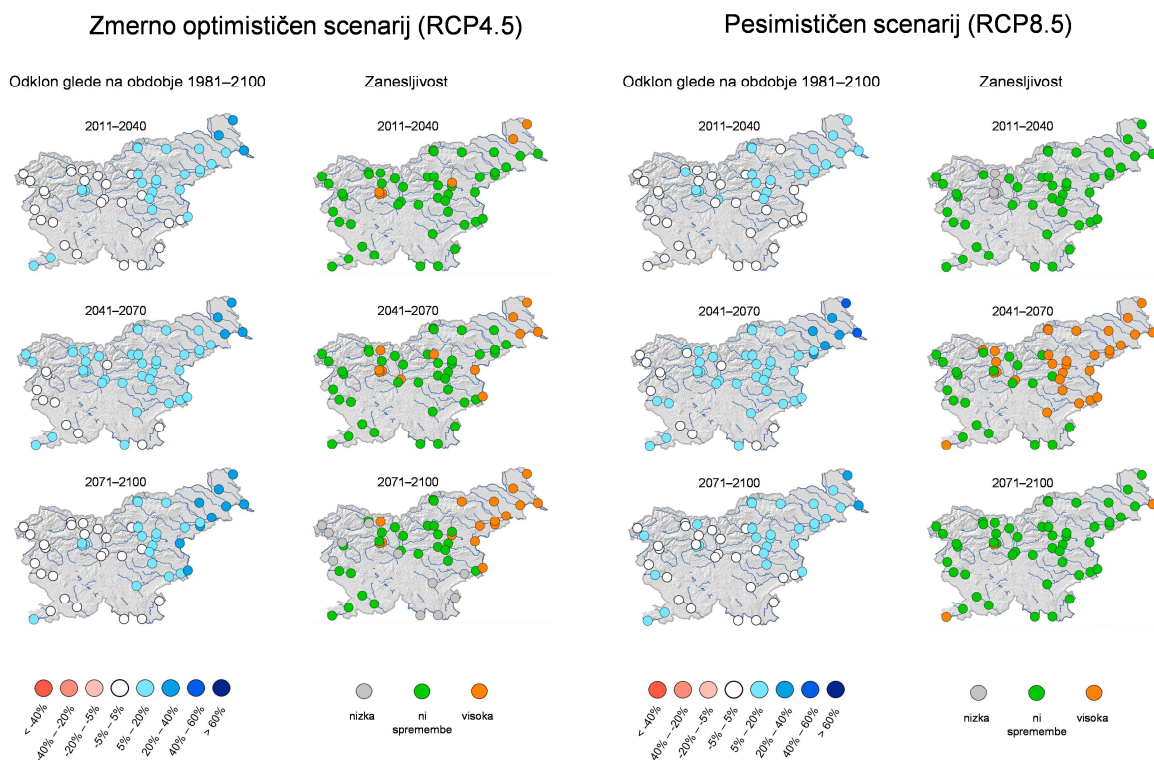
Večjih sprememb srednjih letnih pretokov v Sloveniji za različne scenarije izpustov do konca 21. stoletja glede na primerjalno obdobje 1981–2010 ni pričakovati, le za severovzhod države se kaže deloma znatno povečanje pretokov (slika 8). Zanesljivost predvidenih sprememb pretokov je v največji meri odvisna od zanesljivosti spremembe padavin, ki imajo največji vpliv na odtok površinskih voda.

Po zmerno optimističnem scenariju izpustov RCP4.5 kažejo srednji pretoki v primerjavi s primerjalnim obdobjem 1981–2010 za bližnjo prihodnost na manjše povečanje predvsem za severovzhodni del države in na obalnem območju, drugje sprememb ni pričakovati (slika 8). Za sredino 21. stoletja so povečanja predvidena za večji del države z izjemo rek

Notranjske, Vipave, spodnjega dela Soče in Kolpe. Za konec stoletja pa ocenjujemo, da bo bilančno stanje srednjih pretokov rek podobno kot v bližnji prihodnosti. Pri vseh obdobjih z večjo vodnatostjo izstopa predvsem Pomurje, kjer je predvideno povečanje pretokov do 30 %. V vseh treh obdobjih so spremembe deloma zanesljive za severovzhod države in na posameznih postajah v severni Sloveniji (slika 8).

Pesimistični scenarij izpustov RCP8.5 kaže podobno kot RCP4.5. Za sredino stoletja so povečanja predvidena za večji del države, kjer se izrazito in zanesljivo povečanje kaže za večino vzhodnega dela Slovenije, celo do okrog 40 %, medtem ko za Posočje in v delih južne Slovenije sprememb ni pričakovati. Konec stoletja bo bilančno stanje srednjih pretokov podobno kot pri scenariju RCP4.5, le da je zanesljivost spremembe manjša.

Tudi optimistični scenarij RCP2.6 kaže v bližnji prihodnosti na manjše povečanje na skrajnem severovzhodu države, za sredino in konec stoletja pa kaže na bilančno bolj bogate srednje pretoke skoraj povsod po državi, z izrazitejšim povečanjem srednjih pretokov v Pomurju (Bertalanič in sod., 2018).



Slika 8: Relativna sprememba srednjega pretoka v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno).

### Spremembe velikih pretokov

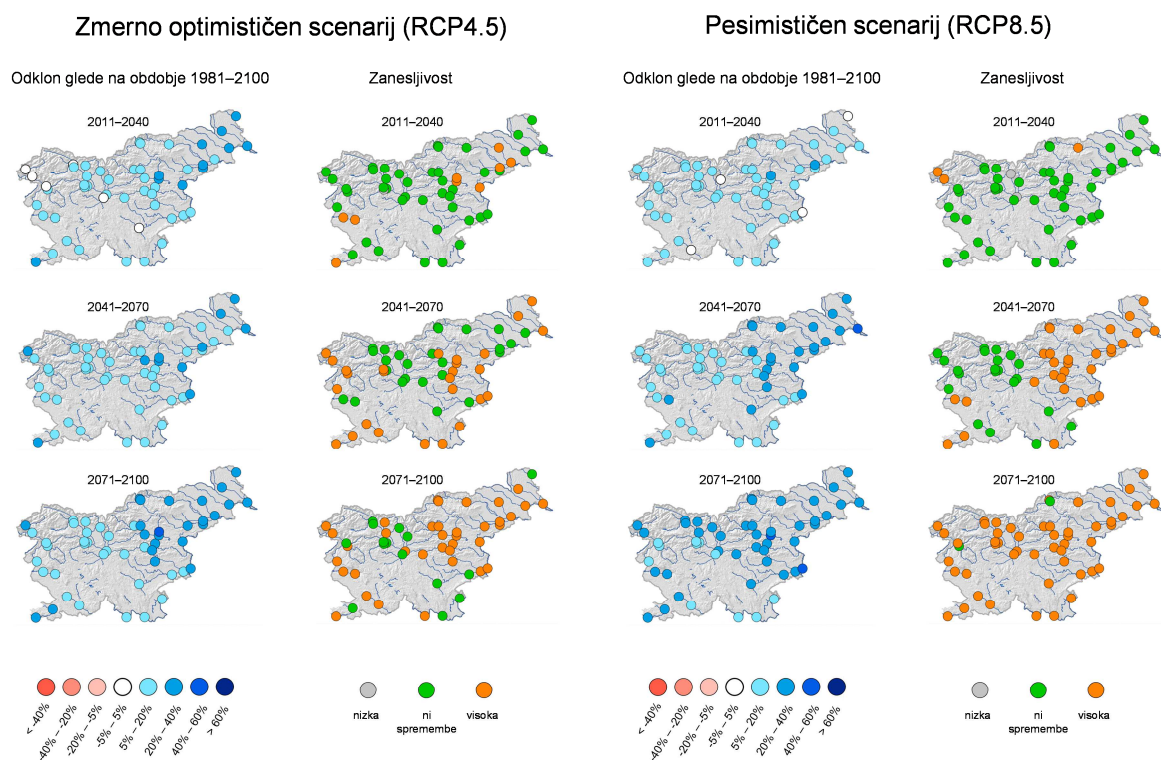
Pri spremembi velikih pretokov (srednjih obdobjnih konic) kažejo vsi trije uporabljeni scenariji izpustov za vsa tri obravnavana obdobja v prihodnosti na povečanje srednjih konic po večini države, pri čemer so, podobno kot pri srednjih pretokih, največja povečanja predvidena za severovzhod in deloma vzhod države (slika 9).

V primeru scenarijev izpustov RCP4.5 in RCP8.5 se sprememba od bližnje prihodnosti proti koncu stoletja stopnjuje. Za bližnjo prihodnost je v scenariju izpustov RCP4.5 za



severovzhodni del predvideno večje povečanje kot v primeru scenarija izpustov RCP8.5, do okrog 30 %. V sredini stoletja je največji porast pričakovan v severovzhodni Sloveniji in na Obali. Proti koncu stoletja se pri scenariju izpustov RCP4.5 kaže podobna slika kot v sredini stoletja, pri scenariju izpustov RCP8.5 pa se kaže povečanje med 20 in 40 % glede na primerjalno obdobje na skoraj vseh postajah. Zanesljivost sprememb oziroma število postaj z visoko zanesljivostjo spremembe se z vsakim naslednjim obdobjem stopnjuje (slika 9). Za oba scenarija izpustov so spremembe najbolj zanesljive v zadnjem obdobju, v primeru scenarija izpustov RCP8.5 so takrat zanesljive na skoraj vseh postajah.

Čeprav se tudi v primeru scenarija izpustov RCP2.6 kažejo povečanja velikih pretokov v vseh treh obravnavanih obdobjih, na vzhodu tudi do 30 %, pa so te spremembe nezanesljive, oziroma manjše od naravne spremenljivosti (Bertalanič in sod., 2018).



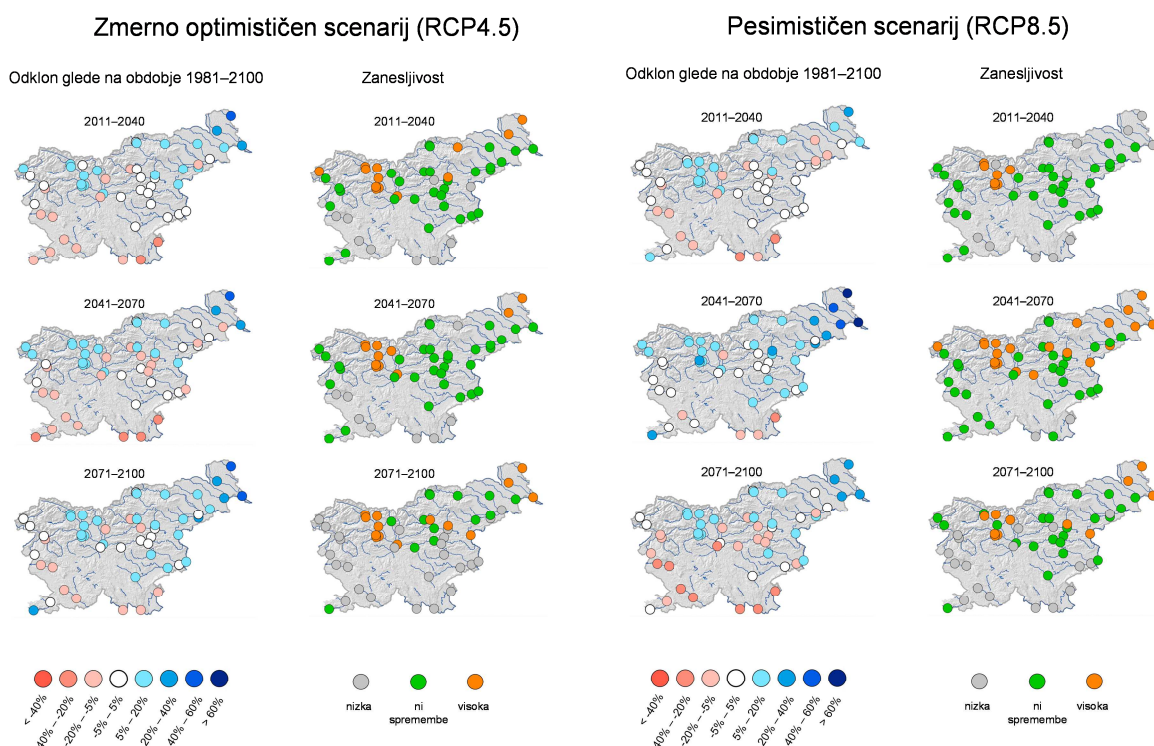
Slika 9: Relativna sprememba velikih pretokov (srednjih obdobjih konic) v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

### Spremembe malih pretokov

Pri srednjih malih pretokih lahko pričakujemo tako povečanje kot zmanjšanje v primeru vseh treh uporabljenih scenarijev izpustov. Scenarij izpustov RCP4.5 kaže v bližnji prihodnosti ter v sredini 21. stoletja na povečanje za severno polovico države (slika 10). Večja in zanesljiva povečanja se kažejo za Pomurje. V Pokolpju in jugozahodni Sloveniji je predvideno zmanjšanje srednjih malih pretokov, vendar je to zmanjšanje nezanesljivo, ker si modeli nasprotujejo v predznaku sprememb. Za zadnje obdobje se kažejo podobne spremembe kot v sredini stoletja, z razliko, da je za Krko in spodnjo Savo predviden porast srednjih malih pretokov. Je pa za vse postaje v južnem in jugozahodnem delu zanesljivost sprememb nizka (slika 10).

V primeru scenarija izpustov RCP8.5 v bližnji prihodnosti pričakujemo podobno spremembo malih pretokov kot v scenariju izpustov RCP4.5, vendar je v tem primeru sprememba zanesljiva le v delu Gorenjske. Za sredino stoletja se kaže zanesljivo povečanje malih pretokov v severni in vzhodni Sloveniji. Za južni del države je signal spremembe podoben kot za bližnjo prihodnost in nezanesljiv. Za konec 21. stoletja se kaže podobna sprememba kot v bližnji prihodnosti, le da je signal zmanjšanja malih pretokov v južni Sloveniji nezanesljiv.

V primeru scenarija izpustov RCP2.6 so predvidene spremembe podobne kot v scenariju izpustov RCP4.5. Te spremembe so manjše od naravne spremenljivosti. Izjema je le občutno povečanje malih pretokov v Prekmurju ob koncu stoletja (Bertalanič in sod., 2018).



Slika 10: Relativna sprememba srednjih malih pretokov v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija izpustov RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno).

## Zaključki

Za pripravo strokovnih podlag za prilagajanje na podnebne spremembe v Sloveniji je ključno poznavanje pretekle podnebne spremenljivosti in ocenjevanje prihodnjih podnebnih razmer. Ocene sprememb pretokov do konca 21. stoletja kažejo, da večjih sprememb srednjih letnih pretokov v Sloveniji v primerjavi z obdobjem 1981–2010 po treh scenarijih izpustov toplogrednih plinov ni pričakovati, z izjemo severovzhoda, kjer bi se pretoki v zmerno optimističnem scenariju izpustov do konca 21. stoletja lahko povečali do 30 %. V primeru pesimističnega scenarija izpustov bo lahko v sredini 21. stoletja na severovzhodu povečanje do 40 %.

Srednje letne konice se bodo po vseh obravnavanih scenarijih izpustov v primerjavi z obdobjem 1981–2010 povečale povsod po državi, v povprečju od 20 do 30 %. Povečanje se od bližnje prihodnosti proti koncu stoletja stopnjuje. Največje povečanje konic bo na



severovzhodu države, kjer bo v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov povečanje znašalo do približno 30 %. V primeru pesimističnega scenarija izpustov bo povečanje proti koncu 21. stoletja med 20 in 40 % na skoraj vseh vodomernih postajah v Sloveniji.

Spremembe srednjih malih pretokov so po vseh scenarijih prostorsko neenotne in le ponekod v severni polovici Sloveniji kažejo na značilno povečanje za približno 20 %.

Negotovost modelskega ansambla je velika, zlasti pri rekah, kjer so razmerja med malimi, srednjimi in velikimi pretoki velika. Pri velikih pretokih je negotovost večja od negotovosti srednjih in malih pretokov. Pri vseh pa se negotovosti proti koncu stoletja povečujejo (Bertalanč in sod., 2018).

## Literatura

- ARSO. (2018). Pregled hidroloških razmer površinskih voda v Sloveniji: Poročilo o monitoringu za leto 2016. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje. [http://www.arso.gov.si/vode/publikacije\\_in\\_poročila/Poročilo\\_o\\_hidrološkem\\_monitoringu\\_površinskih\\_voda\\_za\\_leto\\_2016.pdf](http://www.arso.gov.si/vode/publikacije_in_poročila/Poročilo_o_hidrološkem_monitoringu_površinskih_voda_za_leto_2016.pdf) (30.01.2018)
- Bertalanč, R., Dolinar, M., Draksler, A., Honzak, L., Kobold, M., Kozjek, K., Lokpošek, N., Medevd, A., Vertačnik, G., Vlahovič, Ž., Žust, A. (2018). Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Sintezno poročilo - prvi del. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje. [http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/OPS21\\_Porocilo.pdf](http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/OPS21_Porocilo.pdf) (28.11.2018)
- DHI. (2014). MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels. Reference Manual. Hørsholm, Danska: Danish Hydraulic Institute.
- Gačnik, N., Plečko, J. (2018). Nadgradnja ocene izrednih meteoroloških in hidroloških razmer v Sloveniji do konca 21. stoletja - poročilo projekta za sklopa 4 in 5. Ljubljana: Agencija Republike Slovenije za okolje.
- Kobold, M., Brilly, M. (2006). The use of HBV model for flash flood forecasting. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 407–417. [www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/407/2006/](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/407/2006/). (17.01.2007)
- Kobold, M., Frantar, P., Dolinar, M., (2011). Vpliv padavin na pretočni režim Slovenije. V: *Upravljanje voda v Sloveniji*, Fit media, Celje, 181-193.
- Nielsen, S.A., Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology* 4: 171–190.
- Oblak, J. (2017). Analiza sezonske spremenljivosti pretokov rek v Sloveniji. Magistrsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 91 str.
- Petan, S., Golob, A., Moderc, M. (2016). Hidrološki prognostični sistem Agencije Republike Slovenije za okolje. *Ljubljana. Acta hydrotechnica* 28/49 (2015): 119–131.
- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.

# Novi globinski datum za slovensko morje

Božo Koler<sup>1</sup>, Miran Kuhar<sup>1</sup>, Polona Pavlovčič-Prešeren<sup>1</sup>, Tilen Urbančič<sup>1</sup>, Oskar Sterle<sup>1</sup>,  
Bojan Stopar<sup>1</sup>, Mihaela Triglav Čekada<sup>2</sup>, Klemen Ritlop<sup>2</sup>, Igor Karničnik<sup>2</sup>, Vasja Bric<sup>2</sup>,  
Dalibor Radovan<sup>2</sup>

## Povzetek

V članku so opisane standardne gladine morja, ki so v uporabi v pomorski geodeziji, kartografiji in hidrografiji. Iz dolgotrajnih mareografskih opazovanj na mareografski postaji v Kopru (MP Koper) je bil določen novi globinski datum za slovensko morje, ki omogoča natančnejše določanje globin morja. To je gladina srednje nižje nizke vode živih morskih men. V našem primeru se nahaja 70 cm pod novo izračunano srednjo gladino morja in predstavlja povezavo med geodetskim višinskim referenčnim sistemom na kopnem in hidrografskim globinskim referenčnim sistemom na morju. Referenčna ploskev za določanje nadmorskih višin na kopnem je namreč srednja gladina morja oziroma geoid. Obe referenčni ravni sta fizično realizirani kot oznaki na mareografski postaji v Kopru. Izračunani sta iz istega niza mareografskih opazovanj in veljavni za datum 10. 10. 2010.

**Ključne besede:** plimovanje morja, globinski datum, referenčne ravni plimovanja, Slovenija

**Key words:** ocean tide, chart datum, reference tidal levels, Slovenia

## Uvod

Hidrografska dejavnost v Sloveniji obsega hidrografske meritve na morju, izdelavo pomorskih kart, pomorskih publikacij in ostalih informacij o stanju plovni poti ter navigacijskih oznak. Po Karničniku in dr. (2006): "Ladja, ki pripluje v pristanišče, mora točno vedeti, s kakšno globino vode pod kobilico razpolaga. Te informacije mora poveljnik ladje prejeti točne, pravočasne, predvsem pa ažurne...".

Da bi bili podatki o globinah na pomorskih kartah ažurni, se morajo le-ti redno pridobivati in vzdrževati, saj se topografija morskega dna in s tem globine spreminjajo s časom. Pri tem je pomembno nedvoumno poznavanje referenčne ravni (nivoja, gladine), na katero se nanašajo izmerjene globine. Tej ravni, nivoju oz. gladini pravimo globinski datum (tudi: hidrografski datum, hidrografska ničla, angl. Chart Datum). To je nivo morja, ki je v izbranem akvatoriju privzet za nivo, na katerega se nanašajo globine morja in je osnova za izdelavo uradnih pomorskih kart. Globinski datum se izbere tako, da so globine redko oziroma nikoli manjše od prikazanih na karti in da prikazane globine obenem niso nerazumno nizke.

Ker v Sloveniji še vedno uporabljamo stari globinski datum iz časa bivše Jugoslavije, zahteve po varni plovbi in s tem po natančnih hidrografskih podatkih pa so vedno večje, je Ministrstvo za infrastrukturo naročilo projekt izračuna novega modela geoida in določitve globinskega datuma za slovensko morje. Projekt sta izvedla Geodetski inštitut Slovenije in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

<sup>1</sup> UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

<sup>2</sup> Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, Ljubljana

## Standardne gladine morja za potrebe hidrografije

Obstaja več različnih referenčnih gladin za določanje globine morja, ki so odvisne od plimovanja morja. Plimovanje se obnaša različno v različnih morjih in tudi pristaniščih. Tako v Sloveniji, kot tudi v drugih članicah Mednarodne hidrografske organizacije (angl. International Hydrographic Organization - IHO) skušamo slediti priporočilom IHO.

Pri obravnavi različnih ravni plimovanja morja so v Sloveniji pomembne predvsem naslednje:

- srednja visoka voda (SVV, angl. Mean High Water - MHW), ki določa obalno črto,
- srednji nivo morja (SNM, angl. Mean Sea Level - MSL), ki se uporablja kot višinski datum oz. kot ničelni nivo višin na topografskih kartah; v hidrografiji je SNM referenčni nivo, od katerega določimo globinski datum,
- srednja nižja nizka voda živih morskih men (SNNVŽMM, angl. Mean Lower Low Water Springs - MLLWS), ki določa globinski datum oz. hidrografsko ničlo predstavlja izhodiščni nivo za določanje globin morja.

Obalna črta razmejuje kopno in morje in se vrti v topografske karte. Zaradi plimovanja morja in drugih vzrokov ta meja ni stalna, zato jo je potrebno ustrezno predpisati. Večina držav prevzame za obalno črto presek ravni srednje visoke vode in kopna (Shalowitz, 1962, Jovanović, 1978). Pri tem ne smemo zamenjati obalne črte s terminom morsk obala, saj je to geografski pojem, definiran kot kopenski pas, ki je občasno poplavljen (Domijan in dr., 2005). Skladno s smernicami IHO obalno črto določa raven srednjih visokih vod, tj. povprečje vseh visokih vod (plim) v daljšem časovnem obdobju.

Srednji nivo morja (SNM) se v geodeziji uporablja kot višinski datum. Predstavlja izhodišče za določitev fizikalno definiranih višin, ki se uporabljajo v posamezni državi (ortometrične ali normalne višine). V pogovornem jeziku pravimo tem višinam nadmorske višine. SNM se določa na osnovi mareografskih opazovanj v daljšem časovnem obdobju, največkrat v trajanju 18,6 let. To je obdobje precesijske periode Luninih vozlov. Gre za fizikalni (astronomski) pojav precesijskega gibanja vrtilne osi vrtečega se telesa okrog središčnega telesa, ki privlači vrteče se telo (npr. Zemlja Luno, Zemlja umetni Zemljini satelit, Sonce Zemljo). Je posledica nepravilne oblike vrtečega se telesa (predvsem sploščenosti v smeri vrtilne osi), ki ima za posledico sferno nesimetričnost njenega gravitacijskega polja. Lunin vpliv na plimovanje morja je dvakrat večji od Sončevega, zato je zaradi njenega dominantnega vpliva potrebno srednje vrednosti vseh ravni plimovanja izračunati po preteku tega precesijskega obdobja. Ameriški urad NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) imenuje to periodo "National Tidal Epoch Datum", saj so vse srednje vrednosti ravni plimovanja izračunane kot povprečje opazovanj gladine morja v tem obdobju (NOAA, 2000)

Globinski datum je referenčni nivo za merjenje, računanje in prikaz globin morja na pomorskih kartah. Države, ki ležijo ob oceanih, globokih morjih in reliefno razgibanem morskem dnu, običajno za globinski datum privzamejo najnižji nivo zaradi astronomskih vplivov (NAV, angl. Lowest Astronomical Tide – LAT), pod katero nivo morja pri oseki ne upade. V plitvem morju in morju z dokaj ravnim dnom, kot je slovensko morje, je smiselno, da je globinski datum določen kot srednja nižja nizka voda živih morskih men (SNNVŽMM).

Srednja nižja nizka voda živih morskih men predstavlja povprečje (v obdobju 18,6 let) izmerjenih nižjih, nizkih vod (osek) v obdobju največje amplitude plimovanja (v obdobju t.i. živih morskih men, ko so Zemlja, Sonce in Luna poravnani na premici; nastopi približno ob mlaju in ščipu).

Globinski datum hkrati predstavlja del državnega referenčnega globinskega sistema na morju. Ta je nujen za zagotovitev varne plovbe in posodobitev uradnih podatkov o globinah morja. V Sloveniji so do sedaj vsi podatki temeljili na stari hidrografski ničli iz obdobja SFRJ. Ker je realizacija novega horizontalnega in vertikalnega državnega koordinatnega sistema za kopni del države v postopku končne izvedbe, je nujna tudi vzpostavitev povezave z morskim delom. Z uvedbo novega referenčnega globinskega sistema bo, med drugim, omogočena tudi čezmejna uskladitev globin na morju s sosednjimi državami, ter izpolnitev obveznosti Slovenije do IHO.

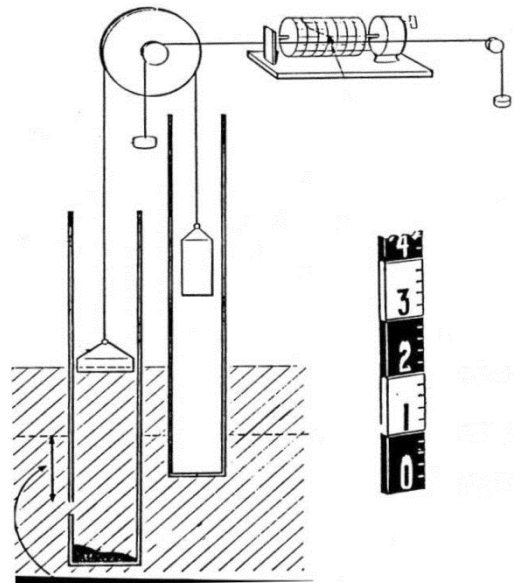
Že v SFRJ je Hidrografski inštitut vojne mornarice iz Splita določil globinski datum. Pregled takratne dokumentacije v zvezi z določitvijo globinskega datuma je pokazal, da so bile izračunane vrednosti višin nivoja morja (globinskih datumov) različne, saj je bilo v uporabi več višinskih datumov (Bakar, Maglaj, Trst). Novo vrednost smo določili iz podatkov meritev nivoja morja na stari in novi MP Koper.

### **Mareografska postaja Koper**

Mareograf (angl. tide gauge) je naprava za registracijo trenutnega nivoja morske gladine. Ti se postavljajo ob obalah svetovnih morij in oceanov in nenehno beležijo trenutne vrednosti gladine morja. Začetki registracije morske gladine segajo v XVIII. stoletje. V uporabi je več izvedb mareografa, in sicer mehanska, tlačna, akustična ali radarska. Do sedaj so bili največkrat v uporabi mehanski mareografi (slika 1, desno); konstrukcija teh se v zadnjih sto letih ni bistveno spremenila.

Prvi mareograf v Kopru so postavili leta 1957 (slika 1, levo). Merjenje nivoja morja z mehanskimi mareografi je obremenjeno s številnimi vplivi in pogreški. Tako nabiranje sedimentov in alg v cevi mareografa ovira prosti pretok vode v cev mareografa. Neenakomerni tek urnega mehanizma, ki poganja valj s papirjem, na katerega se zariše trenutni nivo morja, zatikanje peresa in razlivanje črnica zaradi vlage v zraku, so le nekatere od težav, ki so prisotne pri tovrstnih meritvah in registraciji nivoja morja. Z dobro vzdrževanimi mehanskimi mareografi lahko na osnovi tovrstnih meritev letne srednje nivoje morja iz večletnih nizov opazovanj določimo z natančnostjo 2 do 2,5 cm (Hannah, 2010, Dawidowicz, 2014).

Nova MP Koper je opremljena z radarskim senzorjem nivoja morja in mehanskim mareografom s plovcem, ki nivo plovca registrira v digitalni obliki (slika 3). S sodobnimi mareografi lahko bolj podrobno spremljamo proces plimovanja, ter ekstremne nivoje morja v krajših časovnih intervalih (Dawidowicz, 2014). Seveda so podatki bolj natančni in zanesljivi, če je mareograf ustrezno kalibriran, zato se priporoča kalibracija mareografa vsakih 6 mesecev.



Slika 1 - Stari mareograf v Kopru in skica principa delovanja mehanskega mareografa



Slika 2 - Nova MP Koper



Slika 3 - Radarski senzor in senzor s plovcem na MP Koper

V okviru projekta »Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav«, ki ga je ob finančni podpori Finančnega mehanizma EGP 2009–2014 vodila GURS s partnerjema Norveško in Islandsko geodetsko upravo, je bil v okviru podprojekta »Geodetski referenčni sistem«, ki sta ga izvajala Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo in Geodetski inštitut Slovenije, določen tudi novi višinski datum Koper. Ta je bil določen v več korakih.

### **Kratek pregled analize mareografskih opazovanj na MP Koper**

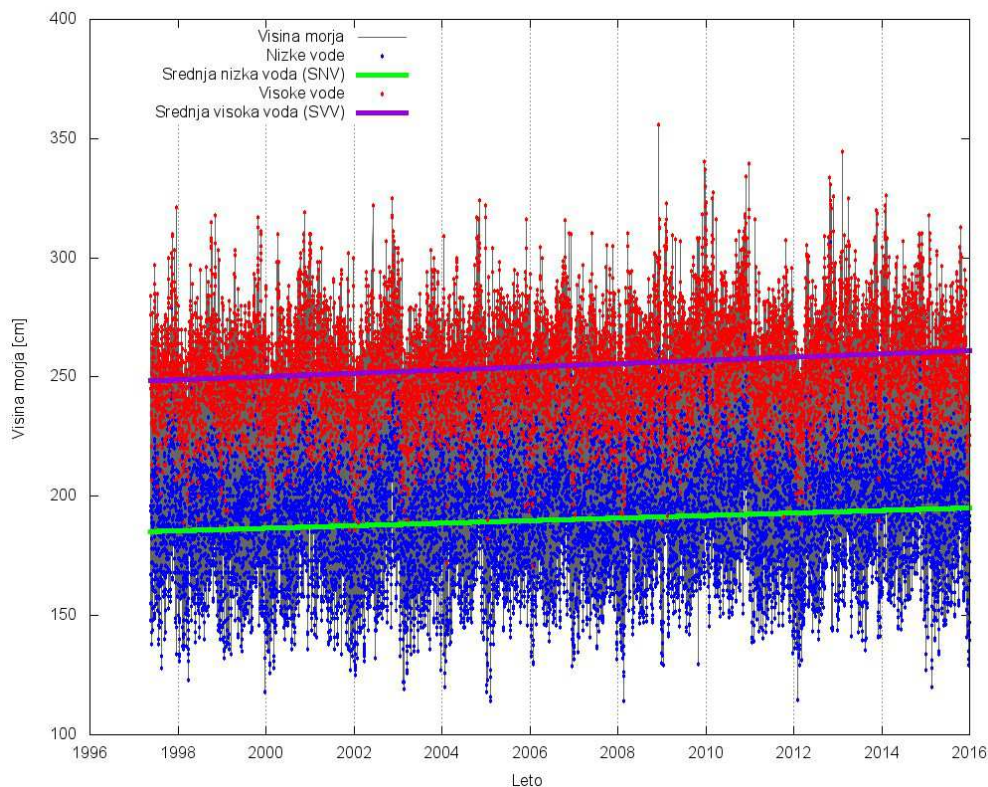
Najprej smo analizirali 18,6-letni niz opazovanj nivoja morja in nato razlike med različnimi načini izračuna srednjega nivoja morja na MP Koper. Srednji nivo novega globinskega datuma smo nato določili hkrati z določitvijo srednjega nivoja morske gladine. Izračunani nivoji SVV, SNV in SNNVŽMM se razlikujejo, ker so izračunani iz različnih nizov podatkov. Niz podatkov, iz katerih so izračunani omenjeni nivoji, je isti, kot je bil uporabljen za izračun srednjega nivoja morja za določitev novega višinskega datuma Slovenije - SVS2010 (o določitvi novega višinskega datuma Slovenije SVS2010 bo v letu 2019 objavljen poseben prispevek v reviji Geodetski vestnik). Za obdobje od 21. 5. 1997 00:00:00 do 31. 12. 2005 23:00:00, so bili podatki pridobljeni na starem mareografu (slika 1, levo), od 1. 1. 2006 00:00:00 do 31. 12. 2015 23:00:00 pa na novi MP Koper (slika 2). Pri izračunu srednjega nivoja morja je bilo ugotovljeno, da se ta spreminja s časom.



Posledično se s časom spreminjajo tudi zgoraj naštetih srednji nivoje morja. Vsi navedeni nivoje morja so bili zato izračunani kot linearne funkcije odgovarjajočih nivojev morja. Končna vrednost za srednji nivo morja pa je bila izračunana za datum 10. 10. 2010. Vrednost srednjega nivoja morja, izračunana za ta datum predstavlja višinski datum (višinski datum Koper) novega Slovenskega višinskega sistema (SVS2010). Ker smo vse srednje nivoje morja izračunali iz istega, 18,6 let trajajočega niza meritev nivoja morja smo dosegli podatkovno in časovno usklajenost izračunanih nivojev morja, ki veljajo za isti datum (10. 10. 2010).

### Primer izračuna srednje nizke vode (SNV) in srednje visoke vode (SVV)

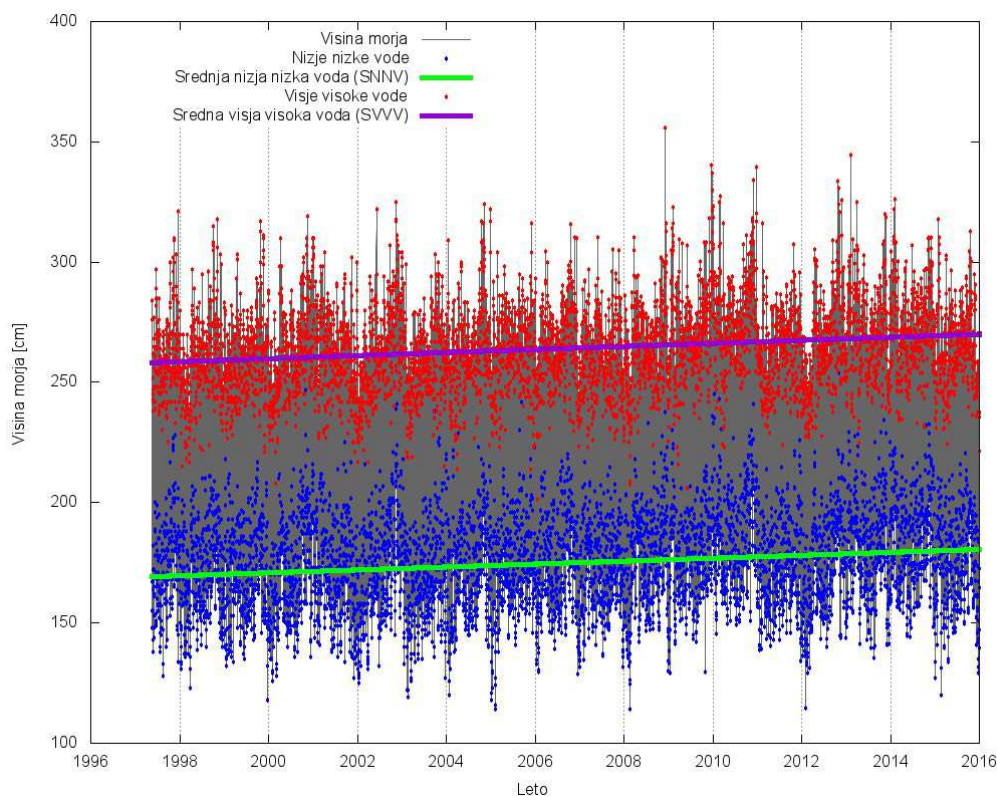
Pri izračunu SNV in SVV smo upoštevali vse nizke vode (SNV) in vse visoke vode (SVV). V podatkih mareografa to pomeni vse ekstremne vrednosti, torej obe visoki vodi in obe nizki vodi v enem plimnem dnevu. Slika 4 prikazuje podatke, ki so bili uporabljeni za izračun SNV in SVV, ter izračunani srednji vrednosti.



Slika 4 - Prikaz podatkov in rezultatov za izračun SNV in SVV

### Primer izračuna srednje nižje nizke vode (SNNV) in srednje višje visoke vode (SVVV)

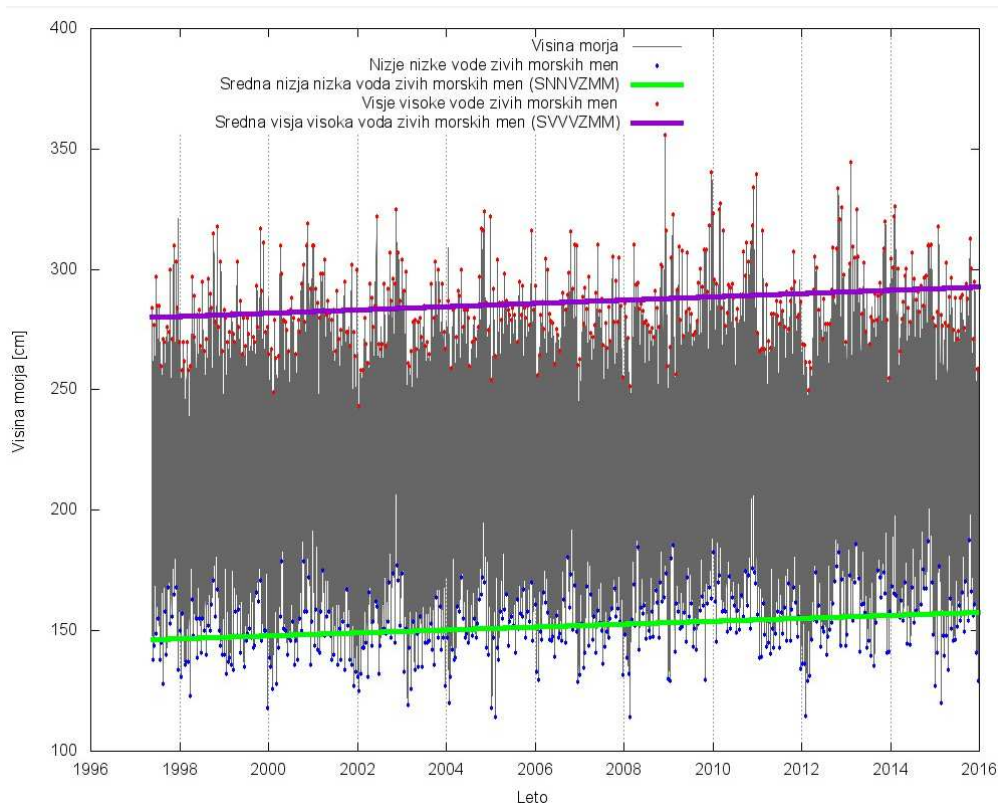
V primeru izračuna srednje nižje nizke vode (SNNV) in srednje višje visoke vode (SVVV) v izračun vzamemo eno samo vrednost za vsak plimni dan, in sicer najnižjo vrednost za izračun SNNV in najvišjo vrednost za izračun SVVV. Slika 5 prikazuje podatke in rezultate za izračunani srednji vrednosti. V primerjavi s sliko 4 je razvidno, da je na sliki 5 le polovica podatkov, ki so prikazani na sliki 4.



Slika 5 - Prikaz podatkov in rezultatov za izračun SNNV in SVVV

### **Določitev srednje nižje nizke vode živih morskih men (SNNVŽMM) in srednje višje visoke vode živih morskih men (SVVVŽMM)**

Za ta izračun uporabimo samo dve vrednosti v celem luninem mesecu, in sicer za čas, ko je Luna polna (ščip) oziroma prazna (mlaj). S slike 6 je razvidno, da je nabor podatkov veliko manjši, ko upoštevamo višje visoke in nižje nizke vode le za čas polne in prazne Lune. Se pa tudi vidi, da so v izračun vzete le ekstremne vrednosti, spodnje za SNNVŽMM in zgornje za SVVVŽMM. Pri tem je pomembna spodnja vrednost (SNNVŽMM), saj predstavlja nov globinski datum za določitev globin morja in kartiranje morskega dna.



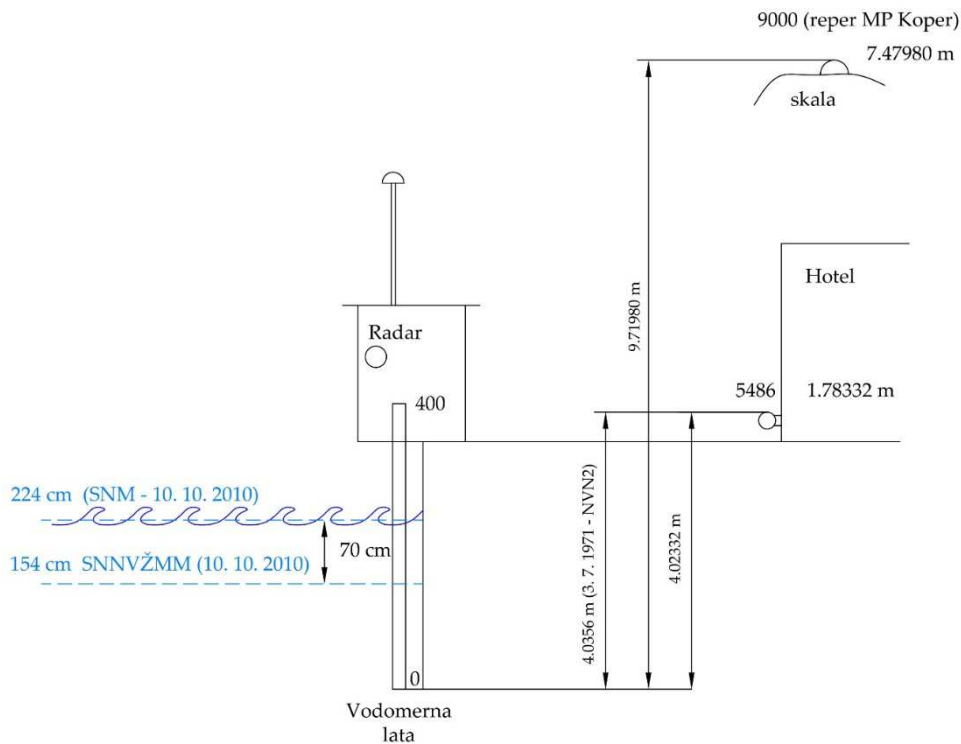
Slika 6 - Prikaz podatkov in rezultatov za izračun SNNVŽMM in SVVVŽMM

### Fizična realizacija državnega višinskega in globinskega datuma

Poznavanje povezave med višinskim in globinskim datumom je zelo pomembno za varno odvijanje pomorskega prometa in povezovanje višin točk na kopnem z globinami na morju (Tamisiea in dr., 2014). Na osnovi mareografskih opazovanj je določen tudi nivo morja, ki predstavlja osnovo za določitev obalne črte. Dolgoletni niz meritev nivoja morja nam omogoča tudi izračun hitrosti dolgoročnega spreminjanja nivoja morja. Poznavanje hitrosti dvigovanja nivoja morja je zelo pomembno za izvajanje protipoplavnih ukrepov in prostorsko načrtovanje na območju obale.

Pri tem pa morata biti višinski datum, ki predstavlja izhodišče za določitev višin na kopnem, in globinski datum, ki predstavlja osnovo za določitev globin na morju, med seboj povezana in usklajena. V našem primeru smo povezanost in usklajenost obeh datumov dosegli s tem, da sta višinski in globinski datum prvič izračunana iz istega niza opazovanj in oba veljata za isti časovni datum 10. 10. 2010.

Fizično predstavlja državni globinski datum oznaka 154 cm, državni višinski datum pa oznaka 224 cm na vodomerni lati MP Koper (slika 7). Nov državni globinski datum, skupaj z modelom geoida na morju, predstavlja Slovenski globinski sistem 2010 (SGS2010).



Slika 7 - Fizična realizacija državnega višinskega in globinskega datuma

## Zaključek

Projekt določitve državnega globinskega referenčnega sistema na morju je dal dva ključna rezultata:

- ploskev novega modela geoida na slovenskem morju in
- novi globinski datum za slovensko morje.

V članku je opisan nov slovenski globinski datum (SNNVŽMM). Določen je na osnovi meritev nivoja morja na MP v Kopru za isti časovni datum kot višinski. V naravi je novi globinski datum realiziran z oznako 154 cm na vodomerni lati mareografa. Dosedanji globinski datum je predstavljen z oznako 152 cm na vodomerni lati mareografa v Kopru in se nanaša na stari jugoslovanski višinski datum Maglaj. Stari globinski hidrografski datum ("hidrografska ničla") je le 2 cm nižje od novega, zato ostanejo vrednosti globin na slovenskih pomorskih kartah iste.

Višinski datum (SNM) je osnova za določanje nadmorskih višin na kopnem. Dosedanji višinski datum Trst je za 15,5 cm nižje kot višinski datum Koper, vendar v hidrografiji ni bil uporabljan. Dosedanji višinski datum za področje hidrografije je bil višinski datum Maglaj, ki predstavlja oznako 215 cm na vodomerni lati MP Koper, kar pomeni, da je za 9 cm nižji od novega.

Razlika med novim višinskim in novim globinskim datumom (razlika SNM – SNNVŽMM) je 70 cm. Razlika med starim višinskim in starim globinskim datumom za potrebe hidrografije pa je 63 cm, kar je zapisano na vseh dosedanjih pomorskih kartah.

S tem projektom je dokončan prvi izračun geoida na slovenskem morju in prva povezana določitev globinskega in višinskega datuma v zgodovini države. Preostane še pravna opredelitev Slovenskega globinskega referenčnega sistema (predlagana kratica SGS2010), ki bi morala biti usklajena z opredelitvijo Slovenskega višinskega sistema (SVS2010), ki je v pristojnosti GURS. Višinski sistem je bil uradno sprejet z »Uredbo o



določitvi parametrov višinskega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema« (Ur.l. 80/18, 7. 12. 2018), medtem ko se uradni sprejem slovenskega globinskega sistema in globinskega datuma predvideva v kratkem.

## Literatura

- Shalowitz, A. L. (1962). Shore and sea boundaries, Washington D.C.: U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Dawidowicz, K. (2014). Sea level changes monitoring using GNSS technology – a review of recent efforts. *Acta Adriatica*, 55/2, 145-162. <http://hrcak.srce.hr/file/199292>, pridobljeno: 17.4.2018.
- Domijan N., Leder N., Čupić S. (2005). Visinski datumi Republike Hrvatske. Treći hrvatski kongres o katastru s međunarodnim sudjelovanjem, 7.-9. 03. 2005, Zagreb /Medak D., Nikolić P., Pribičević B. (ur.). Hrvatsko geodetsko društvo, 2005. str. 345-350.
- Hannah, J. (2010). The Difficulties in Using Tide Gauges to Monitor Long-Term Sea Level hange. [https://www.fig.net/resources/monthly\\_articles/2010/july\\_2010/july\\_2010\\_hannah.pdf](https://www.fig.net/resources/monthly_articles/2010/july_2010/july_2010_hannah.pdf), pridobljeno 10.12.2018.
- Jovanović, B. (1978): Izučavanje metoda mjerenja dubina mora, unapređenje obrade dubina i definiranje obalne linije sa hidrografskog, geodetskog i pomorskog gledišta, Doktorska disertacija, Geodeski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 292 str.
- Karničnik I., Klanjšček M., Radovan D. (2006). Sodobno hidrografsko kartiranje in dokumentiranje slovenskega morja. *Geodetski vestnik* št. 50/1, 37-43.
- Koler B., Stopar B., Pavlovčič P.,P., Kuhar M., Sterle O., Urbančič T., Triglav Č.M., Ritlop K., Karničnik I., Bric V., Radovan D. (2018). Določitev državnega globinskega referenčnega sistema na morju. končno poročilo. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: Geodetski inštitut Slovenije, 148 str., ilustr.
- Stopar B., Koler B., Kogoj D., Ambrožič T., Pavlovčič Prešeren P., Kuhar M., Sterle O., Kregar K., Štebe G., Urbančič T., Goršič J., Mencin A., Berk S., Fabiani N., Mesner N., Caserman M., Bric V., Triglav M., Karničnik I., Janežič M., Oven K. (2016). Implementacija kombinirane geodetske mreže in višinske komponente ESRS v državni geodetski referenčni sistem : končno poročilo. Sklop 3. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: Geodetski inštitut Slovenije, 216 str., ilustr.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, (2000). Tide and Current Glossary, National Ocean Service, Center for Operational Oceanographic Products and Services, Silver Spring, MD.
- Tamisiea, M.E., Hughes, C.W., Williams, S.D.P., Bingley, R.M. (2014). Sea level: measuring the bounding surfaces of the ocean. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 372, 1–26. doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0336>

# Karakterizacija vodnih virov za javno oskrbo s pitno vodo v Ljubljani s pomočjo različnih geokemičnih analiz

Polona Vreča<sup>1</sup>, Tjaša Kanduč<sup>1</sup>, Zdenka Šlejkovec<sup>1</sup>, Stojan Žigon<sup>1</sup>, Klara Nagode<sup>2</sup>, Nika Močnik<sup>3</sup>, Branka Bračič Železnik<sup>4</sup>, Brigita Jamnik<sup>4</sup>, Marjetka Žitnik<sup>4</sup>

## Povzetek

V urbani hidrologiji predstavljajo različni geokemični parametri, tudi naravni izotopi, pomembno orodje, in nudijo upravljavcem vodnih virov dodatne informacije, s pomočjo katerih lahko proučujemo sestavo in dinamiko virov, njihove poti ter interakcije med vodnimi telesi. Da bi poglobili znanje o kroženju vode na območju Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja, pomembnih vodonosnikov za oskrbo mesta Ljubljane s pitno vodo, smo v letu 2018 izvedli prve obsežnejše geokemično-izotopske raziskave na različnih odvzemnih mestih znotraj ljubljanskega vodovodnega sistema, od vodnjakov v črpališčih do pip pri končnih uporabnikih.

**Ključne besede:** javna oskrba s pitno vodo, geokemija, izotopi, kisik, vodik, ogljik

**Key words:** domestic water supply, geochemistry, isotopes, oxygen, hydrogen, carbon

## Uvod

V Sloveniji se 97 % prebivalcev oskrbuje s pitno vodo iz podzemne vode (Janža, 2015), zato je znanje o ranljivosti le-te ključnega pomena za zaščito in upravljanje z vodnimi viri. V Sloveniji je glede na število uporabnikov javnega vodovodnega sistema največje javno podjetje JP Vodovod- Kanalizacija d.o.o. (JP VO-KA), ki oskrbuje s pitno vodo več kot 300.000 prebivalcev Ljubljane. Oskrba s pitno vodo je zagotovljena v Ljubljani že od leta 1890. Glede na zakonodajo in zadnje tehnološke standarde priteče danes voda do uporabnika po modernem vodovodnem cevovodu preko osrednjega vodovodnega sistema, ki se napaja iz peščeno-prodnih vodonosnikov Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. Osrednji vodovodni sistem se napaja s podzemno vodo preko vodnjakov v petih vodarnah (Kleče, Hrastje, Brest, Jarški prod in Šentvid), od koder voda preko zbirnih vodov, vodohranov in ostalih objektov vodovodnega sistema potuje do priključkov končnih uporabnikov. Nekateri predeli Ljubljane se oskrbujejo iz posamezne vodarne, drugi pa iz dveh ali več vodarn, kar je odvisno od porabe vode in tlačnih razmer v sistemu. V Ljubljani priteče pitna voda po vodovodnem omrežju do uporabnikov brez tehničnih postopkov priprave vode in je klorirana le občasno. Pretežni del vode v vodovodnem sistemu (90 %) se načrpa iz vodarn Kleče, Hrastje, Jarški prod in Šentvid na Ljubljanskem polju (Janža, 2015), manjši delež pa predstavlja podzemna voda iz vodarne Brest na Ljubljanskem barju.

Kakovost podzemne vode se že desetletja ščiti z vodovarstvenimi območji, določenimi z uredbami, na katerih je prepovedana oziroma omejena vsaka dejavnost ali poseg v prostor, ki bi ogrožal kakovost ali količino vodnih virov. Ukrepi so namenjeni zmanjševanju nevarnosti in tveganja, ki jih povzročajo sedanje dejavnosti ali tiste, ki se v prostor šele uvajajo. Napajalno zaledje vodarn je kljub temu izpostavljeno pritiskom

<sup>1</sup> Odsek za znanosti o okolju, Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana; polona.vreca@ijs.si

<sup>2</sup> Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

<sup>3</sup> Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani, Večna pot 113, 1000 Ljubljana

<sup>4</sup> JP Vodovod-Kanalizacija d.o.o., Vodovodna cesta 90, 1000 Ljubljana



urbanizacije, industrije, prometa, kmetijstva in starih okoljskih bremen (Janža, 2015). Neznani viri onesnaženja predstavljajo pomemben del teh pritiskov. Dobro kemijsko stanje podzemne vode je ogroženo kljub izvajanju osnovnih ukrepov in obstoju stroge okoljske zakonodaje (Jamnik et al., 2012).

Ključ za razumevanje poslabšanja kakovosti urbanih vodnih virov je poznavanje vpliva urbanizacije na celotno vodno pot. Najpogostejši problemi v urbanih območjih so: 1) nihanja gladine podzemne vode zaradi sprememb v rabi tal in hidrometeoroloških razmer; 2) točkovni ali razpršeni viri onesnaževanja; 3) karakterizacija in kvantifikacija komponent podzemnega dotoka in odtoka; 4) posebne značilnosti toka podzemne vode in transport onesnažil; in 5) povezovanje podatkov za trajnostno upravljanje z urbaniimi vodnimi viri (IAEA F3024, 2018, projektna dokumentacija). Posledično obsega urbana hidrogeologija interdisciplinarno razumevanje vodnih virov, transporta, porazdelitve ter mešanja vode in onesnaževal v odvisnosti od urbane rasti, družbenih sprememb in podnebne spremenljivosti (Grimmeisen et al., 2017).

Stabilni in radioaktivni izotopi ponujajo široko paleto možnosti za proučevanje vodnih virov, poti in interakcij v vodnem krogu in predstavljajo pomembno orodje v izotopski hidrologiji (Aggarwal et al., 2005). Poleg tega predstavljajo izotopi pomembno orodje tudi v urbani hidrogeologiji in lahko zagotovijo pomembne dodatne informacije upravljavcem voda (IAEA, 2002; Ehleringer et al., 2016; Jameel et al., 2016; Grimmeisen et al., 2017; IAEA F3024, 2018).

Kljub uporabnosti naravnih izotopov lahkih elementov (H, O, C in N) v raziskavah pomembnih za upravljanje z vodnimi viri slovenska zakonodaja ne predpisuje monitoringa razmerij stabilnih izotopov v pitni vodi. Zato se v Sloveniji ne izvaja sistematična karakterizacija in redno spremljanje izotopske sestave pitne vode od vodnega vira do končnega uporabnika. V preteklosti so na območju ljubljanskih vodonosnikov potekale številne kratkotrajne izotopske raziskave, s pomočjo katerih so bile določene značilnosti vodonosnikov, kot tudi viri, poti in interakcije vode za javno oskrbo ter pridobljeni podatki za izboljšavo konceptualnega modela ljubljanskega vodonosnika (npr. Andjelov et al., 2005, Cerar in Urbanc, 2013, Mezga et al., 2014, Ogrinc et al., 2008, Pirc et al., 1998, Trček, 2017; Urbanc in Jamnik, 1998; 2007; Vrzel et al., 2016; 2018; Zupanc et al., 2011). Sistematično poteka redno v Ljubljani od leta 1981 le monitoring izotopske sestave kisika in vodika v mesečnih kompozitnih vzorcih padavin (Vreča in Malenšek, 2016).

V letu 2018 smo v okviru IAEA koordiniranega projekta F33024 »Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas« pričeli v sodelovanju z JP VO-KA z izvajanjem projekta »Multi-isotope characterization of water resources for domestic supply in Ljubljana, Slovenia«, katerega glavni namen je oceniti uporabnost različnih geokemičnih parametrov, predvsem razmerij stabilnih izotopov, pri določanju izvora, kroženja in medsebojnih vplivov vode v urbanem okolju in izdelati smernice za nadaljnjo redno uporabo izbranih parametrov pri upravljanju z vodnimi viri za javno oskrbo s pitno vodo na območju Ljubljane. Prva faza raziskav obsega pregled razpoložljive literature in zbiranje podatkov o izotopski sestavi vod na območju ljubljanskih vodonosnikov (Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja). Pregled je pokazal, da so bile opravljene do sedaj izotopske raziskave v posameznih vodnjakih na območju vodarn Kleče, Hrastje, Jarški prod, Šentvid in Brest, v preostalih objektih javnega vodovodnega sistema pa tovrstne raziskave niso bile opravljene. Zato smo v letu 2018 izvedli prvo vzorčenje na različnih odvzemnih mestih znotraj ljubljanskega vodovodnega sistema, od vodnjakov v vodarnah do pip pri končnih uporabnikih, in v zbranih vzorcih določili izotopsko sestavo ter ostale geokemične parametre. V prispevku predstavljamo rezultate dosedanjih raziskav.

## Metodologija

Na osnovi zbranih podatkov in izkušenj JP VO-KA smo določili 97 odvzemnih mest znotraj ljubljanskega vodovodnega sistema, ki ga z rednimi monitoringi za nadzor kakovosti pitne vode spremlja JP VO-KA. Odvzemna mesta zajemajo vodnjake (VD) v petih vodarnah, zbirne vode (ZV), vodohrane (VH), objekte za pripravo vode (PV), pitnike (PIT) ter pipe v javnih objektih (PJ). V načrt vzorčenja smo vključili 9 oskrbovalnih območij in sicer pet glavnih vodarn: Kleče (A), Hrastje (B), Brest (C), Jarški prod (D), Šentvid (E), in štiri območja, ki se oskrbujejo z vodo iz dveh ali treh različnih vodarn: Hrastje/Jarški prod (F), Kleče/Brest (G), Kleče/Hrastje/Jarški prod (H) in Kleče/Hrastje/Brest (I2). Dodatno smo za vzorčenje izbrali 10 odvzemnih mest: pip v javnih in privatnih (PP) objektih, ki niso vključena v redni monitoring JP VO-KA, 3 mesta na reki Savi (R: Brod, Črnuče in Šentjakob) in iztok iz Centralne čistilne naprave (CČN). V načrt vzorčenja je bilo zajetih skupaj 111 odvzemnih mest. Vzorčenje je potekalo v obdobju od 6. 9. 2018 do 29. 11. 2018. Na štirih izbranih odvzemnih mestih vzorčenja ni bilo možno izvesti, na enem mestu pa je bilo vzorčenje izvedeno dvakrat. Septembra je bilo izvedenih 8 vzorčenj (zbranih 35 vzorcev), oktobra 10 vzorčenj (zbranih 42 vzorcev), novembra pa 12 vzorčenj (zbranih 31 vzorcev). Končno število zbranih vzorcev glede na vrsto odvzemnega mesta in oskrbovalno območje je prikazano v Preglednici 1.

Meteorološki podatki o količini padavin in temperaturi zraka ter hidrološki podatki (pretok in temperatura vode reke Save v Šentjakobu pri Ljubljani) so bili pridobljeni iz arhiva Agencije RS za okolje (v nadaljevanju ARSO).

Preglednica 1 - Število zbranih vzorcev glede na vrsto odvzemnega mesta in oskrbovalno območje.

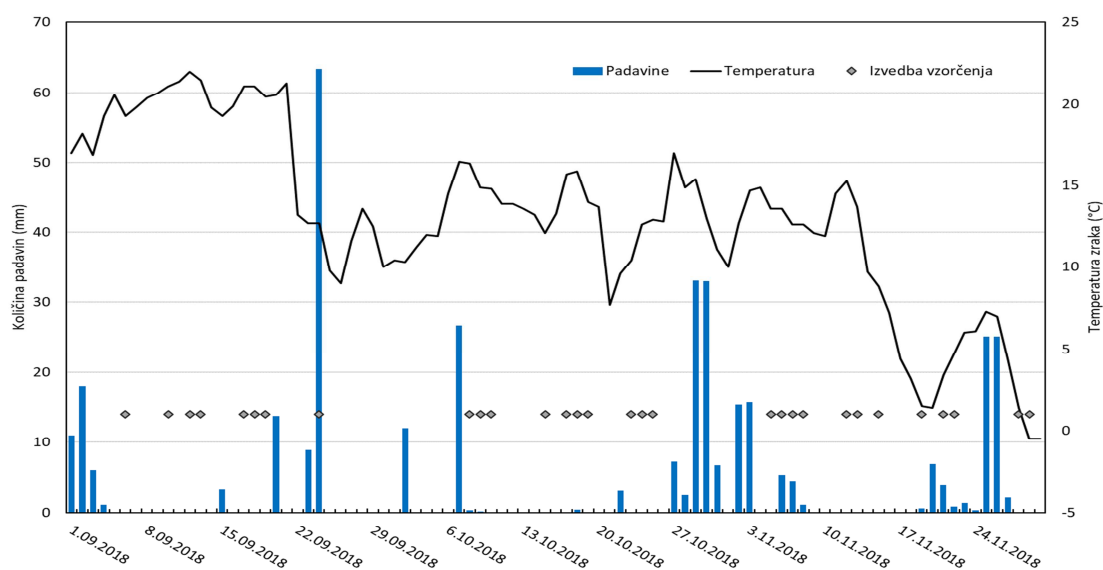
OSKRBOVALNO OBMOČJE		VRSTA ODVZEMNEGA MESTA									
		VD	ZV	VH	PV	PIT	PJ	PP	CČN	R	Vsota
A	Kleče	15	5	5		6	2*	2			35
B	Hrastje	9									9
C	Brest	11	2	2	2	2	1	1			21
D	Jarški prod	3		5			2				10
E	Šentvid	3		6			1	1			11
F	Hrastje/Jarški prod					2	1	1			4
G	Kleče/Brest			1		1	2	1			5
H	Kleče/Hrastje/Jarški prod					1	1	1			3
I2	Kleče/Hrastje/Brest			3		1	1	1			6
	Ostale lokacije								1	3	4
	Vsota	41	7	22	2	13	11	8	1	3	108

\* – vzorčenje opravljeno dvakrat

Vzorčenje na mestih, ki so vključena v redni monitoring za nadzor kakovosti pitne vode (skupno 93 odvzemnih mest) in na iztoku CČN so izvedli sodelavci JP VO-KA, na ostalih mestih (13) pa sodelavci IJS. Ob odvzemu vzorcev je bila in-situ izmerjena temperatura vode (T v °C) in elektroprevodnost (EC v  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). V laboratorijih Odseka za znanosti o okolju, IJS smo v zbranih vzorcih vode določili pH, totalno alkalnost (TA v mM), izotopsko sestavo raztopljenega anorganskega ogljika ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  v ‰), izotopsko sestava kisika ( $\delta^{18}\text{O}$  v ‰) in vodika ( $\delta^2\text{H}$  v ‰) ter koncentracijo celotnega arzena (As v  $\mu\text{g}/\text{L}$ ).

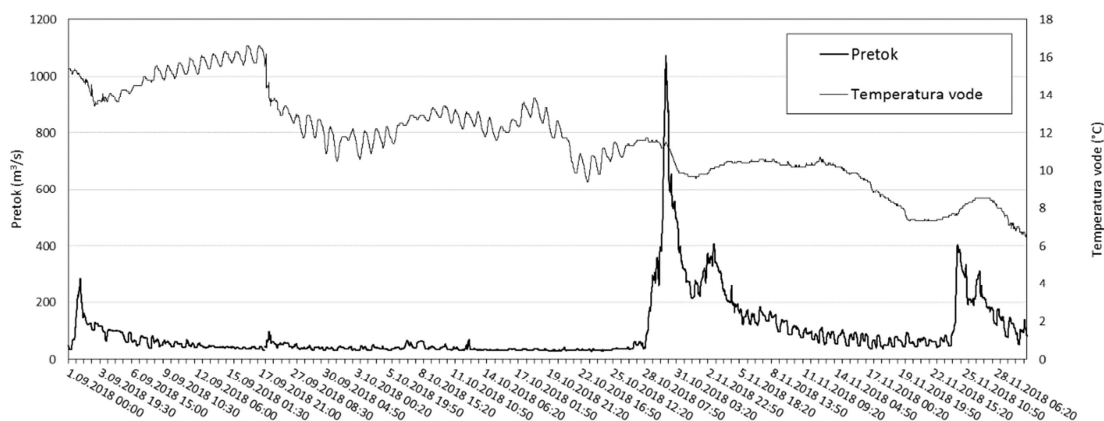
## Rezultati

Prvotni načrt raziskav je predvideval, da bomo večji del vzorčenja opravili v enem mesecu, dejanska izvedba pa je bila zaradi obsežnosti možna v treh mesecih, ko so se znatno spreminjale tudi meteorološke in hidrološke razmere v zaledju obeh vodonosnikov. Poteka dnevne količine padavin in temperature zraka na meteorološki postaji Ljubljana–Bežigrad v času izvedbe raziskav sta prikazana na Sliki 1, pretoka in temperature vode v reki Savi v Šentjakobu pri Ljubljani pa na Sliki 2. Ker v obdobju raziskav na nobenem odvzemnem mestu nismo izvajali bolj pogostega vzorčenja (npr. tedenskega), časovnih sprememb na posamezni lokaciji ne moramo opredeliti.



Slika 1 - Spreminjanje dnevne količine padavin in temperature zraka na meteorološki postaji Ljubljana–Bežigrad (vir: meteo.si, 12.12.2018) ter dnevi izvedenega vzorčenja.

Rezultati dosedanjih raziskav so prikazani v Preglednicah 2 in 3, kjer so zbrane povprečne vrednosti analiziranih parametrov glede na oskrbovalno območje ter glede na vrsto odvzemnega mesta. Rezultati meritev na objektih vodovodnega sistema od vodnjakov do pip glede na oskrbovalno območje so prikazani na grafih odvisnosti med totalno alkalnostjo in elektroprevodnostjo (Slika 3), totalno alkalnostjo in pH (Slika 4), izotopsko sestavo raztopljenega anorganskega ogljika in totalno alkalnostjo (Slika 5) ter izotopsko sestavo vodika in kisika (Slika 6). Glede na totalno alkalnost in elektroprevodnost se od ostalih mest razlikuje območje vodnjakov v Hrastju (Slika 3), glede na izotopsko sestavo vodika in kisika pa oskrbovalno območje Šentvid (Slika 6). V vseh vodnjakih na Ljubljanskem polju so bile določene koncentracije arzena pod 0,1 oziroma pod 0,2 ng/mL, v šestih vodnjakih na območju vodarne Brest pa so bile vrednosti višje in so znašale do 0,53 ng/mL v vodnjaku VD Brest 2 (Preglednica 3). Vse določene koncentracije arzena so zelo nizke in ne presegajo mejnih vrednosti za As v pitni vodi, ki znaša 10 µg/L (Uradni list RS, 2004). Za oskrbovalno območje Brest so značilne tudi višja totalna alkalnost in nižja izotopska sestava raztopljenega anorganskega ogljika (Slika 5).



Slika 2 - Spreminjanje pretoka in temperature vode v reki Savi v Šentjakobu pri Ljubljani (vir: arhiv ARSO, neobdelani podatki, 20.12.2018)

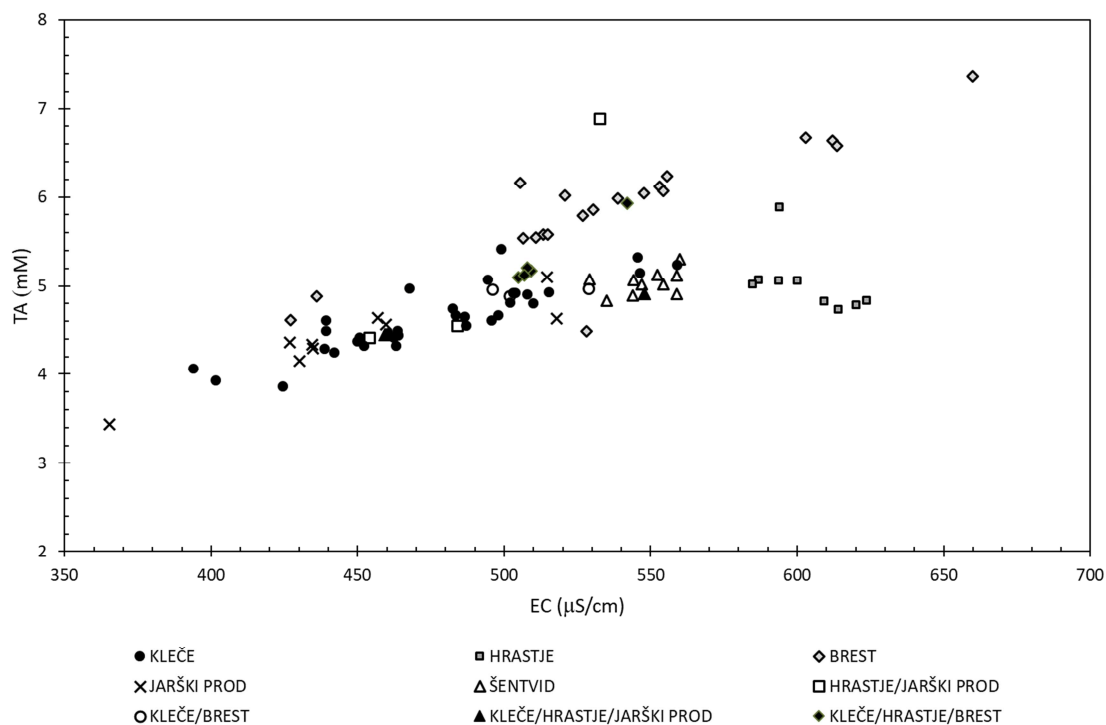
Preglednica 2 - Povprečne vrednosti parametrov, analiziranih glede na oskrbovalno območje, razen pri arzeniu (As\*), kjer je navedena najvišja določena koncentracija celotnega arzena v vodi, n.d. pa pomeni, da so vse določene vrednosti pod mejo detekcije.

Št. predstavlja število analiziranih vzorcev.

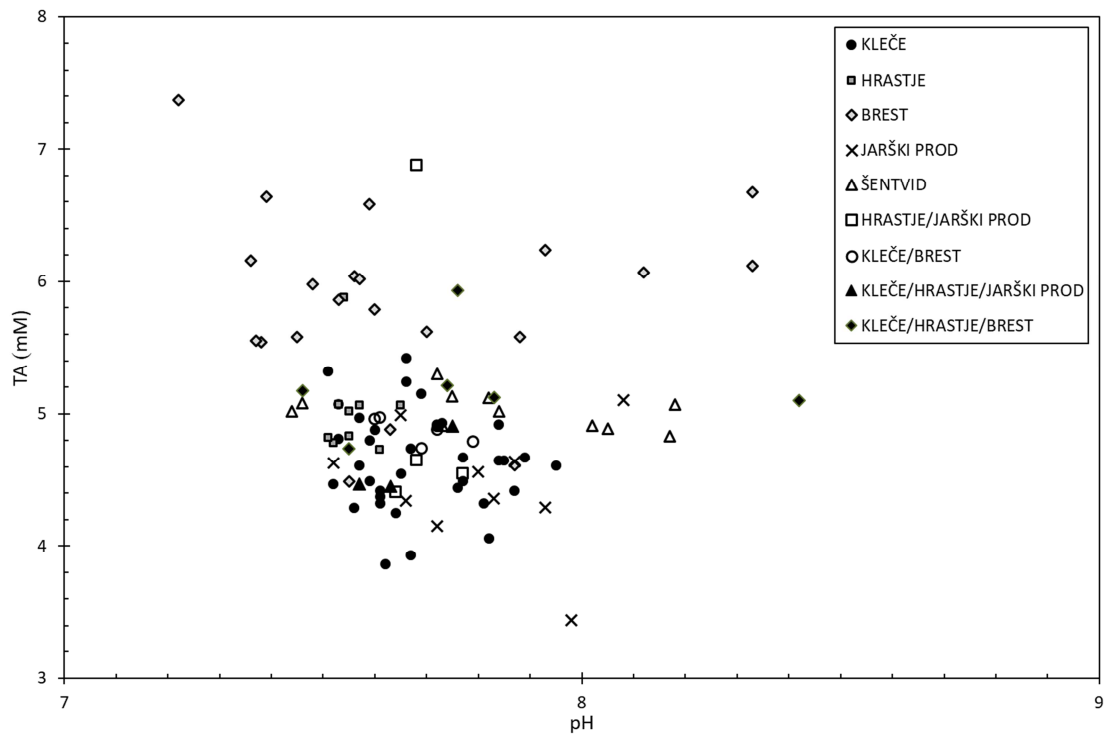
OSKRBOVALNO OBMOČJE	Št.	T	EC	pH	TA	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	As*
		°C	$\mu\text{S}/\text{cm}$		mM	‰	‰	‰	$\mu\text{g}/\text{L}$
Kleče (A)	35	12,3	477	7,7	4,6	-9,17	-61,1	-12,4	0,16
Hrastje (B)	9	12,8	603	7,6	5,0	-8,97	-59,7	-13,2	n.d.
Brest (C)	21	12,2	538	7,7	5,9	-9,27	-61,3	-13,4	0,53
Jarški prod (D)	10	12,7	449	7,8	4,5	-9,26	-61,8	-12,2	0,23
Šentvid (E)	11	13,3	548	7,8	5,0	-8,85	-58,7	-12,7	n.d.
Hrastje/Jarški prod (F)	4	14,4	490	7,7	5,1	-9,16	-61,2	-12,6	n.d.
Kleče/Brest (G)	5	12,9	509	7,7	4,9	-9,15	-61,5	-12,8	n.d.
Kleče/Hrastje/Jarški prod (H)	3	14,5	504	7,7	4,6	-9,13	-60,9	-12,8	n.d.
Kleče/Hrastje/Brest (I2)	6	15,1	514	7,8	5,2	-9,24	-61,4	-13,4	0,39
Vodovodni sistem	104	12,7	511	7,7	5,0	-9,10	-60,9	-12,8	0,53

Preglednica 3 - Povprečne vrednosti parametrov, analiziranih glede na vrsto odvzemnega mesta, razen pri arzenu (As\*), kjer je navedena najvišja določena koncentracija celotnega arzena v vodi, n.d. pa pomeni, da so vse določene vrednosti pod mejo detekcije. Št. – število analiziranih vzorcev; LP – območje Ljubljanskega polja, LB – območje Ljubljanskega barja; ostale okrajšave so pojasnjene v poglavju Metodologija.

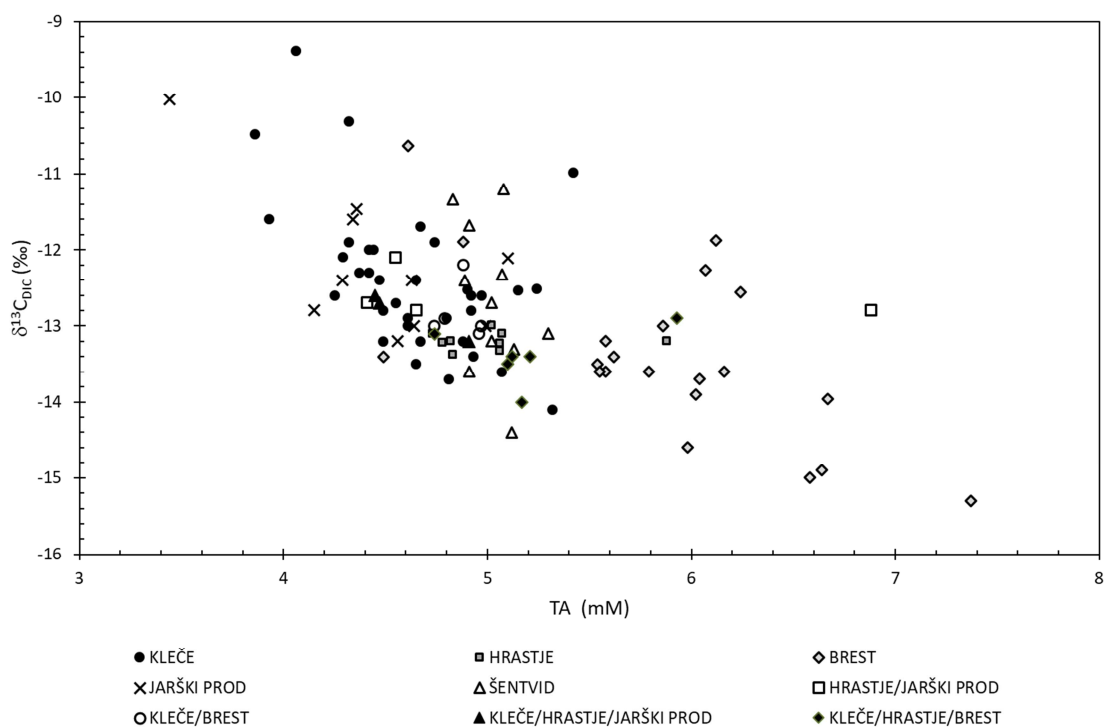
VRSTA ODVZEMNEGA MESTA	Št.	T	EC	pH	TA	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	As*
		°C	$\mu\text{S}/\text{cm}$		mM	‰	‰	‰	$\mu\text{g}/\text{L}$
PIT	13	14,3	513	7,7	5,1	-9,18	-61,3	-13,0	0,19
VD	41	11,8	519	7,7	5,1	-9,14	-60,7	-12,4	0,53
VD (LP)	30	11,9	514	7,7	4,8	-9,10	-60,5	-12,2	n.d.
VD Kleče	15	11,4	470	7,7	4,6	-9,19	-61,2	-12,0	n.d.
VD Hrastje	9	12,8	603	7,6	5,0	-8,97	-59,7	-13,2	n.d.
VD Brest (LB)	11	11,7	533	7,7	5,9	-9,25	-61,0	-13,0	0,53
VD Jarški prod	3	11,5	436	8,0	4,3	-9,28	-61,5	-11,2	n.d.
VD Šentvid	3	11,7	541	7,9	4,9	-8,88	-58,9	-11,4	n.d.
VH	22	13,5	499	7,8	4,9	-9,12	-60,7	-12,9	0,29
PP	8	n.d.	n.d.	7,7	4,8	-9,13	-61,2	-13,0	0,39
PJ	11	13,6	500	7,6	4,9	-9,16	-61,0	-12,9	0,16
ZV	7	12,0	484	7,7	4,8	-9,23	-61,2	-12,8	0,12
CČN, 12.9.2018	1	21,7	1086	9,9	5,91	-8,68	-58,2	-11,9	0,12
R, 12.9.2018	3	15,1	344	8,2	3,3	-9,41	-62,9	-8,3	n.d.



Slika 3 - Odvisnost med totalno alkalnostjo in elektroprevodnostjo glede na oskrbovalno območje.

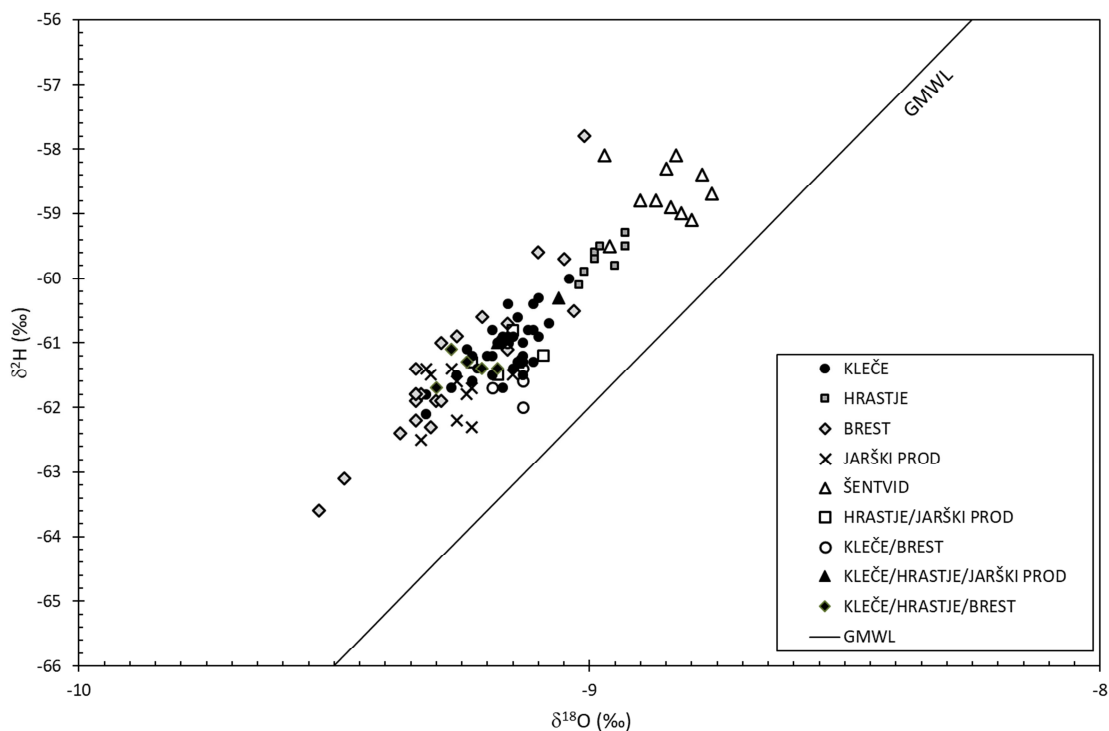


Slika 4 - Odvisnost med totalno alkalnostjo in pH glede na oskrbovalno območje.



Slika 5 - Odvisnost med izotopsko sestavo raztopljenega anorganskega ogljika in totalno alkalnostjo glede na oskrbovalno območje.





Slika 6 - Odvisnost med izotopsko sestavo vodika in kisika glede na oskrbovalno območje.

### Zaključek

V prispevku so predstavljeni rezultati prve obširnejše geokemično-izotopske raziskave ljubljanskega vodovodnega sistema od vodnjakov do pip pri končnih uporabnikih. Prvi rezultati kažejo, da v sistemu prihaja do sprememb, ki jih je potrebno podrobneje raziskati. Glavna pomanjkljivost opravljenih raziskav je povezana z vzorčenjem, ki ga ni možno izvesti v kratkem časovnem obdobju, saj lahko v objekte JP VO-KA vstopa le pooblaščen in usposobljeno osebje. Zbrane rezultate bomo podrobneje proučili, jih primerjali s podatki predhodnih raziskav in na osnovi ugotovitev pripravili smernice za nadaljnje raziskave.

### Zahvala

Raziskave potekajo v okviru IAEA koordiniranega projekta F33024 »Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas« in nacionalnega raziskovalnega programa (P1-0143) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Avtorji se zahvaljujemo sodelavcem JP VO-KA (V. Kramarič Zidar, M. Benda) in IJS (R. Jaćimoviću, D. Kocmanu, I. Lengarju, R. Novaku, J. A. Robinson) za pomoč pri vzorčenju ter M. Kobold iz ARSO za posredovanje hidroloških podatkov in pregled prispevka.

## Literatura

- Aggarwal, P. K., Gat, J. R., Froehlich, K. F. (2005). *Isotopes in the water cycle*. Springer, Dordrecht, 381 p.
- Andjelov, M., Rejec Brancelj, I., Smrekar, A., Kladnik, D., Perko, D. (2005). Podtalnica Ljubljanskega polja. *Geografija Slovenije* 10, Založba ZRC, Ljubljana, 251 p.
- Cerar, S., Urbanc, J. (2013). Carbonate chemistry and isotope characteristics of groundwater of Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje aquifers in Slovenia, *The Scientific World Journal* 2013, 11 p.
- Ehleringer, J. R., Barnette, J. E., Jameel, Y., Tipple, B. J., Bowen, G. J. (2016). Urban water – a new frontier in isotope hydrology, *Isotopes in Environmental and Health Studies* 52, 477-486.
- Grimmeisen, F., Lehmann, M. F., Liesch, T., Goepfert, N., Klinger, J., Zopf J., Goldscheider, N. (2017). Isotopic constraints on water source mixing, network leakage and contamination in an urban groundwater system, *Science of the Total Environment* 583, 202-213.
- IAEA [International Atomic Energy Agency] (2002). *The application of isotope techniques to the assessment of aquifer systems in major urban areas: Final report of a co-ordinated research project 1997–2000*. IAEA, Vienna, 82 p.
- IAEA F3024 (2018). *Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas*. Projektna dokumentacija, 5 p.
- Jameel, Y., Brewer, S., Good, S. P., Tipple, B. J., Ehleringer, J. R. in Bowen, G. J. (2016). Tap water isotope ratios reflect urban water system structure and dynamics across a semiarid metropolitan area, *Water Resources Research* 52, 5891-5910.
- Jamnik, B., Janža, M., Prestor, J. (2012). Project INCOME: developing a comprehensive approach for Slovenian aquifer management, *Water* 21, 49.
- Janža, M. (2015). A decision support system for emergency response to groundwater resource pollution in an urban area (Ljubljana, Slovenia), *Environmental Earth Sciences* 73, 3763-3774.
- Mezga, K., Urbanc, J., Cerar, S. (2014). The isotope altitude effect reflected in groundwater: a case study from Slovenia, *Isotopes in Environmental and Health Studies* 50, 33-51.
- Ogrinc, N., Kanduč, T., Stichler, W., Vreča, P. (2008). Spatial and seasonal variations in  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values in the river Sava in Slovenia, *Journal of Hydrology* 359, 303-312.
- Pirc, S., Brank, M., Mattusch, J., Pezdič, J. (1998). Distribution of carbon and oxygen stable isotopes in stream waters in Slovenia, *RMZ - Materials and Geoenvironment* 45, 163-167.
- Pravilnik o pitni vodi (2004). Uradni list RS, št. 19, 2155.
- Trček, B. (2017). Application of environmental tracers to study the drainage system of the unsaturated zone of the Ljubljansko polje aquifer, *Geologija* 60, 267-277.
- Urbanc, J., Jamnik, B. (1998). Izotopske raziskave podzemne vode Ljubljanskega polja, *Geologija* 41, 355-364.
- Urbanc, J., Jamnik, B. (2007). Porazdelitev in izvor nitratov v podzemni vodi Ljubljanskega polja, *Geologija* 50, 467-475.
- Vrzel, J., Vuković-Gačić, B., Kolarević, S., Gačić, Z., Kračun-Kolarević, M., Kostić, J., Aborgiba, M., Farnleitner, A., Reischer, G., Linke, R., Paunović, M., Ogrinc, N. (2016). Determination of the sources of nitrate and the microbiological sources of pollution in the Sava River Basin, *Science of the Total Environment* 573, 1460-1471.
- Vrzel, J., Solomon, D. K., Blažeka, Ž., Ogrinc, N. (2018). The study of the interactions between groundwater and Sava River water in the Ljubljansko polje aquifer system (Slovenia), *Journal of Hydrology* 556, 384-396.
- Vreča, P., Malenšek, N. (2016). Slovenian Network of Isotopes in Precipitation (SLONIP) - a review of activities in the period 1981-2015, *Geologija* 59, 67-83.
- Zupanc, V., Burnik Šturm, M., Lojen, S., Kacjan-Maršič, N., Adu-Gyamfi, J., Bračič-Železnik, B., Urbanc, J., Pintar, M. (2011). Nitrate leaching under vegetable field above a shallow aquifer in Slovenia, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144, 167-174.



# Spremljanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem

Andrej Mihevc<sup>\*</sup>, Tilen Urbančič<sup>\*\*</sup>

## Povzetek

Večletno spremljanje oblikovanja poligonalnih tal in pred več leti opravljena izmera vertikalnih pomikov nas je vodila do celovitejše obravnave omenjenih pojavov v Skedneni jami. Za potrebe večletnega spremljanja premikov smo si vzpostavili geodetsko mrežo oslonilnih točk, ki so stabilizirane v stene jame. Iz izmer v obdobju devetih mesecev smo zaznali premike kamnov, med izmerama pred in v času zmrzovanja jamskih tal, pa tudi vertikalne premike pretežno ilovnatih tal. Določili smo jih kot razdaljo med oblakoma točk dveh terminskih izmer. Največji zaznani premiki so tudi do 15 cm. Tehnologija terestričnega laserskega skeniranja se izkaže kot primerna za spremljanje tovrstnih sprememb oblike jamskih tal.

**Ključne besede:** jama, temperatura, poligonalna tla, terestrično lasersko skeniranje

**Key words:** cave, temperature, polygonal ground, terrestrial laser scanning

## Uvod

Periglacialni pojavi, ki so značilni za večje geografske širine in večje nadmorske višine, nastanejo tam, kjer zaradi nizkih zimskih temperatur in pomanjkanja snežne odeje seže sezonsko zmrzovanje globoko v tla. Posledica so premikanje tal po vertikali in horizontali ter nastajanje značilnih oblik. Z njimi se pri nas srečujejo arheologi, ki pri izkopavanjih v jamah pogosto naletijo na deformirane plasti sedimentov (Brodar, 1983). Povečini jih pripisujejo hladnim obdobjem pleistocena.

Pri proučevanju jam ob severnem robu Planinskega polja je Gams (1963) raziskal in opisal tudi Skedneno jamo (Slika 1). V jami je med drugim opazil lepo razvita poligonalna tla. Ugotovil je, da so recentna, da so v jami nastala v sedanjih klimatskih pogojih in ne v pleistocenu. O podobnih oblikah v drugih jamah so poročali tudi Mihevc (2009), Zupan Hajna (2009), Obu et al. (2018). V nekaj jamah pa smo sezonske premike tal tudi merili. Na več načinov smo označili kamne na tleh in nato merili razdaljo med njimi in fiksnimi točkami na stenah. Tako so določili letne vertikalne premike med 10 in 20 cm v Skedneni jami, Ulici pečini in v Potolčki zijalki (Mihevc, 2001; 2016), nismo pa mogli izmeriti bočnih premikov.

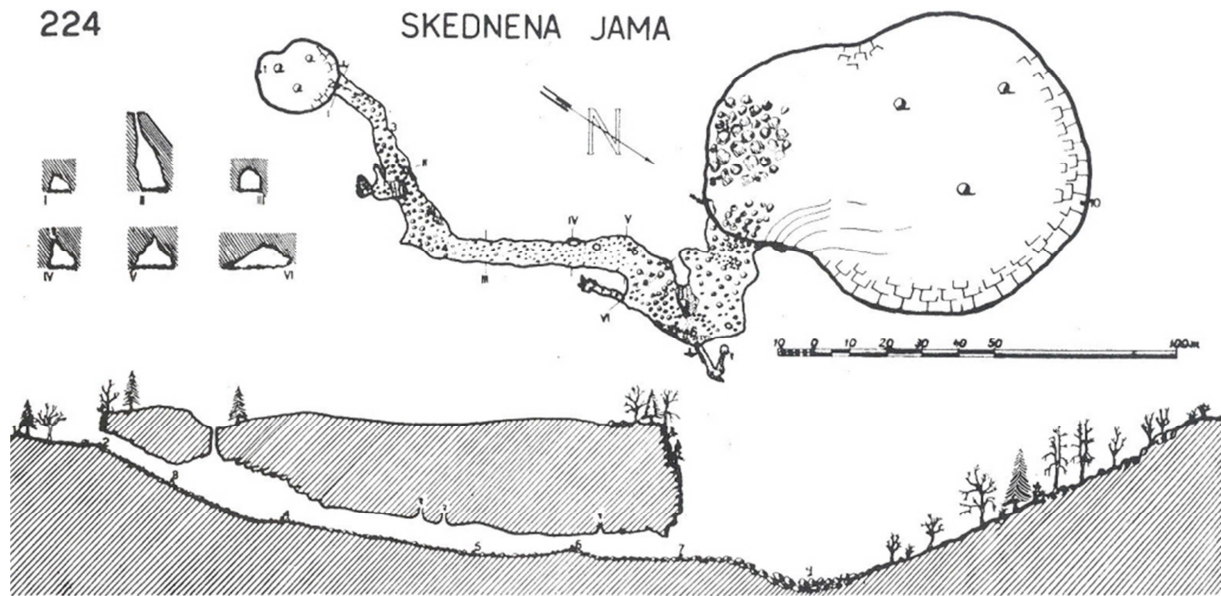
Terestrično lasersko skeniranje (TLS) je metoda množičnega zajema prostorskih podatkov. V primerjavi s klasično geodetso izmero, s TLS v zelo kratkem času določimo koordinate velikemu številu naključnih točk, kjer pa je njihova natančnost manjša. Uporaba metod množičnega zajema prostorskih podatkov v jamah omogoča podrobne podatke o geometriji jame. Natančno lahko določimo obliko in velikost jame, izdelamo različne vzdolžne in prečne profile, virtualne 3D modele ter vizualizacije (Gallay et al., 2015; Yakar et al., 2016).

---

<sup>\*</sup> Inštitut za raziskovanje Krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna

<sup>\*\*</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Za meritve smo izbrali Skedneno jamo, ki je zaradi lahke dostopnosti in izrazitih periglacialnih pojavov za ta namen zelo primerna. Oblake točk TLS bomo uporabili za spremljanje sprememb oblike površja jamskih tal. Tovrstni podatki nam omogočajo celovit vpogled, identificiranje in določitev velikosti deformacij oz. sprememb oblike tal.



Slika 1 - Tloris in iztegnjeni profil Skednene jame (Gams, 1963)

### Skednena jama

Skednena jama je 206 m dolga in 30 m globoka jama. Leži pod uravnanim vrtačastim površjem, ki je na višini okrog 485 m. Jama ima tri vhode. Najnižji je v dnu velike udorne doline, na višini okrog 451 m. Za vhomom se rov razširi v okrog 15 m široko dvorano (Slika 2).



Slika 2 - Vhodna dvorana z značilno uravnanimi ravnimi tlemi – skednjem

Tla dvorane so ravna, kot na skednju, od tod tudi ime jame. Iz dvorane vodi glavni rov proti jugu. Jamska tla se spuste za kak meter, nato pa se rov blago, nato pa strmo vzpne do drugega, nekoliko manjšega vhoda. V tem delu jame je tudi tretji vhod, navpično brezno, ki sega v jamo s površja. Sprva je rov širok okrog 10 m in je povečini do 5 m visok. Poleg tega glavnega rova ima jama še dva majhna stranska rova. Pomemben je rov, ki se pod stropom vhodne dvorane odcepi proti SV. Rov je do 1,5 m širok in do 1,8 m visok ter dolg le 10 m (Slika 1).

Stene glavnega rova so živoskalne, le ponekod so nastali majhni beli in razpokani kapniki, ki kažejo na zimsko zmrzovanje in poletno odlaganje sige. Stene jame so v toplem delu leta vlažne, saj se na njih kondenzira vlaga, v hladni polovici leta pa večinoma suhe. V jami na štirih mestih kaplja prenikajoča voda, pozimi na teh mestih nastanejo veliki ledeni kapniki (Slika 2).

Večji del jamskih tal tvorijo manjše skale in droban grušč pomešan s peskom in jamsko ilovico. V večjem delu jame, v dolžini več kot 100 m, so jamska tla gladka in izravnana v blago nagnjeno površino z naklonom 7-10°. V prečnem prerezu pa so jamska tla vodoravna (Slika 3). V teh uravnanih tleh so oblikovana poligonalna tla .





Slika 3 - Enakomerno in v vzdolžnem smislu blago nagnjena klančina v glavnem rovu

Uravnana jamska tla kažejo recentne drobne krioturbatne strukture, poligonalna tla, kamnite pasove, po velikosti sortirane kamne, kupčke gline in šopi ledenih kristalov. Te oblike so bolj izrazite v bližini dotoka kapljajoče vode (Sliki 4 in 5).

Povprečna letna temperatura v bližnji Planini je  $9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Najhladnejši mesec je januar ( $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in najtoplejši julij ( $+18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Podobne temperature smemo pričakovati tudi na površju nad jamo. Zaradi več vhodov je potek temperatur v jami pod močnim vplivom zunanjega dogajanja. Pozimi v jamo z lahko prodira zunajni zrak, jama se močno ohladi, tla zamrznejo, ledeni kapniki pa se v jami obdržijo pogosto do maja. V toplem delu leta topli zunanji zrak težje vdira v jamo. Temperaturo zraka v jami tedaj določa temperatura obdajajoče kamnine, ki je približno enaka povprečni zunanji temperaturi, to je okrog  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Slika 4 - Poligonalna tla v bolj vodoravnih tleh v vhodni dvorani



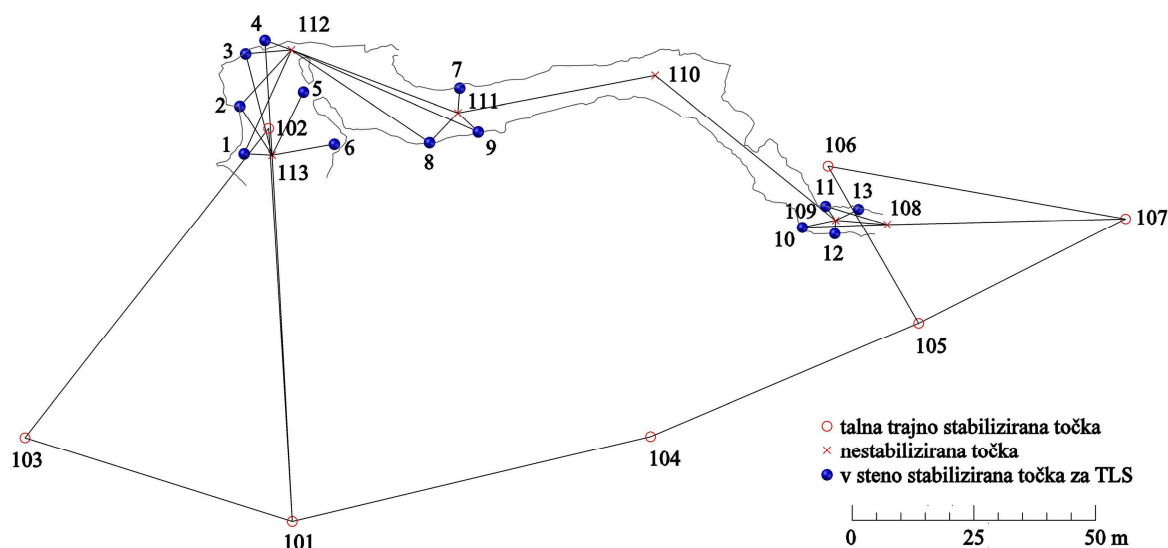
Slika 5 - Na nagnjenih tleh rova so poligoni zaradi polzenja tal razpotegnjeni



## Trestrično lasersko skeniranje Skednene jame

### Geodetska mreža

Koordinatno izhodišče vseh izmer TLS v Skedneni jami predstavlja lokalna geodetska mreža devetnajstih točk. Mreža je zasnovana kot razširjena oblika zaključenega poligona (Slika 6). Na površju je s klini trajno stabiliziranih 7 točk. V jami so točke geodetske mreže stabilizirane v steni s sidrnimi vijaki, skupaj 13 točk (Slika 7). Razporejene so tako, da v geometrijskem smislu zagotavljajo kakovostno georeferenciranje oblakov točk v vsej jami in glede na predvidena mesta postavitve terestričnega laserskega skenerja ter lego območij poligonalnih tal, ki jih imamo namen podrobneje obravnavati. Stabilizacija (v steno) in signalizacija (reflektivne nalepke) točk v jami sta prilagojeni uporabi TLS.



Slika 6 - Geodetska mreža Skednene jame



Slika 7 - Točka geodetske mreže oz. oslonilna točka za TLS: levo sidrni vijak, desno okrogla reflektivna tarča s premerom 5 cm

Geodetsko mrežo smo izmerili 11. 4. 2018. Uporabili smo tahimeter Leica Nova MS50 in precizne prizme Leica GPH1P. Proti vsem vidnim točkam smo na vsakem stojišču horizontalne smeri izmerili v petih girusih. Istočano smo v obeh krožnih legah v petih ponovitvah izmerili tudi zenitne razdalje in poševne dolžine. Za upoštevanje dejanskih pogojev v atmosferi, smo v času izmere na vseh stojiščih izmerili meteorološke parametre. Ker je bila mreža merjena prvič, smo za izračun koordinat točk in njenih natančnosti mrežo izravnali kot prosto.

### Terestrično lasersko skeniranje

Za izvedbo skeniranja smo uporabili skener Riegl VZ-400 (Slika 8). Med 11. 4. 2018 in 5. 1. 2019 smo izvedli 8 izmer (11. 4. 2018, 10. 5. 2018, 11. 6. 2018, 10. 7. 2018, 9. 8. 2018, 10. 9. 2018, 9. 11. 2018 in 5. 1. 2019). Pri skeniranju smo na vseh stojiščih v vseh terminskih izmerah ločljivost skeniranja nastavili na 1 cm/20 m v vertikalni in horizontalni smeri. Za registracijo oblakov točk smo kot vezne točke, poleg točk geodetske mreže, uporabili tudi reflektivne valje s premerom in višino 10 cm, okrogle reflektivne nalepke premera 5 cm in okrogle Leicine tarče za skeniranje velikosti 6". Registriran oblak točk posamezne terminske izmere smo georeferencirali v lokalni koordinatni sistem jame preko točk geodetske mreže.



Slika 8 - Skener Riegl VZ-400 ter oslonilne in vezne točke (reflektivne nalepke, valjčki, tarča Leica 6")

Obdelave oblakov točk smo opravili v programih RiSCAN PRO (filtriranje), Surfer 15 (izdelava digitalnih modelov višin in izračun razlik) in CloudCompare (izračun razdalj med oblaki točk).

## Rezultati

### Geodetska mreža

V mreži, ki je bila izmerjena 11. 4. 2018, smo iz opazovanj izračunali 54 sredin merjenih horizontalnih smeri in prav toliko sredin poševnih dolžin in zenitnih razdalj. Opazovanja proti vsem ostalih vidnim točkam smo opravili na vseh sedmih stalno stabiliziranih točkah na površju ter šestih nestabiliziranih in na stativih prisilno centriranih točkah v jami. Mrežo smo izravnali ločeno za ravninske koordinate in višine. Mrežo smo v obeh primerih izravnali kot prosto (Kuang, 1996). Povprečne natančnosti koordinat točk po izravnavi predstavljamo v Preglednici 1.

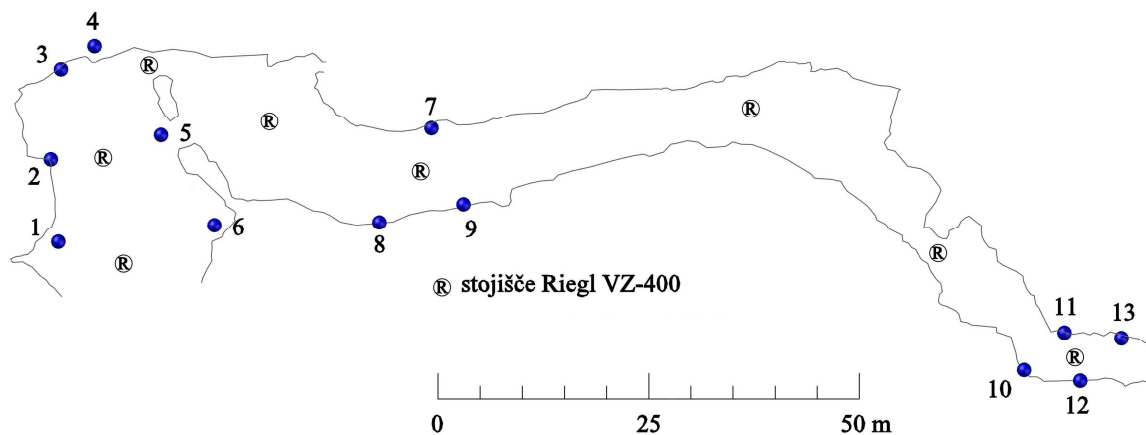
Preglednica 1 - Natančnosti koordinat točk geodetske mreže

	$\bar{\sigma}_y$ [mm]	$\bar{\sigma}_x$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
Vse točke v mreži	1,1	1,0	1,2
13 točk v jami	1,4	1,5	2,0

Natančnosti koordinat točk celotne mreže so odvisne tudi od opazovanj na nalepke, ki smo jih uporabili za signaliziranje točk v stenah jame. Iz Preglednice 1 vidimo, da na povprečne natančnosti posameznih koordinat točk cele mreže koordinate stenskih točk oz. opazovanja na te točke vplivajo med 0,3 in 0,8 mm.

### Obdelava oblakov točk

Za pridobitev kakovostnejših podatkov pri skeniranju in enostavnejši obdelavi oblakov točk v vsaki izmeri smo izberali približno ista mesta postavitve skenerja. Položaje postavitve skenerja prikazujemo na Sliki 9.



Slika 9 - Stojišča skenerja pri skeniranju dne 10. 5. 2018.

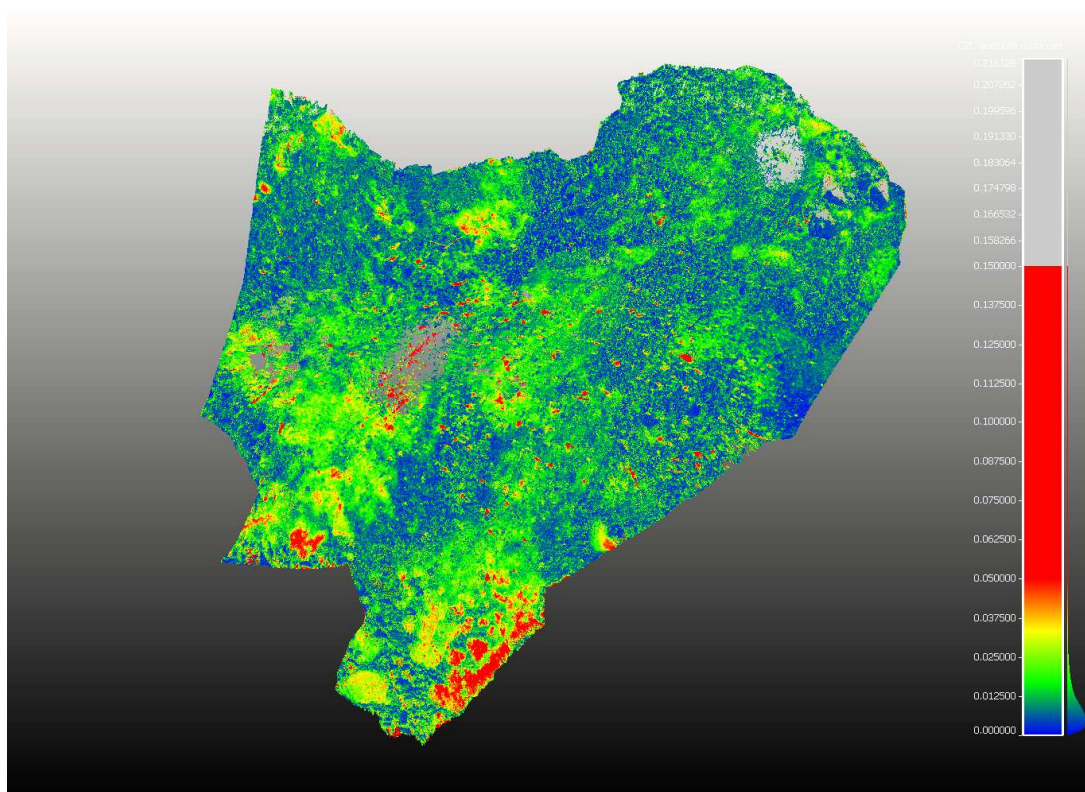
Prve korake obdelav oblakov točk skeniranja z Rieglovim skenerjem smo naredili v programu RiSCAN PRO. Oblak točk skeniranja iz posameznega stojišča je v koordinatnem sistemu takrtne orientacije skenerja. Za registracijo oblakov točk smo uporabili vezne točke. V povprečju smo imeli med dvema zaporednima stojiščema več kot 8 veznih točk. Za georeferenciranje združenega oblaka točk smo uporabili oslonilne točke geodetske mreže (Sliki 6 in 9). Nefiltriran oblak točk je pri skeniranju cele jame vseboval skoraj 350 000 000 točk. Ker je skenirana površina v jami takšne oblike, da oblakov točk z



običajnimi algoritmi ne moremo samodejno klasificirati, smo morali ročno izbrisati vse neželene točke ter točke klasificirati v talne in netalne. Oblake točk smo za nadaljno obdelavo in izračune razlik v obliki površja zaradi neenakomerne gostote filtrirali z Octree filtrom.

Primerjavo oblakov točk smo naredili na dva načina. Najprej s kreiranjem digitalnih modelov višin s programom Surfer. Na podoben način, vendar brez modeliranja ploskev, pa tudi s programom CloudCompare, smo premike določili z izračunom razdalj med oblakoma točk.

Opravljenе izmere so v letu 2018 potekale v času, ko je bila temperatura v jami stalno nad 0 °C. Glede na dejstvo, da na dviganje tal vplivajo ravno temperature pod lediščem, sprememb oblike površja v času med aprilom in novembrom 2018 ni bilo, niti jih nismo pričakovali. Zaznali smo le številne premaknjene večje kamne, za kar razloge najdemo v obiskovalcih jame. Prve spremembe oblike površine smo zaradi zmrzovanja v tleh zaznali šele po obdelavi oblaka točk skeniranja 5. 1. 2019. Ker glede na poznavanje tovrstnih procesov v tako kratkem obdobju ni pričakovati znatnega premika kamnov in drobnega materiala v horizontalnem smislu, smo spremembo oblike poligonalnih tal izračunali le v višinskem smislu. Izračunane razlike med oblakoma jamskih tal v dvorani pri večjem vhodu v jamo (Slika 9, kjer so točke 1-6) za izmeri 9. 11. 2018 in 5. 1. 2019 prikazujemo na Sliki 10. Z rdečo barvo so prikazana vsa območja, kjer je razdalja med oblakoma večja od 5 cm.



Slika 10 - Prikaz razdalj med oblakoma točk skeniranja z Riegl VZ-400 za dneva 9. 11. 2018 in 5. 1. 2019

Ugotovili smo, da so se na območju, ki je na Sliki 10 spodaj in kjer smo pričakovali največje spremembe, območja drobnega ilovnatnega materiala dvignila tudi do 12 cm. V povprečju so se različna manjša območja dvignila za dobrih 5 cm. Večji kamni, ki mejijo na območja ilovnatnega materiala so ostali stabilni, manjši kamni pa so se premaknili za do 2 cm. Manjša območja rdeče barve prikazujejo premaknjene kamne. Dve večji lisi brez



točk sta na območjih, kjer je večji dotok vode s stropa in pri skeniranju 5. 1. 2019 zaradi mokrih tal in ledenih sveč nismo dobili odbojev laserskega žarka.

### **Zaključek**

Vzpostavljena geodetska mreža v Skedneni jami omogoča kakovostno in dolgotrajno spremljanje spreminjanja oblike poligonalnih tal. Stabilnost točk geodetske mreže imamo namen preveriti po enem letu od vzpostavitve. Način stabilizacije točk v jami zagotavlja zanesljivo georeferenciranje oblakov točk skeniranja z najrazličnejšimi instrumenti.

Tehnologija terestričnega laserskega skeniranja je za proučevanje jam ter identificiranje in določitev velikosti sprememb oblike jamskih tal zelo uporabna. Naš namen je bil predvsem zaznavanje premikov jamskih tal zaradi zmrzovanja. Zaporedne meritve tal so pokazale največje premike po vertikali do 15 cm. Bili so tam, kjer je v jamskih tleh več vode, to je v okolici kapljanj oziroma dotoka prenikle vode. Tu so se premiki tudi najprej začeli. Dvigovanje tal je sčasoma zajelo celo jamo. Poleg tega so meritve pokazale tudi naključne premike nekaterih kamnov na tleh. To pa lahko pripišemo obiskovalcem, ki jih premikajo pri hoji po jami.

Največjo težavo pri obdelavi oblakov točk predstavljajo točke v senci kamnov ter točke na stičišču jamskih tal in sten, ki jih je potrebno ročno pregledati in neželene točke odstraniti. Na osnovi pridobljenih izkušenj bomo skrbno načrtovali prihodnje izmere in poskusili določiti maksimalne vrednosti sprememb. Oblika tal v Skedneni jami, splošne lastnosti poligonalnih tal in dolgoletno vizualno in metrično spremljanje sprememb oblike tal nas vodijo k večletnemu spremljanju dogajanja v jami in morebitno določitev premikanja materiala jamskih tal tudi v horizontalnem smislu.

### **Literatura in viri**

- Brodar, S., Brodar, M. (1983). Potočka zijalka: visokoalpska postaja aurignacijskih lovcev = Potočka zijalka : eine hochalpine Aurignacjägerstation, *Dela*, 24, 213.
- Gallay, M., Kanuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J.D., Hofierka, J., Sedlák, V. (2015). Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave. Slovakia, *International Journal of Speleology*, 44, 3: 277–291.
- Gams I. (1963). Logarček. *Acta carsologica*, 3: 7–84.
- Kuang, S., 1996. *Geodetic Network Analysis and Optimal design*, Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan
- Mihevc, A. (2009). Cryoturbation of the sediments at the cave entrances : case studies from Skednena jama, Potočka zijalka and Bestažovca Cave. V: Steguweit, L., (ur.). Hugo Obermaier-Gesellschaft für Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit, 51st Annual Meeting in Ljubljana, 14th-18th of April. [Erlangen]: Hugo Obermaier-Gesellschaft für Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit, 26.
- Mihevc, A. (2001). Jamski fluvialni sedimenti v Snežni jami na Raduhi in v Potočki zijalki. *Geološki zbornik 16 (Povzetki referatov)*. Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 60–63.
- Obu, J., Košutnik, J., Overduin, P., Boike, J., Blatnik, M., Zwieback, S., Gostinčar, P., Mihevc, A. (2018). Sorted patterned ground in a karst cave, Ledenica pod Hrušico, Slovenia. *Permafrost and periglacial processes*, Apr.-June 2018, 29, 2: 121–130.
- Zupan Hajna, N. (2007). Barka depression, a denuded shaft in the area of Snežnik Mountain, Southwest Slovenia. *Journal of caves and karst studies: a publication of the National Speleological Society*, 69, 2: 266–274.
- Yakar, M., Ulvi, A., Toprak, A.S. (2016). The Use of Laser Scanner in Caves, Encountered Problems and Solution Suggestion. *Universal Journal of Geoscience* 4, 4: 81–88.

# Analiza kakovosti operativnega delovanja točke kombinirane geodetske mreže Kog

Katja Oven<sup>1</sup>, Klemen Ritlop<sup>1</sup>, Mihaela Triglav Čekada<sup>1</sup>, Oskar Sterle<sup>2</sup>,  
Bojan Stopar<sup>2</sup>

## Povzetek

V članku je predstavljena metodologija določitve mikrolokacij za vzpostavitev geodetskih točk kombinirane geodetske mreže v Republiki Sloveniji. Opisani so postopki izbora mikrolokacij, ki so bili podprti z mednarodnimi standardi. Predstavljena je gradbena zasnova, projekt za izvedbo in gradnja prve geodetske točke kombinirane geodetske mreže na Kogu. V nadaljevanju so predstavljene ugotovitve o delovanju stalne postaje GNSS točke KGAI kombinirane geodetske mreže na Kogu od začetka njenega delovanja do danes ter rezultati obdelave GNSS opazovanj te postaje za obdobje dveh let.

**Ključne besede:** geodetske točke kombinirane geodetske mreže, lokacije, dokumentacija, gradnja, kakovost, stabilnost, omrežje GNSS

**Keywords:** zero order combined geodetic network, location, documentation, construction, quality, stability, GNSS network

## Uvod

Državna kombinirana geodetska mreža je bila vzpostavljena z namenom povezati najvišje redove obstoječe horizontalne, vertikalne in gravimetrične mreže ter državno omrežje stalnih postaj GNSS. To je geodetska mreža najvišjega reda (tudi geodetska mreža 0. reda), ki služi kot temeljna državna geodetska infrastruktura za stalno spremljanje geodinamičnih procesov na območju Slovenije in ki dolgoročno zagotavlja kakovostno georeferenciranje.

Izgradnja geodetskih točk kombinirane geodetske mreže je bila izvedena v okviru podprojekta »Geodetski referenčni okvir (GRFR)«, ki je bil eden od štirih podprojektov projekta »Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav«. Slednji je bil vključen v Memorandum o soglasju (MoS) za izvajanje Finančnega mehanizma Evropskega gospodarskega prostora za leta 2009–2014 (FM EGP), izvajala ga je Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS) v sodelovanju z Ministrstvom za kmetijstvo in okolje ter s projektoma partnerjema Norveško geodetsko upravo (Statens Kartverk) in Geodetsko upravo Islandije (Landmaelingar Islands).

Projekt izgradnje geodetskih točk kombinirane geodetske mreže je izvajalo več institucij. Ključni za izvedbo sta bili Oddelek za geodezijo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter Geodetski inštitut Slovenije. V projektu so sodelovali še Oddelek za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani z namenom izdelave geoloških študij potencialnih mikrolokacij, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem UL FGG z namenom izdelave gradbene zasnove izgradnje točk kombinirane geodetske mreže ter podjetje TERRAS s.p., ki je izdelalo načrte za izgradnjo in izvajalo

<sup>1</sup> Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

nadzor izgradnje geodetskih točk kombinirane geodetske mreže, medtem ko je bilo podjetje Grča gradnje d.o.o. zadolženo za izvedbo gradbenih del. Projekt izgradnje geodetskih točk kombinirane geodetske mreže je vseskozi potekal v tesnem sodelovanju z Geodetsko upravo Republike Slovenije.

V članku je predstavljena izbira lokacij geodetskih točk kombinirane geodetske mreže, ki je bila podprta s predhodno izvedenimi študijami in tujimi standardi. Sledi predstavitev gradbene zasnove stabilizacije točke kombinirane geodetske mreže na Kogu ter projekta za izvedbo gradnje (PZI). Opisano je delovanje in nadzor kakovosti delovanja ter rezultati obdelave dvoletnih opazovanj GNSS na tej točki.

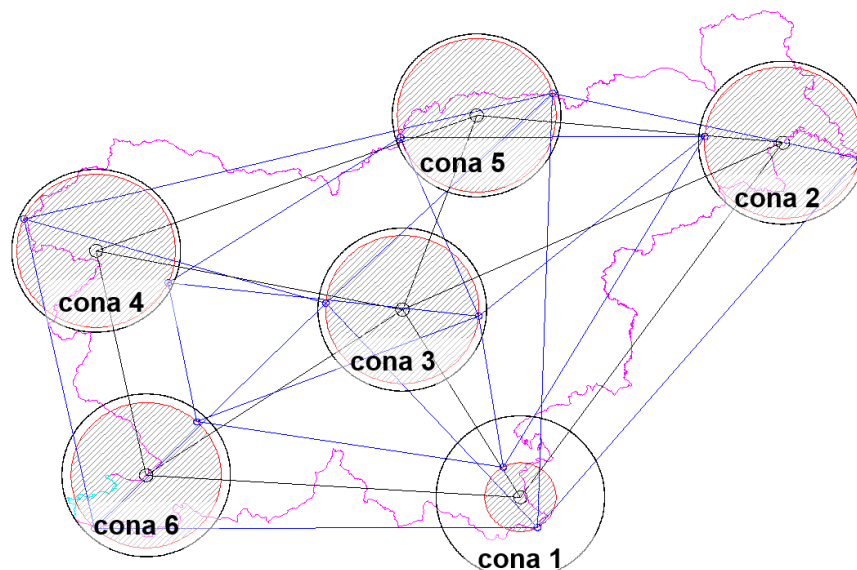
### **Izbira lokacij geodetskih točk kombinirane geodetske mreže**

Izgradnja geodetskih točk kombinirane geodetske mreže je temeljila na rezultatih študije, ki je bila izdelana v okviru Ciljnega raziskovalnega programa »Konkurenčnost Slovenije 2006–2013« v raziskovalnem projektu V2-1096 z naslovom »Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture« (izveden v letih 2010–2012). Rezultati študije so vključevali predlog umestitve geodetske mreže v državni prostor, smernice in priporočila za izbor mikrolokacij, navodila za stabilizacijo točk ter zahteve glede merilne opreme in njene namestitve. Priporočila so se opirala na standarde ECGN (European Combined Geodetic Network), priporočila EUREF (Reference Frame Sub-Commission for Europe) za vključitev v EPN (EUREF Permanent GNSS Network) in priporočila za postaje EUPOS (European Position Determination System).

V okviru priporočil EUREF je bilo potrebno raziskati ali izbrane mikrolokacije ustrezajo smernicam za vzpostavitev kombiniranega omrežja, postaj GNSS, višinskih mrež in gravimetričnih geodetskih mrež. V okviru preverjanj dodatnih meril se je na izbranih mikrolokacijah preverjala še ustreznost reliefa, delež vidnega neba, geološke, hidrološke in tektonske značilnosti, prisotnost motečih objektov in naprav z vidika gravimetričnih opazovanj in opazovanj GNSS, bližina prometne infrastrukture, možnost priključitve na energetska in telekomunikacijska omrežja, možnost izvedbe posega v prostor in izpolnjevanje prostorskih pogojev za gradnjo objekta, bližina naselij in podobno.

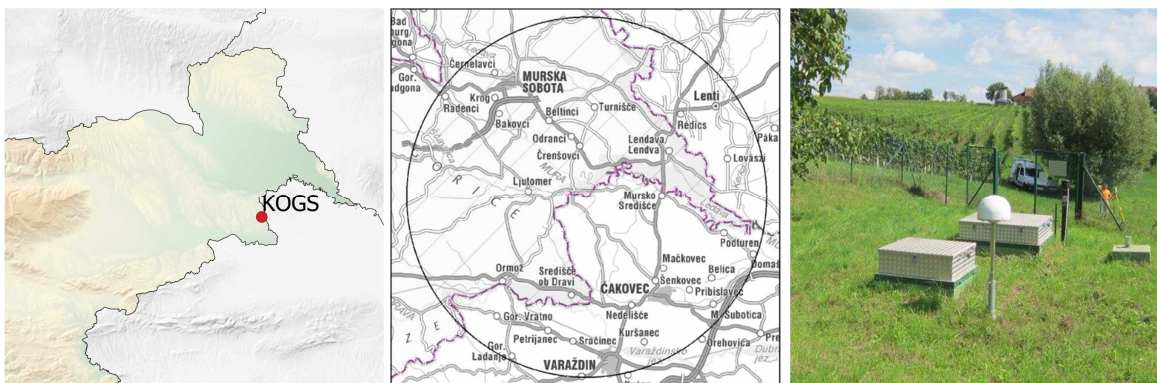
V postopku izbora mikrolokacij so bili raziskani načini temeljenja in stabilizacije obstoječih tujih stalnih postaj GNSS v povezavi z geološkimi značilnostmi tal. Analizirane so bile geološke značilnosti mikrolokacij nekaterih obstoječih stalnih postaj GNSS državnih ali regionalnih omrežij v tujini: FreDNet (Friuli Regional Deformation Network), GREF (Integriertes Geodätisches Referenznetz Deutschlands), izbrane EUREF postaje, APOS (Austrian Positioning Service) in AGNES (Automated GPS Network of Switzerland). Proučena so bila tudi priporočila, zahteve in smernice IGS (International GNSS Service).

Izbora mikrolokacij se je odvijal znotraj šestih makrolokacij oziroma con (slika 1). Prvotno izhodišče projekta je bilo, da za mikrolokacije uporabimo potresne opazovalnice Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), saj so te lokacije izpolnjevale večino zahtev tudi za potrebe vzpostavitve točk kombinirane geodetske mreže. S terenskimi ogledi in poskusnimi meritvami GNSS je bilo proučenih dvanajst od osemindvajsetih ARSO-vih potresnih opazovalnic, izmed katerih jih je bilo pet izbranih za preverbo nadaljnjih kriterijev. Te opazovalnice so bile: BOJS – Bojanci, ZAVS – Zavodnje, GBRS – Gornja Briga, KOGS – Kog in LJU – Ljubljana.



Slika 1 - Prikaz šestih makrolokacij za izbor geodetskih točk kombinirane geodetske mreže (Berk in sod., 2012)

Tekom projekta je bil dogovor za postavitve točke državne kombinirane geodetske mreže dosežen le na potresni opazovalnici KOGS na Kogu (slika 2). Po preverjanju strokovnih geodetskih kriterijev, geoloških značilnosti in po pridobitvi prostorskih pogojev za gradnjo so bile določene še štiri končne mikrolokacije: Prilozje, Areh, Korada in Šentvid pri Stični. Za šesto mikrolokacijo je bila izbrana stalna postaja omrežja SIGNAL v Kopru.



Slika 2 - Lokacija potresne opazovalnice KOGS (levo), makrolokacija severovzhodne točke kombinirane geodetske mreže (sredina, vir: Berk in sod., 2012) in stanje na lokaciji pred izgradnjo točke kombinirane geodetske mreže (desno, vir: GURS)

Eden ključnih pogojev gradnje je bilo ARSO-vo strinjanje glede gostovanja točke kombinirane geodetske mreže na zemljišču potresne opazovalnice KOGS. Z ARSO-m je bil zato sklenjen sporazum o uporabi zemljišča za potrebe vzpostavitve, obratovanja in vzdrževanja državne geodetske točke najvišjega reda. S tem sporazumom smo opredelili točno lokacijo gradnje na zemljišču potresne opazovalnice KOGS, način temeljenja točke kombinirane geodetske mreže s piloti in stabilizacije z betonskim stebrom, na katerem je nameščena antena GNSS in v katerega je vgrajena omarica za dodatno opremo. Opredeljeno je bilo, da bo za delovanje državne geodetske točke izvedena gradnja elektro

in telekomunikacijskega priključka ter da je del zemljišča potresne opazovalnice KOGS v bodoče dan v uporabo za potrebe nemotenega izvajanja vseh vzdrževalnih del in dostopa do merilnega mesta.

### Gradbena zasnova točke kombinirane geodetske mreže na Kogu

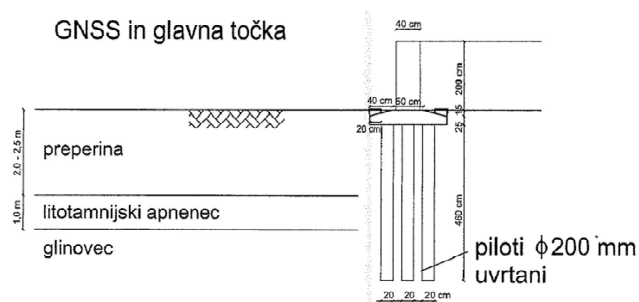
Gradbena zasnova točke kombinirane geodetske mreže na Kogu je upoštevala:

- umestitev točke v severozahodni vogal parcele in na čim večji oddaljenosti od potresne opazovalnice KOGS ,
- obstoječe geološke značilnosti mikrolokacije,
- da je območje potresne opazovalnice Kog ograjeno, zato mora biti antena GNSS nameščena nad vrh zgornjega roba ograde,
- ARSO-v predlog, da se stabilizacija točke izvede na način, ki ne bo poškodoval kamnine v neposredni okolici potresne opazovalnice, torej, da ne sme priti do razpok v kamninski podlagi zaradi udarnega vrтанja v tla, kar je posledično pomenilo uporabo rotacijskega vrтанja v kamnino,
- dogovor z ARSO-m, da je za njih ustrenejši način izvedbe masivnejši armiranobetonski steber kot pa tanjša jeklena konstrukcija.

Geološke značilnosti lokacije potresne opazovalnice na Kogu so ustrezale kriterijem za postavitev točke kombinirane geodetske mreže. Po dobrih 2 m preperine se nahaja 1 m debela plast litotamnijskega apnenca, pod njo plast glinovca, 2–5 m globoko pa se je nahaja trdna podlaga. Opazovalnica KOGS ni locirana na tektonski prelomnici.

V zasnovi stabilizacije točke je bil predlagan 2,0 m visok armirano betonski steber s premerom 40 cm, v katerem je vgrajen vijak za postavitev antene GNSS.

Predlog za temeljenje stebra je moral izpolnjevati ARSO-ve zahteve glede nepoškodovanja kamninske podlage tekom gradnje. Zato je bila predlagana temeljna plošča, podprta s tremi piloti premera 15–20 cm, ki naj od površja tal segajo 5 m globoko (slika 3).



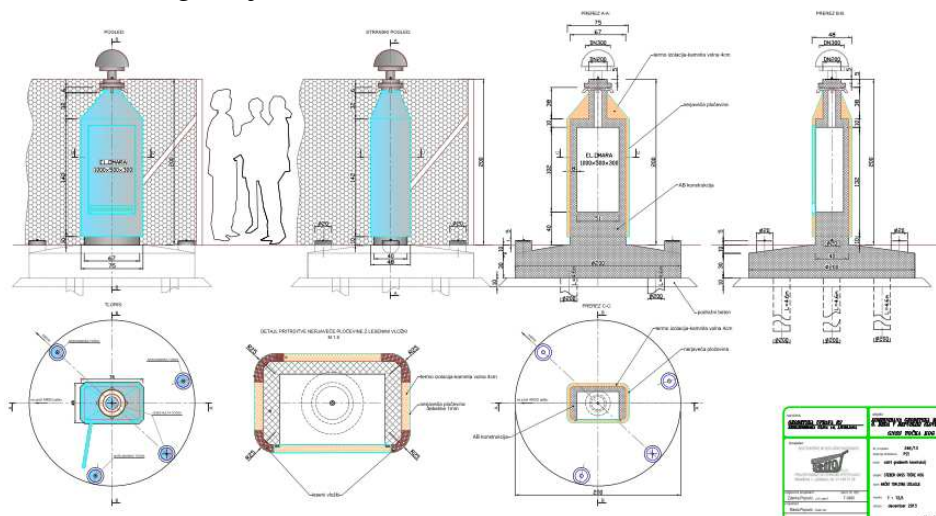
Slika 3 - Piloti s stebrom (vir: Logar in sod., 2013)

### Projekt za izvedbo gradnje in gradnja točke kombinirane geodetske mreže na Kogu

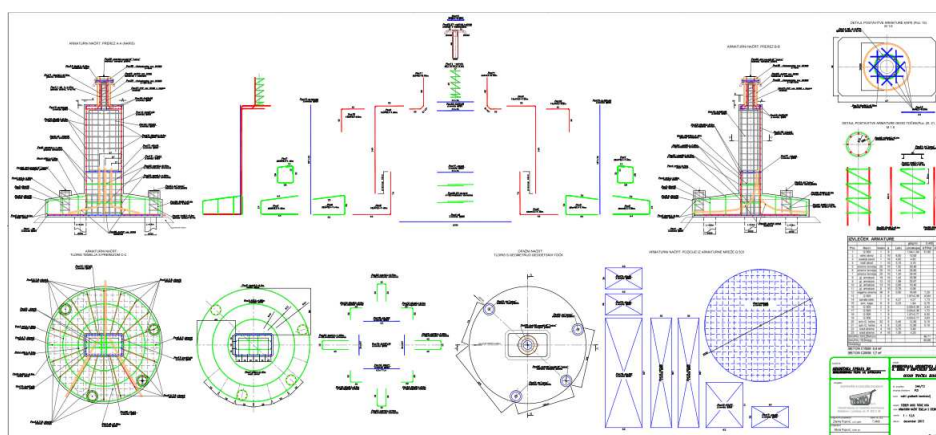
Na osnovi gradbene zasnove, geodetskega načrta, pridobljenih prostorskih pogojev, ustreznih soglasij, sporazuma z upravljalcem potresne opazovalnice, soglasij o uporabi okoliških zemljišč itd. je bil izdelan projekt za izvedbo (PZI), ki je vključeval:

- izdelavo projektne dokumentacije za fizično stabilizacijo točke Kog – načrti gradbenih konstrukcij,
- izdelavo projektne dokumentacije potrebne infrastrukture za točko Kog – načrti električnih inštalacij in električne opreme.

PZI je vseboval načrte s podrobnimi tehničnimi rešitvami in detajli (slika 4 in 5). Iz njih je bila razvidna podrobna sestava konstrukcijskih elementov, dimenzij in materialov, ki so bila uporabljena za gradnjo, načrt inštalacij, načrt toplotne izolacije, opažni načrt itd. S PZI smo si zagotovili predvidljivo, kvalitetno in natančno gradnjo, katera je bila pod stalnim nadzorom nadzornika gradnje.



Slika 4 - Izsek iz projektne dokumentacije (PZI) točke kombinirane geodetske mreže na Kogu (vir: TERRAS s.p.)



Slika 5 - Primer detajlnih načrtov (PZI) točke kombinirane geodetske mreže na Kogu (vir: TERRAS s.p.)

Gradnja točke kombinirane geodetske mreže na Kogu je potekala pod strogim nadzorom in skladno s predvidenimi deli (slika 6). Prva točka kombinirane geodetske mreže je pričela s svojim polnim operativnim delovanjem 1. 1. 2016, ko je bilo operativno vzpostavljeno celotno kombinirano omrežje v naši državi.





Slika 6 - Armatura krožnega temelja in stebra (levo) ter pogled na dokončno zgrajen steber z GNSS točko in tremi nivelmanskimi točkami ter potresno opazovalnico KOGS (vir: GURS)

### Nadzor in delovanje točke kombinirane geodetske mreže na Kogu

Nadzor nad delovanjem stalne postaje GNSS točke kombinirane geodetske mreže KGA1 se izvaja v okviru nadzora kakovosti delovanja celotnega omrežja GNSS kombinirane geodetske mreže. Za izvajanje nadzora je zadolžena Služba za GNSS, ki deluje v okviru državne geodetske službe na Geodetskem inštitutu Slovenije.

Za nadzor delovanja omrežja GNSS kombinirane geodetske mreže se uporablja programski paket *Alberding GNSS Status Software*, ki je dopolnjen z modulom *Alberding PPP Monitoring*. Osnovni modul *Alberding GNSS Status Software* vseskozi preverja povezanost stalnih postaj omrežja 0. reda z glavnim strežnikom omrežja 0. reda in kakovost opazovanj. Za nadzor kakovosti opazovanj so skrbnikom omrežja za vsako postajo v realnem času na voljo številni indikatorji kakovosti: dosegljivost postaje in latenca podatkov, število vidnih satelitov, število možnih in dejansko izvedenih opazovanj, razmerje med signalom in šumom, število izpadov signala, velikost večpotja ter vrednosti faktorjev HDOP, VDOP in PDOP. Modul *Alberding PPP Monitoring* pa je namenjen nadzoru položaja stalnih postaj omrežja 0. reda. Vsak dan se za posamezno postajo na podlagi celotnega niza opazovanj preteklega dne izračunajo koordinate po metodi PPP in primerjajo z referenčnimi koordinatami. V primeru, če vrednost določenega indikatorja preseže predhodno nastavljene mejne vrednosti oziroma, če je odstopanje dnevne rešitve od referenčnih koordinat preveliko, se o težavi obvesti skrbnike sistema, ki nato ukrepajo napaki oziroma težavi primerno.

Postaja KGA1 operativno deluje tri leta (2016, 2017 in 2018). V tem obdobju so bile zabeležene sledeče težave z delovanjem postaje:

- Devetkrat je postaja izgubila mrežno povezavo z glavnim strežnikom omrežja 0. reda. V osmih primerih je bil vzrok za izgubo povezave nepravilno delovanje mrežne opreme (modem ali usmerjevalnik), enkrat pa je bila postaja nedosegljiva zaradi vzdrževalnih del na telekomunikacijskem omrežju. V primeru težav z mrežno povezavo se napako javi Telekomu Slovenije, ki napako odpravi ali preko oddaljenega dostopa ali neposredno na lokaciji postaje.
- Enkrat je prišlo do okvare senzorja nagiba, ki ga je bilo potrebno zamenjati.
- Enkrat je sprejemnik GNSS prenehal sprejemati signale vseh satelitov. Težavo je rešil ponovni zagon sprejemnika, po katerem je sprejemnik ponovno začel pravilno delovati.

V naslednjem poglavju je na podlagi obdelave opazovanj GNSS podana ocena kakovosti stabilizacije točke KGA1 in kakovosti samih opazovanj. Zanesljivost delovanja postaje pa lahko ocenimo na podlagi popolnosti arhiva opazovanj. Opazovanja se v realnem času prenašajo in shranjujejo v arhiv opazovanj kombinirane geodetske mreže. Dodatno pa se opazovanja shranjujejo tudi na samem sprejemniku GNSS, na katerem se hranijo 30 dni. Tako lahko v primeru izgube povezave postaje z glavnim strežnikom opazovanja naknadno prenesemo s sprejemnika in dopolnimo arhiv. V arhiv se shranjujejo dnevne datoteke v formatu RINEX z intervalom registracije 30 sekund. V eni dnevni datoteki je torej shranjenih 2880 epoh opazovanj. Za posamezno leto je popolnost arhiva podana v preglednici 1.

Preglednica 1 - Popolnost arhiva opazovanj GNSS za točko KGA1

leto	število možnih epoh v letu	število shranjenih epoh v letu	odstotek popolnosti	število manjkajočih epoh v letu
2016	1.054.080	1.054.036	99,9958 %	44
2017	1.051.200	1.051.199	99,9999 %	1
2018	1.051.200	1.048.747	99,7667 %	2.453

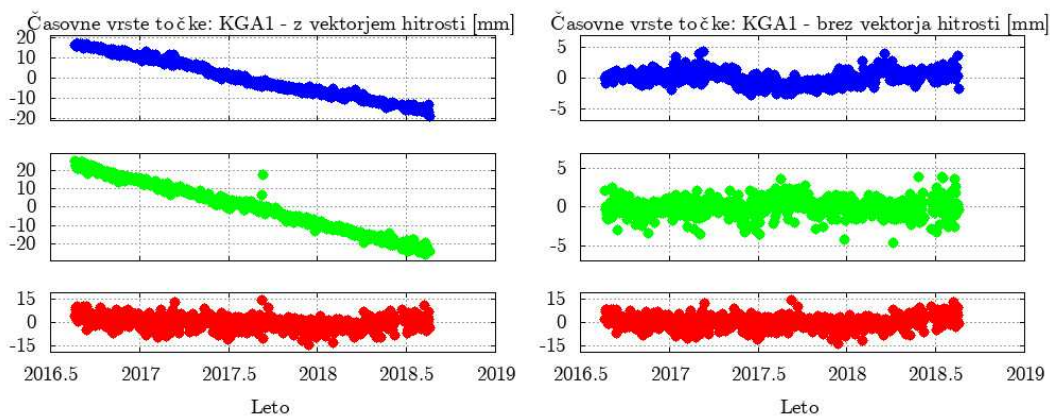
Glede na majhno število zabeleženih težav v treh letih delovanja postaje KGA1 in skoraj popoln arhiv opazovanj GNSS za to obdobje lahko zaključimo, da oprema na postaji KGA1 ne deluje le kakovostno, temveč tudi izredno zanesljivo.

### Obdelava opazovanj GNSS na točki kombinirane geodetske mreže na Kogu

Stalno delujoča postaja GNSS točke 0. reda KGA1 je, tako kot vse postaje GNSS mreže 0. reda, vključena v obdelavo opazovanj GNSS stalno delujočih postaj GNSS na območju Slovenije na dnevni osnovi. Obdelava opazovanj poteka v okviru naloge »Analitični center mreže 0. reda in njen vpliv na geodetski referenčni sistem« (Fabiani in sod., 2018), kjer je cilj obdelava opazovanj GNSS vseh stalno delujočih postaj GNSS na območju Slovenije in njene okolice. Ocenjene koordinate vseh postaj GNSS na dnevni osnovi za daljše časovno obdobje bodo pomembne za ugotovitve glede ustreznosti vzpostavitve in dolgoročne stabilnosti državnega koordinatnega sistema, kar je ključen element za zagotavljanje kakovosti vseh vrst prostorskih podatkov.

Vsa opazovanja GNSS se obdelajo na dva načina, v relativnem načinu s programskim paketom *Bernese, GNSS Software, Version 5.2* (Dach in sod., 2015) in v absolutnem načinu po metodi PPP, s programskim paketom *gPPP*, izdelan na Oddelku za geodezijo UL FG (Sterle in sod., 2014). Postopek in lastnosti obdelave na oba načina pa sta podrobno opisana v Sterle (2015). V obeh primerih se obdelajo tako GPS kot tudi GLONASS opazovanja, po postopku za obdelavo opazovanj GNSS z najvišjo kakovostjo, za pridobitev koordinat postaj z najvišjo točnostjo in zanesljivostjo.

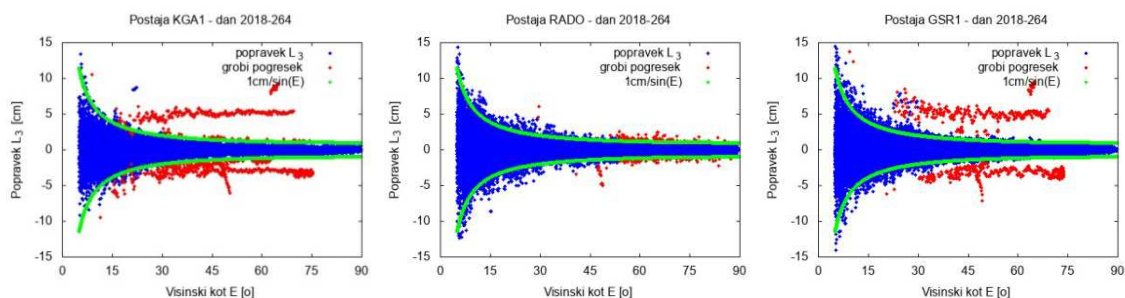
Za stalno delujočo postajo GNSS točke 0. reda KGA1 imamo tako na voljo ocenjene koordinate za vsak dan od sredine leta 2016 do sredine leta 2018. Pridobljene časovne vrste koordinat predstavlja slika 7. Obe sliki časovnih vrst prikazujeta časovne vrste za koordinate N, E in h, kjer leva prikazuje časovne vrste s prisotno globalno geodinamiko (vektor hitrosti ni odstranjen), medtem ko desna slika prikazuje časovne vrste, ko vektor hitrosti točke odstranimo.



Slika 7 - Časovne vrste koordinat stalno delujoče postaje točke 0. reda KGA1, predstavljene v smereh N, E in h, pred odstranitvijo vektorja hitrosti točke (levo) in po odstranitvi vektorja hitrosti točke (desno)

Razpršenost (standardni odklon) koordinat na desni sliki je 1,1 mm, 1,2 mm in 3,7 mm za koordinate N, E in h, kar kaže na kakovostno stabilizacijo točke ter stabilno in zanesljivo delovanje instrumentarija GNSS. V grafični predstavitvi časovne vrste koordinate N je razvidna trenutno še nepojasnjena prisotnost sistematičnega pogreška velikosti od enega do dveh milimetrov.

Samo kakovost opazovanj GNSS oziroma kakovost delovanja instrumentarija GNSS lahko preverimo tudi z analizo popravkov opazovanj GNSS, ki jih prikazuje slika 8.



Slika 8 - Prikaz velikosti popravkov linearne kombinacije faznih opazovanj  $L_3$  v odvisnosti od višinskega kota za tri stalno delujoče postaje GNSS: KGA1, RADO in GSR1 za 264-ti dan leta 2018 (21. 9. 2018)

Slika 8 prikazuje velikost popravka linearne kombinacije opazovanj  $L_3$  v odvisnosti od višinskega kota pri metodi PPP. Z modrimi pikami so prikazani popravki  $L_3$ , z rdečimi pikami popravki  $L_3$ , ki so bili evidentirani kot grobi pogreški, z zeleno črto pa teoretično določena odvisnost natančnosti opazovanj GNSS od višinskega kota. Velikost popravkov je pri večjih vrednostih višinskega kota manjša, na nivoju okoli centimetra ali manj, medtem ko s padanjem višinskega kota popravki naraščajo, tudi do velikosti nekaj decimetrov pri zelo nizkih višinskih kotih. Vzrok je predvsem v vplivu atmosfere (troposfera in ionosfera) in v večpotju signala. Iz slike je razvidno, da je razpršenost modrih pik malenkost manjša pri postaji KGA1, kot pri ostalih dveh, kar gre verjetno pripisati kakovostni stabilizaciji in predvsem ustrezni lokaciji postaje. Obe postaji omrežja SIGNAL (GSR1 in RADO), sta stabilizirani na strehah stavb, kjer se predpostavlja, da je večpotje večje kot v primeru postaje KGA1, ki je stabilizirana na betonskem stebri na tleh.

Imata pa postaji RADO in GSR1 prednost v tem, da nimata ovir v okolici, kot je to pri postaji KGA1 (vegetacija v bližini). To se pri postaji KGA1 vidi v manjšem številu opazovanj pri nizkih višinskih kotih. Zanimiva je tudi enaka oblika prisotnosti grobih pogreškov pri postajah GSR1 in KGA1, kar pa se ne pojavi pri postaji RADO. Vzrok gre iskati v vrsti instrumentarija, saj sta postaji GSR1 in KGA1 opremljeni z instrumentarijem podjetja Leica, medtem ko je na postaji RADO nameščen instrumentarij podjetja Trimble.

Rezultati obdelave opazovanj GNSS na stalno delujoči postaji GNSS točke 0. reda KGA1 kažejo na visoko kakovostno geodetsko točko. Ponovljivost koordinat (slika 7) kaže na milimetrsko natančnost določitve horizontalnih koordinat točke in nekaj milimetrsko natančnost določitve višinske komponente točke. Na osnovi teh rezultatov lahko sklepamo, da je geodetska točka KGA1 z vseh vidikov kakovostno stabilizirana, kar pomeni, da bo v prihodnje predstavljala eno izmed ključnih točk pri vzpostavitvi in vzdrževanju koordinatne osnove Slovenije z najvišjo stopnjo zanesljivosti. Zaradi stabilnih časovnih vrst koordinat bo spadala v ožji krog najbolj zanesljivih geodetskih točk za geotektonske analize območja Slovenije. Kar se tiče analize kakovosti izvedenih opazovanj GNSS (slika 8) lahko tudi rečemo, da so opazovanja GNSS na postaji KGA1 pridobljena kakovostno. Predvsem je tu poudarek na lokaciji, ki zagotavlja visoko stopnjo ustreznosti s stališča izmere GNSS, kar pomeni nizko stopnjo prisotnosti sistematičnih in grobih pogreškov v opazovanjih (predvsem večpotje). Edino, kar bomo morali v prihodnje paziti je, da se okolica točke ne zaraste do te mere, da bi vplivala na opazovanja GNSS.

## **Zaključek**

Vzpostavitev državne kombinirane geodetske mreže predstavlja materializacijo državnega koordinatnega sistema na najvišjem nivoju. Gre za ključno komponento državne prostorske infrastrukture, ki zagotavlja dolgoročni temelj za potrebe georeferenciranja v Republiki Sloveniji.

V prispevku na kratko predstavljamo izgradnjo prve geodetske točke kombinirane geodetske mreže na Kogu. Po uspešnem zaključku gradnje je od 1. 1. 2016 omrežje postaj GNSS v okviru državne kombinirane geodetske mreže polno operativno in pod stalnim nadzorom Službe za GNSS na Geodetskem inštitutu Slovenije, na Oddelku za geodezijo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani pa poteka dnevna obdelava opazovanj GNSS stalno delujočih postaj GNSS na območju Slovenije, kamor so vključene tudi vse postaje GNSS državne kombinirane geodetske mreže.

Časovna vrsta dnevno ocenjenih koordinat stalno delujoče postaje GNSS točke 0. reda KGA1 kaže na kakovostno stabilizacijo točke, visoko kakovost opazovanj in stabilno delovanje instrumentarija GNSS ter na ustrezno izbrano lokacijo postaje. Majhno število težav z delovanjem postaje in visoka stopnja popolnosti arhiva opazovanj GNSS za celotno obdobje delovanja postaje pa kažejo, da postaja ne deluje samo kakovostno, temveč tudi izredno zanesljivo, in tako od pričetka njenega delovanja zagotavlja praktično neprekinjen niz opazovanj GNSS najvišje kakovosti.

## **Zahvala**

Pri izvedbi projekta izgradnje točk kombinirane geodetske mreže so sodelovali kolegi: Sandi Berk, mag. Klemen Medved, Žarko Komadina in mag. Jurij Režek z Geodetske uprave Republike Slovenije; Niko Fabiani in mag. Vasja Bric z Geodetskega inštituta Slovenije; doc. dr. Božo Koler, doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren in izr. prof. dr. Janko

Logar s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, izr. prof. dr. Marko Vrabec z Naravostlovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, mag. Mladen Živčič z Agencije Republike Slovenije za okolje ter Zdenka Popović in Nikola Popović iz podjetja Terras s.p.

Predstavljeno delo v članku je bilo opravljeno v okviru podprojekta »Geodetski referenčni okvir (GRFR)«, ki je bil eden od štirih podprojektov projekta »Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav«, kateri je bil vključen v Memorandum o soglasju (MoS) za izvajanje Finančnega mehanizma Evropskega gospodarskega prostora za leta 2009–2014 (FM EGP). Nekatera dela so bila opravljena še v okviru ciljnih raziskovalnih projektov V2-1096 »Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture« in V2-1729 »Povečanje zanesljivosti javnih omrežij GNSS SIGNAL in 0. red«, ki sta bila izvedena v okviru različnih Ciljnih raziskovalnih programov. Sofinanciranje projektov je bilo zagotovljeno s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) in Geodetske uprave Republike Slovenije. Nekaj aktivnosti je bilo izvedenih tudi s finančno podporo ARRS v okviru raziskovalnega programa P2-0227 »Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije«.

## Literatura

- Berk, S., Bajec, K., Fajdiga, D., Bitenc, M., Hari, J., Klanjšček, M., Triglav Čekada, M., Žagar, T., Radovan, D., Ambrožič, T., Koler, B., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Savšek, S., Sterle, O., Stopar, B. (2012). Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture. Končno poročilo. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, 149 str.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomski inštitut Univerze v Bernu, Bern, Švica.  
<http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf> (pridobljeno 11. 1. 2019)
- Fabiani, N., Ritlop, K., Oven, K., Sterle, O., Stopar, B. (2018). Služba za GNSS 2018: končni elaborat, 2000 str.
- Logar J., Robas B.. Gradbena zasnova stabilizacije točk kombinirane geodetske mreže 0. reda; Kog in Prilozje, 10 str.
- Sterle, O. 2015. Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska disertacija, UL FGG, Ljubljana.
- Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. 2014. Metoda PPP pri statični izmeri GNSS. Geodetski vestnik, 58 (3), str. 466–481. doi: [10.15292/geodetski-vestnik.2014.03.466-481](https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.03.466-481)
- Stopar, B., Koler, B., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Štebe, G., Urbančič, T., Oven, K., Janežič, M., Bajec, K., Berk, S., Bric, V. (2013). Izdelava projektne dokumentacije za točke kombinirane mreže 0. reda. Projekt 2433-13-0003. Elaborat: 1. faza, 2. faza. Ljubljana, 166 str.
- Stopar, B., Koler, B., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Štebe, G., Urbančič, T., Oven, K., Janežič, M., Bajec, K., Bric, V., Berk, S. (2014a). Izdelava projektne dokumentacije za točke kombinirane mreže 0. reda. Projekt 2433-13-0003. Elaborat: 3. faza: točka Šentvid pri Stični. Ljubljana, 46 str.
- Stopar, B., Koler, B., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Štebe, G., Urbančič, T., Oven, K., Janežič, M., Bajec, K., Bric, V., Berk, S. (2014b). Izdelava projektne dokumentacije za točke kombinirane mreže 0. reda. Projekt 2433-13-0003. Elaborat: 3. faza: točke Areh, Koper in Korada. Ljubljana, 43 str.



# Evidentiranje in analiziranje sprememb plazu nad Belco z geodetskimi metodami

Dušan Petrovič\*, Janez Goršič\*, Albin Mencin\*, Klemen Kozmus Trajkovski\*,  
Tilen Urbančič\*, Dejan Grigillo\*

**Ključne besede:** zemeljski plaz, oslonilne točke, daljinsko vodeni letalnik, TLS, primerjava oblakov točk

**Key words:** landslide, control points, unmanned aerial vehicle, TLS, point clouds comparison

## Razširjen povzetek

Plazovito pobočje nad naseljem Belca v dolini Save Dolinke je eno bolj aktivnih erozijskih žarišč v Slovenji. Okoli 100 m široko in 500 m dolgo strmo plazišče s povprečnim nagibom okoli  $45^\circ$  v zgornjem delu vsebuje znatne količine nestabilnega materiala. V februarju 2018 je po deževju in zmrzali prišlo do večjega skalnega podora (ocena 27.000 m<sup>3</sup> kamnitega gradiva, Kostevc 2018), ki je zasul gozdno cesto, ki je potekala preko plazu ob dolini Belce do pašnih planin pod Kepo. Ceste zaradi nestabilnosti niso sanirali, zato so kmetje morali živino na pašo na planino goniti preko Avstrije in prelaza Sedlišč (1438 m). Ponoven podor se je zgodil po obilnem lokalnem deževju konec oktobra 2018, ko je grušč odlomljenega materiala zasul spodnji del struge potoka Belca, hidroelektrarno in žago ter nevarno ogrožal stanovanjske objekte ob glavni cesti Jesenice - Kranjska Gora. Prva sanacija je vsebovala odvoz nakopičenega materiala ob žagi in hidroelektrarni ter odvoz materiala iz struge do izliva v Savo Dolinko. Hkrati se je izkazalo, da je na mestu odloma v zgornjem delu pobočja še veliko terenskih razpok (slika 1), ki so predstavljale grožnjo za ponoven podor, zato je bila 5. 12. 2018 izvedena nadzorovana sprožitev dela dodatnega nestabilnega materiala, katerega količina pa ni dodatno ogrožala objektov in infrastrukture. Nadaljnje nadzorovano proženje preostalega nestabilnega materiala je predvideno za pomlad 2019 (objava RTV Slovenija).



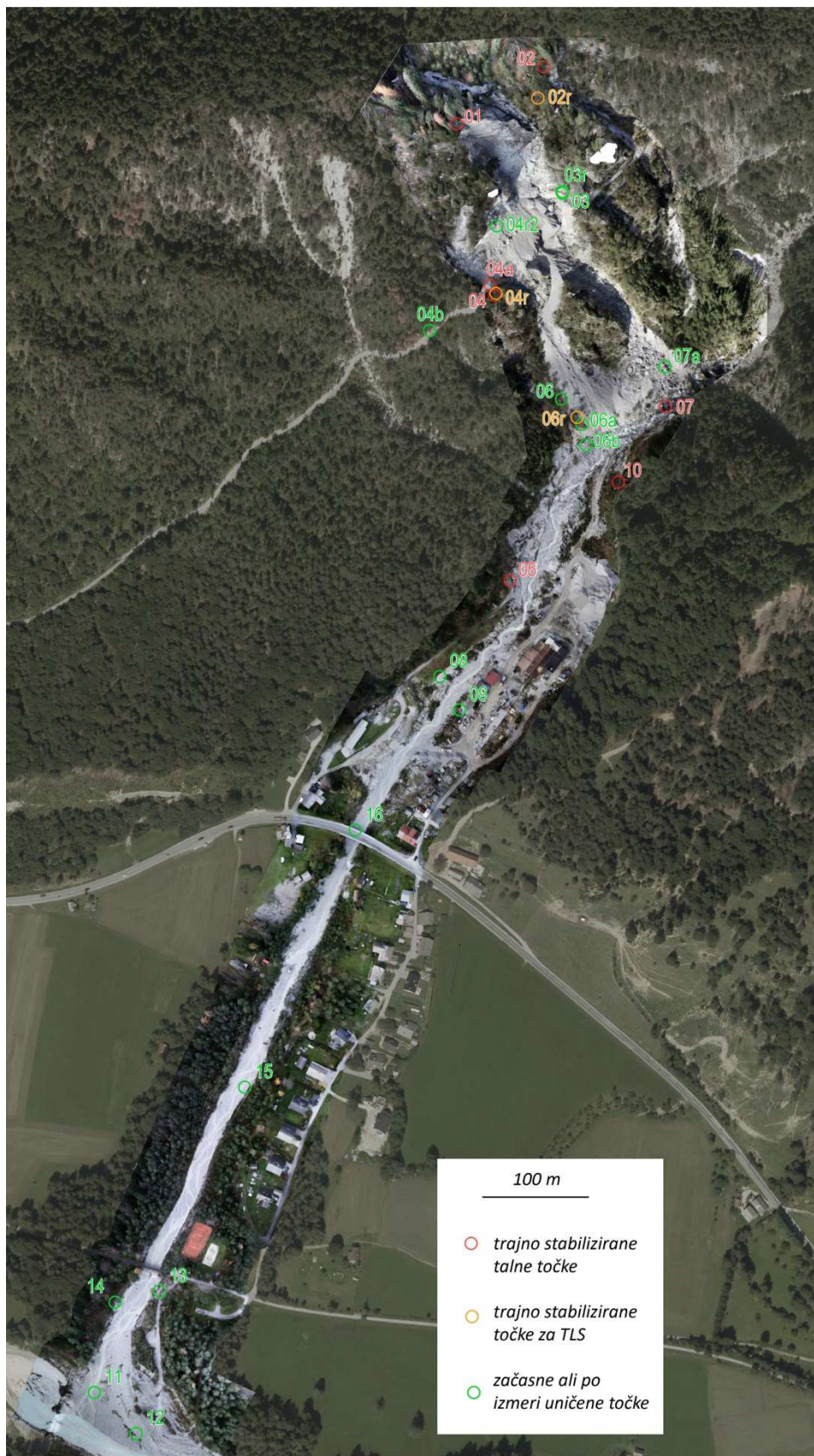
Slika 1 - vidne razpoke terena v zgornjem delu plazišča

\* UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, Ljubljana



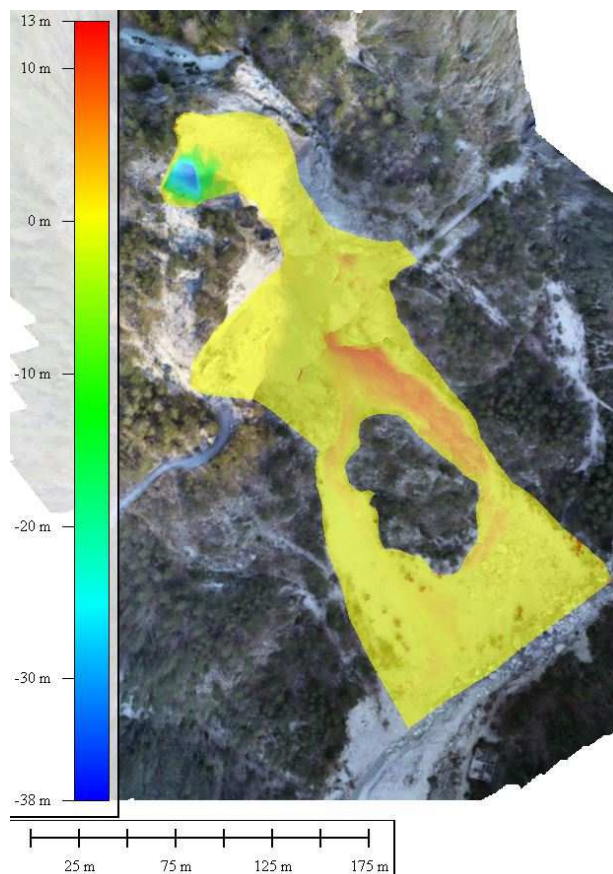
Raziskovalci Katedre za kartografijo, fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje ter Katedre za inženirsko geodezijo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani smo se evidentiranja plazu lotili 8. 11. 2018, nekaj dni po jesenskem podoru. Okoli območja plazu in struge potoka Belca smo vzpostavili 16 oslonilnih točk (slika 2) in njihovo lego določili z metodo RTK GNSS z inštrumentom Javad Triumph-LS. Dve točki sta bili vzpostavljeni nad plazom (01 in 02), dve v sredini plazu, na območju dostopa nekdanje ceste (04, 04a), preostale pa v dolini vzdolž struge do izliva v Savo Dolinko. Na osrednje območje plazu oslonilnih točk zaradi nevarnosti plazenja nismo postavljali. V treh misijah smo z daljinsko vodenim letalnikom fotografirali celotno območje plazu in struge Belce do sotočja, pri čemer smo plaz fotografirali s poševnimi posnetki pod kotom  $45^\circ$ , strugo pa z nadirnimi posnetki. Iz pridobljenih podatkov smo izračunali oblak točk, ga umestili v državni koordinatni sistem in iz njega izgradili digitalni model površja ter ortofoto. Digitalni model struge se je izkazal kot ustrezen, medtem ko model plazu zaradi izjemne reliefne razgibanosti pobočja in neugodne lege nekateterih oslonilnih točk za izmero z metodo GNSS ni zadostil pričakovani kakovosti. Snemanje smo zato ponovili 4. 12. 2018, ko smo se osredotočili na plaz. Šestim stabiliziranim oslonilnim točkam iz prve izmere smo dodali in stabilizirali štiri dodatne talne (03, 04b, 06, 07) in dodatne oslonilne točke za terestrično lasersko skeniranje (TLS), na sliki 2 označene z r, vse pa izmerili tako s klasično tahimetrično izmero z instrumentom Leica TCRP1201 kot tudi z izmero GNSS, a tokrat z dvema različnima instrumentoma (Javad Triumph-LS in Leica Viva GS15) in dvema metodama izmere, RTK in hitro-statično.

Območje plazu smo poševno fotografirali z daljinsko vodenim letalnikom, sočasno pa z enega stojišča v bližini točke 10 vidni del plazu tudi skenirali s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ-400. Po izračunu koordinat vseh oslonilnih točk smo pri obdelavi fotografij z letalnika in pri obdelavi podatkov skenerja upoštevali lege oslonilnih točk in izračunali georeferencirane oblake točk pobočja plazu. 11. 12. 2018, nekaj dni po izvedenem nadzorovanem proženju plazu, smo meritve ponovili, ponovno smo opravili poševno in dodatno še nadirno fotografiranje z letalnikom ter terestrično lasersko skeniranje. Tri talne in ena za TLS namenjena stabilizirana točka so se sicer pri razstrelitvi uničile, vendar je število in razporeditev preostalih točk omogočalo izdelavo in georeferenciranje oblakov točk, prav tako pa tudi izdelavo digitalnih modelov površja in ortofota.



Slika 2 - mozaik izdelanih in državnih ortofotov območja z oslonilnimi točkami vseh opravljenih izmer

Primerjava digitalnih modelov površja plazu pred in po nadzorovanem proženju je prikazana na sliki 3. Prostornina nasutega (dodatnega) materiala, na sliki v oranžno-rdečih odtenkih, je okoli 15.000 m<sup>3</sup>. Izračunana prostornina odstreljenega dela, na sliki v zeleno-modrih odtenkih, je okvirno 11.000 m<sup>3</sup>. To območje je imelo pred umetno sproženim podorom nezadostno gostoto pridobljenega oblaka točk, predvsem zaradi snemanja zgolj poševnih fotografij. Poleg tega so po odlomu nastale previsne stene, kar predstavlja težavo pri izračunih iz višinskih modelov. Območja nasutega materiala imajo v obeh izmerah zadostno gostoto oblaka točk in topografsko niso problematična, zato lahko sklepamo, da je tudi okvirna prostornina sproženega odloma 15.000 m<sup>3</sup>.



Slika 3 - primerjava višinskih modelov območja plazu pred in po nadzorovanem odlomu

Na osnovi vseh izdelkov ter uporabe podatov Laserskega skeniranja Slovenije, morda pa tudi morebitnih pridobljenih drugih meritev (Kostevc 2018), bomo skušali še dodatno čim točneje in ustrezneje interpretirati dosedanje in morebitne prihodnje podore na območju plazu.

### Literatura

Vir: Kostevc, M. 2018. Ocena ogroženosti naselja Belca pred drobirskim tokom, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire.

# Pavle Šegula (1923–2017) in njegov pomen za poznavanje domačih in tujih raziskav s področja kriosfere

Miha Pavšek\*

Konec leta 2017 smo se na kranjskem pokopališču planinski prijatelji poslovili od Pavleta Šegule, ki je več kot pol stoletja spremljal številne tuje in večino domačih raziskav o snegu, ledu, plazovih in ledenikih ter seznanjal z njimi tako strokovno kot tudi splošno javnost. Neprecenljiv pa je seveda njegov prispevek k povečanju varstva in zaščite pred snegom in snežnimi plazovi, saj je bil med pobudniki ustanovitve Podkomisije za snežne plazove (danes Komisija za reševanje iz plazov) pri Gorski reševalni službi (GRS) Slovenije ter za izdelavo lavinskega katastra in delovanje lavinske službe. Velik del izjemnega bibliografskega opusa posega neposredno in posredno s področja kriosfere. Čeprav imamo v slovenskih gorah samo nekaj hektarov stalno poledenelega površja in le sezonsko zamrznjena tla, pa je razumevanje delovanja teh procesov in njihovih posledic pomembno tudi za preventivo na področju varstva in zaščite pred pojavi snega, ledu in snežne erozije.

**Ključne besede:** kriosfera, značilnosti snežnih plazov, nevarnosti v gorah, lavinska preventiva, Slovenija

**Key words:** cryosphere, avalanche characteristics, mountain hazards, avalanche prevention, Slovenia

## Uvod

Občudujoč njegovo življenjsko pot in delo ter bogastvo in raznovrstnost znanj, ki nam jih podajal in zapustil, sem ob odhodu planinskega prijatelja, s katerim sva se sporazumevala kot bi bila vrstnika, razmišljal tudi o njegovem prispevku s področja kriosfere. Bolj kot z raziskavami ali v današnjem času s projekti je s svojim delom poskrbel, da je prišlo znanje in izrazje o snegu, ledu in plazovih tudi v naše kraje, hkrati pa skrbel za seznanjanje s tovrstnimi raziskavami doma in na tujem. To pa je seveda temeljnega pomena za vsako stroko, tudi lavinologijo in nivologijo (plazo- in snegoslovje) oziroma širše, za raziskave s področja kriosfere.

Več kot 200 bibliografskih zapisov ima samo v Planinskem vestniku, okrog 170 v COBISS-u (knjižnični informacijski sistem, ki ga uporabljajo knjižnice v Sloveniji; prvi zapis je iz 1951 in zadnji iz leta 2013) in skoraj 40 v reviji Ujma, ki jo izdaja Uprava RS za zaščito in reševanje. Nekatera dela se ponavljajo, še več pa je tistih, ki so ostala izven teh in drugih bibliografskih pregledovalnikov. Še precej več kot je govoril – pri tem je skrbno pazil na izrazje, besedotvorje in skladnjo – je pisal. Posebej ga je kdaj razjezilo nesodelovanje ljudi, ki bi lahko oziroma celo morali med seboj sodelovati. Zanimalo ga je prav vse, še posebej pa tisto, kar je bilo povezano s snegom, ledom in plazovi. Za vse znanja in napredka željne je bil odprta knjiga, pravi leksikon in hkrati enciklopedija, tudi jezikovna, na dveh nogah.

## Bogata in ustvarjalna življenjska pot

Pavle Šegula se je rodil v Kranju in se že v mladih letih zagledal v gore, komaj 21-leten pa je odšel v partizane. Bil je vedoželjen, še posebno ga je veselilo učenje elektrotehnike in

---

\* Geografski inštitut Antona Melika, ZRC SAZU, Novi trg 2, Ljubljana



tujih jezikov, za kar je izkoristil vsak prosti čas. Postal je odličen radiotelegrafist, po vojni pa je študiral ob delu in leta 1957 diplomiral na fakulteti za elektrotehniko. Bil je med glavnimi organizatorji radioamaterskih klubov v Ljubljani in deloval kot inštruktor po vsej Sloveniji. S svojim mladeniško neugnanim poletom in delavnostjo je bil izredno priljubljen. S skromnostjo in preprostostjo se je približal prav vsakemu, vsakomur je ponudil dobro besedo, strokovni pogovor in dejansko pomoč.

Po nesrečnem naključju, pri katerem je na zasneženem Storžiču izgubil prijatelja, je sklenil, da mora s svojo energijo in znanjem pripomoči, da bi bilo nesreč v gorah čim manj. Priključil se je planincem in gorskim reševalcem ter začel z neutrudnim vzgojnoizobraževalnim delom. Izkazal se je kot odličen organizator; kjerkoli je bil, česar koli se je lotil, je vedno pokazal, kaj zmore. Njegova neverjetna delavnost ga je kmalu pripeljala v upravni odbor Planinske zveze Slovenije, leta 1960 pa v Komisijo za gorsko reševalno službo. Prav pri slednji je našel najplemenitejše poslanstvo, njegovo delo v okviru te komisije pa je obrodilo najžlahtnejše sadove. Takrat je začel skrbeti za ustrezno uporabo brezžičnih radijskih zvez v planinstvu in pri reševanju, ukvarjal se je z organizacijo raznih srečanj in v naslednjih letih poskrbel, da je večina planinskih postojank dobila brezžično radijsko povezavo. Svoje znanje je prenašal na druge, predaval na posvetovanjih in seminarjih ter pripravljajl ustrezno gradivo – od prevodov tuje literature do samostojnih strokovnih izdaj.



Slika 1 - Pavle Šegula na tiskovni konferenci na PZS v začetku leta 2015 (Foto: Pavel Oman).

Govoreč več jezikov je bil izredno dobrodošel na zboru IKAR (Mednarodna organizacija za gorsko reševanje) leta 1962 na Vršiču. Takrat je bila v okviru te

organizacije ustanovljena Podkomisija za reševanje iz plazov. Takoj je postal njen član, svojemu elektrotehniškemu znanju pa je začel dodajati še spoznanja o snegu in snežnih plazovih ter se osredotočil na njihovo raziskovanje. Kot izredno študijski človek in navdušen gornik je vse odtelej dejavno in častno zastopal GRS v tej mednarodni organizaciji, v kateri je deloval skoraj polna tri desetletja. Povsem upravičeno je bil deležen izrednega mednarodnega ugleda in posebnega priznanja kot zaslužni član te organizacije.

Nevarnost plazov v gorah, ob tem pa varovanje človeških življenj v plazovitih območjih, vse to je bilo zanj ne le izziv, ampak tudi življenjska naloga. Z velikim veseljem in požrtvovalnostjo se je posvetil preventivi med dejavnostmi v naravi, še posebej v hribovitem in goratem svetu. Temeljito je zbiral in raziskoval dosegljivo svetovno literaturo, še posebej o snegu in plazovih, svoje znanje pa nesebično posredoval naprej. Želel si je, da bi njegova opozorila prišla prav do vsakega obiskovalca gora, zato se je neutrudno oglašal s praktičnimi preventivnimi članki v dnevnem časopisju, strokovnih glasilih in revijah ter opozarjal na najrazličnejše nevarnosti v gorah, zlasti na snežne plazove. Leta in desetletja so skoraj v vsaki številki Planinskega vestnika izhajali njegovi članki, zapisi in opozorila; nizal je gradiva in poročila s simpozijev mednarodne reševalne organizacije IKAR, s seminarjev in posvetov GRS ter obiskov pri tujih gorskih reševalcih.



Slika 2 - Pavle Šegula med terenskim ogledom žičnic in smučišč na Kaninu spomladi 1976 (Foto: Marjan Saksida).

Bil je pobudnik in organizator različnih preventivnih tečajev, na primer posvetovanja Gore in varnost in še posebej vsakoletnih Dni varstva pred snežnimi plazovi (prvič leta 1975; sprva v Poljčah, nato v vojašnici na Rudnem polju na Pokljuki), ki so bili prvi takšne oblike na svetu. Prav tako je organiziral tečaje za vodnike reševalnih psov, minerske tečaje za umetno proženje snežnih plazov ter varnostne tečaje za javne uslužbence, ki lahko kdaj pridejo v stik s plazovi. Razvil se je v našega najboljšega poznavalca snega in njegovih preobrazb – plazoslovca brez primere. Začel je načrtno zbirati podatke za kataster plazov na Slovenskem, vodil pa je tudi evidenco lavinskih dogodkov, to je primerov nesreč s škodo ali poškodbami, ki niso bile usodne. Konec leta 1962 je postal tudi načelnik Komisije za odprave v tuja gorstva in s svojim nesebičnim delom odločilno pomagal



preseči velike težave in pognati kolesje slovenskih odprav v tuja gorstva, v katerih je bilo pomembno tudi znanje o ledu in ledenikih. V tej vlogi je deloval celo desetletje. Zelo dejaven je bil tudi v domači Škofji Loki; leta 1978 je bil med glavnimi ustanovitelji postaje GRS.

Večina ga je poznala predvsem kot dolgoletnega načelnika Podkomisije za snežne plazove pri Gorske reševalni službi Slovenije (danes zveza oziroma GRZS). Kljub poznim letom se je Pavle zlahka privadil na računalnike in elektronsko komunikacijo, a še vedno se je najraje pogovarjal, tako v živo kot prek telefona, najbolj pa se je razveselil obiska na domu v njegovi Suhi v Škofji Loki, kjer si med knjigami in priročniki »komajda videl skozi okno«. Znal je prisluhnti venomer in vsakomur, pri čemer ni obveljala le njegova, kar se je še posebej dobro obneslo pri pripravi najrazličnejših slovarjev.

### Jagodni izbor njegovih bibliografskih enot

Kmalu po začetku delovanja so nastajale tudi njegove knjige: najprej prevod francoskega reševalnega priročnika (1972) in avstrijskih Gaylovih Plazov, nato poglobljeno poglavje Bivanje in hoja po gorah v knjigi Življenje v naravi in leta 1977 temeljni, in še danes izredno priljubljeni priročnik Nevarnosti v gorah, planinski brevir za preventivo pri nesrečah v gorah. In končno še učbenik Sneg, led, plazovi in slovenski del slovarja mednarodnega združenja planinskih organizacij UIAA ter trojezični planinski slovar treh dežel. Kasneje je prevedel še ameriški priročnik Podhladitev, omrzline in druga škoda zaradi mraza in brošuro Gore in zdravje. Vsa navedena dela so med pionirskimi pri nas, zato so jih še danes z zanimanjem prebirajo tako strokovnjaki kot zainteresirana splošna javnost. Pripravil in uredil je jubilejne zbornike ob različnih obletnicah GRS, drugo knjigo prijatelja Cirila Pračka Vrnite mi moje sinove z gore (2000) ter z njo osnoval zbirko Med gorskimi reševalci. Leta 2001 je izdal še svojo gorniško avtobiografijo Križemkražem po gorah. Spodbujal in pomagal je tudi pri nastanku jubilejne knjige Reševanje v gorah ob stoletnici gorskega reševanja v Sloveniji leta 2012.



Slika 3 - Naslovnice najbolj znanih del Pavleta Šegule (Foto: Marko Zaplatil, ZRC SAZU).

## Najštevilnejše so objave v Planinskem vestniku

Največ (prek 350) in večinoma poljudnih objav, je priobčil v Planinskem vestniku. Dejstvo, da so razvrščene v kar sedem kategorij, kaže širino njegovih nazorov in znanj ter posledično tudi objav. Pod alpinizmom najdemo predvsem poročila z odprav in taborov v tujini v času, ko je načeloval KOTG in tudi še kasneje (rubrika Slovenci v tujini, 1971), opisanih pa je tudi nekaj njegovih alpinističnih podvigov v domačih in tujih gorah. Pri naravovarstvu je že zgodaj opozoril na varovanje gorske narave (Gore naj bodo človeštvu na voljo neizumetničene, 1982) in opozarjal, da velikopotezni načrti, ki so jih imeli v 2. pol. 20. stoletja z našim gorskim svetom nekateri tedanji odločevalci, niso v skladu z varovanjem gorskega okolja. Svoj odnos do preteklosti in spoštovanja zgodovine je pokazal tudi v številnih člankih, ki jih je pripravil ob obletnicah najrazličnejši društev. Vešč je bil tudi potopisov z izletov ali daljših trekingov, še posebej iz manj znanih domačih in tujih gorah, tuje mu ni bilo niti kolesarjenje. Posebej rad je ime anekdote, iz katerih je potegnil uporabne nauke (gre torej za nekakšne planinske basni). Najobsežnejša so poročila med letoma 1962 in 1990 o delu planinske zveze in gorske reševalne službe, redne analize nesreč v zimskih sezonah doma in deželah IKAR, pri čemer je vedno opozarjal tudi na novosti, ki jih je videl v tujini oziroma bral o njih v tuji literaturi. Že omenjeno kritičnost kažejo tudi številni odzivi v pisnih bralcev. Večina njegovih prispevkov so pomembni dokumenti časa, ki so danes zelo dobrodošli zlasti, ko preučujemo posamezne teme kronološko. Katerekoli teme se je že lotil, vedno pa je opozarjal na varnost oziroma na varno doživljanje in izvedbo planinskih dejavnosti,

## Prevajalski opus in revija Ujma

Neizmerno čaščenje domačega in znanje številnih tujih jezikov kaže tudi njegov prevajalski opus od prevoda skript francoske GRS (1967), prek številnih prevodov iz nemške literature o ukrepih za reševanje zasutih v plaz (1965), ABC za vodnike lavinskih psov (1964), Atlasu plazov (1981), pa Gaylovi Plazovi (1973), Gornikov svetovalec (1996), do francoskega zbornika Gore in zdravje (1990) ter angleškega o podhladitvi, omrzlinah in drugi poškodbah zaradi mraza (1990), in ne nazadnje v Ujmi o klasifikaciji snega v sezonski snežni odeji (1995) in preobrazbi snega (1998) ter o osnovah preobrazbe snega v reviji Življenje in tehnika (1998). Ne smemo pozabiti, da je objavil tudi številne prispevke v tujih zbornikih, najbolj redno pri IKAR-ju (Mednarodna komisija za reševanje v gorah), pa v Avstrijskem kuratoriju za varnost v gorah (po njihovem zgledu je spodbudil domače posvetovanje Gore in varnost ter uredil zbornike med letoma 1984 in 1990) ter na mednarodnih simpozijih in delavnicah o snegu in plazovih. Ne smemo pozabiti tudi številnih drugih publikacij, kjer je sodeloval kot urednik zbornika (zlasti GRS in PD PTT Ljubljana, slednjega med letoma 1973–2003) ali strokovni sodelavec oziroma kot soavtor knjig in brošur. Zadnji od zbornikov je bil Pračkov Vrnite mi moje sinove z gore (2000).

V reviji Ujma je objavil številne polemične članke o varstvu pred snežnimi plazovi v Sloveniji in spodbujal pristojne ter odgovorne k ustanovitvi državne lavinske službe kot jo poznajo v sosednjih alpskih deželah, kar se je v zadnjih letih vsaj deloma uresničilo in je potemtakem tudi njegova zasluga. Različni pregledi plazovitih območij po regijah, področjih (prometna infrastruktura), tematika preživetja pod snežnim plazom in lavinski psi, povezanost nosilcev varstva pred snežnimi plazovi, vse to in pa redni pregledi izbranih pomembnejših lavinskih objav iz tuje literature so napolnili marsikatero stran omenjene strokovne revije.

## Objave s področja kriosfere

Na koncu se vrnimo k njegovi bibliografiji in se seznanimo podrobneje z bibliografskimi enotami, ki se dotikajo kriosfere. Že v začetku 90. let 20. stoletja je pisal o ledenikih Severne Amerike, v reviji *Življenje in tehnika* pa o osnovah preobrazbe snega (1998) in o skrivnostih ledu (2000). Revijo *Ujma* je izkoristil za seznanitev z zastružnimi zgradbami a krajevno zaščito pred kopičenjem živega snega (1993), za predstavitev publikacije Mednarodna klasifikacija snega v sezonski snežni odeji (1995), ki jo je pripravila delovna skupina Mednarodne komisije za sneg in led (ICSI) pri Mednarodni zvezi za znanstveno hidrologijo (IASH) in omogočil seznanitev domači javnosti. V tej reviji je pisal tudi o preobrazbi snega (2000). Njegov največji »otrok« in življenjsko delo (nastajal je poldrugo desetletje) je gotovo šestjezični slovar *Sneg in plazovi* (1995), kateremu je dodal še razlage gesel v slovenskem jeziku in je prvi te vrste na svetu. Z njim je na eni strani odprl tuja znanja domačim strokovnjakom ter utrl pot domačemu znanju v tujini. Veselimo se že dejstva, da bo slovar kmalu dostopen tudi na portalu Termania med drugimi terminološkimi slovarji in torej javnosti kar najširše dostopen. Pomembno je tudi njegovo sodelovanje pri Planinskem terminološkem slovarju (2002), kakršnega nima vsaka država, niti planinsko bolj razvite od nas bolj razvite alpske sosedo. Obe deli sta bili deležni velikega zanimanja strokovne in planinske javnosti. Poleg omenjenih je brez dvoma eno najpomembnejših njegovih del obsežna monografija *Sneg, led plazovi* (1986), nekakšen dva enim oziroma »abecednik in katekizem« lavinologije (plazoslovja), vključno z nivologijo (snegoslovjem). To področje je pokrival še v okviru številnih drugih priročnikov na primer za izobraževanja in zborovanja gorskih reševalcev, minerje snežnih plazov (s podpoglavjem *Namerno proženje snežnih plazov*, 1967), smučarskih vaditeljev in učiteljev, mladinskih vodnikov in vodnikov planinskih šol. Veliko je tudi njegovih pregledov problematike snežnih plazov, najbolj obsežen tovrsten prispevek je pripravil za domače Loške razglede. Pogosto je spisal le nasvete v obliki enkratnih prispevkov ali v nadaljevanjih (podlistek, rubrika) za bolj varno gibanje oziroma hojo v gorah, kjer je opozarjal na najpogostejše pomanjkljivosti obiskovalcev gora, ki lahko privedejo tudi do nesreč z najhujšim izidom.

## Namesto zaključka

Čeprav je bila Sekcija za kriosfero v okviru SZGG ustanovljena že po njegovem aktivnem udejstvovanju v planinstvu, pa je s svojim delom in objavami pustil za seboj neizbrisen pečat, predvsem pa olajšal ustanovitev sekcije in njeno delovanje v prihodnosti. Zadnji avtorski prispevek Pavleta Šegule v COBISS-u datira iz leta 2006 in ga je torej zapisal pri svojih 83 letih. Morda je ta zapis najlažje skleniti kar s Pavletovimi lastnimi besedami, ki jih je zapisal v priložnostnem povzetku svojega življenja na začetku tega stoletja: »Če se vprašam zakaj tako, je vselej odgovor, da prav gotovo zaradi želje koristiti skupnosti na način, kot to lahko najboljše in najlažje storim. V tem delu razen samega delovanja in veselja nad skupnimi dosežki nikoli nisem iskal osebnih gmotnih koristi; če bi ne bil tak, ne bi bilo tudi marsikatero knjige, skript ali članka. Zato sem imel pri delu razmeroma proste roke, zagotovo pa mi je bilo prihranjeno prenekatero razočaranje.«

Nam pa je zapustil velikansko dediščino, del katere je povezan tudi z znanji in raziskavami s področja kriosfere in se je ne bi sramovali niti največji alpski narodi. S svojim delom in življenjem nam je pokazal, da lahko brez sramu in zavisti stopimo ne le ob njihov bok, temveč da spadamo mednje. Zgled, ki ga velja čislati tudi v domačem

stanovskem združenju, ki povezuje strokovnjake in vse tiste, ki jih na kakršenkoli drugi način zanimajo področja, povezana z geodezije in geofiziko ter njihovimi panogami.

### **Zahvala**

Prispevek temelji na raziskovalnem programu Geografija Slovenije (P6-0101) in infrastrukturnem programu (I0-0031) Naravna in kulturna dediščina, ki ju financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

### **DODATEK:**

Pavle Šegula - izbor knjig(A), člankov (B) in predavanj (C) s področja kriosfere:

#### **A: KNJIGE**

#### **AVTORSKE**

1. Nevarnosti v gorah; Izdala: Planinska založba, 1978
2. Sneg, led, plazovi; Izdala: Planinska založba, 1986
3. Priročnik za gorske reševalce; Izdala: Komisija za GRS pri PZS, 1972, soavtor; poglavje: Nevarnosti (*Strela, Plazovi, Preventiva*) in poglavje: *Sredstva za zvezo in sporazumevanje*
4. Priročnik za minerje snežnih plazov; skripta, 1967; avtor II. dela: *Namerno proženje plazov*. Soavtor Danilo Belšak
5. Priročnik za minerje snežnih plazov; skripta; 2. izdaja; 1997
6. Priročnik Sneg, preobrazba snega, plazovi, reševanje iz plazov; skripta; 1998
7. Šestjezični slovar sneg in plazovi; 1995, izdala: Komisija za GRS pri PZS
8. Zbornik seminarja CZ, Kranj 1980; prispevek: *Obezbedjenje od snežnih lavina u Sloveniji*
9. Loški razgledi 36, 1989; prispevek: *Snežni plazovi na območju občine Škofja Loka*
10. Vaditelj smučanja, 1970; poglavje: *Nevarnosti v gorah*
11. Zbornik Alpsko smučanje, 1992, 1996, prispevek: *Sneg, plazovi, smučanje in varnost*
12. Program snovi za mladinske vodnike in vodnike planinske šole; izdala PZ PZS, 1970, avtor poglavja *Nevarnosti v gorah*
13. Planinski vodnik; izdala PZ PZS, 1982; avtor poglavja *Nevarnosti v gorah*
14. Planinski terminološki slovar, Založba ZRC, SAZU, 2002, soavtor, nosilec gesel: *sneg in plazovi*

#### **PREVODI TUJIH KNJIG**

1. Priročnik Gorska reševalna služba v Franciji; skripta, 1961 (F.F.M., 1960: *Le Secours de Montagne en France*, 1960);
2. Plazovi, 1973, PZ PZS, 1973 (Albert Gayl: *Lawinen*)
3. Nujni ukrepi za reševanje zasutih v plaz; 1965 (*Dringliche Maßnahmen zur Rettung Lawinenverschütteter* – Zbornik 1. Simpozija Fondation Internationale Vanni Eigenmann, Davos 1963)

4. ABC za vodnike lavinskih psov, 1964 (Sepp Isslitzer: *ABC für Lawinhundeführer*, ÖBRD, Landesleitung Tirol, 1962)
5. Atlas plazov, ilustrirana klasifikacija plazov (*Avalanche atlas*, UNESCO, 1981; prevod angleško-francosko-nemško-rusko-španskega izvirnika; (v tipkopisu)
6. Gornikov svetovalec, 1996 (Walter Siebert, Willi Jungmeier: *Alpin Ratgeber*)
7. Podhladitev, omrzline in druge poškodbe zaradi mraza, 1990 (J. A. Wilkerson, Cameron C. Bangs, John S. Hayward; naslov izvirnika: *Hypothermia, Frostbite and other Cold Injuries*, 1986; Izdala založba The Mountaineers, 1986)
8. Gore in zdravje, 1991 (Izdali: A.R.P.E, SANDOZ, F.F.M.E, naslov izvirnika: *Santé et altitude*, avtorji: C. Rathat, J-P Richalet, J-P Herry, H. Chardonnet, 1990)
9. Mednarodna klasifikacija snega v sezonski snežni odeji; izšlo v reviji UJMA, št. 9, 1995; (Publikacija ICSI of the IASH & International glaciological Society, 1990, naslov izvirnika: *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*)
10. Osnove preobrazbe snega 1 in 2; študija: Samuel C. Colbeck; izšlo v reviji Življenje in Tehnika, marec in april 1998
11. Preobrazba snega; študija: Claude Sergent, revija Neige et Avalanches, št. 83/1998; naslov izvirnika: *Les Metamorphoses de la Neige*. Izšlo v reviji UJMA, 2001

## UREDNIK IN/ALI SOAVTOR KNJIG, BROŠUR, ZBORNIKOV

1. Zbornik GRS 1912–1982; Izdala PZ PZS, 1982; (urednik in soavtor)
2. Zbornik GRS 1912–1987; Izdala PZ PZS, 1987; (urednik in soavtor)
3. Vrnite mi moje sinove z gore; samozaložba; avtor Ciril Praček, 2000
4. Zbornik 2. posveta Gore in varnost; Izdala Komisija za GRS pri PZS, 1984
5. Zbornik 3. in 4. posveta Gore in varnost; izdala Komisija za GRS pri PZS, 1985/86
6. Zbornik 5. posveta Gore in varnost; tipkopis, ni bilo publicirano; 1990
7. Zbornik 2. posveta zdravnikov GRS, 1987
8. Signali; glasilo PTT Podjetja Ljubljana 1971–1975; glavni in tehnični urednik, avtor uvodnikov, reportaž, splošnih člankov in fotografij
9. Zbornik 20 let PD PTT Ljubljana, 1973; sourednik, avtor prispevkov: *Na obisku pri koroških planincih in Na Piku Lenina*
10. Zbornik 25 let PD PTT Ljubljana, 1979; prispevek: *Bogastvo planinskega sveta*, soavtor *uvodnika*
11. Zbornik 40 let PD PTT Ljubljana, 1994; prispevek: *Hoja v gore – za vsakogar nekaj*
12. Zbornik 50 let PD PT Ljubljana, 2003, prispevek: *Izleti PD PTT Ljubljana po avstrijskem Koroškem*

## B. ČLANKI

### I. V domačih revijah

1. 1. Alpinistični razgledi (prevodi in izvorni prispevki)
2. 2. Obramba in zaščita (4 članki s področja reševanja in varnosti pred snežnimi plazovi)
3. 3. UJMA (področje varnosti pred snežnimi plazovi; 37 člankov)
4. 4. Planinski vestnik 1962–2001 (leposlovje o hoji po gorah, varnost, organizacija, GRS, KOTG; okrog 350 člankov)
5. 5. Zdravje
6. 6. Svobodna misel (gore in partizanstvo); 2 članka

7. 7. Življenje in tehnika (tehnični članki, varstvo pred plazovi, sneg, preobrazba snega, škoda zaradi plazov); okrog 50 člankov
8. 8. Radioamater (tehnični članki); okrog 5 člankov
9. 9. Delo, Dnevnik (varnost v gorah, plazovi, okrog 300 prispevkov)
10. 10. Razni drugi prispevki, študije, zapisi o ogledih ipd. (24 prispevkov)

## II. Prispevki v tujih zbornikih

1. Zborniki Avstrijskega kuratorija za varnost v gorah 1973, 1987/1, 2, 1989/1, 2, 1990, 1997 (Jahrbuch des Österreichischen Kuratorium für alpine Sicherheit 1973. 1987, 1989,1990,1997)
2. Mednarodni simpozij o snegu in plazovih, Chamonix, 1978; referat: Pravilnik o varnosti na organiziranih smučiščih v Jugoslaviji (*Règlement pour la sécurité des pistes en Yougoslavie*)
3. Mednarodni simpozij o snegu, ledu, plazovih, Chamonix, 1991; referat: Dan varstva pred snežnimi plazovi (*La journée de la sécurité contre les avalanches en Yougoslavie*)
4. Kongres cestarjev Jugoslavije, Naum, 1989; referat: *Zaščita cest pred zameti (cestni promet, snežni plazovi, zameti)*
5. Posvetovanje voda in ceste, Novo mesto, 1996; referat: *Predlog spremljanja zasutih cest po snežnih plazovih in zametih*

## C. PREDAVANJA IN ODDAJE

1. Radio Ljubljana, športno uredništvo (155 predavanj)
2. Radio Žiri (66 predavanj)
3. Dnevi varstva pred snežnimi plazovi (Poljče, Rudno polje, ... redno od leta 1975 dalje).





# Luščenje vetra iz aerosolov in vlage v 4D-Var asimilaciji opazovanj pri numeričnem napovedovanju vremena

Žiga Zaplotnik\*, Nedjeljka Žagar\*

## Razširjeni povzetek

V zadnjih letih se je močno povečala količina daljinskih satelitskih opazovanj (meritev) atmosfere, tako aerosolov in redkih plinov, katerih vsebnosti se prostorsko in časovno spreminjajo, kot tudi iz meritev sevalnosti izluščenih navpičnih profilov vlage in temperature. Ta trend povečevanja daljinskih opazovanj se bo nadaljuje z nedavno izstrelitvijo satelita Aeolus in pričakovano misijo EarthCARE. Pričakovano je, da bo Aeolus še posebej v tropih precej izboljšal točnost vetra v analizi, t.j. začetnem pogoju za meteorološko napoved. Vseeno pa bo skupno meritev vetra še vedno mnogo manj kot ostalih meritev, zato bo ta v začetnem pogoju še vedno precej odvisen od natančnosti prejšnje kratkoročne napovedi, ozadja, in načina predstavitve kovarianc napak ozadja – prejšnje napovedi.

V tej študiji ocenjujemo možnost luščenja polja vetra iz meritev koncentracije vlage in aerosolov ter opazovanj ostalih masnih spremenljivk (npr. Temperature) s pomočjo štiridimenzionalne variacijske asimilacije opazovanj (4D-Var). V 4D-Var se namreč z integracijo enačb atmosferskega modela znotraj asimilacijskega okna informacija o opazovani količini prostorsko in časovno porazdeli ter vpliva tudi na ostale spremenljivke. Točneje, opazovanja mase vsebujejo tudi informacijo o advekciji z vetrom. Z dobrim poznavanjem količin, ki se z vetrom advektirajo, lahko torej vetru “sledimo” (ang. wind tracing). V praksi je zaradi nezvezne, nelinearne dinamike vlažnih procesov ter mnogih procesov aerosolov, ki ne ohranjajo skupne mase (npr. izpiranje s padavinami), luščenje vetra zahtevno in podvrženo napakam – ravno ti “motilci” pa so glavni predmet študije.

---

\* UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ul. 19, Ljubljana