



Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

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

**RAZISKAVE S PODROČJA
GEODEZIJE IN GEOFIZIKE
2019**

zbornik del

25. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 30. januar 2020

UREDNIŠKI ODBOR

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

RECENZIJA

Mira Kobold
Andrej Gosar
Miran Kuhar
Žiga Zaplotnik
Miha Pavšek
Klemen Kregar

ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko
Jamova 2, Ljubljana

Naklada: 80 izvodov

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

SLOVENSKO združenje za geodezijo in geofiziko. Strokovno srečanje (25 ; 2020 ; Ljubljana)
Raziskave s področja geodezije in geofizike 2019 : zbornik del / 25. srečanje Slovenskega
združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 30. januar 2020 ; [organizator srečanja Slovensko
združenje za geodezijo in geofiziko; uredniški odbor Miran Kuhar ... et al.]. - Ljubljana : Slovensko
združenje za geodezijo in geofiziko, 2020

ISBN 978-961-6884-69-3
1. Gl. stv. nasl. 2. Kuhar, Miran
COBISS.SI-ID 303479552

Predgovor

Iztekle se je leto 2019 in s tem tudi leto, posvečeno praznovanju stoletnice delovanja Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG, <http://www.iugg.org>), ki je bilo ustanovljeno 1919 v Bruslju. Danes povezuje IUGG znanstvenike iz več kot 90 držav. Najpomembnejši IUGG dogodek v preteklem letu je bila 27. generalna skupščina, ki je potekala v Montrealu od 8. do 18. julija 2019, <http://iugg2019montreal.com>. Srečanja se je udeležilo skoraj 4000 raziskovalcev iz več kot 100 držav, tudi nekaj iz Slovenije, ki se ukvarjamo z raziskavami na področjih delovanja IUGG, to je geodezije, hidrologije, meteorologije in fizike ozračja, seizmologije in fizike notranjosti Zemlje, oceanografije, geomagnetizma in aeronomije ter na področju raziskav zemljine kriosfere. Tekom srečanja so potekali tudi sestanki odborov IUGG, ki sem se jih kot nacionalna zastopnica udeležila. Izglasovano je bilo novo predsedstvo IUGG za obdobje 2019-2023 in prvič v 100 letni zgodovini je postala predsednica IUGG ženska, prof. dr. Kathryn Whaler. Glavne tri resolucije IUGG, sprejete v Montrealu so: 1) zmanjšanje ogljičnega odtisa s pomočjo raziskovalne skupnosti, 2) razvoj in vzdrževanje temeljnih geodetskih izdelkov, predvsem mednarodnega terestričnega referenčnega sestava (ITRF) ter 3) zahvala organizatorjem 27. generalne skupščine za gostoljubje. Izbran je bil organizator naslednje, 28. generalne skupščine IUGG, Nemški nacionalni komite za geodezijo in geofiziko, ki bo srečanje organiziral leta 2023 v Berlinu.

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko (SZGG), ki deluje v okviru IUGG, je interdisciplinarno združenje, ki povezuje slovenske strokovnjake s področja raziskav planeta Zemlje. SZGG je bilo ustanovljeno leta 1993, vendar pa takrat še ni bilo vpeto v mednarodno združenje. Tako predstavlja leto 2019 v povezavi z IUGG prelomnico tudi za SZGG, saj je minilo 25 let od dopisne potrditve članstva v IUGG. Dokončna formalna potrditev je sledila na generalni skupščini IUGG v Boulderju 2. julija 1995. Tako bo v letu 2020 minilo 25 let od sprejema SZGG v IUGG. Ob tem jubileju čestitam vsem ustanovnim, nekdanjim in sedanjim članom in vas vabim, da se o zgodovini SZGG in delovanju posameznih sekcij seznanite v pričujočem, 25. zborniku del. V veliko veselje mi je tudi, da so se nam na slavnostni akademiji ob našem jubileju pridružil dr. Alexander Rudloff, generalni tajnik IUGG ter vsi ostali, ki jih zanimajo rezultati interdisciplinarnih raziskav, v katerih sodelujejo naši člani.

Tudi zbornik del je jubilejni, kar petindvajseti po vrsti in tako kot v preteklosti, so tudi v letošnjem zbrani prispevki naših članov, predstavljeni na strokovnem posvetu »Raziskave s področja geodezije in geofizike – 2019«. Upam, da jih boste z zanimanjem prebrali ter pobrskali občasno tudi po internetni strani SZGG <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/>, kjer so na voljo zborniki preteklih posvetovanj, poročila sekcij in ostale informacije povezane z delovanjem SZGG ter povezave na IUGG in posamezna mednarodna področna združenja.

Vsem, ki ste pripomogli, da je SZGG uspešno delovalo preteklih 27 let in da je pred nami ta zbornik, se iskreno zahvaljujem in veselim tradicionalnih januarskih srečanj tudi v prihodnje.

predsednica SZGG

dr. Polona Vreča

Vsebina

Predgovor	3
Prvi del: strokovni prispevki	
Katarina Kosovelj, Nedjeljka Žagar - Dinamični odziv ozračja na perturbacije diabatnega gretja v tropih	9
Rudi Čop - Spremembe števila geomagnetnih neviht in števila sončnih peg: mesečni, desetletni in stoletni naravni cikli	21
Klaudija Sapač, Simon Rusjan, Mojca Šraj - Analiza nizkih pretokov porečja Ljubljanice..	29
Dušan Rajver, Alessandro Casasso, Pietro Capodaglio, Joerg Prestor, Charles Cartannaz, Charles Maragna, Simona Pestotnik, Jernej Jež - Plitvi geotermalni potencial za zaprte navpične sisteme: trije študijski primeri iz alpskega prostora	39
Mihaela Triglav Čekada, Tomaž Gnidovec - Zmanjšanje ledenikov Vzhodnih Alp od leta 1807 do danes	55
Tilen Urbančič, Uroš Sojer, Božo Koler - Določitev sprememb geometrije kanalizacijske deformabilne cevi iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja	65
Drugi del: zgodovinski pregled delovanja Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko	
Jože Rakovec - Ob 25-letnici včlanitve Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (SZGG) v Mednarodno zvezo za geodezijo in geofiziko (IUGG)	81
Bojan Stopar, Božo Koler, Oskar Sterle, Miran Kuhar, Sandi Berk, Klemen Medved, Dalibor Radovan - Pregled delovanja sekcije Geodezija Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko v obdobju 1993-2019	87
Andrej Gosar - 25 let sodelovanja Slovenije v Mednarodni zvezi za seizmologijo in fiziko notranjosti Zemlje (IASPEI).....	101
Rudi Čop - Geomagnetne meritve na ozemlju Republike Slovenije.....	107
Gregor Skok - Meteorološka sekcija v okviru SZGG	117
Mitja Brilly, Katarina Zabret, Klaudija Sapač, Nejc Bezak, Andrej Vidmar, Matjaž Mikoš, Mira Kobold, Andrej Kryžanowski in Mojca Šraj - Razvoj hidrologije v Sloveniji	123
Matjaž Ličer, Dušan Žagar, Vlado Malačič - Fizikalna oceanografija v Sloveniji: kratak oris ob petindvajsetletnici delovanja Slovenskega društva za geodezijo in geofiziko	135
Mihaela Triglav Čekada, Polona Vreča - Zgodovina sekcije za kriosfero pri Slovenskem združenju za geodezijo in geofiziko	141

Prvi del: strokovni prispevki

Dinamični odziv ozračja na perturbacije diabatnega gretja v tropih

Katarina Kosovelj*, Nedjeljka Žagar**

Povzetek

Madden-Julianova oscilacija (MJO) je pojav, povezan z anomalijami v diabatnem gretju atmosfere v tropskih predelih. V pričujočem članku je predstavljena simulacija atmosferskega odziva na anomalije v diabatnem gretju, podobne idealiziranim anomalijam v štirih različnih razvojnih fazah MJO od osmih. Za vsako od štirih obravnavanih faz je bil izračunan ansambel simulacij za 100 zim z različnimi vremenskimi pogoji. Anomalije so bile dodane časovnim tendencam temperature, med drugim pa vsebujejo tudi povratne zanke iz modelskih shem za konvekcijo in kondenzacijo na velikih prostorskih skalah. Rezultati so analizirani s pomočjo normalnih načinov gibanj, lastnih rešitev lineariziranih osnovnih meteoroloških enačb za hidrostatično in nestisljivo ozračje. Normalni načini omogočajo ločeno analizo atmosferskega odziva na anomalije v Rossbyjevih in inercialno-težnostnih valovih. Glavna rezultata sta primerjava atmosferskega odziva na anomalije, podobne štirim fazam MJO in ovrednotenje deleža modelskega odziva v posameznih Rossbyjevih in inercialno-težnostnih valovih.

Ključne besede: Madden-Julianova oscilacija, normalni načini atmosferskih gibanj, model SPEEDY, Rossbyjevi valovi, inercialno-težnostni valovi, diabatno gretje

Keywords: Madden-Julian oscillation, atmospheric normal modes, SPEEDY model, Rossby waves, inertio-gravity modes, diabatic heating

Uvod

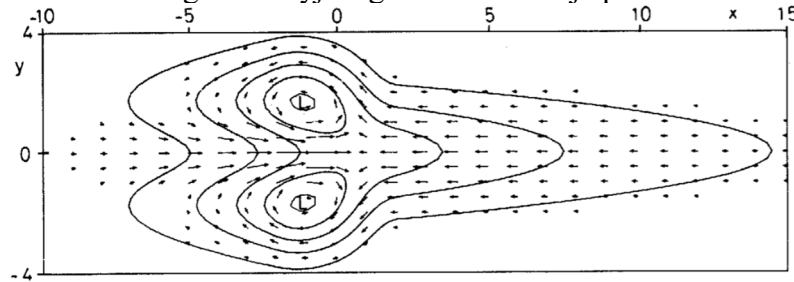
Različni atmosferski pojavi so lahko med seboj povezani, čeprav se dogajajo na geografsko zelo oddaljenih območjih. Eden izmed takšnih tropskih pojavov, ki vplivajo na atmosferske procese izven tropov, je Madden-Julianova oscilacija (MJO). Je del splošne cirkulacije ozračja v tropih, v smeri zahod-vzhod (t.i. zonalni smeri). Je ponavljajoč se pojav s periodami med 30 in 90 dnevi (Madden in Julian, 1971,1972), povezan s konvekcijo, ki sega preko celotne troposfere, lahko celo višje od 15 km (t.i. globoko konvekcijo, Hendon in Salby, 1994; Salby in Hendon, 1994). MJO se začne nad Indijskim oceanom, z nizkim zračnim tlakom pri tleh in okrepljeno globoko konvekcijo. Zaradi kondenzacije odvečne vlage v dvigajočem se zraku nastanejo močne nevihte. Poleg tega se nad zahodnim Pacifikom pojavita spuščanje zraka in visok zračni tlak. Kombinacija okrepljene konvekcije in oslabiljene konvekcije (zaradi spuščanja zraka) na različnih lokacijah vzdolž ekvatorja povzroča anomalije v tropski zonalni cirkulaciji nad Pacifikom (t.i. Walkerjevi cirkulaciji, npr. Adames in Wallace, 2014). S časom se okrepljena konvekcija zaradi MJO pomika proti vzhodu, se sprva še okrepi, nato pa razpade nad Pacifikom (Madden in Julian, 1972). Atmosferski odziv na povečano konvekcijo zaradi MJO se lahko opiše tudi z odzivom v obliki atmosferskih valov. Vir energije za valovanja v danem primeru predstavlja povečana količina sproščene latentne toplote pri kondenzaciji v nevihtnih celicah (t.i. diabatna perturbacija).

Že najenostavnejša teorija valovanja v tropski atmosferi (Matsuno, 1966), s katero lahko opišemo valovni odziv atmosfere na diabatne perturbacije, loči dve skupini valovanj – inercialno-težnostne (IG) valove pod vplivom zemeljske težnosti, vzgona in rotacije ter t.i.

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

** Univerza v Hamburgu, Meteorološki inštitut, Hamburg, Nemčija

(tropske) Rossbyjeve valove z značilnim ravnovesjem tlaka (oz. geopotenciala – višina ploskve konstantnega tlaka) in vetra. Matsuno (1966) v svoji teoriji loči IG valove, ki se propagirajo proti vzhodu (EIG) in proti zahodu (WIG). Perturbacija v diabatnem gretju atmosfere vzbudi tako Rossbyjeve kot IG valove. Med Rossbyjemi valovi ima pomembno vlogo t.i. ekvatorialni Rossbyjev val. Sestavljata ga dva vrtinca, ki se nahajata vsak na svoji strani ekvatorja, zahodno od diabatne perturbacije (npr. kot ciklonalna vrtinca okrog nizkega zračnega tlaka (L) na sliki 1). Med najpomembnejšimi IG valovi je Kelvinov val, ki se pojavlja vzhodno od motnje, ima maksimalno amplitudo vetra in geopotenciala ob ekvatorju in pojava z oddaljevanjem od ekvatorja kot $\exp(-y^2)$. Tropski odziv na lokalizirano motnjo na ekvatorju, čemur ustreza tudi perturbacija zaradi MJO, sestavlja kombinacija Kelvinovega in ekvatorialnega Rossbyjevega vala. Primer je prikazan na sliki 1.



Slika 1: Primer horizontalnega stacionarnega odziva enostavnega numeričnega modela atmosfere na motnjo v temperaturi na ekvatorju (v točki $x = 0, y = 0$). Odziv v zračnem tlaku (konture) in horizontalnem vetru (vektorji). Minima zračnega tlaka sta označena z »L«. Kelvinov val je viden kot vzhodni veter v kombinaciji z znižanim zračnim tlakom ob ekvatorju, vzhodno od motnje ($x > 0$). Ekvatorialni Rossbyjev val sestavljata vrtinca vetra okrog obeh minimumov zračnega tlaka, zahodno od motnje ($x < 0$). Kelvinov in ekvatorialni Rossbyjev val sta vsak posebej predstavljena na Sliki 2 (oz. njuni obliki). (Vir: Gill, 1980).

Ekvatorialne Rossbyjeve in Kelvinove valove najdemo tudi med lastnimi rešitvami lineariziranih osnovnih meteoroloških enačb za hidrostatično in nestisljivo ozračje – med t.i. normalnimi načini gibanj (eng. normal mode functions – NMF, npr. Kasahara in Puri, 1981). Tudi med NMF ločimo proti vzhodu in proti zahodu gibajoče se IG valove ter Rossbyjeve valove. NMF niso omejeni na tropske predele, raztezajo se lahko vse do polov. Ekvatorialne Rossbyjeve valove zato v primeru NMF raje imenujemo Rossbyjevi $n=1$ načini, čeprav se pri projekciji na NMF realni ekvatorialni Rossbyjevi valovi projicirajo pretežno na Rossbyjeve $n=1$ načine znotraj tropskih predelov.

Izven tropov MJO povzroča odziv v obliki serije ciklonalnih in anticiklonalnih vrtincev, ki se širi proti vzhodu, stran od diabatne perturbacije (eng. Rossby wave train – RWT, npr. Adames in Wallace, 2014).

Zgoraj opisani življenjski cikel MJO se pogosto razdeli na osmem faz. Glede na prostorsko porazdelitev okrepljene konvekcije in spuščanja zraka, imajo nekatere faze vzdolž ekvatorja približno dipolni vzorec diabatnega gretja atmosfere (en center s segrevanjem zraka zaradi sproščanja latentne toplote pri kondenzaciji in en z ohlajanjem zaradi porabe toplote za izhlapevanje pri spuščanju zraka - takšni sta npr. fazi 2 in 6), v drugih fazah pa je vzorec bolj podoben monopolu (npr. en center s segrevanjem ali ohlajanjem - npr. fazi 4 in 8). Ostale faze so prehodi med temi štirimi fazami (npr. Cassou, 2008; Lin in sod., 2009).

Obstajajo že študije valovnega odziva atmosfere na časovno in prostorsko kvazi-stacionarne tropske diabatne perturbacije, podobne posameznim fazam MJO. Večinoma so bile narejene z modeli brez uporabe vlažnih procesov. Ni pa še bilo narejeno ovrednotenje

atmosferskega odziva na idealizirane tropske diabatne perturbacije, podobne posameznim fazam MJO, v posameznih normalnih načinih. Glavna cilja te študije sta dva:

1. Primerjava atmosferskega odziva na štiri različne stacionarne tropske diabatne perturbacije podobne MJO. Analizirane perturbacije predstavljajo štiri faze MJO od osmih, in sicer tiste z monopolno obliko in tiste z dipolno obliko, s približno enako amplitudo obeh polov. Vse štiri obravnavane perturbacije so idealizirane oblike in imajo enako magnitudo. Natančneje nas zanima, kakšne vloge igrajo pri odzivu na te motnje Rossbyjevi, IG, Kelvinovi in posebej Rossbyjevi $n=1$ načini?
2. Ovrednotenje odziva na te štiri perturbacije v normalnih načinih v odvisnosti od prostorske skale. Zanimala nas je razporeditev variance odziva med Rossbyjeve, IG, Kelvinove in Rossbyjeve $n=1$ načine.

Rezultati bi lahko pomagali pri razumevanju valovnega odziva atmosfere na posamezne faze MJO in pri razumevanju povezav med odzivi v geografsko oddaljenih regijah. Predvsem so mišljene povezave med tropi in zmernimi širinami. Samo ovrednotenje variance odziva nam lahko pomaga razumeti razmerja med jakostjo odziva v posameznih normalnih načinih, oz. relativno pomembnost posameznega načina za posamezno fazo MJO.

Ta članek je povzetek dela doktorske dizertacije. Podrobnejši opis eksperimentov in rezultatov je v Kosovelj (2019) in Kosovelj in sod. (2019).

Metodologija

Dekompozicija na normalne načine gibanj

Normalni načini gibanj so lastne rešitve lineariziranih osnovnih meteoroloških enačb za hidrostatično in nestisljivo ozračje. Sestavljajo popoln set 3D ortogonalnih funkcij, zato se lahko uporabljajo kot bazne funkcije za projekcijo globalnih atmosferskih polj vetra in geopotenciala. Takšna projekcija podatkov na normalne načine je podrobneje opisana npr. v Kasahara in Puri (1981), Žagar in sod. (2015) ter Kosovelj (2019).

Za izračun normalnih načinov ter projekcijo podatkov je uporabljena vertikalna koordinata σ , ki je v primeru, da je zračni tlak na vrhu numeričnega modela enak 0 hPa, definirana kot $\sigma = p/p_s$, kjer je p_s tlak pri tleh. Koordinata σ ima tako pri tleh vrednost 1, na vrhu atmosfere pa 0. Namesto pravega geopotenciala ($\Phi = gz$, kjer je g težni pospešek, z pa višina ploskve konstantnega tlaka), je uporabljen spremenjen geopotencial, ki upošteva tudi spremembe v zračnem tlaku pri tleh (p_s): $P = \Phi + RT_0 \ln p_s$. Tu je Φ geopotencial, T_0 povprečna temperatura na vsakem modelskem nivoju in R specifična plinska konstanta (za suh zrak znaša $R = 287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

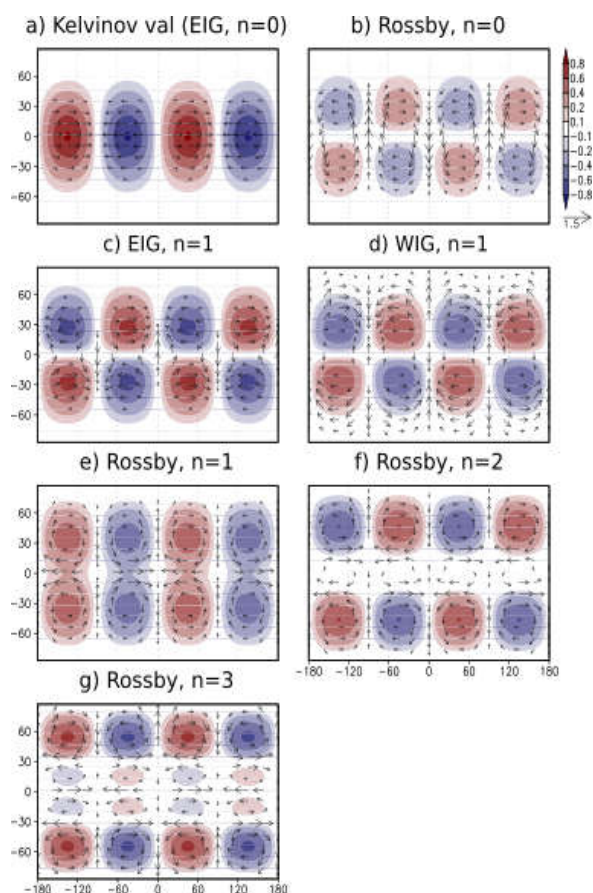
Projekcijo lahko zapišemo kot:

$$\begin{bmatrix} u(\varphi, \lambda, \sigma) \\ v(\varphi, \lambda, \sigma) \\ P(\varphi, \lambda, \sigma) \end{bmatrix} = \sum_m \mathbf{S}_m \left(\sum_k \sum_n \chi_n^k(m) \mathbf{H}_n^k(m) \right) G_m(\sigma) \quad (1)$$

V enačbi 1 $\chi_n^k(m)$ predstavlja kompleksne koeficiente razvoja, pri čemer so k zonalno valovno število, n meridionalni indeks in m vertikalni indeks. Funkcije G_m predstavljajo vertikalne bazne funkcije. Prva bazna funkcija ($m=1$) je barotropna – nima nobene ničle – vse ostale bazne funkcije pa so barokline (vsaka naslednja bazna funkcija ima eno ničlo več od prejšnje). Horizontalne bazne funkcije so Houghove funkcije ($\mathbf{H}_n^k(m)$). Houghove

funkcije so sestavljene iz sinusnih valov v zonalni smeri in iz kombinacije pridruženih Legendrovih polinomov v meridionalni smeri (jug-sever). Ločimo Houghove funkcije za Rossbyjeve in IG načine. Houghove funkcije za lihe Rossbyjeve in sode IG meridionalne indekse so simetrične glede na ekvator, medtem ko so Houghove funkcije za sode Rossbyjeve in lihe IG meridionalne indekse asimetrične glede na ekvator. Primeri nekaterih Houghovih funkcij so na Sliki 2. Kako daleč proti poloma se raztezajo Houghove funkcije je odvisno od vertikalnega indeksa (m). Večji kot je m , bližje ekvatorju so ujete Houghove funkcije. Diagonalna 3×3 matrika S_m zagotavlja, da so vhodni podatki v projekcijo brezdimenzijski.

Enačba 1 opisuje inverzno projekcijo iz modalnega v fizikalni prostor. Lahko jo uporabimo za filtriranje posameznih načinov ali skupin načinov (npr. Kelvinovega načina, Rossbyjevga $n=1$ načina, vseh Rossbyjevih ali IG načinov). Neželene načine odstranimo tako, da njihove koeficiente razvoja ($\chi_n^k(m)$) postavimo na nič, preden inverzno projekcijo izračunamo.



Slika 2: Primeri nekaterih Houghovih funkcij z različnimi meridionalnimi indeksi (n). Brezdimenzijski veter je prikazan z vektorji, brezdimenzijski geopotencial z barvami. Vsi primeri so za vertikalni indeks 3 in zonalno valovno število 2. Prirejeno po Kosovelj (2019).

Model SPEEDY

Za numerične simulacije je uporabljen model ICTP AGCM (SPEEDY; Molteni, 2003; Kucharski in sod., 2006). Je spektralni model z vertikalno koordinato σ . Natančnejši opis uporabljene verzije 41 je dosegljiv na: <http://users.ictp.it/~kucharsk/speedy-net.html>.

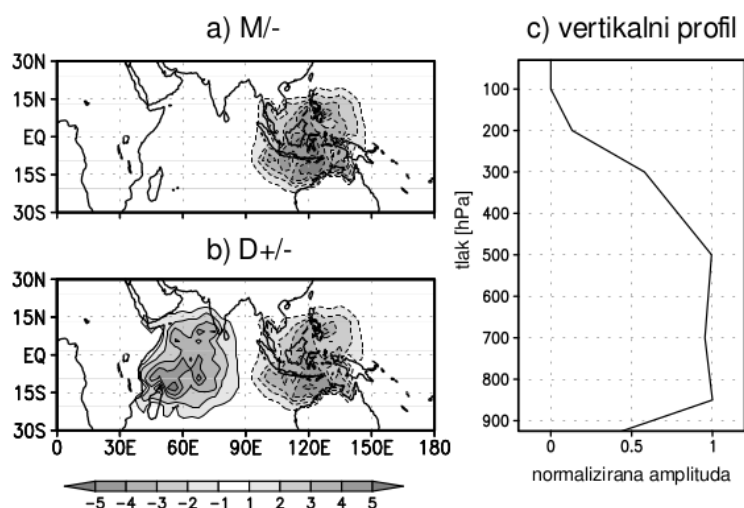
Model ima 8 vertikalnih nivojev, najvišji ($\sigma = 0,025$) predstavlja stratosfero, najnižji ($\sigma = 0,95$) pa planetarno mejno plast. Planetarna mejna plast je plast atmosfere, kjer ima kopensko ali oceansko površje pomemben vpliv na dinamiko ozračja. Modelski rezultati so podani na Gaussovski mreži s približno horizontalno ločljivostjo $3,75^\circ \times 3,75^\circ$. V spektralnem prostoru je uporabljenih 30 valovnih števil (T30).

Opis eksperimenta

S SPEEDY-jem so bili izračunani štirje ansambli. Edina vnaprej definirana razlika med njimi je v lokaciji tropske diabatne perturbacije in njenem predznaku.

Najprej je bila izračunana 102 leti (1909-2010) dolga modelska integracija brez perturbacij, ki vsem štirim ansambлом služi kot kontrolna integracija. Od leta 1911 naprej je bil model zagnan za vsak 1. januar, z dodatnimi tropskimi diabatnimi perturbacijami. Te perturbacije so bile dodajane skozi celoten čas posamezne integracije. Vsaka takšna integracija je obsegala prvih 90 dni v letu in predstavlja en član enega ansambla. Vsak ansambel pa obsega 100 let - torej 100 članov. Modelski rezultati so bili shranjeni kot dnevna povprečja.

Vsak od štirih ansamblov je bil pripravljen z drugačnimi tropskimi diabatnimi perturbacijami, ki so bile tekom integracije v model dodajane kot dodatne tendence temperature. Te dodatne perturbacije upoštevajo povratne zanke preko konvekcije in kondenzacije. Dodane perturbacije so sinusne oblike, z maksimumi nad Indijskim oceanom in Indonezijo. V horizontalni smeri so bile ob vsakem časovnem koraku in v vsaki modelski točki pomnožene z naključnim faktorjem 0 ali 1, kar simulira naključnost konvekcije. Povprečne perturbacije so predstavljene na sliki 3 za eksperimenta M/- (ohlajanje nad Indonezijo – približno ustreza fazama MJO 1 ali 8) in D+/- (faza 2). Eksperimenta M/+ (gretje nad Indonezijo, faza 4) in D-/+ (fazi 5 ali 6) imata podobna vzorca z obrnjenimi predznaki glede na M/- in D+/-.



Slika 1: Tropski diabatni perturbaciji (a) M/- in (b) D+/-, povprečeni preko 90 dni, na 500 hPa (približno 5 km). Polne izolinerije predstavljajo dodatno segrevanje, prekinjene izolinerije pa ohlajanje, v K/dan. (c) Povprečni vertikalni profil perturbacij, normaliziran z 90-dnevnim povprečjem perturbacij na 500 hPa. (Vir: Kosovelj, 2019).

Atmosferski odziv na perturbacije je bil analiziran v fizikalnem in modalnem prostoru (prostoru NMF). V fizikalnem prostoru so bili rezultati analizirani kot povprečne razlike med posameznimi člani ansambla in kontrolno integracijo, v modalnem prostoru pa v obliki variance, definirane s kvadratom razlike med koeficienti razvoja posameznih članov ansambla in kontrolne integracije.

Statistična značilnost odziva v fizikalnem prostoru je bil preverjena s pomočjo t-testa za neenake variance (Welchevega t-testa; Welch, 1947), ob ničelni hipotezi, da je povprečni geopotencial peturbiranih simulacij v vsaki točki enak povprečnemu geopotencialu kontrolne simulacije. Povprečje je tu definirano kot 100-letno povprečje geopotenciala na analizirani dan. Opisani rezultati so statistično značilni s stopnjo zaupanja 95 %.

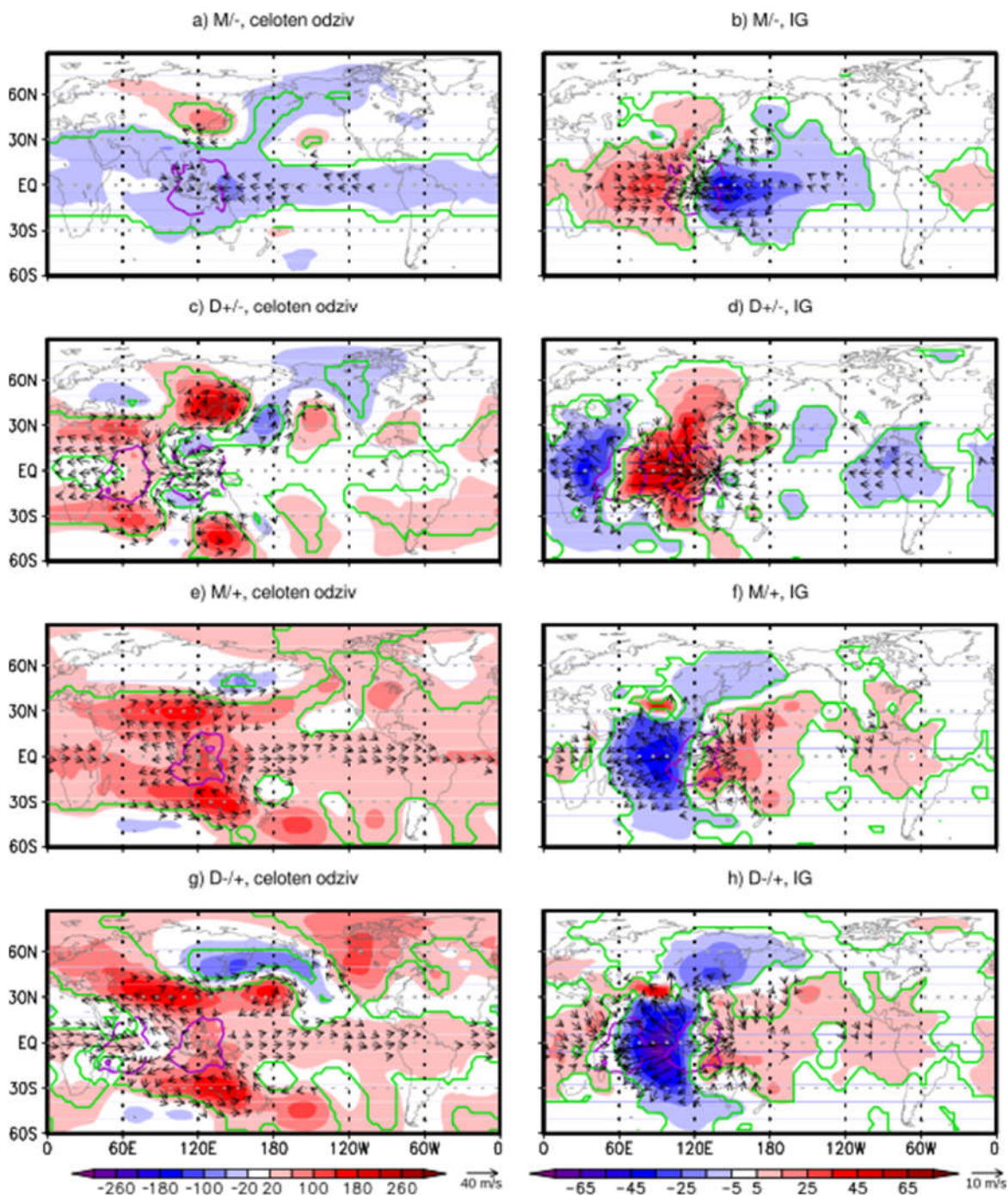
Rezultati

Odziv v fizikalnem prostoru

Kratkoročni odziv (na 3. dan, rezultati niso predstavljeni grafično) na monopolne perturbacije je podoben odzivu na tropske perturbacije, ki ga je opisal Gill (1980). Blizu ekvatorju ga sestavljajo zonalni vetrovi, ki spominjajo na Kelvinov val, vrtinci severno in južno od območja perturbacij pa spominjajo na ekvatorialni Rossbyjev val. Odziv je baroklin, v spodnji troposferi ima nasprotni predznak kot v zgornji troposferi. Kar spominja na Kelvinov val, se dejansko večinoma projicira na IG del odziva, kar izgleda kot ekvatorialni Rossbyjev val, se večinoma projicira na Rossbyjeve načine. Odziv na dipolno perturbacijo je približno enak vsoti odzivov na dve monopolni perturbaciji različnih predznakov, med seboj oddaljeni za 60 stopinj geografske širine. Odziva na M/- in D+/- perturbaciji sta po obliki in amplitudi zelo podobna odzivom na M/+ in D-/+ perturbaciji, le predznaki so obrnjeni.

Nekaj dni kaseneje se pojavi statistično značilen vzorec barotropnih Rossbyjevih valov (eng. Rossby wave train, RWT) izven tropov. V srednjeročnem odzivu (na 14. dan, slika 4) je RWT izven tropov že popolnoma razvit. V tropskih območjih kljub večji amplitudi in drugačnemu prostorskemu vzorcu, odziv sestavljajo podobni gradniki kot v kratkoročnem odzivu. Kljub temu, da je odziv na 14. dan sestavljen podobno za vse štiri eksperimente, sta natančen vzorec in jakost odziva močno odvisna od tega, ali imamo dipol ali monopol ter od predznakov posameznih perturbacij. V primeru enakih velikosti pozitivnih in negativnih perturbacij, je odziv določen pretežno s pozitivnim polom, tudi v primeru perturbacij dipolne oblike.

Poleg pozitivnega pola ima tudi negativni pol perturbacije pomembno vlogo, saj zmanjša in delno tudi omeji tropski odziv na tisti strani motnje, na kateri se negativni pol nahaja. Negativni pol perturbacije tudi pomembno prispeva k obliki in amplitudi RWT izven tropov, kar sta opisala že Seo in Lee (2017). Poleg tega se v primeru perturbacije D-/+ pojavi statistično značilen srednjeročni odziv nad Evropo (viden na Sliki 4g), ki bi lahko, preko širjenja odziva severozahodno od motnje, vplival tudi na vreme v Evropi. Podoben odziv nad Evropo je omenjen tudi v Lin in Brunet (2018), a za potrditev bi bili potrebni dodatni eksperimenti z modeli za numerično napovedovanje vremena.



Slika 2: Celotni (a,c,e,g) in IG (b,d,f,h) odziv na tropske diabatne perturbacije na 200 hPa na dan 14. Geopotencialna višina (Φ/g) je predstavljena z barvami (v m), veter z vektorji. Vijolične črte prikazujejo izolinijo povprečne perturbacije ± 2 K/dan, s slike 3. Zelene črte prikazujejo izolinijo 95 % statistične značilnosti za geopotencial. Vetrovi so risani za hitrosti večje od 7 m/s za celoten odziv ter večje od 1,5 m/s za IG odziv. (Vir: Kosovelj, 2019)

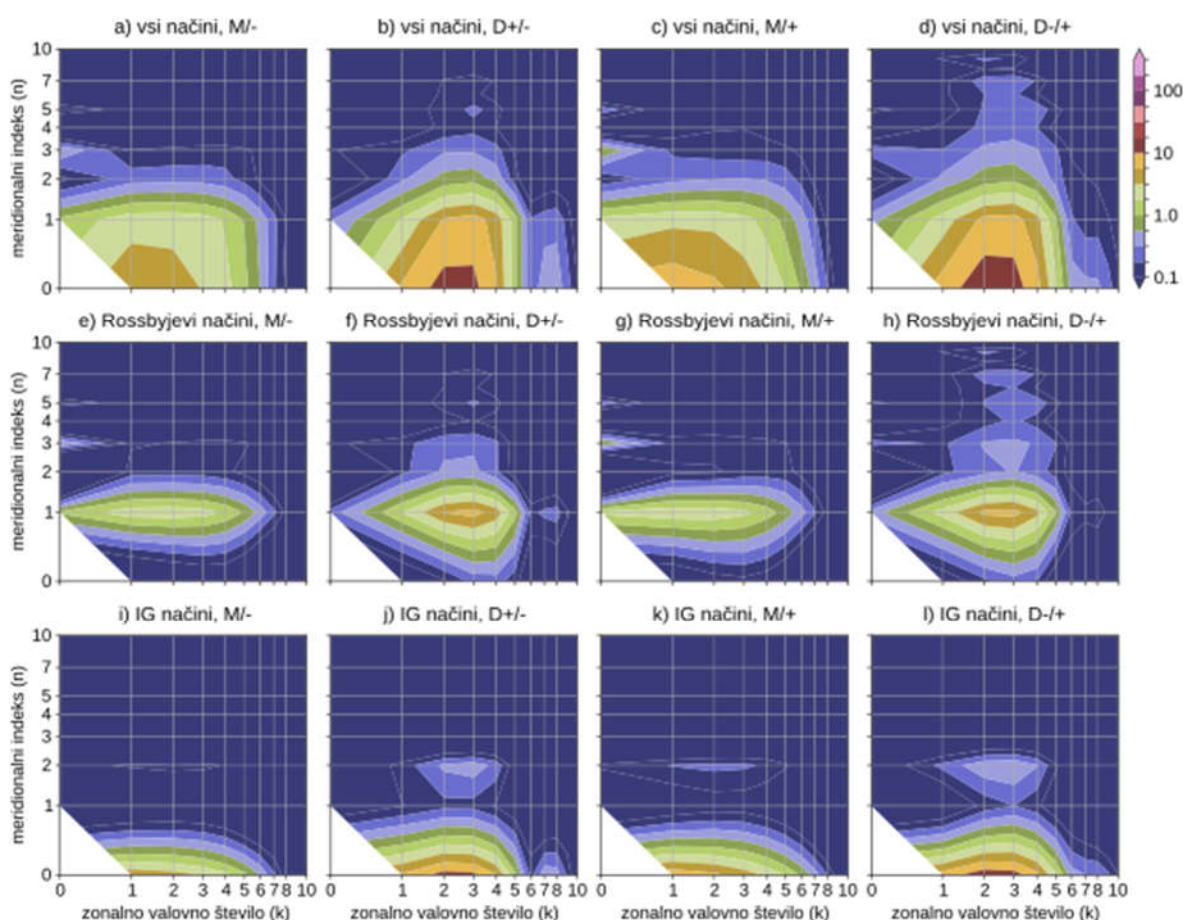
Razdelitev odziva med Rossbyjeve in IG načine ter še dodatno na Kelvinov in Rossbyjev $n=1$ val, podaja še dodatne informacije. Čeprav je odziv v Kelvinovem valu v tropih dominanten, ni edini prispevek h globalnemu IG odzivu. Zunaj tropov imajo ostali IG načini pomembno vlogo nad jugovzhodno Azijo (v bližini subtropskega vetrovnega stržena, desni

stolpec slike 4). Tam amplituda IG odziva na 200 hPa doseže tudi do četrtno amplitude odziva v Rossbyjevih načinih in predstavlja ageostrofsko cirkulacijo (del cirkulacije, pri katerem veter in zračni tlak, oz. geopotencial nista v ravnovesju), posledico interakcije odziva na tropsko diabatsno perturbacijo z vetrovnim strženom.

Med Rossbyjevimi valovi v tropih in subtropih ima sicer največji prispevek Rossbyjev $n=1$ način, a k vzorcu odziva z dvema subtropskima vrtincema, ki na prvi pogled izgleda kot ekvatorialni Rossbyjev val, prispevajo tudi ostali Rossbyjevi valovi z $n>1$. Slednji sicer v največji meri sestavljajo RWT.

Odziv v modalnem prostoru

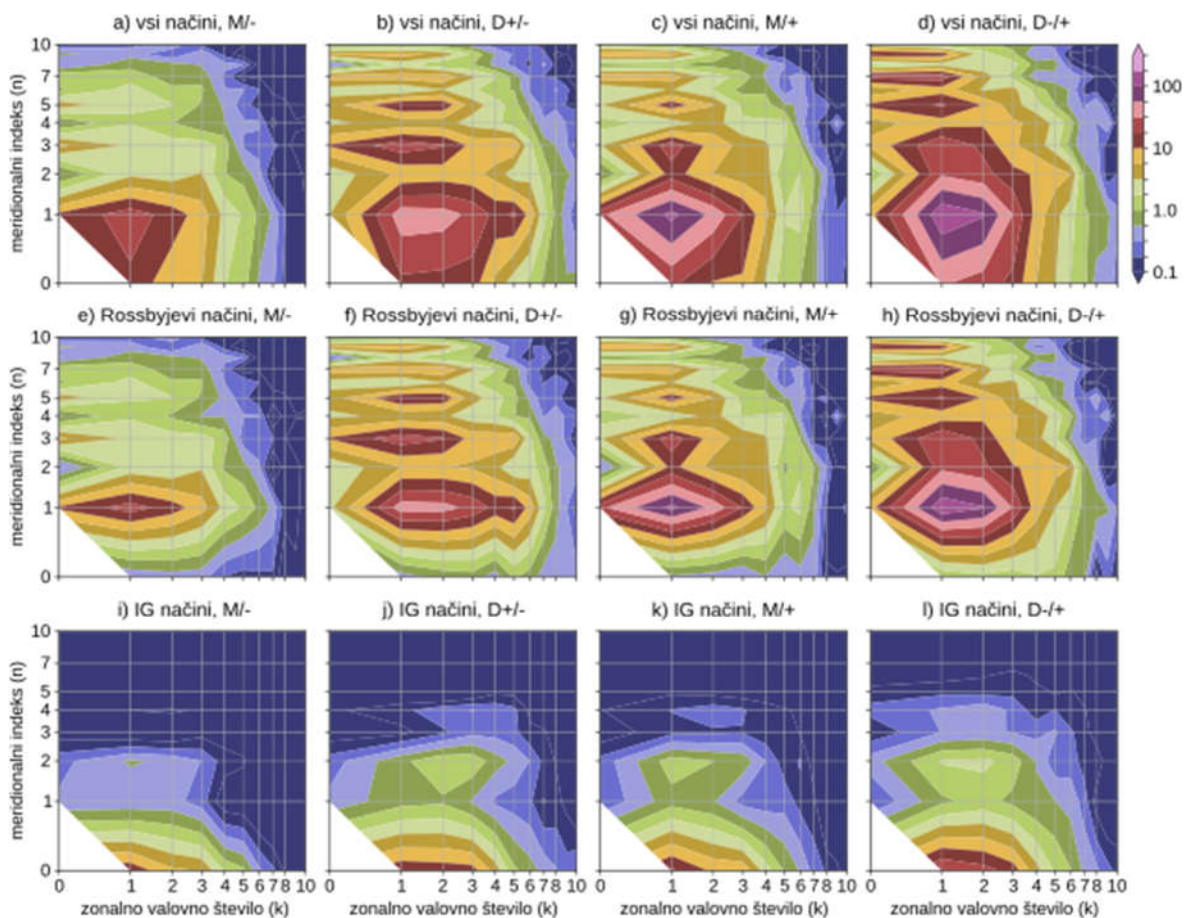
Sliki 5 in 6 prikazujeta razporeditev variance odziva med meridionalne načine in zonalna valovna števila in predstavljata enega glavnih rezultatov doktorskega dela.



Slika 3: Razporeditev variance med zonalna valovna števila in meridionalne načine na 3. dan (v J/kg). (a-d) Celotna varianca, (e-h) Rossbyjev del in (i-l) IG del. (Vir: Kosovelj, 2019)

Vpliv oblike perturbacije (ali je le-ta dipolna ali monopolna) se lepo vidi v kratkoročnem odzivu (slika 5). Za razliko od monopolne perturbacije, ki ima največjo varianco v zonalnem valovnem številu $k=1$, dipolna perturbacija sproži največji odziv v valovnih številih $k=2-3$. To je povezano z zonalno skalo perturbacije, ki ima valovno število tri. V srednjeročnem odzivu (slika 6) imajo vse perturbacije največji odziv v $k=1$. Dipolne perturbacije povzročajo relativno večji odziv v največjih prostorskih skalah (najmanjših valovnih številih) v

primerjavi z monopolnimi perturbacijami, zaradi večje amplitude RWT. Precejšen delež variance, 10-15 % je tudi v zonalnem povprečju ($k=0$).



Slika 4: Enako kot slika 5, le za 14. dan. (Vir: Kosovelj, 2019)

Na sliki 6 se lepo vidi tudi, da je varianca odziva na dan 14 večja v poskusih, ki imajo gretje nad Indonezijo (M/+ in D-/+) v primerjavi s poskusi z ohlajanjem nad Indonezijo (M/- in D+/-). Podobno velja tudi za dan 3, čeprav je razlika manjša in zato na sliki 5 slabše vidna. Do tega pride zaradi hitrejšega časovnega razvoja odziva v poskusih z gretjem nad Indonezijo v kratko- do srednjeročnem obdobju. V skladu s tem opažanjem se obnaša tudi poskus z monopolnim gretjem nad Indijskim oceanom, ki sicer ni predstavljen v tem članku.

Razlog za opisano hitrejšo rast variance v primerih z gretjem nad Indonezijo ni popolnoma jasen. Vse kaže, da gre za kombinacijo različnih faktorjev. Eden izmed njih je močnejša povratna zanka zaradi kondenzacije in konvekcije nad Indonezijo. Drugi faktor je lahko interakcija med diabatno perturbacijo in tokom ozadja (močnimi zahodniki zmernih širin). Podobno lahko vpliva interakcija med valovi v odzivu in tokom ozadja. Možen pa je tudi vpliv drugih nelinearnih pojavov. V dolgoročnem odzivu (po približno 35-40 dnevih, v tem članku ni grafično predstavljen) imata oba poskusa z dipolnima perturbacijama podobno skupno varianco (varianco, sešteto po vseh valovnih številih, meridionalnih in vertikalnih indeksih). Podobno velja za oba poskus M/+ in poskus z monopolnim gretjem nad Indijskim oceanom, ki sicer ni predstavljen v tem članku.

V poskusu M/- varianca ves čas ostane najmanjša med vsemi opisanimi eksperimenti, saj je prisoten le en pol z ohlajanjem zraka. To pomeni, da ne pride do okrepitev odziva zaradi

pozitivne povratne zanke preko konvekcije in kondenzacije. To se sklada tudi z opažanji v fizikalnem prostoru (npr. Sika 4).

Kratkoročni odziv je večinoma v IG načinih, na 3. dan je v IG načinih približno 60 % celotne variance, od tega večina v Kelvinovem valu. Razlog je predvsem v omejenosti odziva na tropske predele, kjer je imajo IG valovi bistveno večjo vlogo kot izven tropov, Kelvinov val pa učinkovito pomaga pri transportu energije stran od perturbacije. V srednjeročnem odzivu, na 14. dan, je še vedno okrog 10 % celotne in večina IG variance v Kelvinovem valu.

Ne glede na časovno skalo je glavni prispevek k Rossbyjevemu delu variance v Rossbyjevem $n=1$ načinu. Na 3. dan je v njem okrog 80 % variance Rossbyjevih načinov in 30-45 % celotne variance. Tudi to je v skladu z omejenostjo odziva pretežno na tropske predele, kjer ima Rossbyjev $n=1$ način med vsemi Rossbyjevimi načini glavno vlogo pri transportu energije stran od perturbacije (npr. Gill, 1980). Na 14. dan je več kot 50 % variance Rossbyjevih načinov v Rossbyjevih načinih z $n>1$, pretežno povezanih z odzivom izven tropskih predelov (RWT).

Na slikah 5 in 6 se opazi tudi, da je varianca odziva večja v lihih Rossbyjevih in sodih IG načinih. Oboji so simetrični glede na ekvator (slika 2). V splošnem velja, da je atmosferski odziv na diabatne perturbacije, ki so približno simetrične glede na ekvator, pretežno v simetričnih načinih, ne glede na cirkulacijo ozadja (npr. Kasahara, 1984 ter Kasahara in da Silva Dias, 1986). Tukaj predstavljeni rezultati temu ustrezajo.

Zaključki

Ta članek je povzetek dela doktorske dizertacije (Kosovelj, 2019). Predstavlja odziv globalne cirkulacije na motnje v tropskem diabatnem gretju in razcep tega odziva na normalne načine gibanj. Razcep na normalne načine omogoča diagnostiko 3D cirkulacije v odvisnosti od prostorske skale, s pomočjo Rossbyjevih in inercialno-težnostnih valov, ki predstavljajo lastne rešitve lineariziranih osnovnih meteoroloških enačb za hidrostatično in nestisljivo ozračje. Za numerične simulacije je uporabljen model ICTP AGCM (SPEEDY).

Pokazano je, da realistična formulacija perturbacij diabatnega gretja, z upoštevanimi povratnimi zankami zaradi vlažnih procesov, ne daje bistveno drugačnih rezultatov kot jih dajejo modeli brez vlage z dodanimi perturbacijami v temperaturi, kakršni so bili pogosto uporabljeni v podobnih študijah. Odziv cirkulacije je večinoma pogojen s pozitivno anomalijo v gretju, vendar meddelovanje obeh polov (pozitivne in negativne anomalije) v dipolu vpliva na odziv v tropih ter na obliko in orientacijo Rossbyjevih valov, ki se širijo iz subtropskih območij. Kratkoročni odziv v fizikalnem prostoru in varianca kratkoročnega odziva se projicirata predvsem na IG načine, še posebej na Kelvinov val. V srednjeročnem odzivu (v fizikalnem prostoru in varianci odziva v modalnem prostoru) dominirajo Rossbyjevi načini, Rossbyjevi načini z meridionalnim indeksom večjim od 1 (Rossbyjevi načini $n>1$) prispevajo več kot 50 % variance k Rossbyjevemu delu variance odziva. Izmed posameznih valov največji prispevek k varianci Rossbyjevih valov prispeva Rossbyjev način $n=1$, ne glede na časovno skalo odziva. Razlike v velikosti variance kratko- in srednjeročnega odziva med posameznimi poskusi se najverjetneje pojavljajo zaradi večjih prepletenih dejavnikov. Edina izjema je monopol z negativno perturbacijo diabatnega gretja, kjer je skupna varianca odziva zaradi odsotnosti povratne zanke preko kondenzacije in konvekcije vedno manjša od ostalih poskusov.

Literatura

- Adames, A. F., Wallace, J. M. (2014). Three-dimensional structure and evolution of the MJO and its relation to the mean flow, *Journal of Atmospheric Sciences* 71, 2007-2026.
- Cassou, C. (2008). Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation, *Nature* 455, 523-527.
- Gill, A. E. (1980). Some simple solutions for heat-induced tropical circulation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106, 447-462.
- Hendon, H. H., Salby, M. L. (1994). The life cycle of the Madden-Julian Oscillation, *Journal of Atmospheric Sciences* 51, 2225-2237.
- Kasahara, A., Puri, K. (1981). Spectral representation of three-dimensional global data by expansion in normal mode functions, *Monthly Weather Review* 109, 37-51.
- Kosovelj, K. (2019): Normal-mode analysis of the role of tropics in global atmospheric predictability (Analiza vloge tropskih predelov v globalni napovedljivosti ozračja s pomočjo normalnih načinov). Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FMF, 124 p.
- Kosovelj, K., Kucharski, F., Molteni, F., Žagar, N. (2019). Modal decomposition of the global response to tropical heating perturbations resembling MJO, *Journal of Atmospheric Sciences* 76, 1457-1469.
- Kucharski, F., Molteni, F., King, M. P., Farneti, R., Kang, I. S., Feudale, L. (2006). Decadal interactions between the western tropical Pacific and the North Atlantic Oscillation, *Climate Dynamics* 26, 79-91.
- Lin, H., Brunet, G. (2018). Extratropical response to the MJO: nonlinearity and sensitivity to initial state, *Journal of Atmospheric Sciences* 75, 219-234.
- Lin, H., Brunet, G., Derome, J. (2009). An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation, *Journal of Climate* 22, 364-380.
- Madden, R. A., Julian, P. R. (1971). Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *Journal of Atmospheric Sciences* 28, 702-708
- Madden, R. A., Julian, P. R. (1972). Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period, *Journal of Atmospheric Sciences* 29, 1109-1123.
- Matsuno, T. (1966). Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, *Journal of the Meteorological Society of Japan* 44, 25-43.
- Molteni, F. (2003). Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I: model climatology and variability in multi-decadal experiments, *Climate Dynamics* 20, 175-195.
- Salby, M. L., Hendon, H. H. (1994). Intraseasonal behavior of clouds, temperature, and motion in tropics, *Journal of Atmospheric Sciences* 51, 2207-2224.
- Seo, K. H., Lee, H. J. (2017). Mechanisms for a PNA-Like Teleconnection Pattern in Response to the MJO, *Journal of Atmospheric Sciences* 74, 1767-1781.
- Welch, B. L. (1947). The Generalization of 'Student's' Problem when Several Different Population Variances are Involved, *Biometrika* 34, 28-35.
- Žagar, N., Kasahara, A., Terasaki, K., Tribbia, J., Tanaka, H. (2015). Normal-mode function representation of global 3-D data sets: open-access software for the atmospheric research community, *Geoscientific Model Development* 8, 1169-1195.

Spremembe števila geomagnetnih neviht in števila sončnih peg: mesečni, desetletni in stoletni naravni cikli

Rudi Čop¹

Povzetek

Sončni cikli in cikli geomagnetnih neviht, ki vplivajo na življenje na Zemlji, se v zahodni civilizaciji le zanimivost iz področja solarne astronomije in geomagnetizma. V veliki meri je za to kriv njen nagel razvoj in njena globalizacija v zadnjih petdesetih letih. V prispevku so zato ti cikli predstavljeni z namenom da bi jih znali upoštevati tudi v našem vsakdanjem življenju, kot se jih že upošteva v civilizacijah, ki so starejše od zahodne.

Ključne besede: mesečni cikel geomagnetnih neviht, cikel sončnih peg, cikel spremembe magnetnih polov na Soncu, stoletni cikel ali Gleissbergov cikel

Keywords: the monthly cycle of geomagnetic storms, the cycle of sunspots, the cycle of changes of the Sun's magnetic poles, the hundredth cycle or cycle of Gleissberg

Sončne pege

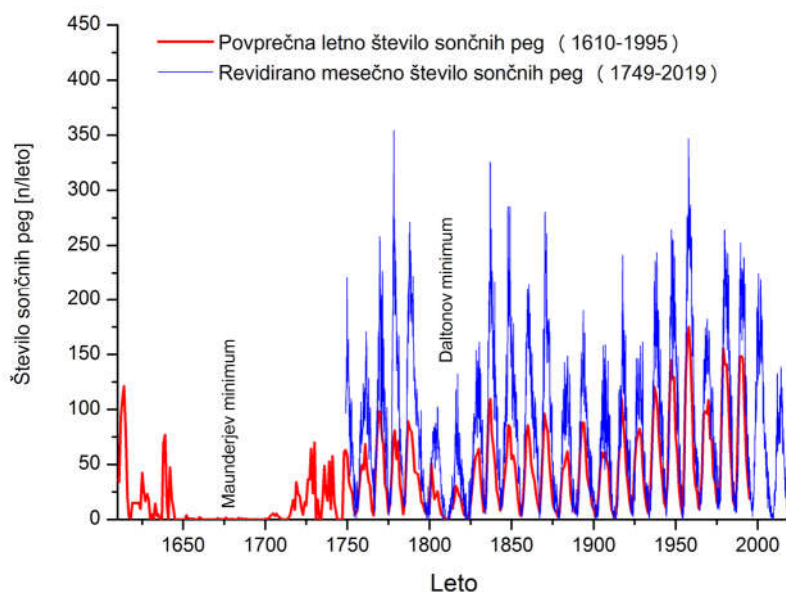
Sončne pege so pred uvedbo teleskopa v astronomijo opazovali s prostim očesom v posebnih pogojih, kot v primeru gozdnih požarov ali skozi dim tempeljskih ognjev. Najstarejši zapisi o sončnih pegah so iz Kitajske, nastali so v obdobju od leta 28 pred našim štetjem do leta 1638. Iz obdobja pred iznajdbo teleskopa obstajajo podobni zapisi še v kronikah iz Japonske, Koreje in Rusije (Bray & Loughhead, 1964). Prav tako je poznano, da je leta 807 arabski astronom Abu Alfadhl Giaafar opazoval sončne pege zaporedno 91 dni (Hoyt & Schatten, 1996).

Verovanje, da je Sonce popoln disk, je v zahodni civilizaciji obstajalo vse do uvedbe teleskopa v solarno fiziko leta 1611. Galileo Galilei (1564–1642) in Christopher Scheiner (1575–1650) (Galilei & Scheiner, 2010; Piccolino & Wade, 2008) sicer nista bila prva, ki sta v prvi polovici 17. stoletja opazovala sončne pege skozi teleskop, sta pa bila prva, ki sta jih pripisala spremembam na površini ali v atmosferi Sonca. Scheiner je tudi prvi opazil, da sončne pege potujejo tem hitreje, čimbolj blizu so solarnemu ekvatorju (Paternò, 2010). Ekvator Sonca se zavrti v 26,2 sideričnih dneh, njegovi poli pa v 36,7 sideričnih dneh (latinsko: sidera, zvezda). Rotacija Sonca je torej odvisna od solarne širine, ki se glede na opazovalca na Zemlji efektivno zavrti v 27 dneh (Gilman, 1974; Sanderson et al, 2003). Cikle sončnih peg, ki v povprečju trajajo 11,06 let, je v prvi polovici 19-tega stoletja odkril Heinrich Schwabe (1789–1875) (Arlt, 2011). To je eno od najpomembnejših odkritij v sodobni astronomiji. Vse naše sedanje vedenje o delovanju Sonca, ki neposredno vpliva na Zemljo in na življenje na njej, izhaja iz tega odkritja.

Dnevni podatki o številu sončnih peg, ki se zbirajo zadnjih 400 let, so najdaljša zbirka dnevnih podatkov v znanosti. Po odkritju ciklov sončnih peg jo je organiziral švicarski astronom Rudolf Wolf (1816–1893). V začetku tega desetletja so po 160 letih te podatke ponovno pregledali in dopolnili (Clette et al, 2014). Upoštevali so le uspešno preverjene podatke ter uskladili število sončnih peg in zapise o številu sončnih grup (Slika 1). V novi in revidirani bazi podatkov je izginil izrazit maksimum iz sredine preteklega stoletja.

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje

Izkazalo se je tudi, da je bila v zadnjih 250 letih sončna aktivnost zelo stabilna (Sunspot, 2007; SILSO, 2019). Podatki o številu sončnih peg se uporabljajo v različnih znanstvenih disciplinah, med drugim tudi v klimatologiji (The Sun, 2000). V geomagnetizmu so postali pomembni po letu 1851, ko je Edvard Sabine (1788-1883) objavil (Sabine, 1852), da se pogostnost geomagnetnih neviht spreminja v skladu s cikli sončnih peg (Maunder, 1904). Da se število geomagnetnih neviht spreminja ciklično v decadalni periodi, je v istem letu objavil tudi Johann von Lamont (1805–1879). V drugi polovici prejšnjega stoletja je bilo še ugotovljeno, da je tudi dotok kozmičnih žarkov na Zemljo moduliran s sončnimi cikli (Hathaway, 2015).

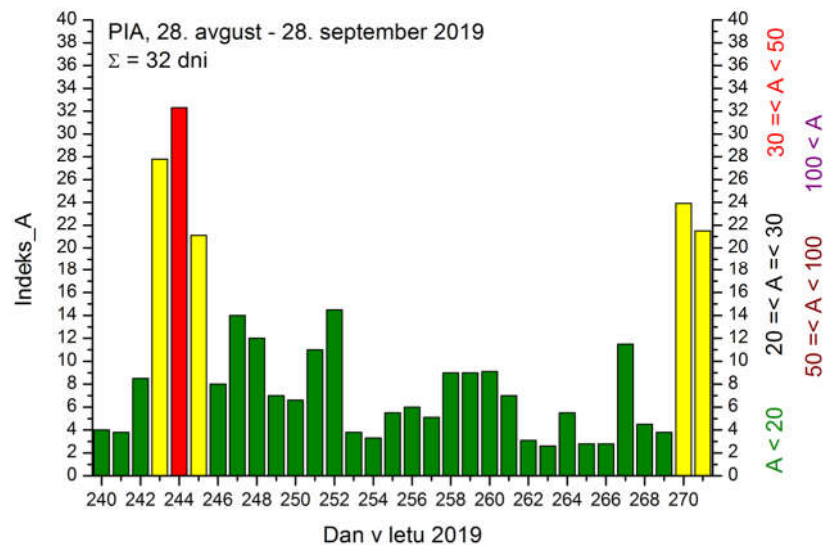


Slika 1 – Povprečno letno število sončnih peg prešteti v letih 1610–1995 (Sunspot, 2007) in revidirano mesečno število sončnih peg in sončnih grup v letih 1749–2019 (SILSO, 2019).

Pieter Zeeman (1865–1943) je odkril premik valovne dolžine svetlobe v primeru, ko ta potuje skozi močno magnetno polje (Zeeman, 1897). George Ellery Hale (1868–1938) je leta 1919 z uporabo Zeemanovega efekta in s prilagojenim spektrometrom ugotovil, da so sončne pege v bistvu področja z močnim in koncentriranim magnetnim poljem na sončevi površini in da Sonce v dveh zaporednih ciklih sončnih peg zamenja tudi usmeritev svojega magnetnega polja (Hale & Nicholson, 1925). Sonce je torej ogromna krogla plazme, ki je električno prevodna in zelo aktivna, če jo opazujemo v daljšem časovnem obdobju. Joseph Larmor (1857–1942) je razložil, da električne toke v Soncu lahko ustvarja samovzbudni enopolni električni dinamo (Stern, 2002). Da je električni dinamo tisti, ki ustvarja sončevo magnetno polje, je bilo potrjeno v drugi polovici prejšnjega stoletja. Za popolnejše razumevanje njegovega delovanja so razvili različne modele (Tobias, 2002; Tiwari, 2017), ki ponazarjajo notranje delovanje Sonca.

Sedemindvajset dnevni cikel geomagnetnih neviht

Geomagnetne nevihte so močne in nestalne spremembe zemeljskega magnetnega polja. Nastajajo zaradi udarnih valov, nastalih v sončnem vetru ob izbruhih v koroni Sonca CME (angl. coronal mass ejections) ali zaradi prehodov Zemlje preko tokovnic sončnega vetra s povečano hitrostjo CIR (angl. corotating interaction regions), ki izhajajo iz lukenj v koroni Sonca. Pogostnost geomagnetnih neviht je vezana na cikel sončnih peg, največja je v času njegovega maksimuma ter v času njegovega pojemanja. Tudi oba izvora geomagnetnih neviht sledita temu ciklu. Maksimum izbruhov v koroni Sonca sovpada z maksimumom sončnega cikla, maksimum števila lukenj v koroni Sonca pa zaostaja za dva do tri leta za njim (Čop, 2017; Obridko et al., 2013).



Slika 2 – Lokalni geomagnetni indeks A za posamezni dan v času 32 dni od 28. avgusta do 28. septembra 2019.

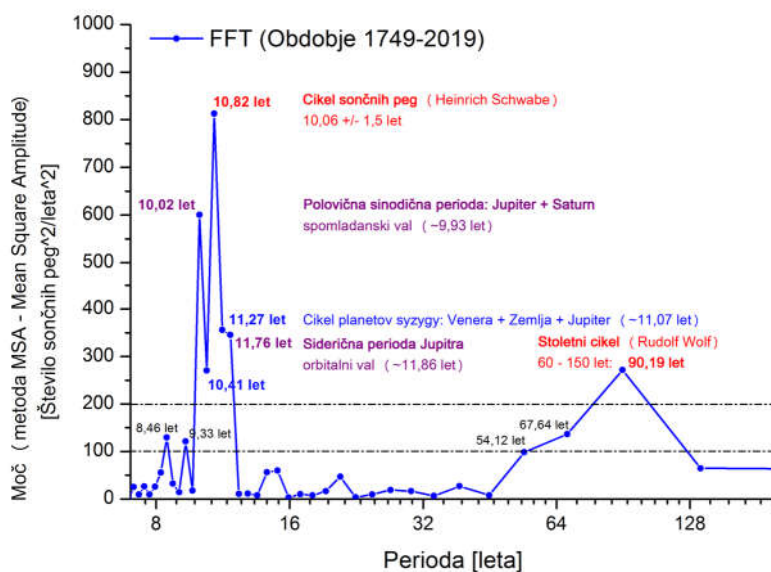
Geomagnetne nevihte se tako kot njihovi izvori delijo na dve skupini: na geomagnetne nevihte z nenadnim začetkom (angl. sudden commencement storms) in geomagnetne nevihte s postopnim začetkom (angl. gradual commencement storms). Okoli 24 % vseh neviht je takih z nenadnim začetkom, močnih in zelo močnih neviht pa je obeh oblik enako število (Lakhina & Tsurutani, 2016; Moen, 2004). Prav tako je pogostnost geomagnetnih neviht različna v različnih letnih časih. Najpogostejše so ob pomladnem in jesenskem enakonočju. Tako v ciklu sončnih peg kot v ciklu geomagnetnih neviht je zaznaven 27 dnevni efektivni obrat Sonca (Slika 2). Velik del geomagnetnih neviht se namreč ponavlja v ritmu efektivnega obrata Sonca. Zaradi tega so geomagnetne nevihte napovedljive, predvsem tiste z manjšo jakostjo, ki jih je preko 80 % vseh (Čop, 2017).

Enajstletni cikel sončnih peg

Sonce je center našega planetarnega sistema in vsebuje skoraj vso maso tega sistema. Njegova aktivnost se ciklično spreminja. Podatki o dnevnem spreminjanju števila sončnih peg so na razpolago od leta 1610 naprej in obsegajo 36 sončnih ciklov. S statistično obdelavo

(Smith, 1999) teh podatkov je dobljena srednja dolžina sončnega cikla $11,06 \pm 1,5$ let in mediana teh vrednosti med 10,7 leti in 11,0 leti. Ti podatki kažejo na utripanje, kar se z notranjimi procesi na Soncu ne da razložiti (Solheim, 2013). Zaradi rotacije planetov okoli Sonca se masno središče našega planetarnega sistema stalno premika in s tem tudi položaj Sonca nanj. Sonce in planeti delujejo med seboj in si izmenjujejo tako gravitacijske kot tudi vztrajnostne impulze. Zaradi tega površina Sonca valovi. Najbolj vplivni so planeti Venera, Zemlja, Jupiter in Saturn, ki imajo siderične periode dolge 0,615, 1,00, 11,862, in 29,458 let. Siderična perioda je čas, ko planet ponovno pride v isto točko na nebesnem svodu glede na zvezde stalnice.

Rezultati analize dnevnega števila sončnih peg od 1. do 23. sončnega cikla, od leta 1755 do 2008 [33], s pomočjo spektralne analize MEM (maximum entropy method), vsebujejo tri značilne periode: 9,98, 10,9 in 11,86 let (Scafetta, 2014; Wilson, 2013). Analiza MEM je ena od oblik analize FFT (fast Fourier transform) za preslikavo iz časovnega v frekvenčni prostor (Smith, 1999; Bergland, 1969). Središčna perioda 10,9 let je enaka periodi solarnega dinamika, krajša stranska perioda 9,98 let pa je blizu spomladanski periodi Jupitra in Saturna. Ta se spreminja od 9,5 do 10,5 let in v povprečju znaša 9,93 let. Daljša stranska perioda 11,86 let je enaka siderični periodi Jupitra. Zato se centralna perioda lahko pripiše solarnemu dinamiku, na katerega vplivata dva največja zunanja planeta, Jupiter in Saturn, s svojo gravitacijo. Dolžino sončnih ciklov je torej mogoče razložiti z nebesno mehaniko. Med seboj delujejo tri periode, ki se po dolžini med seboj le malo razlikujejo.



Slika 3 – Izrazite periode močnostnega spektra sončnih ciklov pridobljene z metodo MSA (mean square amplitude) pri analizi mesečnih podatkov o številu sončnih peg v obdobju 1749 – 2019.

Na naboru podatkov o mesečnem številu sončnih peg v obdobju 1749–2019 sem naredil spektralno analizo MSA (mean square amplitude). Tudi analiza MSA je ena od oblik analize FFT za preslikavo iz časovnega v frekvenčni prostor. Rezultati te analize so predstavljeni na sliki (Slika 3), na kateri je dobro vidna centralna perioda 10,82 let, ki pripada osnovnemu ciklu sončnih peg, in obe bočni periodi 10,02 in 11,76 let. Perioda 10,02 let je blizu spomladanski periodi Jupitra in Saturna, ki v povprečju znaša 9,93 let, perioda 11,76 pa je

blizu siderični periodi Jupitra, ki znaša 11,86 let. Cikel sizigij (staro grško: *suzugos*, spravljen skupaj) planetov Jupiter –Venera–Zemlja je povprečno dolg 11,07 let in blizu periodi 10,41 let kot tudi 11,27 let. V astronomiji je sizigij čas, ko se trije ali več nebesnih teles postavi v približno ravno črto. Tudi spektralna analiza MSA na sicer manjšem naboru podatkov, kot pa je bil uporabljan pri spektralni analizi MEM, da informacijo o delovanju planetov na solarni magnetni dinamiko.

Periodi 8,46 in 9,33 let pripadata višjima harmonskima frekvencama cikla sončnih peg, periodi 54,12 in 67,64 let pa višjima harmonskima frekvencama stoletnega cikla (Slika 3). Tudi vse te višje harmonske frekvence se da razložiti s pomočjo nebesne mehanike.

Stoletni cikel

Pri spektralni analizi MSA nabora podatkov o mesečnem številu sončnih peg v obdobju 1749–2019 se je pojavila tudi stoletna perioda Sonca z dolžino 90,19 let (Slika 3). Ta perioda pripada najdaljšemu naravnemu ciklu, ki se ga da še dokazati neposredno iz zapisov o dnevnem številu sončnih peg. Prvi je ta cikel opazil Rudolf Wolf v 19. stoletju, njegov obstoj pa potrdil Wolfgang Gleissberg (1903 - 1986) v prvi polovici 20. stoletja. Dokazati ga je mogoče še s spremembo širine letnic večstoletnih dreves (Kurths, et al., 1993) ter spremembo pogostnosti in jakosti polarnih sijevev (The Sun, 2000). V kolikor se upošteva pogostnost močnih protonskih neviht SPE (solar proton event) v zadnjih štiristo letih, potem se izkažejo minimumi v letih 1610, 1710, 1790, 1870 in 1950. Dva od njih sta zelo blizu Maunderjevega in Daltonovega minimuma (Slika 2). Poleg rezultatov vsebnosti nitritov v ledeniški skorji na Grenlandiji so bili uporabljeni tudi merilni rezultati iz satelitov izmerjeni v drugi polovici prejšnjega stoletja (McCracken et al., 2001).

Za boljše prepoznavanje lastnosti stoletnega cikla sončnih peg sami obstoječi zapisi o spremembi števila sončnih peg v preteklih štiristo letih ne zadostujejo. Za rekonstrukcijo več tisočletne spremembe sevanja Sonca se uporablja analiza radioaktivnih izotopov berilija ^{10}B in ogljika ^{14}C (cosmogenic isotopes), s katero se ugotavlja sprememba sipanja kozmičnih žarkov (Usoskin & Mursula, 2008), in paleomagnetne analize, s katerimi se ugotavljajo spremembe jakosti zemeljskega magnetnega polja (Ma, 2009; Peristykh & Damon, 2003). Na osnovi tako pridobljenih podatkov je bilo ugotovljeno, da je dolžina stoletnega cikla med 60 in 150 leti in da torej ni izrazito ciklične narave. Moduliran naj bi bil z daljšim okoli 200 letnim ciklom De Vries / Suess, ki se imenuje po dveh najvidnejših razvijalcih datiranja s pomočjo analize radioaktivnega ogljika. 200 letni sončni cikel v največji meri vpliva na spremembo klime na Zemlji (Lüdecke et al., 2015) in se ga da zaznati v lesu iz arheoloških najdišč (De Vriesov efekt) in v ogljikovem dioksidu, ki je nastal ob izgorevanju nafte po začetku industrijske revolucije (Suessov efekt).

Zaključek

Zbirke podatkov o delovanju Sonca in njegovem vplivu na Zemljo nastajajo daljše časovno obdobje, ki se ga ne da ponoviti. Teze in teorije, ki izhajajo iz rezultatov teh obdelav, so zato pridobljene na induktivni način (Glaser & Strauss, 1967; Pranskuniene, 2017). Razvoj primernih orodij in novih idej na področju delovanja Sonca in njegovega vpliva je vezan na čas vsaj dveh generacij (Cliver, 1994). Ta razvoj dodatno upočasnjuje še počasno širjenje tega znanja.

Sonce je izvor energije, ki doteka na Zemljo in omogoča življenje na njej, ki se razvija v zgornji površinski plasti našega planeta v gravitacijskem in magnetnem polju. Mehanizmi

vpliva Sonca na Zemljo so mnogoteri in med seboj prepleteni. Vsekakor pa Sonce magnetno vpliva na biosfero v obliki resonančnih pojavov in ne v absolutnih vrednostih.

Ko se je točnejša meritev časa s pomočjo atomskih ur v zadnjem desetletju prejšnjega stoletja prenesla iz eksperimentalne fizike tudi v vsakdanjo uporabo, in to na področje računalništva, telekomunikacije, navigacije in mobilne telefonije, so pomembne postale nanosekunde (10^{-9} s) in krajše časovne enote. Daljša časovna obdobja so v zahodni civilizaciji izgubila svoj življenjski pomen. Prav tako se v njej poskuša preseči tudi človekovo biološko uro, na katero vpliva predvsem sprememba svetlobe in temperatura (Dunlap & Loros, 2017), torej Sonce.

Literatura

- Arlt, R. (2011). The sunspot observations by Samuel Heinrich Schwabe. *Astronomische Nachrichten*, 332, 805–814.
- Bergland, G. D. (1969). A guided tour of the fast Fourier transform. *IEEE Spectrum*, 6, 41–52.
- Bray, R. J. Loughhead, R. E. (1964). Sunspots. The international astrophysical series. Volume seven. London: Chapman and Hall.
- Clette, F. Svalgaard, L. Vaquero, M. J. Cliver, W. E. (2014). Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle. *Space Science Reviews*, 186, 35–103.
- Cliver, W. E. (1994). Solar activity and geomagnetic storms: The first 40 years. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 75 (49), 569-575.
- Čop, R. (2017). Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg. Zbornik del: Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 69–80.
- Dunlap, C. J. Loros, J. J. (2017). Making time: conservation of biological clocks from fungi to animals. *Microbiol Spectrum*, 5 (3), 1–32.
- Galilei, G. Scheiner, C. (2010). On Sunspots. Translated & introduced by Eileen Reeves and Albert Van Helden. Chicago; London: The University of Chicago.
- Gilman, A. P. (1974). Solar rotation. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 12, 47–70.
- Glaser, G. B. Strauss, L. A. (1967). The Discovery of Grounded Theory. *Strategies for Qualitative Research*. New Brunswick (US); London (UK): AldineTransaction.
- Hale, G. Nicholson, B. S. (1925). The law of sun-spot polarity. *Astrophysical Journal*, 62, 270-300.
- Hathaway, H. D. (2015). The Solar Cycle. Moffett Field (CA, US): NASA Ames Research Center.
- Hoyt, V. D. Schatten, H. K. (1996). The Role of the Sun in Climate Change. New York (NY, US): Oxford University, 1996.
- Kurths, J. Spiering, Ch. Mouller-Stoll, W. Striegler, U. (1993). Search for solar periodicities in Miocene tree ring widths. *Terra Nova*, 5, 359–363.
- Lakhina, S. G. Tsurutani, T. B. (2016). Geomagnetic storms: historical perspective to modern view. *Geoscience Letters*, 3 (5).
- Lüdecke, -J. H. Weiss, O. C. Hempelmann, A. (2015). Paleoclimate forcing by the solar De Vries/Suess cycle. *Climate of the Past Discussions*, 11, 279–305.
- Ma, L. H. (2009). Gleissberg cycle of solar activity over the last 7000 years. *New Astronomy*, 14 (1), 1–3.
- Maunder, E. W. (1904). Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874-1902. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 64, 747–761.
- McCracken, K. G. Dreschhoff, G. A. M. Smart, D. F. Shea, M. A. (2001). Solar cosmic ray events for the period 1561-1994. *Journal of Geophysical Research*, 106 (A10), 21,599–21,609.
- Moen, I. J. (2004). Chapter 2: The Earth's Permanent Magnetic Field. Oslo (Norway): University of Oslo.
- Obridko, V. N. Kanonidi, Kh. D. Mitrofanova, T. A. Shelting, B. D. (2013). Solar Activity and Geomagnetic Disturbances. *Geomagnetism and Aeronomy*, 53 (2), 147–156.
- Paternò, L. (2010). The solar differential rotation: a historical view. *Astrophysic Space Science*, 328, 269–277.

- Peristykh, N. A. Damon, E. P. (2003). Persistence of the Gleissberg 88-year solar cycle over the last ~12,000 years: Evidence from cosmogenic isotopes. *Journal of Geophysical Research*, 108 (A1), 1003.
- Piccolino, M. Wade, J. N. (2008). Galileo's eye: A new vision of the senses in the work of Galileo Galilei. *Perception*, 37, 1312–1340.
- Pranskuniene, R. (2017). Grounded Theory Methodology in the Context of Social Innovations for Rural Development Research. Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development 2017, 1273–1279. Edited by prof. Asta Raupelienė.
- Sabine, E. (1852). On Periodical Laws Discoverable in the Mean Effects of the Larger Magnetic Disturbances. No. II. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 142, 103–124.
- Sanderson, T. R. Appourchaux, T. Hoeksema, J. T. Harvey, K. L. (2003). Observations of the Sun's magnetic field during the recent solar maximum. *Journal of Geophysical Research*, 108 (A1), 1035.
- Scafetta, N. (2014). The complex planetary synchronization structure of the solar system. *Pattern Recognition in Physics*, 2, 1–19.
- Smith, W. S. (1999). *Statistics, Probability and Noise*. Chapter 2. The Scientist and Engineer's guide to Digital Signal Processing. Second Edition. San Diego (CA, US): California Technical.
- Solheim, -E. J. (2013). The sunspot cycle length – modulated by planets? *Pattern Recognition in Physics*, 1, 159–164.
- SILSO – Sunspot Index and Long-term Solar Observations. Sunspot Number. (2019). Brussels (Belgium): Royal Observatory of Belgium.
<http://www.sidc.be/silso/datafiles> (23.8.2019)
- Stern, P. D. (2002). A Millennium of Geomagnetism. *Reviews of Geophysics*, 40 (3), B1–B30.
- Sunspot Numbers; International Sunspot Number. (2007). National Geophysical data Center (NGDC); National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Satellite and Information Service; Solar Data Service.
<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html> (30.10.2007)
- The Sun and Climate. (2000). USGS Fact Sheet FS-095-00. Reston (VI; US): U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Tiwari, R. B. Kumar, M. (2017). An Insight into the Solar Dynamo Theory. *International Annals of Science*, 3 (1), 27–36.
- Tobias, S. M. (2002). The solar dynamo. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 360, 2741–2756.
- Usoskin, G. I. Mursula, K. (2008). Long-term solar cycle evolution: Review of recent developments. *Solar Physics*, 218, 319–343.
- Wilson, I. R. G. (2013). The Venus–Earth–Jupiter spin–orbit coupling model. *Pattern Recognition in Physics*, 1, 147–158.
- Zeeman, P. (1897). On the Influence of Magnetism on the Nature of the Light Emitted by a Substance. *Astrophysical Journal*, 5, 332–347.

Analiza nizkih pretokov porečja Ljubljance

Klaudija Sapač*, Simon Rusjan*, Mojca Šraj*

Povzetek

V prispevku so predstavljeni rezultati analize nizkih pretokov na 11 vodomernih postajah na reki Ljubljanci in njenih pritokih. Za vsako od postaj smo izračunali nabor različnih kazalnikov nizkih pretokov, ki jih lahko razdelimo v tri skupine: statistike nizkih pretokov, kazalniki sezonskosti nizkih pretokov in recesijska analiza hidrograma. Rezultate, ki smo jih dobili za posamezno postajo, smo interpretirali v smislu povezanosti površinske vode s podzemnimi vodami in obsežnostjo zalog vode na posameznem porečju ter posamezne kazalnike primerjali med seboj. Ugotovili smo, da vsi kazalniki kažejo na največjo povezanost površinske vode s podzemno na postajah Malni (Malenščica) in Bistra (Bistra), medtem ko je najslabša povezava na postaji Mali Otok (Nanoščica). V splošnem so uporabljeni kazalniki med seboj skladni v smislu podobne razlage vpliva hidrogeoloških lastnosti na nizke pretoke, kljub temu pa smo pri nekaterih postajah ugotovili neskladnosti posameznih kazalnikov. Zaradi slednjih je priporočljivo na hidrološko in geološko nehomogenih porečjih, kot je tudi porečje Ljubljance, analizirati večje število kazalnikov, da dobimo celovitejši pogled na razmere nizkih pretokov.

Ključne besede: nizki pretoki, porečje reke Ljubljance, kazalniki nizkih pretokov

Keywords: low flows, Ljubljana river catchment, low-flow indices

Uvod

Nizki pretoki so po definiciji pretoki v času, ko dlje časa ni padavin in veljajo za sezonski pojav ter sestavni del pretočnih režimov vseh rek (WMO, 1974; Smakhtin, 2001). V povezavi z nizkimi pretoki nas ne zanimajo samo njihove vrednosti pretokov, temveč nas pogosto zanima tudi, kdaj v letu se najpogosteje pojavljajo, kako dolgo trajajo, kolikšen del pretoka predstavlja bazni odtok ipd. Posledično so bili v preteklosti razviti številni kazalniki nizkih pretokov in metode za njihovo določitev.

Med osnovna in nepogrešljiva orodja v hidrologiji ter upravljanju vodnih virov spadajo krivulje trajanja pretokov (angl. *flow duration curve*, FDC), ki izražajo razmerje med vrednostjo pretoka in odstotkom časa, ko je bil ta pretok presežen. Pri proučevanju nizkih pretokov je pomemben predvsem del krivulje s pretoki, ki so bili preseženi 50 % časa ali več (pretoki, manjši od Q_{50}). V nekaterih državah (npr. Združeno kraljestvo), se FDC uporabljajo za določanje zahtev za zagotavljanje ekološko sprejemljivih pretokov (npr. Q_{95}) (Acreman in Dunbar, 2004). Veliko informacij o pretočnih razmerah na porečjih pa vsebujejo tudi razmerja med posameznimi vrednostmi pretokov iz krivulje trajanja oziroma njena oblika. Tako se na primer razmerje Q_{90}/Q_{50} lahko uporablja kot kazalnik deleža vode, ki prispeva k površinskemu toku iz podzemnih virov (npr. Caissie in Robichaud, 2009). Tudi indeks baznega odtoka (angl. *baseflow index*, BFI) je kazalnik povezanosti med podzemno in površinsko vodo oziroma med količino baznega odtoka v celotnem odtoku in je eden najpogosteje uporabljenih kazalnikov nizkih pretokov. Beck et al. (2013) so ga izračunali za več kot 3000 porečij na svetu za določitev globalnih vzorcev in razvoj modela za oceno BFI na nemerjenih porečjih. Poleg omenjenih kazalnikov lahko v t.i. skupino statističnih kazalnikov uvrstimo še srednje letne n -dnevne minimalne pretoke (ang. *n-day mean annual*

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za okoljsko gradbeništvo, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

minima, MAMn). Ta vrsta kazalnikov se v nekaterih državah uporablja za določanje pogojev rabe vode; na primer v Združenem kraljestvu za izdajanje dovoljenj za odvzem vode uporabljajo kazalnik MAM7 (Smakthin, 2001).

Pri obravnavi nizkih pretokov je pomembno vedeti tudi, kdaj v letu se najpogosteje pojavljajo (sezonskost). Indeks sezonskosti in razmerje sezonskosti sta dva načina, kako lahko določimo obdobje pojavnosti nizkih pretokov oziroma prevladujoči del leta z nizkimi pretoki. Laaha in Blöschl (2006) sta omenjena kazalnika uporabila na več kot 300 porečjih za regionalizacijo nizkih pretokov v Avstriji.

V hidrologiji se pogosto uporabljajo tudi analize recesijskih krivulj, to je padajočih delov hidrograma, ki so tesno povezane z analizami baznega odtoka. Oblika padajočega dela hidrograma vsebuje informacijo, kako hitro bo pretok upadal, če dlje časa ne bo padavin, na kar vplivajo predvsem geološke lastnosti porečij (Smakthin, 2001).

Za 11 vodomernih postaj na porečju Ljubljanice in njenih pritokov so v prispevku predstavljeni rezultati naslednjih kazalnikov: indeksa baznega odtoka (BFI), srednjih n-dnevni letnih minimumov ($n=1, 7, 30, 90$), Q_{50} , Q_{70} , Q_{90} , indeksa in razmerja sezonskosti ter recesijskih konstant, ki so rezultat analize padajočega dela hidrograma. Rezultati so nato interpretirani v smislu povezanosti površinske vode s podzemnimi vodami in obsežnostjo zaloga vode na posameznem porečju. Kobold in Brilly (1994), ki sta izvedla analize nizkih pretokov za 11 porečij v Sloveniji, sta namreč ugotovila, da imajo kazalniki nizkih pretokov najboljšo povezavo ravno z geologijo porečja.

Metode

Izračuni kazalnikov so bili narejeni s pomočjo programa R (R Core Team, 2018) in paketa *lfstat* (Koffler et al., 2016). Za analizo nizkih pretokov na porečju Ljubljanice smo uporabili podatke o dnevni pretokih (ARSO, 2018) za 11 vodomernih postaj (Preglednica 1, Slika 1). V literaturi ni enotnega priporočila glede dolžine podatkovnega niza, potrebnega za analizo nizkih pretokov, zato smo za izračun kazalnikov izbrali celotno razpoložljivo obdobje podatkov za posamezno vodomerno postajo. Vključitev vodomerne postaje v analizo je temeljila na merilih, da so podatki na voljo vsaj za 25-letno obdobje z dodatnim pogojem, da je postaja obratovala v letu 2016, ki je bilo v času analize zadnje leto z razpoložljivimi podatki, ter da v podatkovnem nizu ne manjkajo podatki za več kot 5 let zaporedoma. Podatki o dolžini niza za posamezno vodomerno postajo so prikazani v Preglednica 1.

Za vsako od izbranih lokacij smo izračunali nabor kazalnikov nizkih pretokov. Indeks baznega odtoka (BFI) predstavlja delež volumna baznega odtoka v celotnem odtoku in lahko dosega vrednosti med 0 in 1, pri čemer so vrednosti bližje 0 značilne za porečja z bolj hudourniškiimi in/ali neprepustno geološko podlago, medtem ko so vrednosti bližje 1 bolj značilne za porečja z dobro prepustno geološko podlago in velikimi zalogami vode v porečju (WMO, 2008). Podroben postopek izračuna je predstavljen v WMO (2008). Na enak način interpretiramo tudi razmerje Q_{90}/Q_{50} , ki ga izračunamo na podlagi vrednosti pretokov iz krivulje trajanja (FDC). Poleg omenjenega razmerja smo v prispevku za vsako od postaj izračunali še vrednosti pretokov, ki so v obravnavanih obdobjih bili preseženi 50, 70 in 90 % časa (Q_{50} , Q_{70} , Q_{90}).

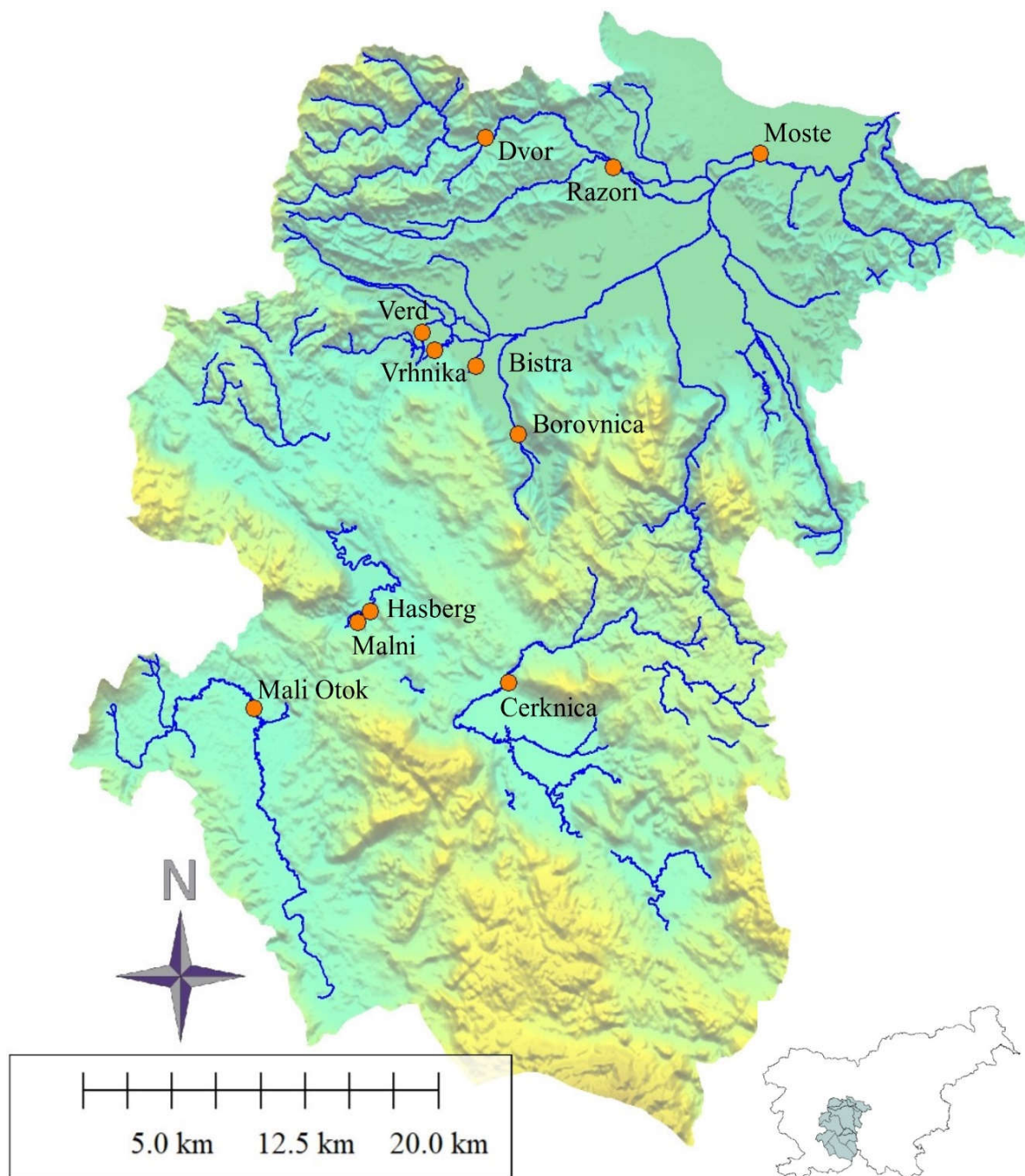
Preglednica 1 – Seznam vodomernih postaj, vključenih v analizo nizkih pretokov

Šifra vodomerne postaje	Ime postaje	Vodotok	Obdobje podatkov	Q_{sr} [m^3/s]
-------------------------	-------------	---------	------------------	----------------------

5030	Vrhnika	Ljubljana	1961-2016	24,00
5078	Moste I	Ljubljana	1924-2016	55,05
5240	Verd I	Ljubljana	1952-2016	6,76
5270	Bistra	Bistra	1970-2016	5,04
5330	Borovnica	Borovnišica	1954-2016	7,49
5500	Dvor	Gradašica	1979-2016	2,31
5540	Razori	Šujica	1954-2016	1,43
5770	Cerknica I	Cerknišica	1954-2016	1,03
5840	Mali Otok	Nanošica	1989-2016	1,48
5880	Hasberg	Unica	1926-2016	22,20
5910	Malni	Malenšica	1961-2016	6,56

Naslednji kazalniki, ki smo jih izračunali, so srednji letni minimalni pretoki (MAM) za trajanja 1, 7, 30 in 90 dni, ki so pogosto uporabljeni kazalniki pri analizah nizkih pretokov (WMO, 2008). Izračunamo jih tako, da za vsako leto obravnavanega obdobja s pomočjo drsečega povprečja računamo povprečja za bloke pretokov, ki so dolgi n-dni, pri čemer smo za n vzeli 1, 7, 30 in 90. Srednja vrednost letnega minimalnega pretoka za določeno trajanje v obravnavanem obdobju je nato enaka srednji vrednosti MAMn posameznih let. MAM1 je dejansko povprečje absolutnih letnih minimumov. Da smo omogočili medsebojno primerjavo kazalnikov MAMn in vrednosti s krivulje trajanja med posameznimi postajami, smo izračunane pretoke delili s srednjim pretokom na posamezni postaji (Preglednica 1). Pri MAMn smo izračunali še razmerja MAMn/MAM7, ki smo jih zrisali na graf, na podlagi katerega smo ocenili gradient med posameznimi razmerji. Gustard et al. (1992) so namreč s tem postopkom ugotovili, da večji gradienti med MAMn/MAM7 kažejo na manjši doprinos podzemnih virov vode k površinskim vodam in obratno.

Časovno komponento nizkih pretokov v smislu njihove pojavnosti v delu leta lahko opišemo z uporabo indeksa in razmerja sezonskosti (Laaha and Blöschl, 2006). Medtem ko je indeks sezonskosti, ki ga grafično predstavimo v polarnem koordinatnem sistemu, kazalnik z bolj podrobnimi informacijami o pojavnosti nizkih pretokov, je kazalnik razmerja sezonskosti bolj splošen, ker daje informacijo samo o tem, ali nizki pretoki prevladujejo v poletnem ali zimskem času. Slednje nam pove vrednost razmerja med pretokom, preseženim 95 % časa v poletnem delu leta, in pretokom, preseženim 95 % časa v zimskem delu leta. Tako vrednosti razmerja sezonskosti, ki so manjše od 0, kažejo, da na porečju nizki pretoki prevladujejo poleti, vrednosti, večje od 1 pa, da dominirajo pozimi. Indeks sezonskosti da za rezultat dan v letu (D), ko se statistično gledano pojavljajo nizki pretoki. Poleg tega je rezultat tudi vektor r, ki lahko doseže vrednosti med 0 in 1. Vrednosti vektorja bližje 0 kažejo na veliko spremenljivost datuma pojava, medtem ko se z vrednostmi proti 1 ta spremenljivost zmanjšuje.



Slika 1 – Območje porečja Ljubljanice z označenimi izbranimi vodomernimi postajami, katerih podatke o dnevni pretokih smo uporabili v analizi nizkih pretokov

Informacijo o tem, kako občutljivo je porečje na obdobje brez padavin in kako hitro bo upadal pretok, lahko dobimo z analizo padajočega dela hidrograma (angl. *hydrograph recession analysis*). Pri recesijski analizi želimo modelirati padajoči del krivulje hidrograma tako, da se čim boljše prilega analitičnemu izrazu funkcije Q_t , ki jo lahko opišemo z eksponentno enačbo 1. reda (Preglednica 2), pri čemer je Q_t odtok iz zaloge vode v porečju brez dotoka. V literaturi najdemo različne metode za parametrizacijo in identifikacijo lastnosti padajočega dela hidrograma, v prispevku pa podajamo rezultate po metodah glavne recesijske krivulje (angl. master recession curve, MRC) in metode z izračunom parametrov za posamezne segmente padajočega dela hidrograma (angl. individual recession segment,

IRS). Za izdelavo glavne recesijske krivulje (MRC) je v paketu lfstat (Kofler et al., 2016) uporabljena korelacijska metoda, pri kateri se na graf zrišejo točke (Q_{t-1} , Q_t) (Langbein, 1938), nato pa se skozi točke zriše prilegajoča premica po metodi najmanjših kvadratov, ki ima naklon k in presečišče navpične osi v izhodišču koordinatnega sistema. Recesijska konstanta C , glavni rezultat recesijske analize, se nato izračuna kot razmerje med spremembo časa in naravnim logaritmom naklona prilegajoče premice (Preglednica 2). Pri metodi IRS je postopek enak, s to razliko, da se za vsak posamezen segment upadanja hidrograma posebej izračuna recesijska konstanta. Končni rezultat je potem srednja vrednost vseh posameznih recesijskih konstant. V prispevku prikazujemo rezultate, ki so bili izračunani z naslednjimi računskimi kriteriji, priporočenimi v literaturi (npr. Tallaksen, 1989, Smakthin, 2001, WMO, 2008): dolžina segmenta 5 dni in začetek analize padajočega dela hidrograma pri Q_{70} , ki je bil izračunan za celo obdobje podatkov. Računski kriteriji in njihov vpliv na vrednosti recesijskih konstant so bili podrobneje obravnavani v Sapač et al. (2019).

Pregled kazalnikov nizkih pretokov, uporabljenih v tem prispevku, je z enačbami ali kratkim opisom postopka za izračun predstavljen v preglednici 2.

Preglednica 2 – Postopki določitve oziroma izračuna kazalnikov nizkih pretokov, uporabljenih v tem prispevku

Kazalnik	Postopek določitve in/ali enačba za izračun
BFI	$BFI = \frac{V_{base}}{V_{total}}$, pri čemer sta V_{base} in V_{total} volumen baznega oziroma celotnega pretoka v strugi reke (Gustard et al., 1992).
Q_{50} , Q_{70} , Q_{90} , Q_{90}/Q_{50}	Pretok, ki je presežen 50, 70, 90 % obravnavanega časa.
MAMn	Minimalna vrednost povprečij pretokov "n-tih" zaporednih dni v letu.
Razmerje sezonskosti	$SR = \frac{q_{95S}}{q_{95W}}$, pri čemer sta q_{95S} in q_{95W} pretoka, presežena 95 % časa poleti (1. april–30. november) oziroma pozimi (1. december–31. marec).
Indeks sezonskosti	$\theta = \frac{D2\pi}{365}$ in $\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$, pri čemer je D zaporedni dan po julijanskem koledarju (od 1 do 365/366), r in θ sta polarni, x in y pa kartezični koordinati polarnega koordinatnega sistema (Laaha and Blöschl, 2006).
Recesijske konstante	$Q_t = Q_0 e^{-\frac{t}{C}}$ in $C = \frac{\Delta t}{\ln(k)}$, pri čemer je Q_0 začetni pretok, Q_t pretok v času t , C recesijska konstanta, k pa naklon prilegajoče se premice na grafu odvisnosti Q_t in Q_{t-1} (Tallaksen, 1995, WMO, 2008).

Rezultati in diskusija

Rezultati kazalnikov nizkih pretokov za vsako od 11 obravnavanih vodomernih postaj na porečju Ljubljance so zbrani v Preglednica 3. Lahko opazimo, da kazalniki za postaji Malni in Bistra izkazujejo največji delež podzemnih voda pri površinskemu toku. Porečji Malenščice in Bistre se nahajata na pretežno karbonatnih kamninah z razpoklinsko poroznostjo, za katere je značilna visoka prepustnost (Petrič, 2010).

Preglednica 3 – Rezultati kazalnikov nizkih pretokov. Pri vsakem od kazalnikov so krepko označene vrednosti, ki glede na vrednost kazalnika izkazujejo najboljšo povezavo s površinskimi vodami in največje zaloge vode v porečju, podčrtano pa vrednosti, ki izkazujejo najmanjše zaloge vode v porečju ter slabo povezavo s podzemno vodo. Pri kazalnikih MAM1, MAM7, MAM30, MAM90, Q₅₀, Q₇₀, Q₉₀ so podane relativne vrednosti glede na dolgoletni srednji pretok.

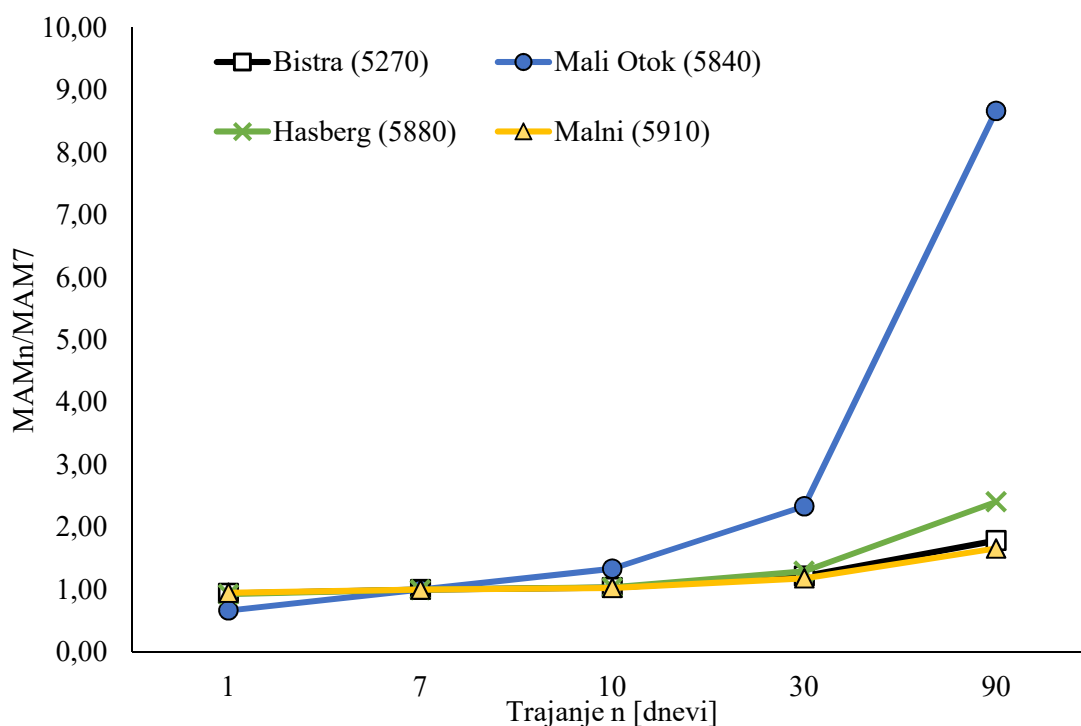
Kazalnik	Vodomerne postaja										
	Vrhnika	Moste I	Verd I	Bistra	Borovnica	Dvor	Razori	Cerknica I	Mali Otok	Hasberg	Malni
BFI	0.55	0.56	0.67	0.85	0.47	0.5	0.47	<u>0.41</u>	<u>0.22</u>	0.63	0.91
MAM1	0.10	0.14	0.14	0.28	0.14	0.21	0.22	<u>0.08</u>	<u>0.01</u>	0.09	0.33
MAM7	<u>0.11</u>	0.16	0.15	0.30	0.15	0.23	0.23	0.13	<u>0.02</u>	0.10	0.35
MAM30	<u>0.16</u>	0.22	0.20	0.37	0.19	0.28	0.28	0.21	<u>0.05</u>	0.13	0.41
MAM90	<u>0.34</u>	0.39	0.37	0.54	0.36	0.38	0.42	0.36	<u>0.18</u>	0.25	0.58
Q ₅₀	0.60	0.68	0.79	1.01	<u>0.52</u>	0.59	0.57	0.58	<u>0.30</u>	0.61	1.06
Q ₇₀	0.31	0.40	0.49	0.78	<u>0.29</u>	0.40	0.40	0.34	<u>0.12</u>	0.31	0.84
Q ₉₀	0.14	0.20	0.22	0.43	0.17	0.26	0.23	0.15	<u>0.02</u>	<u>0.13</u>	0.46
Q ₉₀ /Q ₅₀	0.23	0.3	0.28	0.43	0.32	0.43	0.4	0.26	<u>0.07</u>	<u>0.21</u>	0.43
SI _θ	4.32	4.21	4.28	4.38	4.27	4.12	<u>4.03</u>	4.24	<u>3.79</u>	4.3	4.56
SI _r	0.66	0.71	0.63	0.74	0.47	0.63	0.42	0.65	0.66	0.51	0.7
SR	0.69	0.56	0.56	0.49	0.69	0.76	0.82	0.54	0.11	0.51	0.64
RK MRC	7.65	9.55	9.09	20.17	8.01	11.82	8.30	<u>3.46</u>	<u>2.54</u>	10.95	18.99
RK IRS	9.86	13.06	12.77	28.24	13.07	16.78	10.91	<u>5.63</u>	<u>3.41</u>	12.62	22.70

RK – recesijska konstanta.

Postaja Mali Otok je pri vseh kazalnikih prepoznana kot ena od tistih z najmanjšim deležem podzemne vode oziroma z najslabšo povezanostjo podzemnih in površinskih voda, kar lahko pojasnimo s prevladujočimi neprepustnimi kamninami na porečju (Kolbezen in Pristov, 1998). Pri postajah Cerknica I podobno izkazujejo kazalniki BFI, MAM1 in recesijske konstante, pri postaji Vrhnika so to MAM7, MAM30 in MAM90 in pri postaji Borovnica Q₅₀ in Q₇₀.

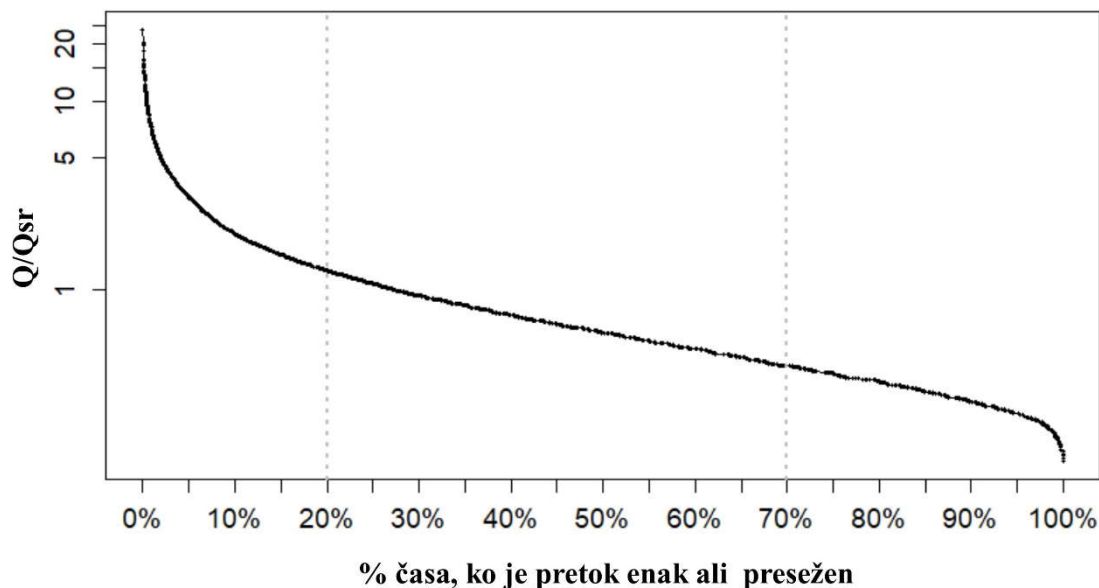
V nadaljevanju so na kratko povzeti rezultati posameznih kazalnikov. Izračunane vrednosti BFI v povprečju kažejo na približno 50-odstotni delež baznega odtoka v skupnem odtoku. Več kot 85-odstotni delež je opazen pri postajah Malni in Bistra, medtem ko pri Malem Otoku delež znaša približno petino. Relativno glede na srednjo vrednost pretoka izraženi MAM_n se gibljejo v razponu $MAM1/Q_{sr} = 0,01$ pri Malem Otoku do $MAM90/Q_{sr}=0,58$ pri postaji Malni. Grafi relativnih vrednosti MAM_n glede na vrednost MAM7 (

Slika 2) potrjujejo, da je Mali Otok postaja z najmanjšim doprinosom podzemne vode, medtem ko sta Malni in Bistra postaji z največjim doprinosom podzemne vode k površinskemu toku. Zanimivo je, da je naslednja postaja, ki ima glede na ta kazalnik najmanjši doprinos podzemne vode, postaja Hasberg, ki je geografsko zelo blizu postaje Malni. Razlog za razlike med sosednjima postajama lahko razložimo na podlagi ugotovitev Ravbar et al. (2012), ki so s sledilnimi testi ugotovili, da je med obema izvirooma bistvena razlika v dinamiki napajanja, slednja pa je pogojena predvsem s hidrogeološkimi lastnostmi obeh porečij.



Slika 2 – Razmerja MAM_n/MAM_7 , iz katerih je razviden gradient, s katerim lahko kvalitativno ocenimo doprinos podzemnih voda k površinskemu toku.

Pri kazalnikih, ki izhajajo iz FDC, bomo poudarili predvsem razmerje Q_{90}/Q_{50} . Čeprav so ga nekateri avtorji (npr. Caissie in Robichaud, 2009) uporabili kot kazalnik baznega odtoka, pri čemer višje vrednosti kažejo na bolj stabilen tok oziroma večji delež baznega odtoka, so na vseh postajah porečja Ljubljaničnosti vrednosti razmerja Q_{90}/Q_{50} manjše od BFI, v nekaterih primerih celo za več kot pol. Ne glede na to pa lahko tudi s tem kazalnikom potrdimo iste postaje z najmanjšim ali največjim doprinosom podzemne vode k površinskemu toku. Poleg tega lahko opazimo, da imata relativno visoko vrednost razmerja tudi postaji Dvor in Razori, ki se nahajata na porečjih s tipično hudourniškim vodotokoma Gradaščica in Šujico, čemur lahko pripišemo tudi razlog za visoke vrednosti. Po padavinskem dogodku namreč pretok hitro naraste ne glede na predhodno vlažnost porečij in nato tudi hitro upade. V podatkovnem nizu je tako malo ekstremno visokih vrednosti pretokov, kar se nato odraža v obliki krivulje trajanja pretokov oziroma razmerju Q_{90}/Q_{50} (Slika 3).



Slika 3 – Brezdimenzijska krivulja trajanja za postajo Dvor (5500), pri čemer so na vertikalni osi relativni pretoki glede na dolgoletni srednji pretok v logaritemskem merilu

Razmerje sezonskosti je na vseh postajah nižje od 1, kar kaže na prevladujoče poletne nizke pretoke. To potrjujejo tudi indeksi sezonskosti (Preglednica 4), ki kažejo, da se nizki pretok (Q_{95}) po navadi zgodi med avgustom in koncem septembra z velikostjo vektorja r , ki izkazuje spremenljivost izračunanega datuma. Glede na indekse sezonskosti lahko pričakujemo, da se bodo nizki pretoki najprej pojavili na postaji Mali Otok (8. avgust), sledijo Razori (22. avgust), Dvor (28. avgust) in Moste (2. september). Najpozneje lahko nizke pretoke pričakujemo na postajah Bistra (12. september) in Malni (22. september). Zanimivo je, da čas pojava nizkega pretoka ne kaže odvisnosti od relativne lokacije v porečju, kar hkrati potrjuje izrazito hidrogeološko nehomogenost porečja.

Preglednica 4 – Indeksi sezonskosti s polarnima koordinatama in najverjetnejšim dnevom dogodka ter razmerje sezonskosti za posamezno vodomerno postajo (VP)

Ime VP	Šifra VP	theta θ	D		r	Razmerje sezonskosti
			(zaporedni dan v letu)	D (datum)		
Vrhnika	5030	4.3237	251.17	8. september	0.48	0.69
Moste	5080	4.2145	244.83	2. september	0.71	0.56
Verd	5240	4.2808	248.68	6. september	0.63	0.56
Bistra	5270	4.3818	254.54	12. september	0.74	0.49
Borovnica	5330	4.2670	247.88	5. september	0.47	0.70
Dvor	5500	4.1228	239.50	28. avgust	0.63	0.76
Razori	5540	4.0289	234.05	22. avgust	0.42	0.82
Cerknica	5770	4.2384	246.22	3. september	0.65	0.54
Mali Otok	5840	3.7857	219.91	8. avgust	0.66	0.11
Hasberg	5880	4.2977	249.66	7. september	0.80	0.51
Malni	5910	4.5612	264.97	22. september	0.70	0.64

Iz rezultatov recesijske analize je razvidno, da daje metoda IRS pri vseh postajah višje rezultate recesijskih konstant kot metoda IRC, kar so ugotovili tudi Sapač et al. (2019). Ne glede na to pa so tudi recesijske konstante skladne z rezultati ostalih kazalnikov glede postaj na porečju Ljubljane z največjim oziroma najmanjšim doprinosom podzemnih vod k površinskemu toku. Vrednosti se po metodi MRC gibljejo od 2,54 in 3,46 dneva na postajah Mali Otok in Cerknica, do 18,99 in 20,17 dneva na postajah Malni in Bistra. Pri metodi IRS so vrednosti od 3,41 in 5,63 na postajah Mali Otok in Cerknica, do 22,70 in 28,24 na postajah Malni in Bistra.

Zaključki

V prispevku so prikazani rezultati različnih kazalnikov nizkih pretokov za 11 vodomernih postaj na hidrogeološko nehomogenem porečju Ljubljane, ki smo jih interpretirali v povezavi z znanimi hidrogeološkimi lastnostmi. Kot je bilo pričakovati zaradi nehomogenosti, vrednosti kazalnikov variirajo od postaje do postaje. Ne glede na to pa ugotavljamo, da so kazalniki v splošnem skladni med seboj v smislu interpretacije kvalitativne ocene doprinosa podzemnih virov vode k površinskemu toku. Vsi kazalniki kažejo na največji prispevek k površinskemu toku iz podzemnih virov na postajah Bistra in Malni. Razloge lahko pripišemo hidrogeološkim lastnostim, ki omogočajo dobro povezavo med podzemnimi in površinskimi vodami ter veliko prepustnost vode. Obratno je večina kazalnikov pokazala za postajo Mali Otok. Ne glede na splošno skladnost kazalnikov pri postajah z največjim in najmanjšim ocenjenim doprinosom podzemne vode pa smo na nekaterih drugih postajah opazili neskladnosti med kazalniki. Na postajah Dvor in Razori, ki ležita na hudourniških porečjih, kazalnik Q_{90}/Q_{50} ni skladen z ostalimi kazalniki, medtem ko na postaji Hasberg neskladnost izkazujejo MAMn kazalniki. Na podlagi rezultatov te raziskave je zato priporočljiva celovita analiza nizkih pretokov, s čimer se lahko z večjo gotovostjo izognemo posledicam napačne interpretacije posameznih kazalnikov.

Literatura

- Acreman, M., Dunbar, M.J. (2004). Defining environmental river flow requirements - a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 8, 861–876.
- ARSO. (2018). Arhiv hidroloških podatkov. Površinske vode - dnevne vednosti. URL http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (pridobljeno 6. 5. 2018).
- Beck, H.E., Van Dijk, A.I.J.M., Miralles, D.G., De Jeu, R.A.M., Bruijnzeel, L.A., McVicar, T.R., Schellekens, J. (2013). Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. *Water Resour. Res.* 49, 7843–7863. <https://doi.org/10.1002/2013WR013918>
- Caissie, D., Robichaud, S. (2009). Towards a better understanding of the natural flow regimes and streamflow characteristics of rivers of the Maritime Provinces. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2843, viii+53.
- Gustard, A., Bullock, A., Dixon, J.M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom, Report No. 108. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Koffler, A.D., Gauster, T., Laaha, G., Gauster, M.T. (2016). Package 'lfstat.' p. 63.
- Kobold, M., Brilly, M. (1994). Low flow discharge analysis in Slovenia. *FRIEND '97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource*, 119–131.
- Kolbezen, P., Pristov, J. (1998). Surface streams and water balance of Slovenia 1961-1990. Ministry of Environment and Spatial Planning, Hydrometeorological Institute of Slovenia, Ljubljana, p. 98.

- Laaha, G., Blöschl, G. (2006). Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrol. Process.* 20, 3851–3878. <https://doi.org/10.1002/hyp.6161>
- Langbein, W.B. (1938). Some channel storage studies and their application to the determination of infiltration. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 19, 435–447.
- Petrič, M. (2010). Case Study: Characterization, exploitation, and protection of the Malenščica karst spring, Slovenia, in: Kresic, N., Stevanovic, Z. (Eds.), *Groundwater Hydrology of Springs*. Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 428–441. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00021-9>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria.
- Ravbar, N., Barberá, J.A., Petrič, M., Kogovšek, J., Andreo, B. (2012). The study of hydrodynamic behaviour of a complex karst system under low-flow conditions using natural and artificial tracers (the catchment of the Unica River, SW Slovenia). *Environ. Earth Sci.* 65, 2259–2272. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1523-4>
- Sapač, K., Rusjan, S., Šraj, M. (2019). Influence of calculation criteria on the values of low-flow recession constants in a non-homogenous catchment in Slovenia. *Acta Hydrotechnica* 32, 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.01>
- Smakhtin, V.U. (2001). Low flow hydrology: A review. *J. Hydrol.* 240, 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Tallaksen, L.M. 1989. Analysis of time variability in recessions. *IAHS-AISH Publ.* 187, 85–96.
- Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.* 165, 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- WMO (1974). *International glossary of hydrology*. Paris, UNESCO and Geneva, WMO, p. 393.
- WMO (2008). *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*, in: *Operational Hydrology Report*. WMO, Geneva, Switzerland, p. 136. <https://doi.org/WMO-No.1029>.

Plitvi geotermalni potencial za zaprte navpične sisteme: trije študijski primeri iz alpskega prostora

Dušan Rajver¹, Alessandro Casasso², Pietro Capodaglio³, Joerg Prestor¹, Charles Cartannaz⁴, Charles Maragna⁴, Simona Pestotnik¹, Jernej Jež¹

Povzetek

Plitve geotermalne sisteme običajno delimo na dve glavni skupini: odprte krožne sisteme, kjer izmenjava toplote poteka s podzemno vodo in zaprte krožne sisteme, kjer izmenjava poteka s kroženjem tekočine kot nosilca toplote v zaprti cevni zanki, zakopani v vodoravni legi v tleh ali v navpični legi kot so geosonde in geotermični piloti. V smislu povečanja rabe geotermalne energije in zlasti števila plitvih geotermičnih naprav lahko kartiranje in ocena plitvega geotermalnega potenciala prispevata k določitvi najprimernejših območij za vsako tehnologijo. Izvedena je bila študija geoloških in geotermičnih značilnosti na treh alpskih pilotnih območjih, in sicer v dolini Aosta (Italija), občini Cerkljeva (Slovenija) in naravnemu parku Bauges (Francija), z namenom določiti geotermalni potencial za sisteme z zaprto zanko. Največji izziv je predstavljalo zlasti prepoznavanje litologij v različnih merilih, da se pravilno določijo vrednosti toplotnih lastnosti. Za dolino Aosta so značilne metamorfne kamnine z nekaj granita, območja Cerkljeva in Park Bauges pa sta pretežno sestavljena iz sedimentnih kamnin s hitrimi spremembami geoloških enot in posledično z različnimi geotermičnimi lastnostmi. Toplotno prevodnost in difuzivnost kamnin smo merili z optično metodo skeniranja TCS in s temi podatki določili plitvi geotermalni potencial za zaprte sisteme, t.j. letno količino energije, ki jo standardna 100 m globoka vrtna trajnostno izmenja s tlemi. Uporabljena G.POT metoda je omogočila pravilno upoštevanje temperature tal, ki se precej razlikuje v širokem območju nadmorske višine, kar je značilno za vsa tri analizirana območja. Dobljene karte prikazujejo prostorsko porazdeljen potencial za 100 m dolgo geosondo.

Ključne besede: plitva geotermalna energija, geotermalni potencial, termični parametri, zaprti geotermalni sistemi, metoda G.POT, Aosta (Italija), park Bauges (Francija), Cerkljeva (Slovenija)

Key words: shallow geothermal energy, geothermal potential, thermal parameters, closed systems, G.POT method, Aosta (Italy), Parc des Bauges (France), Cerkljeva (Slovenia)

Uvod

Tehnologija toplotnih črpalk na zemeljski vir (geotermalne toplotne črpalke - GTČ, angl. ground-source heat pumps - GSHP) je splošno priznana kot ena izmed učinkovitejših in stroškovno učinkovitih rešitev za ogrevanje, hlajenje in pripravo tople sanitarne vode. Čeprav njihova uporaba stalno narašča (Sanner, 2019), GTČ še vedno predstavljajo obrobni sektor obnovljivih virov toplote (Bayer in sod., 2012). Zaradi promocije tega trajnostnega vira energije je Tehnična univerza v Münchnu (TUM) skupaj z Geološkim zavodom Slovenije (GeoZS), Politecnico iz Torina, BRGM, ARPA iz Aoste in še sedmimi drugimi partnerji iz alpskih držav vodila triletni projekt GRETA (Interreg Alpine Space), ki se je zaključil decembra 2018. Glavni cilj projekta je bil premostiti nekatere glavne ovire v

¹ Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Politecnico di Torino, DIATI, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italija

³ ARPA Valle d'Aosta, Loc. La Maladière, 48, 11020 Saint-Christophe AO, Italija

⁴ BRGM, Direction des Géoresources – Div. Géothermie, 45060 Orléans cedex 2, Francija

razširjanju GTČ s poudarkom na naslednjih vprašanjih (Casasso in sod., 2017a): 1) poenostavitev obstoječih uredb in postopkov odobritve, ki temeljijo na najboljših praksah, izbranih med obstoječimi primeri dobre prakse (Prestor in sod., 2016); 2) reševanje načrtovalskih in tehničnih vprašanj različnih plitvih geotermalnih tehnik s poudarkom na posebnih alpskih pogojih (Bottig in sod., 2016; 2017); 3) ocena geotermalnega potenciala in možnih podzemnih motenj pri postavitvi geosond in vrtin; 4) razvoj orodij za vključitev plitve geotermalne energije v lokalne energetske načrte treh pilotnih območij, tj. Oberallgäu (Nemčija), Cerklno (Slovenija) in doline Aosta (Italija); 5) razvoj mreže interakcij in izmenjave znanja z zainteresiranimi stranmi. Ta prispevek prikazuje nekatere dejavnosti projekta, ki so se izvedle pod vodstvom Politecnica iz Torina.

Zaprta navpični sistemi z geosondami so najbolj sprejeta tehnika za plitve geotermalne sisteme, saj v nasprotju z odprtim sistemom ni potrebna prisotnost proizvodnega vodonosnika. Njihova ekonomska sposobnost je odvisna od zmožnosti tal za izmenjavo toplote, definirana kot potencial plitve geotermalne energije (PGE). Geotermalni potencial je odvisen od toplotne rabe stavb (profili porabe energije in najvišje porabe energije) in od lokacijsko-specifičnih termofizikalnih značilnosti podzemlja (toplotna prevodnost in specifična toplotna zmogljivost). Advekcija podzemne vode prav tako izboljšuje uspešnost geosond, vendar jo je težko oceniti, zato je pri ocenjevanju geotermalnega potenciala v splošnem ne upoštevamo. Pomen potenciala PGE je bil v zadnjem desetletju precej prepoznan, zato je bilo financiranih več projektov. Za kartiranje potenciala PGE z zaprtimi sistemi so Ondreka in sod. (2007) in Gemelli in sod. (2011) uporabili metodo VDI 4640 (VDI, 2000, 2001), v jugozahodni Nemčiji in v regiji Marche (Srednja Italija). Vendar ta metoda ne upošteva nemotene temperature tal, kar pripelje do enake specifične vrednosti odvzema toplote za topla tla v dolinah (npr. pri 13 °C) in hladna tla v gorah (npr. 7 °C), in to je njena glavna omejitev. To omejitev presega metoda MIS 3005 (DECC, 2011; Curtis in sod., 2013), ki upošteva trajanje ogrevalnega cikla (s širšo izbiro v primerjavi z VDI 4640), toplotno prevodnost in temperaturo tal. Tabele MIS 3005 so zato bolj prilagodljive in uporabne na širših pilotnih območjih (Casasso in sod., 2017b), vendar ne ponujajo jasne (eksplicitne) formule za oceno plitvega geotermalnega potenciala.

V prispevku predstavljamo oceno geotermalnega potenciala z zaprtimi sistemi kot poprečno toplotno obremenitev, ki jo je mogoče učinkovito izmenjati skozi geosonde. Uporabili smo metodo G.POT za oceno potenciala PGE v treh alpskih pilotnih območjih: v regiji dolina Aosta (Italija), občini Cerklno (Slovenija) in naravnem parku Bauges (Francija). Odprtih sistemov tu ne obravnavamo, je pa bil v projektu ocenjen tudi ta potencial (Böttcher in sod., 2019).

Metoda za določitev plitvega geotermalnega potenciala

Na toplotne lastnosti plitvega podzemlja največ vplivata geološka sestava (litologija) in prisotnost podzemne vode. Poleg tega na toplotno zmogljivost (ekstrakcijo) geosonde vplivajo tudi srednja letna temperatura tal, zemeljski toplotni tok, padavine in trajanje sončnega obsevanja, kar je odvisno tudi od topografije.

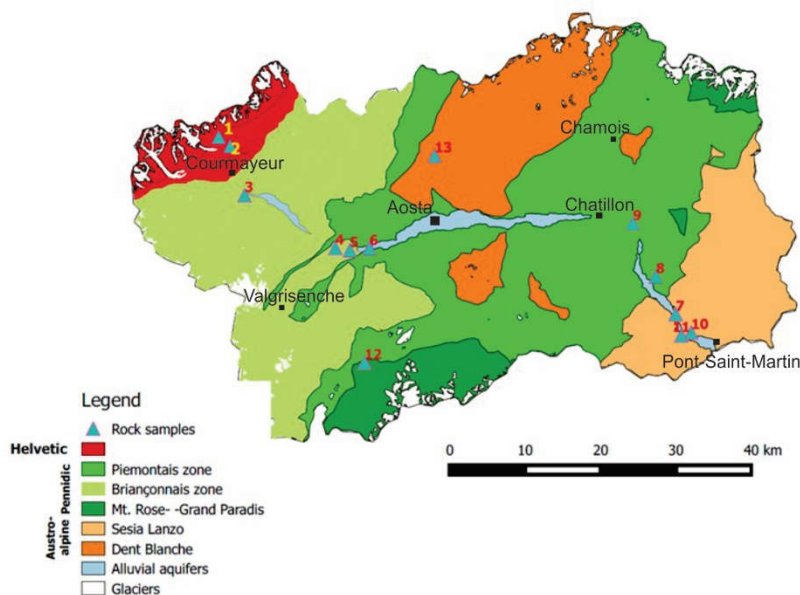
Prepoznavanje litologij v različnih merilih na treh pilotnih območjih

Geološko kartiranje smo najprej izvedli v večjem merilu za potencialno določitev celotnih območij, na vseh treh območjih pa so bila različna (običajno 1: 50.000 ali 1: 25.000), nato pa v manjših merilih za prepoznavanje potenciala za določena majhna območja oz. za skupino stavb, večinoma v merilu 1: 10.000 ali 1: 5.000.

Geološka sestava doline Aosta

Dolina Aosta je največja (3200 km²) in najbolj gorata (popr. nadmorska višina ozemlja je ca 2100 m n.m.) med šestimi preučeni primeri v projektu. Evidentirane so tri glavne tektonske domene Alp (slika 1):

- Helvetska domena v severozahodnem predelu je edini sektor, ki ni bil podvržen metamorfizmu, sestoji pa iz granita in migmatitov (tj. podlaga masiva Mont Blanc);
- Austroalpin lahko razdelimo na dva sektorja:
 - Cona Sesia Lanzo v jugovzhodnem delu regije: prevladujejo eklogitični blestniki in gnajsi z metabaziti;
 - Dent Blanche enota v osrednjem delu regije: večinoma kinzingiti in amfiboliti;
- Penidska domena je najbolj razpršena, nanaša se na širok nabor kamnin prvotno različnega geološkega izvora in paleogeografskega položaja, kasneje deformiranih med orogenezo. Lahko jo delimo v:
 - Masiva Grand Paradis in Monte Rosa: sestojita večinoma iz gnajsa;
 - Paleo-oceansko območje Piemontais: ofioliti (predvsem serpentiniti in metabazalti) in z njimi povezani metasedimenti (v glavnem kalkšisti);
 - Cona Briançonnais: sestoji iz različnih vrst metasedimentnih kamnin.



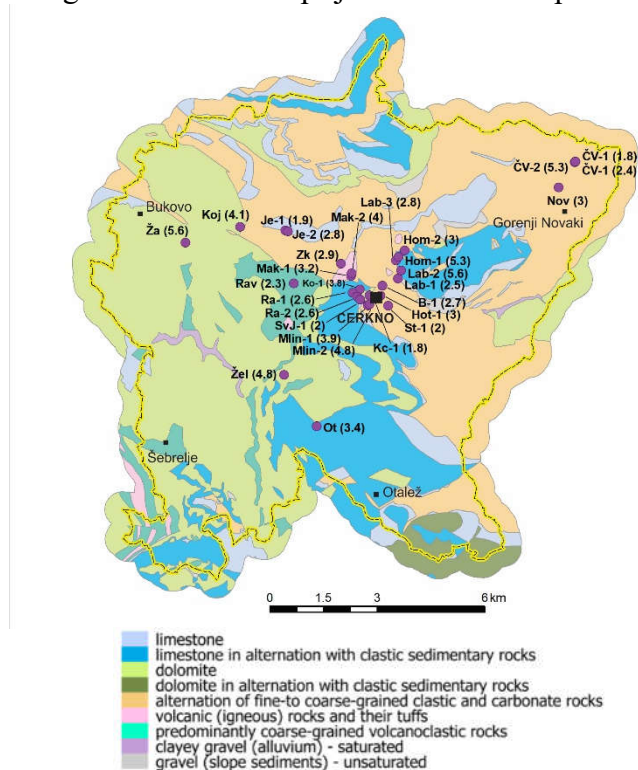
Slika 1: Poenostavljena tektonska karta območja Doline Aosta, s številkami vzorčevanih kamnin.

V dnu glavne doline so kvartarni aluvialni sedimenti (peščeni prod) zelo debeli in prepustni vodonosniki, ki se izkoriščajo predvsem za industrijsko in pitno vodo, v zadnjih letih tudi za geotermalno rabo. Njihovo napajanje izvira iz sezonskega taljenja snega, poleg ledenikov, ki pokrivajo približno 5% celotnega regionalnega območja.

Geološka sestava občine Cerkno

Občina Cerkno je najmanjše (132 km²) med pilotnimi območji. Večinoma ga pokrivajo klastične sedimentne kamnine, ki izkazujejo v različnih geoloških enotah (formacijah) hitro menjavo v obliki različnih zaporedij in razmerij (Slika 2). Ponekod so v klastitih debele plasti karbonata, zlasti apnenca. Drugi izdanki so večinoma karbonatne kamnine, pretežno

dolomit. Klastične kamnine so v glavnem izmenjava peščenjaka in glinavca (ali muljevca). Na Črnem vrhu se izmenjujejo peščenjak, vulkanoklastični tuf in tufit, manj pa glinavec in meljevec. Te plasti zaznamujejo tudi del mesta Cerčno, pa tudi nekaj manjših sosednjih naselij. Aluvialni sedimenti (mulj, pesek in prod) so zelo omejeni, odloženi se le ob rekah in potokih, z nekaj metri globine. Tla in nesprijeti sedimenti so praviloma tanjši od 1 m.



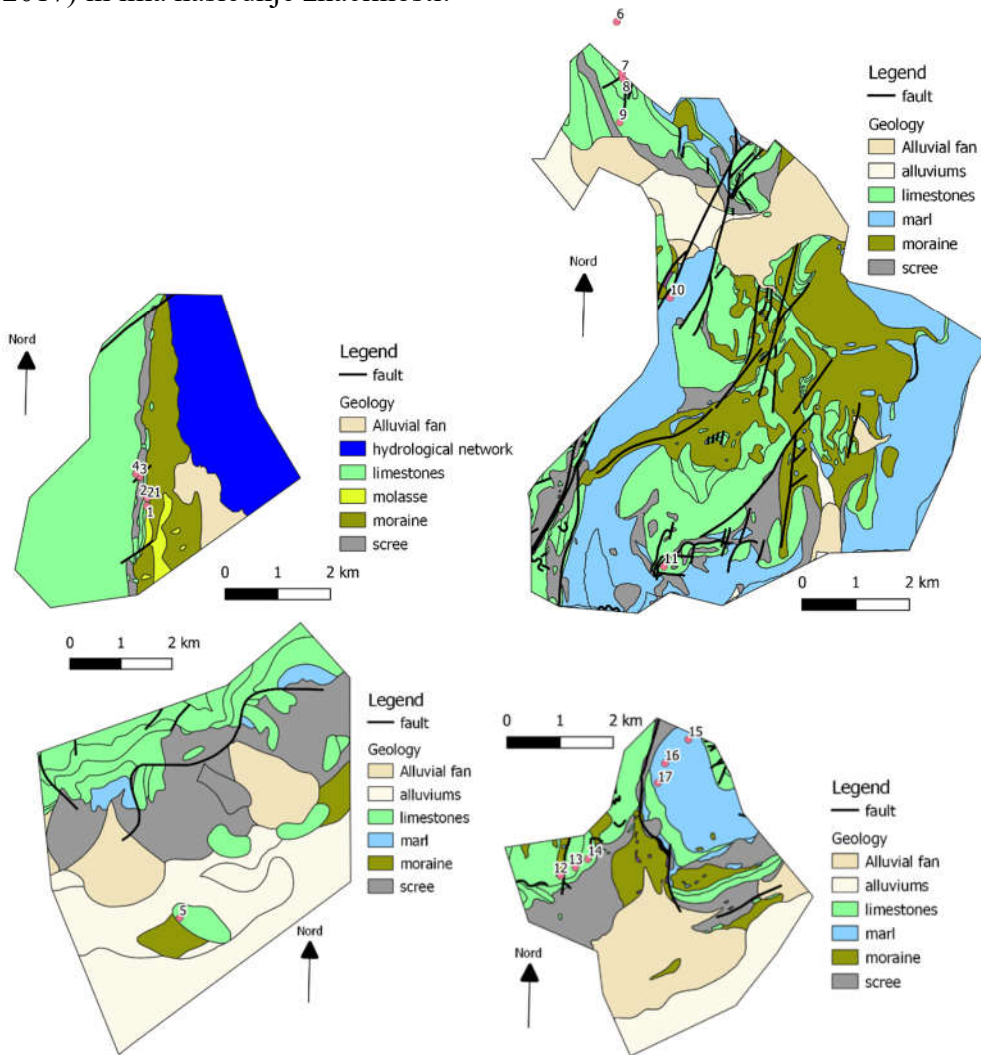
Slika 2: Litološka karta občine Cerčno, s kodami vzorčevanih kamnin.

Geološka sestava naravnega parka Bauges

Masiv Bauges je eden od subalpskih masivov ob zahodnem robu severnih francoskih Alp (glej sliko 3 s kartami štirih občin). V glavnem sestoji iz nagubanih in prelomljenih karbonatnih kamnin (apnenci, laporji), ki so bolj deformirane proti vzhodu. Na zahodu masiv razkriva asimetrične reliefje (zahodna strma pobočja), ki jih povzročata geološka zgradba jurskih in krednih formacij v gubah, ki so prevrnjene proti vzhodu. V vzhodnem delu kaže masiv strmejši reliefje v povezavi z intenzivnejšo deformacijo kamnin z več gubami in prelomi, ki jih povzročata bližina alpskega potisnega nariva. Proti zahodu je omejen s kilometer visoko škarpo, ki označuje mejo z nižjim molasnim predgorjem (200 do 300 m nadm. višine). Predstavlja narinjene kredne in jurske formacije na oligo-miocensko perialpsko molasno zapolnitev. Na vzhodu je masiv prepoznaven do doline Isère. Severne in južne meje masiva najdemo v prečnih dolinah, ki so močno vrezane: dolina Annecy na severu in dolina Chambéry na jugu. V zadnjih fazah kvartarja so alpski ledeniki napredovali in izpodkopavali doline. Številni aluvialni nanosi so lateralno hranili doline s pretežno grobimi sedimenti.

Vzorčenje in laboratorijske meritve toplotnih parametrov

Po letu 2003 se je v svetu uveljavila hitra in natančna metoda merjenja toplotne prevodnosti (angl. thermal conductivity - TC) kamnin in drugih snovi z optičnim skeniranjem. S skenerjem toplotne prevodnosti (TCS) smo po tej metodi v geotermičnem laboratoriju GeoZS izmerili vse vzorčevane kamnine iz treh območij. Naprava nudi po izbiri tudi hkratne meritve toplotne difuzivnosti (angl. thermal diffusivity - TD) (Popov in sod., 2017) in ima naslednje značilnosti:



Slika 3: Geološke karte štirih občin na območju parka Bauges s številkami vzorčevanih kamnin; v smeri urinega kazalca od zgornje leve: (a) Sévrier, (b) Faverges-Seythenex, (c) Saint Pierre d'Albigny, (d) Montmélian. Položaj občin na obodu parka kaže slika 10.

- Meritve TC (in TD): naprava TCS ima usmerjen, mobilni, neprekinjeno delujoč vir toplote z IR žarnico v kombinaciji z IR senzorji temperature.
- 2 IR senzorja merita temperaturo pred in po segrevanju z virom toplote (za merjenje TC + TD se vklopijo 3 senzorji).
- Določitev TC neznanih vzorcev (neobvezno tudi TD): primerjava presežnih temperatur (temp. razlik) standardnih referenc (certificirani vzorci z znanim TC_R) s presežnimi temperaturami enega ali več neznanih vzorcev, ki jih segreva mobilni vir

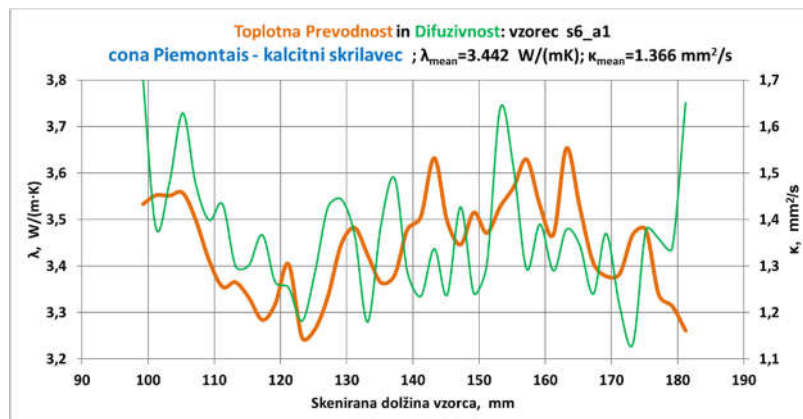
toplote. Pred in za merjenimi vzorci se vzdolž črte za skeniranje postavijo referenčni standardi z znano TC, odvisno od pričakovane TC merjenih vzorcev (slika 4).

Lastnosti kamnin iz doline Aosta

V regiji dolina Aosta je bilo zbranih 13 vzorcev kamnin (slika 1), ki predstavljajo glavne litološke razlike za določanje TC in TD (in s tem toplotne kapacitete). Rezultati meritev (primer na slikah 4 in 5) so pokazali zelo dobre vrednosti TC metamorfnih kamnin (slika 11). Aluvialni nanosi so v štirih glavnih lečah na dnu doline (največja je ravnica Aosta), ledeniški nanosi pa so v manjših lečah v več stranskih dolinah.



Slika 4: Trije kosi vzorca 6 (kalcitni skrilavec iz cone Piemontais) so postavljeni na platformo optičnega skenerja TCS med skeniranjem TC s premikajočo se optično glavo.



Slika 5: Primer profilov TC in TD vzdolž ene od treh skeniranih kamnin vzorca 6 iz doline Aosta.

Lastnosti kamnin iz občine Cerklje

Izmerili smo vrednosti TC in TD na 16 vzorcih z območja mesta Cerklje in na 16 vzorcih iz širše cerkljanske občine (skupno 53 posamičnih kosov po žaganju). Po izmerjenih vrednostih TC kamnin in litološki zgradbi Cerkljanskega smo ocenili, da so najboljše kamnine za izkoriščanje PGE v zahodnem delu, (npr. planota Šebrelje), večinoma zgrajenega iz masivnega dolomita srednje in zgornje triasne starosti (ca 230 mil. let). Vendar pa imajo tudi v drugih predelih občine litološka zaporedja do globin 100 ali 200 m v poprečju

dober potencial, pod pogojem, da so mešanica kamnin z nižjimi in višjimi vrednostmi TC (glej sliko 13).

Lastnosti kamnin iz parka Bauges

Kartografija poprečne TC med 0 in 100 m globine je bila izvedena v štirih občinah tega območja, kjer so bili pobrani vzorci apnenčastih in molasnih kamnin iz najvažnejših geoloških enot, za razliko od slabo razkritih laporjev, katerih nizka trdota je preprečila ohranitev vzorca (slika 3). Vzorci kamnin so večinoma jurski in kredni apnenci in laporji. Z glinami bogate ali slabo strjene geološke formacije, kot so aluvij, melišča ali morene, niso bile vzorčene za te meritve. Vrednosti zanje so povzete iz literature, vklj. iz švicarskega standarda SIA384/6 (Eugster in sod., 2010). Po žaganju je bilo izmerjeno 18 vzorcev na TC in TD. Dobljene vrednosti TC so srednje visoke ($> 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Večina vzorcev je pokazala nizek razpon v spremenljivosti toplotne kapacitete, ki ima tako le obrobni vpliv na končni geotermalni potencial območja. Posledično je bila toplotna kapaciteta (razmerje med TC in TD) opredeljena s poprečno vrednostjo $3,00 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ na celotnem območju.

Opis metode G.POT in izpeljava vhodnih podatkov

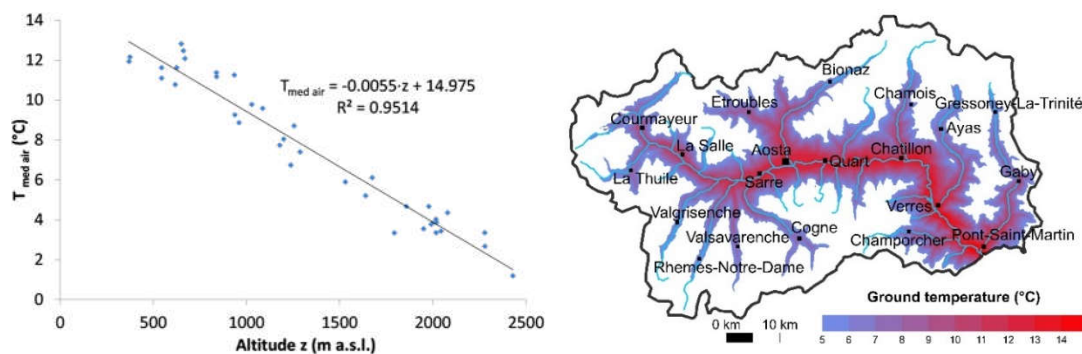
Za oceno geotermalnega potenciala za zaprte sisteme (geosonde) je bila uporabljena metoda G.POT (Casasso & Sethi, 2016) za vsa tri pilotna območja. Metoda predvideva, da uporaba ciklične sinusoidne toplotne obremenitve povzroči časovno spreminjajočo se toplotno spremembo tal in tako doseže mejno temperaturo tekočine (najnižjo ali najvišjo, odvisno od uporabe). Uporabljena metoda temelji na prilagajanju analitičnih enačb zemeljskega prenosa toplote in lahko upošteva več vhodnih parametrov: toplotne lastnosti tal, lastnosti naprave in profil rabe (dolžina geosond, mejna temperatura tekočine - prenosnika toplote, trajanje ogrevanja/hlajenja, letni čas in simulirana življenjska doba).

Ker je toplotna sprememba tal (in s tem prenosnika toplote) neposredno sorazmerna s toplotno obremenitvijo, izmenjano s tlemi, potem razlika med začetno nemoteno temperaturo tal (T_0) in mejno temperature tekočine (T_{lim}) določa toplotno obremenitev (geotermalni potencial), ki jo lahko geosonda določene dolžine trajnostno izmenja. Metoda je bila prvič uporabljena na ozemlju province Cuneo (Casasso & Sethi, 2017) s 100 m kot značilno globino ocenitve geosonde. Metodo lahko uporabimo za oceno geotermalnega potenciala za ogrevanje ali hlajenje. Edina omejitev je, da se lahko upošteva en sam način delovanja, zato je pri kartiranju upoštevan prevladujoči način delovanja. Raziskali smo torej le uporabo za ogrevanje zaradi značilnega podnebja alpskega prostora.

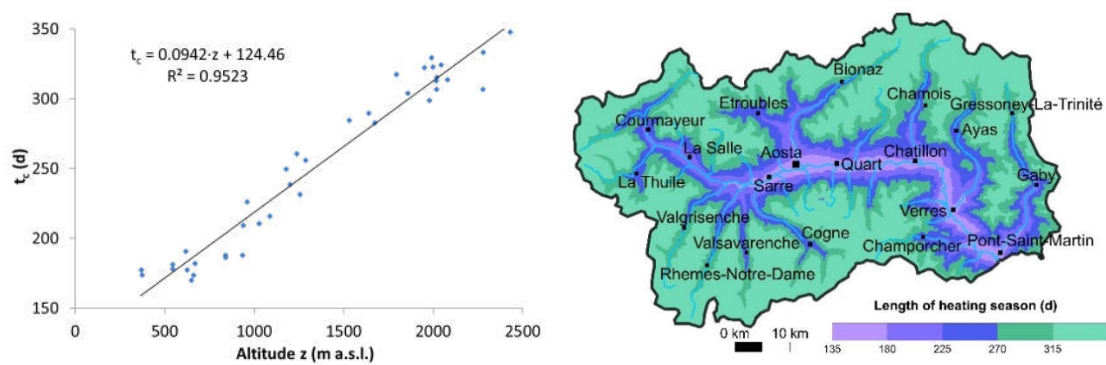
Geotermalni potencial je bil izračunan z nekaj fiksnimi parametri: temperaturna meja = $-3 \text{ }^\circ\text{C}$, dolžina geosonde = 100 m, simulirana življenjska doba naprave = 50 let, polmer vrtine = 0,075 m. Prostorska porazdelitev nekaterih drugih parametrov je temeljila na izmerjenih vrednostih TC in TD. Na podlagi lokalno veljavnih korelacij s podnebnimi parametri in nadmorsko višino sta bili dobljeni dve prostorski porazdelitvi (T_0 in dolžina sinusoidnega cikla toplotne obremenitve ali dolžina ogrevalne sezone t_c).

V relativno majhni globini (pribl. 10 m) je temperatura predpostavljeno stalna skozi vse leto. Nekaj avtorjev (Signorelli & Kohl, 2004; Ouzzane in sod., 2015) poudarja, da je ta temperatura zelo podobna poprečni letni temperaturi zraka, to je parametru, ki ga je z dobro prostorsko ločljivostjo razmeroma enostavno opredeliti. Za dolino Aosta so Casasso in sod., (2018) domnevali, da je temperatura tal za $1 \text{ }^\circ\text{C}$ višja od letne poprečne temperature zraka (slika 6 desno), ki je, kot je prikazano na grafu slike 6 (levo), linearno odvisna od nadmorske

višine tal. S takšno korelacijo zadostuje digitalni model terena (DTM), da dobimo prostorsko porazdelitev T_0 . Vendar pa na višji nadmorski višini (nad 1500 m) temperatura tal zaradi toplotne izolacijske lastnosti snežne odeje postane precej višja od poprečne temperature zraka (Signorelli & Kohl, 2004). Zaradi tega je bila izbrana presečna višina (npr. 2000 m nadmorske višine, kar ustreza poprečni nadmorski višini celotne regije), saj bi bilo ocenjevanje temperature tal in s tem geotermalnega potenciala nad to mejo nemogoče brez terenskih meritev ter bolj malo uporabno, kajti dejansko je na teh višinah malo stavb. Glede na dolžino kurilne sezone so bili za vsa območja sprejeti različni pristopi. Za dolino Aosta in park Bauges je bilo število ogrevalnih dni (primer je slika 7 za dolino Aosta) ocenjeno kot poprečno število dni s poprečno temperaturo pod 12 °C, t.j. z italijanskim pristopom za izračun števila ogrevalnih dni (UNI, 1987). Za Cerkljevo so bile dolžine ogrevalne sezone iz Slovenije najprej soodvisno povezane s stopinjskimi dnevi v Eurostatu (slika 8) in nato z nadmorsko višino tal (Casasso in sod., 2017b). Karta stopinjskih dni (temperaturnega primanjkljaja, angl. heating degree-days, HDD) kaže prostorsko porazdelitev stopinjskih dni in je ocena za porazdelitev porabe energije za ogrevanje. Stopinjski dnevi in trajanje ogrevalne sezone naraščajo z nadmorsko višino. Temperaturni primanjkljaj (vsota stopinjskih dni) je vsota razlik zunanje temperature zraka in izbrane temperature v ogrevanem prostoru, in jo izračunamo za tiste dni, v katerih je poprečna dnevna temperatura zraka nižja od 12 °C (Ovsenik-Jeglič & Mekinda-Majaron, 2002). Dolžina ogrevalne sezone je odvisna od podnebja in je lahko opredeljena z različnimi kriteriji (npr. z nadm. višino tal ali s HDD). Za karto talnih temperatur v občini Cerkljevo so bile ugotovljene linearne korelacije z nadmorsko višino, s temperaturo tal za približno 1 °C višjo od letne poprečne temperature zraka.



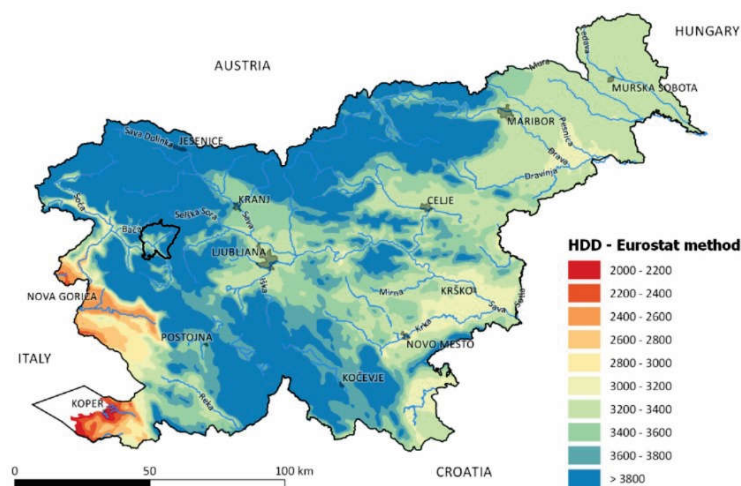
Slika 6: Korelacija talne temperature z višino in njena prostorska razporeditev za območje doline Aosta (Casasso in sod., 2018).



Slika 7: Korelacija dolžine ogrevalne sezone z višino in njena prostorska razporeditev za območje doline Aosta (Casasso in sod., 2018).

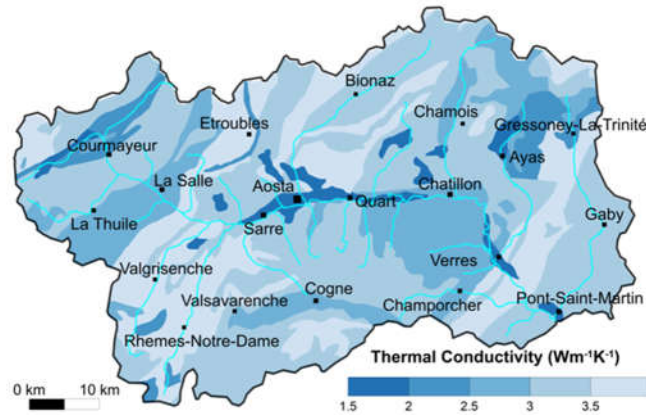
Karte plitvega geotermalnega potenciala

Izdelane so bile najprej karte prostorske porazdelitve poprečne TC za vsa tri območja. V dolini Aosta (slika 9) so vrednosti TC na splošno precej visoke, med 2,8 in 4,0 W/(m·K), povsem značilne za metamorfne kamnine, ki v glavnem tvorijo geološko podlago območja. Na Cerkljanskem (slika 10) so se za najbolj prevodne kamnine izkazali dolomiti (masivni in plastnati), kremenovi peščenjaki in konglomerati, dolomitni apnenci in nekateri tufi (keratofir, porfir), ki imajo najboljši potencial za dimenzioniranje plitvih zaprtih sistemov. Dobre lastnosti so pokazale tudi nekatere druge kamnine, kot so apnenci, karbonatni peščenjaki, meljevci in diabaz. Nekoliko nižji potencial kažejo skrilavi glinavci, meljevci (muljevci), nekateri laporovci in lapornati apnenci. Razpon srednjih vrednosti od 1,8 do 5,6 W/(m·K) za vse vzorčene kamnine kaže na geološko raznolikost Cerkljanskega. Karta TC za park Bauges temelji na izmerjenih vrednostih in nekaterih geoloških premislekih (slika 11).



Slika 8: Karta stopinjskih dni (glede na 20 °C) v Sloveniji (ARSO, 2002); označen je položaj občine Cerkno.

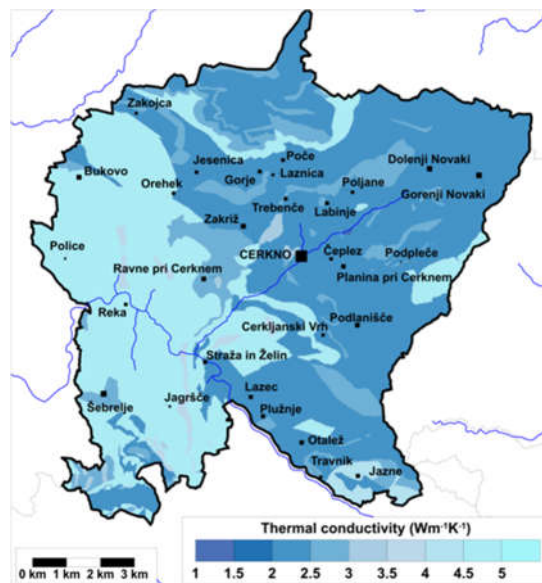
Poprečne izmerjene vrednosti TC na kamninah iz parka Bauges so večinoma med 2,4 in 3,5 W/(m·K). Nevezanih formacij ni bilo mogoče vzorčiti za naše meritve. Trdo ali mehko naravo tal je bilo tudi zelo težko oceniti. Zato ni nemogoče, da se poprečna vrednost, ki izhaja iz karte, razlikuje od dejanske vrednosti TC na terenu. Nazadnje je zelo visoka stopnja netočnosti pripisana globinski razširjenosti formacije, ker ne obstaja 3D geološki model masiva Bauges.



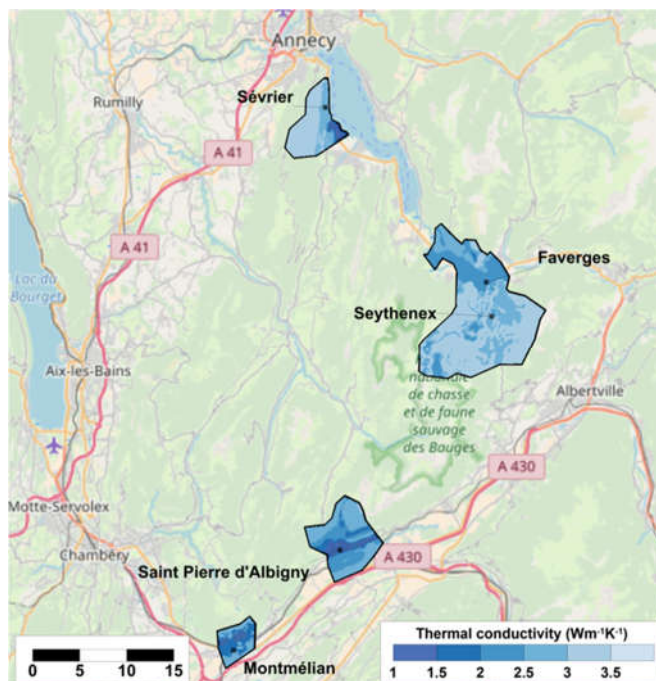
Slika 9: Prostorska porazdelitev poprečne TC tal v zgornjih 100 m pod površja v dolini Aosta.

Geotermalni potencial za 100 m globoke geosonde na območju doline Aosta

Geotermalni potencial za geosonde za dolino Aosta je prikazan le pod 2000 m n.v. (nad katero pač ocena talne temperature ni zanesljivo korelirana s sliko 12 za nadmorske višine). Karta prikazuje dokaj visok geotermalni potencial, ki je na večjem delu ozemlja višji od 10 MWh/leto (>70%), zaradi dokaj visokih vrednosti TC. Nižji potencial lahko najdemo v aluvialnih ravninah v dnu doline zaradi nižjih TC aluvialnih sedimentov. Največje območje je ravnica Aosta z dolžino 13,5 km v smeri zahod-vzhod in širino 2,5 km v osrednjem delu blizu mesta Aosta.



Slika 10: Prostorska porazdelitev poprečne TC tal v zgornjih 100 m pod površja na območju Cerknega.

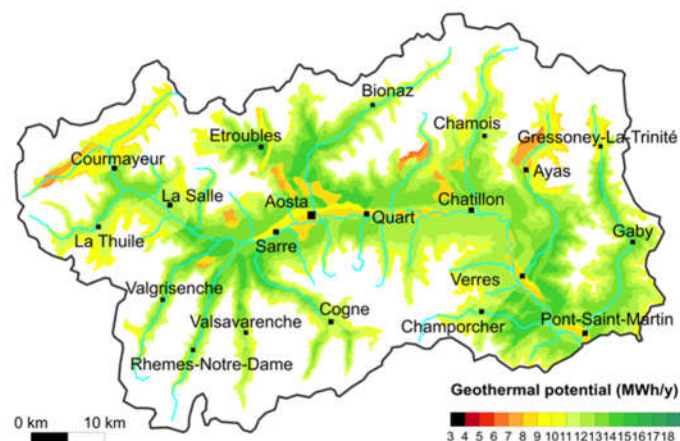


Slika 11: Prostorska porazdelitev poprečne TC v zgornjih 100 m podpovršja v štirih občinah parka Bauges.

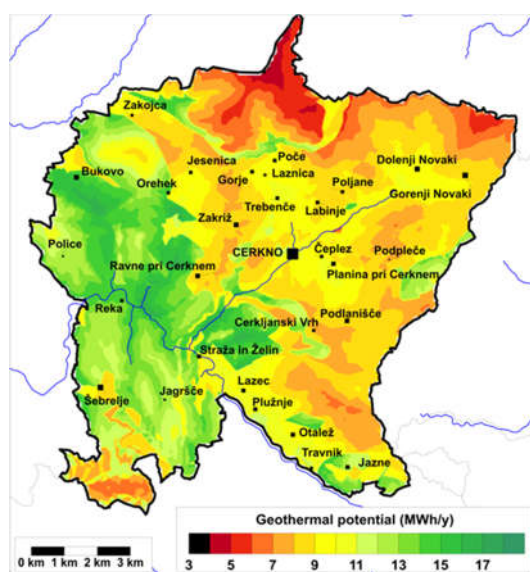
Nekaj velikih leč ledeniških nanosov, za katere je tudi značilen nižji potencial, najdemo celo v številnih stranskih dolinah. Ocena plitvega geotermalnega potenciala z G.POT metodo ne upošteva učinka advekcije podzemne vode, kar lahko občutno poveča toplotno izmenjavo. Učinek advekcije bi lahko upoštevali pri numeričnih modelih, kot so FEFLOW oz. MODFLOW ali z analitičnimi enačbami. Za aluvialno ravnico je bil določen tudi potencial za odprte sisteme.

Geotermalni potencial za 100 m globoke geosonde na območju Cerknega

Prostorsko porazdeljeni potencial za Cerkno (slika 13) se giblje od 8 do 15 MWh/leto, večina naselij pa ima potencial med 8 in 10 MWh/leto (Casasso in sod., 2017b). Višje vrednosti so na območjih z visoko prevodnim dolomitom v vaseh Bukovo (15 MWh/leto), Orehek in Reka (14 MWh/leto), Jagršče, Police in Jazne (12 MWh/year). Na splošno visoka TC podpovršja kompenzira učinek sorazmerno nizke talne temperature in zato plitvi geotermalni potencial kaže precej visoke vrednosti na tem hribovitem območju.



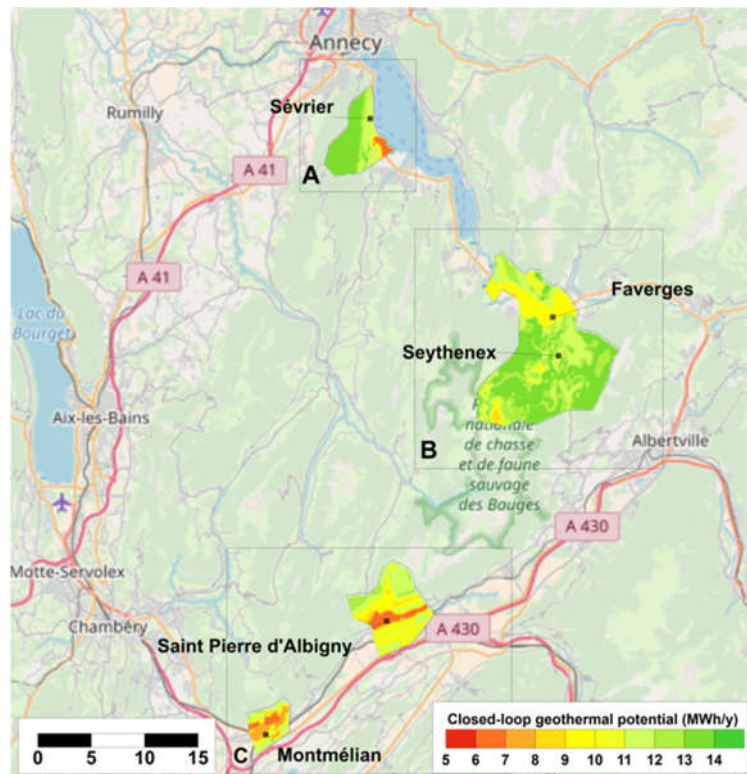
Slika 12: Porazdelitev plitvega geotermalnega potenciala P_{BHE} (MWh/leto) v dolini Aosta.



Slika 13: Porazdelitev plitvega geotermalnega potenciala P_{BHE} (MWh/leto) na območju Cerknega.

Geotermalni potencial za 100 m globoke geosonde na območju parka Bauges

Slika 14 prikazuje (na splošno gledano) prostorsko porazdeljen potencial štirih izbranih občin. Obseg prikazanih vrednosti je precej velik, če ga primerjamo z omejeno površino. To je predvsem posledica podrobne analize poprečne TC, zlasti nad aluvialnimi nanosi. Nad temi nanosi so dejansko potencialne vrednosti nižje od 10 MWh/leto, medtem ko se na pobočjih dolin povečajo do 15 MWh/leto. Nižje vrednosti (5,5 do 7 MWh/leto) so ugotovljene le nad ravnico reke Isère v občinah Montmélian in Saint-Pierre d'Albigny.



Slika 14: Porazdelitev plitvega geotermalnega potenciala v občinah Sévrier, Faverges-Seythenex, Saint-Pierre-d'Albigny in Montmélian (od severa proti jugu, generalni pogled).

Diskusija

Dolina Aosta je glede na srednje vrednosti TC kamnin podlage bolj homogeno območje kot ostali dve, Cerkno in Bauges. Po drugi strani je zaradi višinskih razlik nemotena temperatura tal (T_0) bolj spremenljiva v dolini Aosta in manj na območju parka Bauges in Cerknega. Najvažnejša vhodna parametra za geotermalni potencial sta ravno TC kamnin in T_0 . Potencial (tako za ogrevanje kot hlajenje) se viša s TC, saj se toplotna sprememba tal zmanjša. Po drugi strani se geotermalni potencial viša s T_0 , če upoštevamo način ogrevanja (ker gre pri tem za hlajenje tal in je zanj na voljo širši razpon). Seveda pa se iz nasprotnega razloga potencial zniža, če predpostavimo le hlajenje. Dobljene karte potenciala (slike 12, 13, 14) prikazujejo koliko energije za ogrevanje lahko letno pridobimo iz ene 100 m globoke geosonde (Capodaglio in sod., 2018; Casasso in sod., 2018). Ta potencial za geosonde je dokaj visok za vsa tri gorska območja. Na območju Cerknega znaša med 8 in 10 MWh/leto, z višjimi vrednostmi, do 16 MWh/leto, v zahodnem delu občine, ki ga pokrivajo visoko prevodni dolomiti. V dolini Aosta se giblje med 5 in 18 MWh/leto, in je na večjem delu ozemlja (> 70%) višji od 10 MWh/leto. V parku Bauges potencial znaša med 5 in 15 MWh/leto, s tem, da sta občini Sévrier in Faverges-Seythenex obetavnejši. Omenjeno ogrevalno energijo je mogoče neposredno primerjati z letno porabljeno energijo, izračunano v MWh. Če letno porabimo n.pr. 2300 litrov kurilnega olja s starim kotlom s 70% izkoristkom, je to enako 16 MWh. Približno $\frac{1}{4}$ te energije izvira iz toplotne črpalke (pri COP=4), ostalih 12 MWh iz okolja, iz vrtine. Na zelenkasto obarvanih območjih vseh potencialnih kart bi zadoščala 100 m globoka ali plitvejša vrtina. Na drugih območjih naj bi bila vrtina globlja. Eno globljo vrtino se lahko nadomesti z dvema ali več plitvimi. Pri dimenzioniranju polja geosond se vrtine za geosonde običajno izdelajo 5 do 7 m narazen

(odvisno od globine geosond) in v neki pravilni razporeditvi (pravokotnik, črka L ali U ipd.), da ne prihaja do motečega vpliva med njimi. Geosonde se lahko štejejo za neodvisne, če je razdalja B večja od dolžine geosonde H. Toplotni vpliv je tedaj vedno zanemarljiv. Torej je toplotni vpliv vedno majhen, ko je razdalja B med $H/2$ in H. (Pahud et al., 2002). V primeru posameznih hiš, in če so globine geosond 100 m, to pomeni, da mora biti razdalja do sosednje geosonde 50 metrov ali več, da se toplotne motnje čim bolj zmanjšajo (Zosseder et al., 2018).

Kar zadeva učinek nadmorske višine, zlasti v dolini Aosta, je geotermalni potencial v višjem delu doline globalno nižji zaradi nižje talne temperature. Glede na vrednosti potenciala za zaprte sisteme bi lahko bile že sedaj geosonde zanimive za nadomestitev plinskih kotlov, medtem ko bi jih morali v odsotnosti plinskega omrežja resno obravnavati kot alternativo kotlom na kurilno olje ali utekočinjen naftni plin.

Zaključki

V prispevku je predstavljeno kartiranje in ocena plitvega geotermalnega potenciala za zaprte sisteme, za katerega je izvedena podrobna študija geoloških in geotermičnih značilnosti v treh alpskih pilotnih območjih, s ciljem opredeliti najprimernejša območja za tehnologijo GTČ. Največji izziv je bila identifikacija litologij v različnih merilih za pravilno dodelitev termičnih lastnosti. Z metodo TCS so določene poprečne vrednosti TC vzorcev kamnin (skupaj s TD, ki je potrebna za pridobitev toplotne zmogljivosti). Pridobljene so večinoma pričakovane poprečne vrednosti TC glede na obstoječo litologijo. S temi vhodnimi podatki smo določili geotermalni potencial s pomočjo metode G.POT za standardno 100 m globoko geosondo. Seveda so bile toplotne lastnosti tal opredeljene za enako globino. Opažena je bila močna korelacija podnebja (letna poprečna temperatura zraka in HDD), zlasti na območjih Cerknega in Aoste, zato sta bili talna temperatura in trajanje ogrevalne sezone ocenjeni na podlagi DTM. Namen teh kart je podati veljavne podatke o plitvem geotermalnem potencialu za zaprte sisteme podjetnikom, inženirjem in posameznikom, da jim pomagajo v njihovi energetski izbiri pri izvedbi kateregakoli plitvega geotermalnega projekta, ki vključuje enote GTČ. Geotermalni potencial vsakega območja predstavlja letno količino energije, ki je trajnostno izmenljiva s tlemi, in sicer z eno vrtino z določenimi lastnostmi. Ta količina je uporabna za predhodno oceno stroškov namestitve geotermične naprave z zaprtim sistemom. Vendar ta energija ne bi smela biti mišljena kot nadomestitev za dimenzioniranje celega polja geosond.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Evropskemu regionalnemu razvojnemu fondu Interreg Alpine Space za financiranje projekta GRETA, in več agencijam za dodatne potrebne podatke.

Literatura

- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L. & Blum, P. (2012): Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp 1256-1267.
- Bottig, M., Götzl, G., Prestor, J., Pestotnik, S., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Maragna, C., Casasso, A., Piga, B., Tosco, T., Zambelli, P., Vaccaro, R. & Huggenberger, P. (2016): Catalogue of techniques and best practices for the utilization of Near-Surface Geothermal Energy. GRETA project deliverable 3.1.1, TUM, Munich, 48 p.

- Bottig, M., Hoyer, S., Prestor, J., Pestotnik, S., Rajver, D., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Maragna, C., Casasso, A., Piga, B., Della Valentina, S. & Zambelli, P. (2017): Catalogue of operational criteria and constraints for shallow geothermal systems in the Alpine environment. GRETA project deliverable 3.2.1, TUM, Munich, 91 p.
- Böttcher, F., Casasso, A., Götzl, G. & Zosseder, K. (2019): TAP – Thermal aquifer Potential: A quantitative method to assess the spatial potential for the thermal use of groundwater. *Renew. Energy*, 142, pp 85-95. [https://doi: 10.1016/j.renene.2019.04.086](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.086)
- Capodaglio, P., Baietto, A., Casasso, A., Della Valentina, S., Andorno, E., Caldera, D., Saggese, M., Rajver, D., Bucci, A., Böttcher, F., Zambelli, P. & Olmedo, M. (2018): Geotermia a bassa entalpia: aspetti ambientali, energetici ed economici. Il Progetto INTERREG Spazio Alpino GRETA in Valle d'Aosta. GRETA project booklet, ARPA, Aosta, 85 p.
- Casasso, A. & Sethi, R. (2016): G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, pp 765-773.
- Casasso, A. & Sethi, R. (2017): Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo (Piedmont, NW Italy). *Renewable Energy*, 102, Part B, pp 306-315.
- Casasso, A., Piga, B., Sethi, R., Prestor, J., Pestotnik, S., Bottig, M., Götzl, G., Zambelli, P., D'Alonzo, V., Vaccaro, R., Capodaglio, P., Olmedo, M., Baietto, A., Maragna, C., Böttcher, F. & Zosseder, K. (2017a): The GRETA project: the contribution of near-surface geothermal energy for the energetic self-sufficiency of Alpine regions. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 6, pp 1-12.
- Casasso, A., Pestotnik, S., Rajver, D., Jež, J., Prestor, J. & Sethi, R. (2017b): Assessment and mapping of the closed-loop shallow geothermal potential in Cerknò (Slovenia). *Energy Procedia*, 125C, pp 335-344.
- Casasso, A., Sethi, R., Tiraferri, A., Della Valentina, S., Bucci, A., Tosco, T., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Baietto, A., Prestor, J., Pestotnik, S., Bottig, M., Hoyer, S., Rupprecht, D., Götzl, G., Maragna, C., Cartannaz, C., Zambelli, P., Scaramuzzino, C., Vianello, A. & Huggenberger, P. (2018): Local-scale maps of the NSGE potential in the Case Study areas. GRETA project deliverable 4.2.1, TUM, Munich, 137 p.
- Curtis, R., Pine, T. & Wickins, C. (2013): Development of new ground loop sizing tools for domestic GSHP installations in the UK. *Proceedings European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy, EGEC*, 10 p., SG1-07.
- DECC, MCS 022 (2011): Ground heat exchanger look-up tables. Supplementary material to MIS 3005. Issue 1.0, Dept of Energy and Climate Change (DECC), United Kingdom, p. 22.
- Eugster, W., Pahud, D., Rohner, E. & Signorelli, S. (2010): Sondes géothermiques. SIA 384/6:2010 Bâtiment, génie civil. Norme suisse SN 546 384/6. Valable dès 2010-01-01. Société suisse des ingénieurs et des architectes, CH-8027 Zurich, 76 p.
- Gemelli, A., Mancini, A. & Longhi, S. (2011): GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renewable Energy*, 36(9), pp 2474-2483.
- Ondreka, J., Rusgen, M.I., Stober, I. & Czurda, K. (2007): GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany—possibilities and limitations. *Renew. Energy*, 32 (13), pp 2186–2200.
- Ouzzane M., Eslami-Nejad P., Badache M. & Aidoun Z. (2015): New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature. *Geothermics*, 57, pp 379-384.
- Ovsenik-Jeglič, T. & Mekinda-Majaron, T. (2002): Klimatografija Slovenije. Stopinjski dnevi in trajanje kurilne sezone. Agencija RS za okolje – Urad za meteorologijo, Ljubljana. http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Stopinjski_dnevi_in_trajanje_kurilne_sezone.pdf
- Pahud, D., Mégel T., Brenni, R. (2002): Langzeiteffekt von MehrfachErdwärmesonden. Programm Geothermie Im Auftrag des Bundesamtes für Energie.
- Popov, Y.A., Lippmann, E. & Rauen, A. (2017): TCS – Manual. Thermal conductivity (TC) and thermal diffusivity (TD) scanner, version 31.01.2017. TCS Lippmann and Rauen GbR, Schaufling, 53 p.
- Prestor, J., Pestotnik, S., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Götzl, G., Bottig, M., Weilbold, J., Maragna, C., Martin, J.-C., Durst, P., Casasso, A., Zambelli, P., Vaccaro, R., Gilbert, J.,

- Messina, F. & Spinolo, F. (2016): Overview and analysis of regulation criteria and guidelines for NSGE applications in the Alpine region. GRETA project deliverable 2.1.1, TUM, Munich.
- Sanner, B., (2019): Summary of EGC 2019 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe. Proceedings, European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, EGEC, 14 p.
- Signorelli, S. & Kohl, T., (2004): Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Global and planetary change*, 40, pp 267-284.
- UNI (1987): UNI 9019: 1987 - Heating costs based on consumption. Determination of heating costs by degree-day counter in zone plant. Degree-day counter utilization and test.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI), (2000): VDI 4640 Part 1. Thermal use of the ground. Fundamentals, approvals, environmental aspects, Düsseldorf, 32 p.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI), (2001): VDI 4640 Part 2. Thermal use of the underground. Ground source heat pump systems, Düsseldorf.
- Zosseder, K., Böttcher, F., Prestor, J., Pestotnik, S., Bottig, M., Capodaglio, P., Casasso, A., et al. (2018): Definition of the guidelines for legal and technological procedures. GRETA project deliverable 2.3.1, TUM, Munich

Zmanjšanje ledenikov Vzhodnih Alp od leta 1807 do danes

Mihaela Triglav Čekada*, Tomaž Gnidovec**

Povzetek

Sodobni geoinformacijski portali s prostodostopnimi podatki, ki prikazujejo tudi satelitske posnetke (npr. Google Earth Pro) in portali s historičnimi kartami (npr. Mapire) omogočajo enostavno preučevanje različnih dolgotrajnih sprememb v prostoru. Tako so lahko historične karte druge in tretje vojaške izmere nekdanjega Avstrijskega cesarstva zelo dober vir za preučevanje zmanjševanja ledenikov med letom 1807 in danes, saj pokrivajo slabo polovico Alp, v geografskem smislu imenovano tudi Vzhodne Alpe. Na kartah druge vojaške izmere, ki so bile izdelane med leti 1807 in 1835 smo identificirali 55 ledeniških skupin, ki so pokrivalo skupno 1685 km². Na kartah tretje vojaške izmere, ki so bile izdelane med 1869 in 1887, so iste ledeniške skupine pokrivalo 1293 km². Na satelitskih posnetkih prikazanih v Google Earth Pro, ki so bili posneti večinoma med 2013 in 2017, so iste ledeniške skupine pokrivalo le še 361 km². Skupno se je površina teh ledenikov v 200 letnem obdobju zmanjšala za 79 %, oziroma se je v povprečju stalilo za 6,6 km² ledeniške površine na leto.

Ključne besede: karte druge in tretje vojaške izmere Avstrijskega cesarstva, ledeniki, Mapire, Google Earth Pro

Key words: maps of the second and third Habsburg military survey, glaciers, Mapire, Google Earth Pro

Uvod

Danes so novinarske objave o posledicah podnebnih sprememb zelo pogoste. Vendar pa si povprečni bralec ne zna razložiti podatka o tem, kaj naj bi v resnici pomenil dvig povprečne temperature za 1,5 stopinje Celzija, ki se je zgodil od konca male ledene dobe okoli leta 1850 pa do danes (Triglav Čekada, 2018b). Najbolj otipljiv oz. najhitreje viden in slikovit prikaz dolgoročnih klimatskih sprememb je zmanjševanje ledenikov. Dandanes, ko so vsebolj prisotni raznovrstni prostodostopni in odprti podatki, od satelitskih posnetkov do historičnih kart, pa lahko analizo zmanjševanja ledenikov opravi vsak sam. V tem sestavku predstavljamo analizo zmanjševanja ledenikov med letom 1807 in danes za celotno območje Vzhodnih Alp, ki so nam jo omogočile historične karte druge in tretje vojaške izmere nekdanjega Avstrijskega cesarstva prostodostopne na spletnem portalu Mapire ter sodobni prostodostopni satelitski posnetki iz Google Earth Pro. Historične karte druge in tretje vojaške izmere smo sicer že uporabili za izmero površine Triglavskega ledenika in Kaninskih ledenikov (Triglav Čekada, 2018a), vendar spadajo ti ledeniki med zelo majhne ledenike, ki se odzivajo na klimatske spremembe hitreje kot večji ledeniki (Brown et al. 2010; Colucci in Guglielmin, 2014; Huges 2018), zato nam prikazujejo še bolj pesimistično sliko posledic oziroma vpliva klimatskih sprememb. Za realnejšo sliko smo analizirali zmanjševanje različno velikih ledenikov na območju Vzhodnih Alp.

Že nekatere starejše raziskave (Haeberli in Beniston, 1998; Barry, 2006; Haeberli, 2003; Haeberli in sod., 2007) govorijo o tem, da se je površina alpskih ledenikov med leti 1850 in 1975 zmanjšala za dobro tretjino, prostornina pa še več – kar za polovico. Tako naj bi ledeniki v Alpah okoli leta 1870 pokrivali okoli 4400 km², leta 1975 pa le še

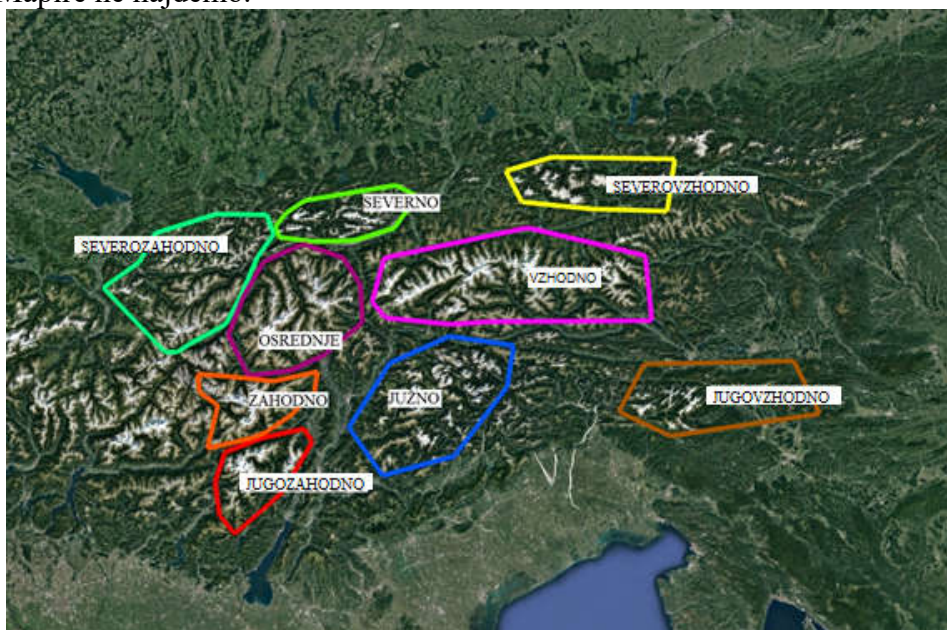
*Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, 1000 Ljubljana in Univerza v Ljubljani in Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana.

**Prapreče 6, 8360 Žužemberk

2909 km². Na prelomu tisočletja naj bi alpski ledeniki pokrivali le še 2060 km² (Huss in Farinotti, 2012; Bach in sod., 2018).

Metodologija

Na spletnem portalu Mapire najdemo digitalizirane in georeferencirane (v koordinatni sistem WGS84) karte od prve do tretje vojaške topografske izmere (Mapire, 2019). To so karte, ki so jih izdelali za območje nekdanje Habsburške monarhije oz. njenega kasnejšega naslednika Avstrijskega cesarstva oz. še kasnejše Avstro-Ogrske. Na kartah prve vojaške izmere, ki so jih izdelali med letoma 1763–1787, ledeniki niso bili izrisani (Triglav Čekada, 2018a). Na kartah druge vojaške izmere, izdelanih med 1807–1869, in tretje vojaške izmere, izdelanih med 1869–1887, pa so ledeniki izrisani. Obstajajo še karte četrte deželne izmere, izdelane med 1896–1915, ki pa jih na spletnem portalu Mapire ne najdemo.



Slika 1: Obravnavana območja Alp.
(vir podlage: Google Earth Pro).

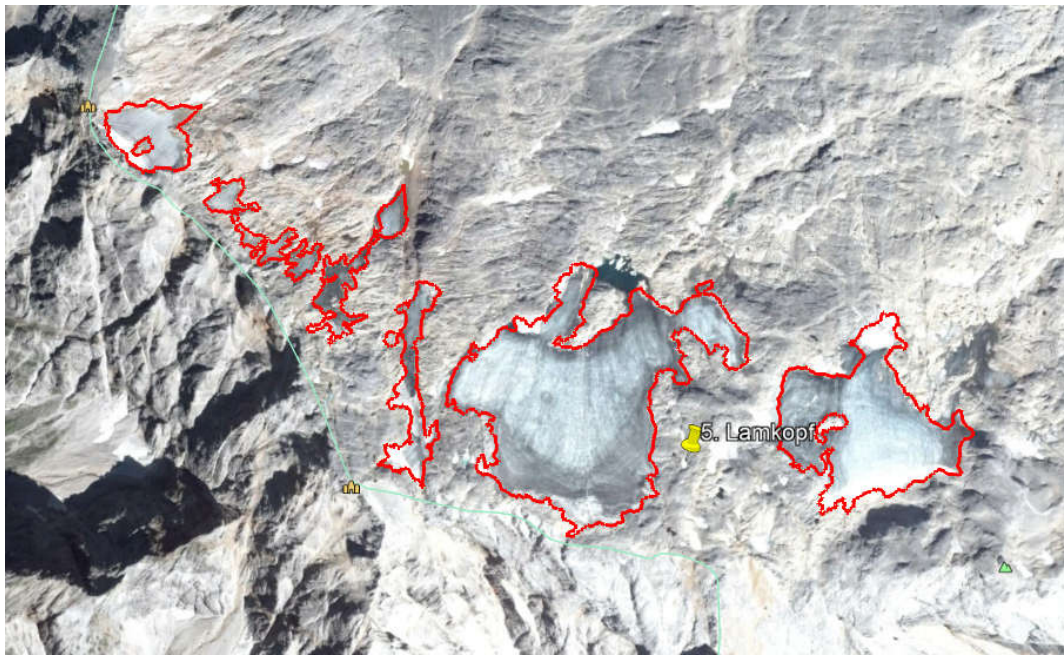
S pomočjo kart druge in tretje vojaške izmere Avstrijskega cesarstva lahko preučujemo približno polovico Alp, t. i. Vzhodne Alpe. Da bo območje lažje obvladljivo, smo ga razdelili na devet delov oz. območij (slika 1), razmejenih z večjimi naravnimi reliefnimi oblikami, kot so rečne doline. Ker so posamezni ledeniki na kartah druge in tretje vojaške izmere ter v različnih spletnih virih različno poimenovani, smo se odločili, da jih bomo združili v 51 ledeniških skupin, ki smo jih večinoma poimenovali po lokaciji območja in ne po samih ledenikih v njej. Le nekatere, kjer je bila identifikacija ledeniškega imena enostavna, smo poimenovali kar po ledeniku (npr. Pastirica, Hallstätter Gletscher ...). Teh 51 ledeniških skupin zajema 263 današnjih ledenikov in tri ledenike, ki so medtem že izginili. V posamezni ledeniški skupini je najmanj en ledenik oz. del ledenika in največ 22 ledenikov oz. njegovih delov. Med ledeniki so tako zelo majhni ledeniki, kot sta Triglavski ledenik ali Kaninski ledeniki, kot tudi klasični veliki dolinski ledeniki kot je Pastirica. Med deli ledenikov so poleg ledenikov tudi okoliška snežišča, ki jih na satelitskih posnetkih ne moremo ločiti od ledenikov. Prav tako so ledeniki in snežišča na kartah druge in tretje izmere prikazani z enakim kartografskim znakom.

Za preučevanje površine ledenikov smo uporabili:

1. Druga vojaška izmera kartirana v merilu 1 : 28800:
 - Salzburg (1807–1808)
 - Tirolska (1816–1821)
 - Ilirija (1829–1835)
2. Tretja vojaška izmera kartirana v merilu 1 : 25000:
 - Avstrijski del Avstro-Ogrske (1869–1887)
3. Satelitski posnetki v Google Earth Pro (2012–2019)

Najprej smo v Google Earth Pro identificirali ledeniške skupine ter njihove posamezne ledenike in digitalizirali njihov današnji obseg v koordinatnem sistemu WGS84. Za različna območja so bili na voljo različni satelitski posnetki narejeni med letoma 2012–2019, v glavnem med 2013–2017. Večinoma so imeli satelitski posnetki ločljivost $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$. Na nekaterih delih, kot je severozahodna Italija, ki v našem primeru pokriva jugozahodno ledeniško območje, pa je bila ločljivost satelitskih posnetkov $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Iz digitaliziranega obsega ledenikov (na sliki 2 je primer zajema za ledeniško skupino Lamkopf) smo izračunali današnjo površino ledenikov.

Današnji obseg ledenikov smo uporabili za identifikacijo starega stanja ledenikov na kartah druge in tretje vojaške izmere. Površino ledenikov smo izmerili kar na spletnem portalu Mapire, ki omogoča izmero površine (slika 3). Rezultate smo prepisali v evidenco in si izdelali posnetek zaslona zajetih površin, da smo lahko kasneje preverjali podrobnosti.



Slika 2: Posnetek zaslona ledeniške skupine Lamkopf v programu Google Earth Pro za satelitski posnetek iz leta 2015 (predstavlja manjše območje kot je prikazano na sliki 3) (vir: Google Earth Pro).



Slika 3: Posnetek zaslon ledeniške skupine Lamkopf v programu Mapire na karti tretje vojaške izmere (vir: Mapire in Avstrijski državni arhiv).

Na primeru treh različno velikih ledenikov smo preverili še ponovljivost zajema površin. Ugotovili smo, da je ponovljivost zajema površin s kart druge in tretje vojaške izmere v Mapire okoli 2 ha, v Google Earth Pro pa 0,3 ha (Gnidovec, 2019). Sama ponovljivost zajema površine je odvisna od merila karte oz. ločljivosti satelitskega posnetka ter od točnosti georeferenciranja vseh podlag v skupni koordinatni sistem. Ker so bile karte druge in tretje vojaške izmere v Mapire transformirane v koordinatni sistem WGS84, je točnost zajema odvisna od točnosti transformacije, ki je okoli 150–200 m ter omogoča točnost zajema površin okoli 1 ha (Timar in sod., 2006; Timár in Székely, 2010).

Zmanjšanje površine ledenikov na območju Vzhodnih Alp

V preglednici 1 so podane površine ledenikov kot so bili prikazani na drugi in tretji vojaški izmeri in današnje stanje iz satelitskih posnetkov. V posameznem izbranem območju (slika 1) je različno število ledeniških skupin (preglednica 2). Med drugo (1807–1835) in tretjo (1869–1887) vojaško izmero so se ledeniki zmanjšali za 23 %, kar je presenetljivo veliko, če vemo, da se je druga izmera izvajala še globoko v zadnjem sunku male ledene dobe, ki je povzročila, da so ledeniki napredovali še vse do leta 1850. Verjetno se je največji delež tega zmanjšanja ledenikov zgodil med leti 1850 in 1869–1887. Del zmanjšanja gre pripisati pravemu krčenju ledenikov, saj naj bi bilo v zadnji polovici devetnajstega stoletja tudi opazovalcem nam bližjih ledenikov pod Kaninom že poznano splošno krčenje vseh alpskih ledenikov (Marinelli, 1910). Kasnejša analiza dolgoročnih opazovanj kolebanja 35 alpskih ledenikov od leta 1700 dalje je pokazala, da so med 1860 in 1900 vsi obravnavani ledeniki nazadovali (Oerlemans, 2005). Drug del zmanjšanja moramo pripisati še napačni interpretaciji originalnih kartografov druge in tretje vojaške izmere, kaj so eni in drugi obravnavali kot ledenik in kaj ne.

Med drugo vojaško izmero in današnjim dnem, torej v zadnjih 200 letih, so se ledeniki Vzhodnih Alp skupno skrčili za 79 % iz 1685 km² na 361 km² (Preglednica 1). V približno 140 letnem obdobju med tretjo izmero in danes, pa so se ledeniki na območju Vzhodnih Alp skrčili za 72 %.

Podrobnejša predstavitev je v preglednici 1, kjer lahko opazimo osrednje in vzhodno območje kot območji z največjo površino ledenikov, skladno s tem, da se nahajata znotraj centralnega alpskega območja, v katerem je tudi največ ledenikov (slika 1). V vzhodnem območju so ledeniki med letoma 1816–1835 pokrivali površino 731 km², v osrednjem delu pa površino 517 km² (Preglednica 1). V prvem območju se je površina ledenikov do obdobja 2013–2017 skrčila na 138 km², v drugem pa na 124 km². Skupno se je na obeh območjih površina ledenikov zmanjšala za 79 % v približno 200 letnem obdobju. V približno 140 letnem obdobju med tretjo izmero in danes pa se je njuna površina zmanjšala za 73 %.

Preglednica 1: Zmanjšanje oz. krčenje površin ledenikov glede na devet obravnavanih območij.

Območje	Mapire: druga vojaška izmera	Mapire: tretja vojaška izmera	Google Earth Pro: satelitski posnetki	Skupno Zmanjšanje [%]
	Površina [km ²]	Površina [km ²]	Površina [km ²]	
Jugozahodno območje	119,47	92,6	17,54	85
Zahodno območje	198,05	147,23	52,31	74
Osrednje območje	516,89	395,32	123,67	76
Južno območje	8,85	5,83	1,20	86
Severozahodno območje	83,7	67,92	23,06	72
Severno območje	10,62	6,72	0,37	96
Jugovzhodno območje	0,81	0,68	0,08	82
Severovzhodno območje	16,53	12,74	5,04	69
Vzhodno območje	730,58	564,65	138,36	81
Skupaj	1685,5	1293,7	361,6	

V preglednici 1 vidimo, da je prišlo do največjega zmanjšanja površine – za kar 96 % – med drugo izmero in današnjim stanjem, na severnem območju, saj se je iz prvotnih skoraj 11 km² površina ledenikov skrčila na slabih 0,4 km². Če severno območje primerjamo z vzhodnim in osrednjim delom, severno že v osnovi zajema veliko manjšo površino in tudi manjšo ledeniško površino. Odstotkovno velik delež površine sta izgubili tudi jugovzhodno (tu so le Triglavski ledenik in Kaninski ledeniki) in južno območje (tu je le ledenik Marmolada) z zmanjšanjem za 86 % in 82 %. Tudi ti dve območji sta imeli prvenstveno sorazmerno majhno površino ledenikov glede na celotno površino, kar je enako kot smo opazili na severnem območju. Iz tega lahko sklepamo, da območja, ki so imela manj ledenikov že pred 200 leti, hitreje izgubljajo ledenike.

Zato smo ledeniške skupine razdelili na prve, ki danes pokrivajo ledenike skupne površine manjše od 5 km², imenujemo jih ledeniške skupine z majhnimi ledeniki, ter druge kjer ledeniki v njih pokrivajo skupno površino večjo od 5 km², imenujemo jih ledeniške skupine z velikimi ledeniki (preglednica 2). Ugotovili smo, da so ledeniki iz ledeniških skupin z majhnimi ledeniki v zadnjih 200 letih izgubili povprečno 87 % ledeniške površine, ledeniške skupine z velikimi ledeniki pa povprečno 77 %. To predstavlja povprečno izgubo ledeniške površine 0,07 km²/leto za majhne ledenike ter 0,52 km²/leto za velike ledenike. V zadnjih 140 letih so ledeniške skupine z majhnimi ledeniki izgubile v povprečju 73 % ledeniške površine, ledeniške skupine z velikimi ledeniki pa povprečno 70 %. To predstavlja povprečno izgubo ledeniške površine 0,07 km²/leto za majhne ter 0,82 km²/leto za velike ledenike.

Preglednica 2: Podrobno zmanjšanje oz. krčenje površin posamezne ledeniške skupine.

Lokacija območja	Druga vojaška izmera [km ²]	Tretja vojaška izmera [km ²]	Satelitski posnetki [km ²]	Skupno zmanjšanje [%]
Jugozahodno območje				
Adamello, Vedretta di Folgorida	94,75	73,96	13,26	86
Presanella	24,72	18,64	4,28	83
Zahodno območje				
Pico san Matteo, Monte Vioz, Monte Cevedale, Cima Venezia, Ortles, Cima Tuckett	176,24	131,54	47,26	73
Cima Vertana	18,72	13,54	4,80	74
Gioveretto	3,09	2,15	0,26	92
Osrednje območje				
Runderhofspitze, Lisenser Spitze, Hörndle	51,71	37,89	15,07	71
Wilder Pfaff, Hinterer Daunkopf	78,85	64,27	18,04	77
Watzespitze, Bliggspitze	40,36	28,62	3,82	91
Hohe Geige	22,90	14,87	1,22	95
Karlesspitze, Marzellspitze, Fineilspitze, Weißkugel, Ehrichspitze, Petersenspitze, Hochvernagtspitze, Wildspitze, Innere Schwarze Schneid	300,00	234,64	84,80	72
Roteck	9,16	6,35	0,72	92
Riffkarspitze	2,17	1,04	0,00	100
Platßer	3,28	1,86	0,00	100
Glockthurm	8,46	5,78	0,00	100
Južno območje				
Marmolada	8,85	5,83	1,20	86
Severozahodno območje				
Silvrettahorn	83,70	67,92	22,68	73
Severno območje				
Zugspitze	10,62	6,72	0,37	96
Jugovzhodno območje				
Triglav	0,32	0,3	0,06	82
Kanin	0,49	0,38	0,06	88
Severovzhodno območje				
Hallstätter Gletscher	9,36	6,87	4,56	51
Lamkopf	7,17	5,87	0,48	93
Vzhodno območje				
Olperer	167,72	128,76	6,28	96
Hochfeiler, Turnerkamp, Schwarzenstein, Wollbachspitze	132,40	102,61	24,50	81
Reiserferner - Ahrn	31,28	24,11	3,44	89
Roskopf	51,87	38,46	5,52	89
Rotspitze	2,29	1,76	2,28	0
Dreiherrnspitze, Großvenediger	170,73	135,84	50,94	70
Großglockner (ledenik Pastirica)	111,24	85,47	34,25	69
Ankogel	16,95	11,94	2,87	83
Hocharn	29,88	22,76	3,50	88
Säuleck	16,22	12,94	4,79	70

Razprava

Za jugovzhodno območje, kjer so Triglavski ledenik in Kaninski ledeniki, ki jih lahko preučujemo tudi na kartah druge vojaške izmere, smo za stanje med leti 1829–1835 izmerili površino 0,82 km², ki se je do 2013–2017 zmanjšala na 0,12 km². Colucci in Žebre (2016) sta našela ob koncu male ledene dobe iz geomorfoloških ostalin (npr. čelne morene) na širšem območju Julijskih Alp (Slovenija in Italija) 19 malih ledenikov, ki naj bi takrat pokrivali 2,35 km², danes pa 0,36 km². Njunsko skupno ugotovljeno zmanjšanje za 84 % je malenkost večje od našega 82 % oz. poda povprečno letno zmanjšanje površine za 0,01 km²/leto, ki je primerljivo z našim letnim zmanjšanjem 0,003 km²/leto.

Hagg in sod. (2012) omenjajo na našem severnem območju, ki prikazuje območje okoli najvišjega vrha Nemčije Zugspitze, tri ledenike: Nördlicher- in Südlicher Schneeferner ter Höllentalferner. Prva dva naj bi leta 1892, to je okoli dve desetletji po tretji vojaški izmeri, obsegala 1,89 km², leta 2009 le še 0,33 km². Razliko med našo izmero površine iz tretje vojaške izmere 1869–1887 ter letom 1892 gre pripisati pospešenemu taljenju ledenikov po koncu male ledene dobe ter uporabi kart, ki prikazujejo samo dva ledenika (Hagg in sod., 2012). Z našimi meritvami je neposredno primerljiva samo površina vseh treh ledenikov iz leta 2009, ki naj bi znašala 0,55 km² (Hagg in sod., 2012), mi pa smo na temelju satelitskih posnetkov iz 2015 izmerili površino 0,37 km². Ledenika sta se glede na podatke v Hagg in sod. (2012) v 117 letnem obdobju povprečno zmanjševala za 0,01 km²/leto. Iz naših podatkov, ki prikazuje obdobje med 1807 in 2015, dobimo hitrost zmanjševanja površine vseh treh ledenikov 0,05 km²/leto.

V jugozahodnem območju, ki pokriva gorsko skupino Adamello-Presanella v Italiji, je bilo leta 2003 za 17,24 km² ledenikov. Največji med njimi, imenovan ledenik Madrone, je pokrival 13,38 km² (Grossi in sod., 2013). Ta vrednost se sklada z našo izmerjeno vrednostjo (13,26 km²) za ledenik pod vrhom gore Adamello, ki smo jo izmerili iz satelitskih posnetkov 2017. Grossi in sod. (2013) za ledenik Madrone omenjajo, da se je čelo ledenika med leti 1820 in 2002 umaknilo za 2 km in je zdaj 880 m višje.

V zahodnem območju, ki pokriva gorsko skupino Ortles-Cevedale v Italiji, je še posebej dobro dokumentirano umikanje ledenika Caresèr. Za ta ledenik obstaja zelo dolga časovna vrsta opazovanj umikanja čela ledenika od leta 1897 naprej, od leta 1933, ko so izdelali njegovo prvo podrobno topografsko karto, lahko sledimo njegovemu tanjšanju, od leta 1967 naprej pa obstajajo glaciološke meritve njegove masne bilance (Carturan in sod., 2013). Ledenik je leta 1933 meril 5,45 km², leta 2012 pa 1,63 km². Od leta 1933 do 2012 se je njegova površina povprečno zmanjševala za 0,1 km²/leto (Carturan in sod., 2013), kar je povsem primerljivo z našo hitrostjo zmanjševanja površin 0,07 km²/leto, ki smo jo dobili za vse ledeniške skupine z majhnimi ledeniki, kamor danes sodi tudi ledenik Caresèr.

V južnem območju, ki pokriva ledenik Marmolada v Italiji, smo na temelju druge izmere izmerili njegovo površino na 8,85 km², v dvestoletnem obdobju do satelitskega posnetka iz leta 2017, pa se je zmanjšal na 1,20 km², povprečno naj bi tako v tem obdobju izgubil 0,04 km²/leto. Nistor (2014), ki je za leta 1986, 1999 in 2013 izmeril njegovo površino iz satelitskih posnetkov Landsat omenja, da naj bi Marmolada leta 1888 merila 4,95 km², 1910 3,92 km², leta 1986 2,70 km² ter 2013 1,67 km². Med leti 1888 in 2013 naj bi ledenik izgubil povprečno 0,03 km²/leto, kar je primerljivo z našimi rezultati.

Sedaj pa pogledjmo še dve malo večji območji v našem vzhodnem in osrednjem območju, ki pokrivata največ ledenikov. Najprej si v vzhodnem območju pogledjmo ledenike v Visokih Turah, kamor sodijo naše ledeniške skupine pod vrhovi Dreiherrnspitze, Großvenediger, Großglockner (Pastirica), Ankogel in Hocharn, ki so v času druge izmere skupno pokrivalo 328,8 km², danes le še 91,56 km². Povprečno so izgubili v 200 letnem obdobju 1,19 km²/leto. Fischer in sod. (2014) pišejo, da naj bi ti ledeniki konec male ledene dobe pokrivali približno dvakrat toliko površine kot so jo leta 1998, ko so pokrivali 185,56 km², kar je okoli 370 km² za leto 1850 in je povsem primerljivo z našim rezultatom, poda pa tudi podobno letno zmanjšanje za 1,22 km²/leto.

Naše osrednje območje se v splošnem pokriva z Ötztalskimi Alpami v Avstriji, delno pa pokriva še Stubajske Alpe na severovzhodu. V našem primeru so se ledeniki na tem območju v 200 letnem obdobju zmanjšali iz 516,89 km² na 123,67 km² v letu 2015, kar pomeni, da so se zmanjšali povprečno 1,08 km²/leto. Abermann in sod. (2009) so ugotovil, da naj bi ledeniki Ötztalskih Alp leta 2006 pokrivali 139,6 km², leta 1967 pa 168,6 km², kar pomeni, da se je njihova površina povprečno zmanjšala za 0,74 km²/leto. Tudi razlika med površinami 2006 (Abermann in sod., 2009) in našo iz 2015 je pričakovana za skoraj desetletno razliko.

Sklep

Zgornja primerjava naše izmere na temelju satelitskih posnetkov iz obdobja 2013–2017 ter povprečnih hitrosti zmanjševanja ledenikov in bolj podrobno izmerjenih površin različnih ledenikov iz literature nam je pokazala, da smo dobili sorazmerno primerljive vrednosti in to navkljub temu, da ne poznamo podrobnosti obravnavanih ledenikov in smo se zanašali le na našo sposobnost pravilne fotointerpretacije oz. na razločevanje snega in ledu na satelitskih posnetkih. Zavedati se moramo tudi, da večine satelitskih posnetkov niso posneli konec ledeniške talilne sezone (začetek oktobra), zaradi česar prihaja do razlik v današnjih izmerjenih površinah ledenikov. Ob hitrem pregledu literature nismo našli avtorjev, ki bi uporabili drugo vojaško izmero za določitev površin ledenikov, zato direktne primerjave nismo mogli izvesti. Redki omenjajo uporabo tretje vojaške izmere, ki naj bi jo za izmero ledenikov leta 1888 v Ötztalskih Alpah uporabljal Richter (Abermann, 2011). Različne kasnejše topografske karte posameznih večjih ledenikov, ki so jih izdelali na koncu devetnajstega ali na začetku dvajsetega stoletja so vendarle omogočile, da smo lahko primerjali povprečno letno hitrost zmanjševanja oz. krčenja ledeniških površin na različnih območjih. Ugotovili smo, da so vrednosti primerljive z našimi. S tem potrjujemo hipotezo, da novodobni prostodostopni satelitski posnetki in prostodostopne historične karte druge in tretje vojaške izmere omogočajo realno dolgoročno oceno zmanjševanja ledenikov za polovico Alp, t.i. Vzhodne Alpe.

Zahvala

Delo je bilo delno financirano v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2–8176 Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

- Abermann, J., Lambrecht, A., Fischer, A., Kuhn, M. (2009). Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969-1997-2006). *The Cryosphere*, 3, 205-215.
- Abermann, J. (2011). Die Gletscher in Österreich Vergangenheit und Gegenwart. Doktorat. Innsbruck.
- Bach, E., Radić, V., Schoof, C. (2018). How sensitive are mountain glaciers to climate change? Insights from a block model. *Journal of Glaciology*.
- Barry, R. G. (2006). The status of research on glaciers and global glacier recession: a review. *Progress in Physical Geography*, 30(3), 285-306.
- Brown, J., Harper, J., Humphrey, N. (2010). Cirque glacier sensitivity to 21st century warming: Sperry Glacier, Rocky Mountains, USA. *Global and Planetary Change* 74 (2), 91-98.
- Carturan, L., Baroni, C., Becker, M., Bellin, A., Cainelli, O., Carton, A., Casarotto, C., Dalla Fontana, D., Godio, G., Martinelli, T., Salvatore, M. C., Seppi, R. (2013). Decay of long-term monitored glacier: Careser Glacier (Ortles-Cevedale, European Alps). *The Cryosphere*, 7, 1819-1838.
- Colucci, R.R., Guglielmin, M. (2014). Participation-temperature changes and evolution of a small glacier in the southeastern European Alps during the last 90 years. *International journal of climatology*, 35, 2783-2797.
- Colucci, R.R., Žebre, M. (2016). Late Holocene evolution of glaciers in the southeastern Alps. *Journal of Maps*, 12 (S1), 289-299.
- Fischer, A., Stocker-Waldhuber, M., Seiser, B., Hynek, B., Slupetzky, H. (2014). Glaciological monitoring in Hohe Tauern National Park. *Management & Policy Issues*, 6 (1).
- Gnidovec, T. (2019). Določitev obsega ledenikov iz kart 2. in 3. Avstrijske vojaške izmere. Diplomski naloga, UL FGG.
- Grossi, G., Caronna, P., Ranzi, R. (2013). Hydrologic vulnerability to climate change of the Mandrone glacier (Adamello-Presanella group, Italian Alps). *Advances in Water Resources*, 55, 190-203.
- Haerberli, W., Beniston, M. (1998). Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 27 (4), 258-265.
- Haerberli, W. (2003). Glaciers and ice caps: historical background and strategies of world-wide monitoring. *Mass balance of the Cryosphere: Observations and Modelling of Contemporary and Future Changes*. Cambridge University Press, 559-577
- Haerberli, W., Hoelzle, M., Paul, F., Zemp, M. (2007). Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology*, 46 (1), 150-160.
- Hagg, W., Mayer, C., Mayr, E., Heilig, A. (2012). Climate and glacier fluctuations in the Bavarian Alps in the past 120 years. *Erdkunde*, 66 (2), 121-142.
- Hughes, P.D. (2018). Little Ice Age glaciers and climate in the Mediterranean mountains: a new analysis. *Geographical research letters*, 44 (1), 15-45.
- Huss, M., Farinotti, D. (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of geophysical research*, 117.
- Nistor, M.M. (2014). Using Landsat images and GIS to assess the changes of Mer de Glace and Marmolada glaciers in the last three decades. *Studia UBB Geographia*, LIX, 1, 65-76.
- Mapire (2019). Spletni portal historičnih kart, <http://mapire.eu/en/>, Österreichisches Staatsarchiv in Arcanum Adatbázis Kft (dostopano 2. 12. 2019).
- Marinelli, O. (1910). I ghiacciai delle Alpi Venete. *Memorie geografiche*, 4 (11).
- Oerlemans, J. (2005). Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records. *Science*, 308 (5722), 675-677.
- Timár, G., Molnár, G., Székely, B., Biszak, S., Varga, J., Jankó, A. (2006). Digitized maps of the Habsburg Empire – The map sheets of the second military survey and their georeferenced version. Arcanum, Budimpešta, 59 p.
- Timár, G. in Székely, B. (2010). Digitizing and georeferencing of the historical cadastral maps (1856-60) of Hungary. *Proceedings of the 5th International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage*. 22–24 Februar 2010, 559-564.
- Triglav Čekada, M. (2018a). Ledeniki na kartah vojaške izmere avstro-ogrske monarhije. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2017: zbornik del*, Ljubljana, 25. januar 2018, Ljubljana, 153-165.
- Triglav Čekada, M. (2018b). Konec male ledene dobe v očeh Triglavskih prvopristopnikov in geodezije. *Geodetski vestnik*, 62 (4), 690-701.

Določitev sprememb geometrije kanalizacijske deformabilne cevi iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja

Tilen Urbančič*, Uroš Sojer **, Božo Koler*

Povzetek

Pri gradnji kanalizacijske infrastrukture se predvsem pri večjih premerih cevi vse pogosteje uporabljajo deformabilne cevi, katerih prednost je v načinu prenosa obremenitve nasipa na cev. Po zasutju se oblika cevi spremeni. V članku predstavljamo rezultate obdelav oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja notranjosti cevi. Spremembo geometrije oblike cevi v prečni smeri smo iz oblaka točk določili z izravnavo parametrov elipse po metodi najmanjših kvadratov. Analizirali smo obliko nevgrajene in vgrajene cevi. Vgrajena cev je bila v prvem primeru zasuta s predpisanim materialom, v drugem pa v celoti betonirana in zasuta. Tehnologija terestričnega laserskega skeniranja se izkaže kot primerna za tovrstne naloge. Na osnovi analiz smo definirali funkcijske zveze, s katerimi lahko napovemo vrednost sprememb geometrije deformabilnih cevi za obravnavana načina vgradnje.

Ključne besede: deformabilna cev, sprememba geometrije, izravnavo elipse, terestrično lasersko skeniranje

Key words: flexible pipe, deformation, ellipse adjustment, terrestrial laser scanning

Uvod

Večja urbana območja za zbiranje in odvajanje odpadnih voda uporabljajo obsežne podzemne sisteme kanalizacijskih cevi (Romanova et al., 2013). Vgrajene kanalizacijske cevi morajo kljubovati najrazličnejšim obremenitvam. Izkušnje in slabosti starih sistemov so skupaj z razvojem tehnologije omogočili, da se za izdelavo kanalizacijskih cevi trenutno uporabljajo novi materiali, npr. GPR (angl. Glass fiber Reinforced Plastics – GRP), iz katerih so narejene tudi deformabilne cevi.

Ustrezno kakovost sistema kanalizacijskih cevi zagotavljamo s primernim nadzorom in vzdrževanjem. Najpogosteje uporabljena metoda za nadzor stanja cevi je z video nadzorno kamero oz. CCTV (ang. closed-circuit television camera). Začetki uporabe CCTV kamer segajo v leto 1960 in so še danes najpogosteje uporabljena tehnologija za tovrstne naloge. Vse analize potekajo iz video podatkov, zajetih s kamero na daljinsko vodenem vozilu (Romanova et al., 2013). Na kakovost analize imata poleg vidnosti velik vpliv tudi izkušnost operaterja in kakovost kamere (Romanova et al., 2013; Dirksen et al., 2013). Iz podatkov CCTV kamere ne moremo dobiti nobenih geometrijskih podatkov, kar je največja slabost. Za podrobne analize stanja cevi potrebujemo podatke za izračun hidravlične zmogljivosti, strukturne trdnosti in stabilnosti ter podatke o dimenzijah ali deformacijah cevi (Stanić et al., 2017; Wirahadikusumah et al., 1998). Manjkajoče podatke lahko pridobimo z uporabo radarja (Olhoeft, 2000), sonarja (Kirkham et al., 2000), laserskim profilmetrom (Duran et al., 2003) ali z združitvijo CCTV kamere in laserskega profilmetra (Duran et al., 2007).

Za nadzor geometrije cevi in zaznavanje morebitnih sprememb so se okoli leta 2000 začele uporabljati metode, ki za merjenje uporabljajo lasersko svetlobo (Stanić et al., 2017). Najbolj pogosta je uporaba laserskih profilmetrov (Stanić et al., 2013; Liu & Krys, 2012;

* UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

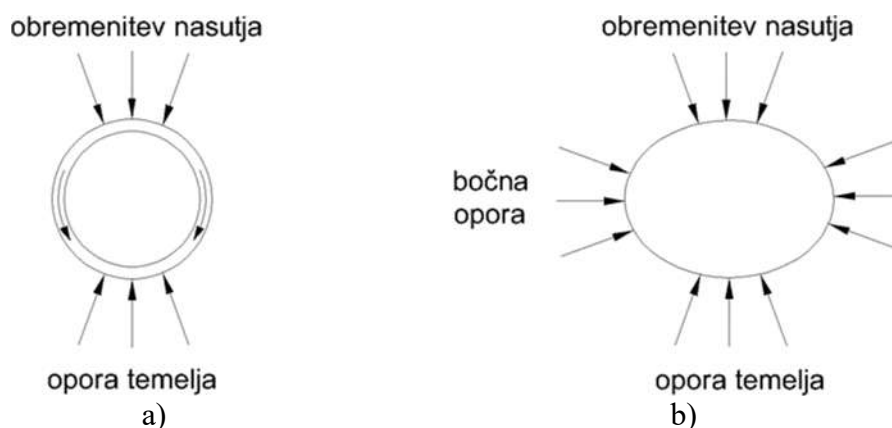
** Prenova-Gradbenik, Stanežiče 39, 1210 Ljubljana-Šentvid

Duran et al., 2003). Uporaba običajnih terestričnih laserskih skenerjev je zaradi majhnega premera cevi težavna. Stenmark (2018) je iz oblaka točk terestričnega laserskega skenerjanja za potrebe vgradnje nove cevi v obstoječo cev določil minimalni premer cevi. Merjene vrednosti omogočajo zaznavo morebitne ovalnosti cevi ali drugih pomembnih sprememb geometrije cevi. Najbolj kakovostni senzori omogočajo zaznavanje strukturnih poškodb, npr. razpok ali izgubo debeline stene zaradi različnih poškodb oz. korozije. Največja slabost uporabe laserskih instrumentov, ki jih uporabniki včasih spregledajo, je napaka v odboju laserskega žarka. Posledično se lahko tovrstna napaka odrazi kot sistematična napaka pri določevanju notranje geometrije cevi (Clemens et al., 2015).

V članku predstavljamo prvi primer uporabe terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 za določevanje morebitnih sprememb geometrije deformabilnih cevi. Testne meritve smo izvedli na nevgrajeni cevi, cevi, ki je zasuta s predpisanim materialom in na cevi, ki je v celoti betonirana ter zasuta. Pri zasutih ceveh smo iz podatkov o višini nasutja nad cevjo in velikosti spremembe oblike cevi določili funkcijsko zvezo, ki omogoča napoved sprememb geometrije vgrajenih deformabilnih cevi glede na višino nasutja.

Deformabilna cev

Glede na prenos sil pri zasutju cevi delimo na toge in deformabilne. Glavna lastnost togih cevi je, da obremenitev nasipa na cev prenesejo preko sten cevi na temelj. Take cevi imajo običajno debelejšo steno, saj mora biti stena cevi dovolj močna, da prenese težo nasutja (Slika 1 a). Drugače je pri deformabilnih ceveh, ki prenese del obremenitve nasipa tudi na utrjeno zemlino ob bok cevi. Ob večji obremenitvi na cev, se zmanjša vertikalni premer, istočano pa se poveča horizontalni premer cevi. Velikost spremembe premera v horizontalni smeri je odvisna od karakteristik in zbitosti zemljine ob straneh cevi (slika 1). Glede na vrsto materiala cevi se velikost upogiba giblje med 2 % in 7,5 % (Howard, 1996).



Slika 1: Delovanje sil: a) toga cev in b) deformabilna cev (Howard, 1996).

Načrtovalci cevodovodov naj bi upoštevali pričakovano vrednost spremembe geometrije cevi v vertikalni smeri ob zasutju, in vrednost te spremembe za obdobje 50 let po vgradnji (Bellinghausen et al., 2000). Za spremljanje geometrije cevi so predpisani različni standardi in predpisi. Statičen izračun dolgotrajne spremembe geometrije po nemškem ATV-DVWK-A 127E predpisuje, da le ta ne sme preseči 6 % premera cevi (z 90 % stopnjo zaupanja). Standarda DIN EN 16109 in DIN 4033 priporočata, da kontrolo geometrije vgrajenih cevi naredimo takoj po zasutju. Kontrolna izmera cevi naj bi vključevala določitev spremembe v vertikalni smeri po celotni dolžini zgrajenega cevododa. V standardu DIN 4033 je jasno zapisan pomen te kontrole: »Sprememba premera v vertikalni smeri je merilo kvalitete izdelave, podpore zemljine ob boku cevi in nasutja zemljine nad cevjo«. Tudi ta standard

določa največjo dovoljeno kratkoročno in dolgoročno spremembo geometrije, ki znašata 4 % oz. 6 % (Bosseler & Stein, 1997).

V raziskavi smo iz oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja analizirali spremembo geometrije deformabilne cevi HOBAS GRP DN1200 pred vgradnjo in takoj po zasutju. Cev je narejena iz armiranega poliestra oz. GRP.

Opis delovišča in uporabljenega instrumentarija

Terensko izmero smo opravili na dveh gradbiščih kanalizacijskega kolektorja C0 Medvode – Sneberje. Načini vgradnje cevi so predvsem zaradi okoljevarstvenih vzrokov določeni različno za različne odseke. V analizo sprememb geometrije vgrajene cevi smo izbrali odsek, kjer je cev le zasuta s predpisanim materialom (v nadaljevanju cev 1) ter odsek, kjer je cev betonirana in kasneje zasuta s predpisanim materialom (v nadaljevanju cev 2). Za izvedbo izmere je bilo torej nujno, da je omogočen dostop v cev. V obeh primerih smo izvedli terestrično lasersko skeniranje cevi v dolžini 70 oz. 85 m. Posamezna cev meri v dolžino 6 m in ima premer 1,2 m. Za potrebe analiz vpliva višine nasutja na spremembo geometrije cevi smo skenirali tudi območje terena nad cevjo.

Uporabili smo terestrični laserski skener Leica BLK360 (slika 2). Glavni razlogi za izbiro tega skenerja so velikost instrumenta, doseg, zadovoljiva specificirana natančnost koordinat skeniranih točk in postopek obdelave tako pridobljenih podatkov. Obravnavane cevi imajo z notranje strani gladek in rahlo svetleč zaključni sloj. Glede na predhodnje izkušnje in znane lastnosti laserske svetlobe, smo za določena območja (v odvisnosti od vpadnega kota laserskega žarka) pričakovali bolj razpršene točke okoli skenirane površine. Pri skeniranju cevi 1 smo zato določili stojišče na vsake 3 m. Prostorska ločljivost skeniranih točk je bila nastavljena na 5 mm/10 m. Z obdelavo podatkov smo prišli do zaključka, da najslabše odboje laserskega žarka dobimo na razdaljah med 0,6 m in 1,5 m od skenerja. Cev 2 smo zato skenirali s stojišč na 6 m razdalji in s prostorsko ločljivostjo skeniranih točk 10 mm/10 m.

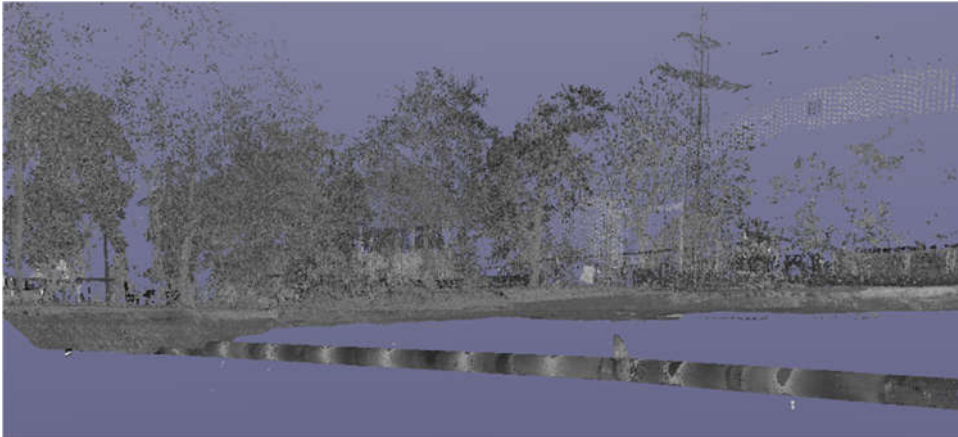


Slika 2: Terestrični laserski skener Leica BLK360 med izmero.

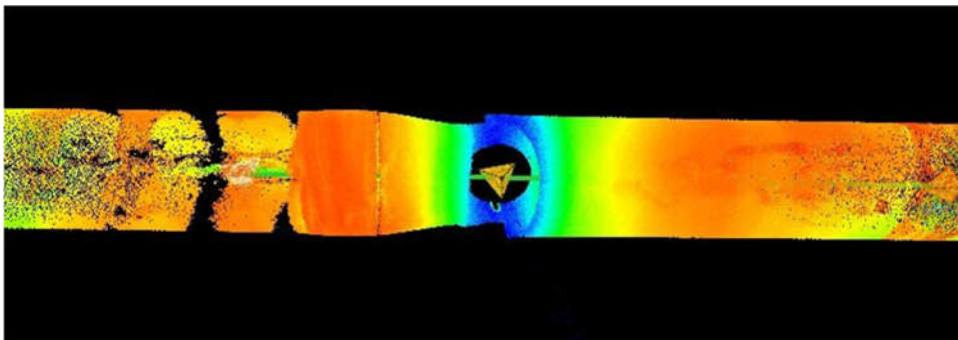
Obdelava podatkov

Osnovne korake obdelave skeniranih oblakov točk (brisanje neželenih točk in registracija oblakov točk) smo naredili v programu Leica Cyclone REGISTER 360. Oblak točk pred obdelavo za cev 2 vidimo na sliki 3. Za nadaljne izračune smo potrebovali oblak točk, ki

vsebuje le točke cevi in točke na temenom cevi. Z algoritmom RANSAC (Fischler & Bolles, 1981), ki omogoča samodejno prepoznavo točk izbrane geometrijske oblike, zaradi različno sploščene cevi, nismo bili uspešni. Odločili smo se za ročno brisanje točk, ki ne predstavljajo pravega odboja od površine cevi. Primer oblaka točk, kjer v bližini stojišča vidimo množico neželenih točk kot zožano cev, prikazujemo na sliki 4. Brisanje točk smo izvedli v oblaku točk posameznega stojišča. Poleg neželenih točk v bližini stojišča smo zaradi velikega vpadnega kota izbrisali tudi vse točke, ki so bile od stojišča oddaljene za več kot 10 m.

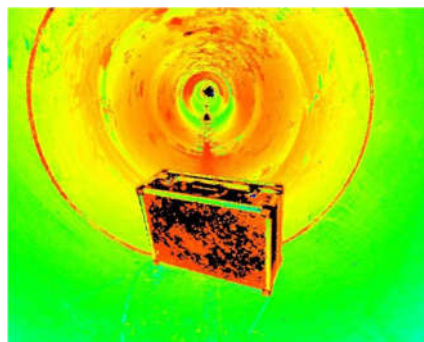


Slika 3: Registriran oblak točk za cev 1.



Slika 4: Napake v odboju laserskega žarka od notranje cevi.

Zaradi geometrije skeniranega objekta smo si za kakovostnejšo izvedbo samodejne registracije oblakov točk v cevi postavili kovčke za orodje (slika 5). Te površine so predstavljale dodatne vezne ploskve. Registracija je vključevala stojišča znotraj cevi ter tudi zunaj (teren nad cevjo).



Slika 5: Uporaba kovčkov za izboljšanje kakovosti registracije oblakov točk.

Na kakovost registracije imajo vpliv skupne površine med dvema oblakoma točk, torej njihova oblika ter odstotek prekrivanja. Kakovost registracije ocenimo kot povprečno absolutno napako (MAE). Rezultate za obe cevi navajamo v preglednici 1.

Preglednica 1: Ocene natančnosti registracij

Cev	Št. stojišč	Št. točk	Prekrivanje* [%]	MAE** [mm]	MAE*** [mm]
Cev 1	40	$31,5 \cdot 10^6$	74	4,1	4,9
Cev 2	23	$4,4 \cdot 10^6$	62	3,6	4,8

* Srednja vrednost med vsemi zaporednimi stojišči

** Samo za notranjost cevi

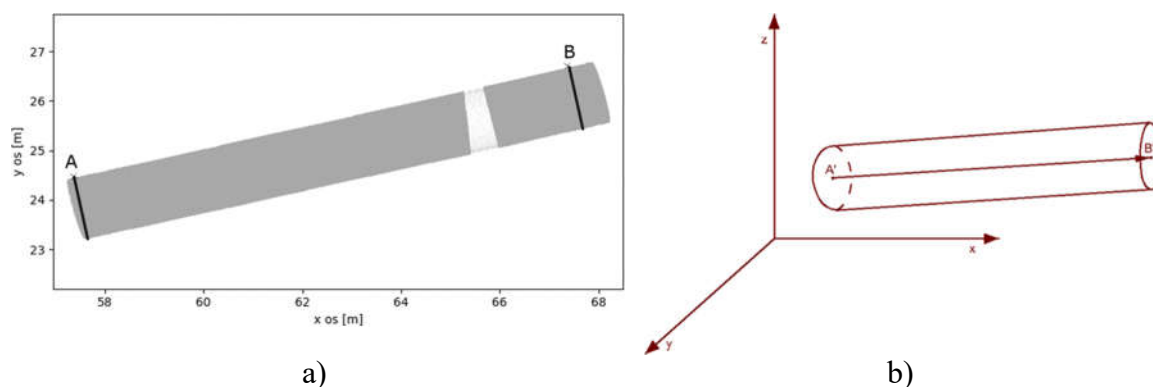
*** Vsa stojišča skupaj

Rezultat obdelave je registriran oblak točk, ki vsebuje le točke z dobrim odbojem od notranjosti cevi in točke terena nad temenom cevi.

Določitev premerov cevi – parametrov elipse

Obdelavo oblakov točk smo naredili v lastnem programu, napisanem v programskem jeziku Python, ki vključuje naslednje korake:

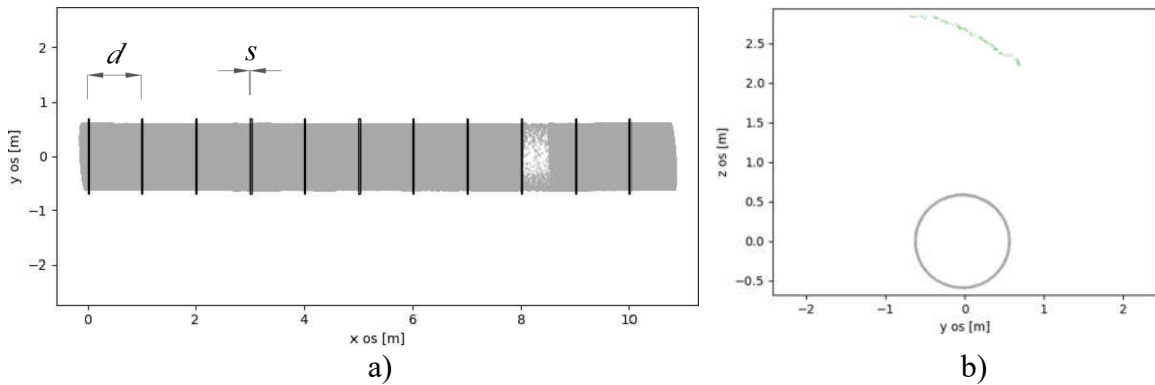
- a) *Določitev usmerjenosti cevi:* Cev želimo transformirati tako, da bo os cevi orierirana v smeri koordinate x , da jo bomo potem lažje razrezali za prečne profile. To naredimo tako, da v izdelanem grafičnem vmesniku v tlorisnem pogledu izberemo točki A in B. Iz teh dveh točk v ravnini xy izračunamo približno usmerjenost cevi in s pomočjo pravokotnega vektorja iz oblaka točk izrežemo množici točk, ki so znotraj obravnavanega odseka (slika 6a). Za izrezan prečni profil točk cevi izravnamo parametre elipse, kjer določimo tudi 3D koordinate središča cevi – točki A' in B'. Iz teh dveh točk izračunamo dejansko usmerjenost cevi (slika 6b).



Slika 6: Določitev usmerjenosti cevi: a) Določitev približne usmerjenosti cevi preko izbora točk v grafičnem vmesniku. b) Dejanska usmerjenost cevi.

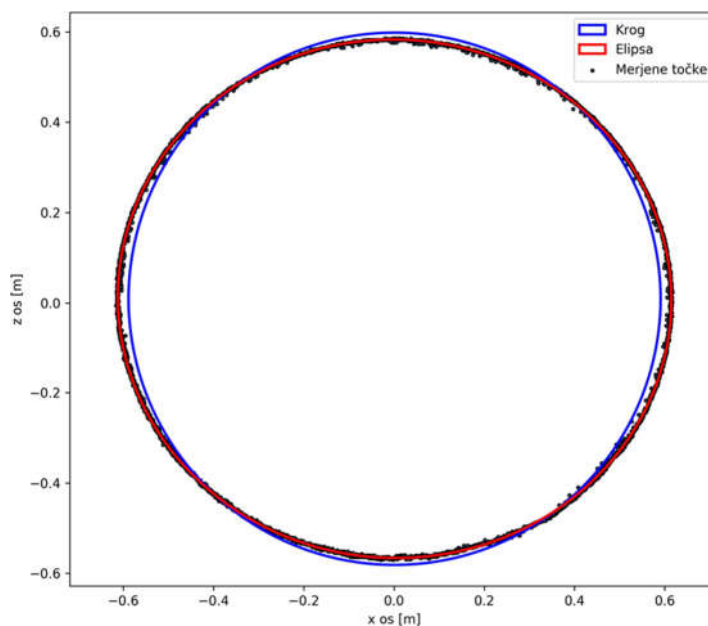
- b) *Transformacija oblaka točk:* Postopek izračuna smo poenostavili tako, da smo koordinatno izhodišče postavili v točko A' ter os x orientirali tako, da sovpada z osjo cevi. Pri rotiranju oblakov točk smo upoštevali le rotaciji okoli koordinantih osi y in z , torej rotacijski matriki \mathbf{R}_β in \mathbf{R}_γ . Rotacija okoli osi x bi povzročila rotacijo oblaka točk okoli vzdolžne osi cevi. Rezultati izravnave premera v horizontalni in vertikalni smeri torej ne bi bili določeni za dejanski položaj cevi.

c) *Izrezovanje točk prečnega prereza cevi:* V transformiranemu oblaku točk izrežemo podmnožice točk, ki pripadajo prečnim prerezom cevi na izbranih odsekih vzdolž cevi (slika 7a). Za izbrano razdaljo d med prečnimi prerezi program izreže točke za zeleno širino s . Širino smiselno nastavimo glede na gostoto točk. Poleg točk cevi izrežemo tudi točke terena (slika 7b). Iz točk, ki pripadajo cevi, izravnamo parametre elipse, točke terena uporabimo za izračun višine terena nad temenom cevi.



Slika 7: Izrezovanje točk prečnih prerezov: a) Izrezovanje točk s korakom 1 m in širino 1 cm. b) Izrezane točke cevi (siva) in terena (zeleni)

d) *Izravnavna parametrov elipse:* Oblika cevi se pri obremenitvi spremeni iz kroga v elipso. Glede na predpripravljene podatke smo izvedli izravnavo elipse v ravnini (slika 8). Uporabili smo algoritem po Halir & Flusser (1999).



Slika 8: Z rdečo je prikazana izravnavana elipsa skozi merjene točke (črne pike), modri krog predstavlja obliko cevi s premerom po podatkih proizvajalca.

Elipsa velja za poseben primer splošne stožnice, ki jo lahko zapišemo kot drugo stopnjo polinoma:

$$F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (1)$$

Upoštevamo splošno omejitev, ki zagotavlja elipso:

$$b^2 - 4ac = 0 \quad (2)$$

kjer so a, b, c, d, e in f koeficienti elipse in (x, y) koordinate točk na elipsi.

Izravnavo izvedemo z minimiziranjem odstopanj razdalje točk od stožnice. Primer izravnane elipse skozi skenirane točke in teoretične oblike prečnega prereza cevi prikazujemo na sliki 8.

Testiranje korelacij

V analizi rezultatov nastopajo spremembi premerov v vertikalni in horizontalni smeri ter višina nasutja. Morebitno podobnost porazdelitve z normalno porazdelitvijo bomo za vse tri spremenljivke ugotavljali z izračunom koeficientov asimetrije in sploščenosti.

Za spremenljivki, ki se porazdeljujeta normalno in predpostavljamo linearno povezanost, smo za določitev povezanosti uporabili Pearsonov koeficient korelacije r :

$$r = \frac{\sum x_1 x_2}{N - 1} \quad (3)$$

kjer je x_1 vrednosti prve množice spremenljivk, x_2 vrednosti druge množice spremenljivk in N število vseh statističnih enot.

V primeru ugotavljanja korelacije med spremenljivkama, kjer se ena porazdeljuje normalno, druga pa ne, smo uporabili Spearmanov koeficient korelacije ρ , ki je posebna oblika Pearsonovega koeficienta korelacije. Podatke pred izračunom koeficientov preuredimo v range. V tem primeru za izračun povezanosti uporabimo razliko med rangi različnih vrednosti:

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum \delta_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (4)$$

kjer δ_i razlika med rangoma za i – to enoto in N število vseh enot (parov rangov).

Vrednost koeficienta korelacije se nahaja med -1 in 1 . Kadar je izračunan koeficient blizu -1 ali 1 govorimo o močni negativni oz. pozitivni povezanosti. Med premenljivkama ni povezanosti, kadar je koeficient korelacije blizu 0 .

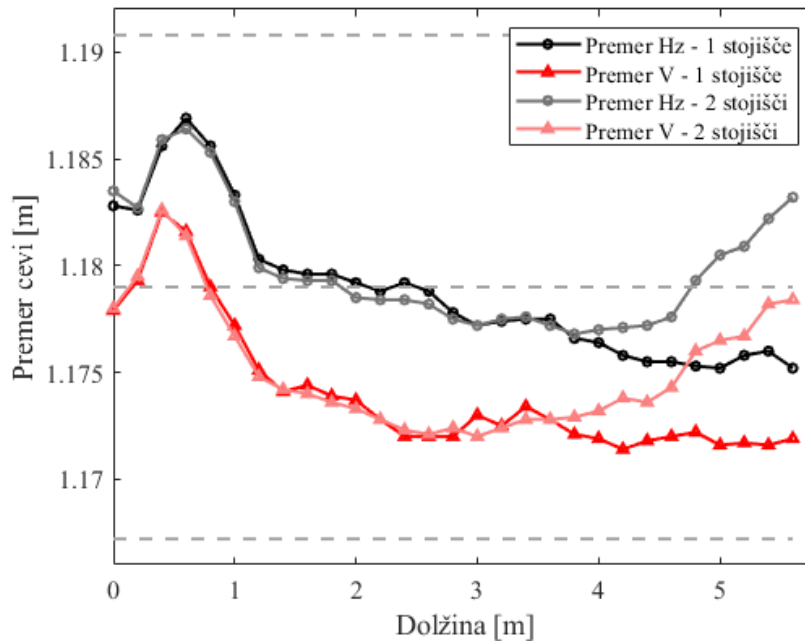
Rezultati

Analiza ne vgrajene cevi

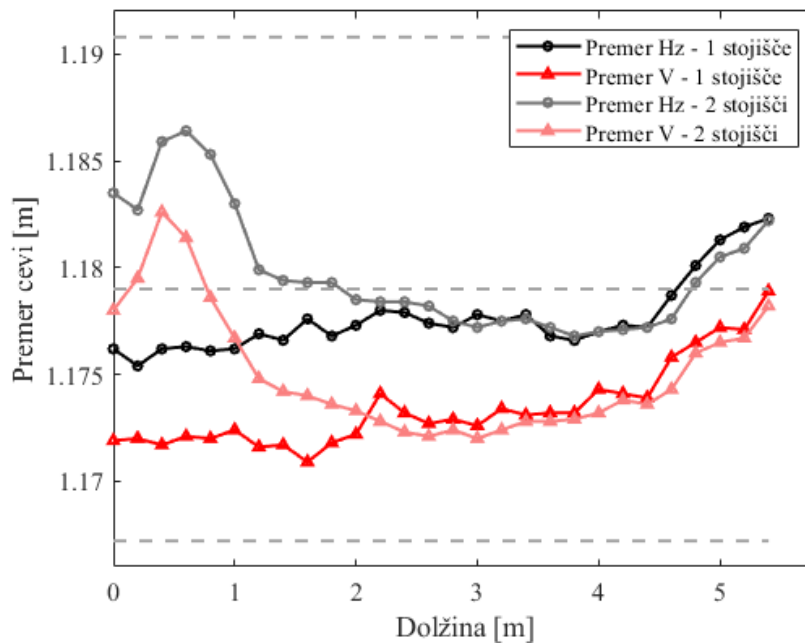
Analizo geometrije ne vgrajene cevi smo naredili zato, da bi ugotovili kakovost odboja laserskega žarka od notranje površine cevi. Cev je ležala na terenu brez dodatne obremenitve. Skenirali smo jo z obeh strani cevi in oblaka točk registrirali. Parametre elipse smo izravnali skozi točke na vsakih 20 cm za širino 2 cm iz točk vsakega stojišča posebej ter iz združenega oblaka točk (sliki 9 in 10).

Na slikah 9 in 10 smo s črtkano črto izrisali projektiran premer cevi, ki znaša 1,179 m (srednja črta) ter črti, kjer odstopanje od projektiranega premera cevi znaša $\pm 1\%$. V vseh

primerih je tako v horizontalnem kot v vertikalnem smislu odstopanje premera manjše od 1 %. Lastna teža in ostali vplivi (osončenost, temperatura,...) cevi povročijo spremembo geometrije tako, da je vertikalni premer manjši od horizontalnega in sicer za do 7 mm. Največje vrednosti so v srednjem delu cevi, kar je pričakovano. Vidimo, da se premeri v obeh smereh za izračune iz posameznega stojišča z oddaljevanjem od skenerja zmanjšujejo. V tem primeru lahko govorimo o sistematičnem vplivu zaradi odboja laserskega žarka. Z registracijo dveh oblakov točk se napaka v odboju deloma odstrani, saj je gostota točk v bližini skenerja večja, kar vpliva na rezultate izravnave elipse oz. na določitev premerov cevi.



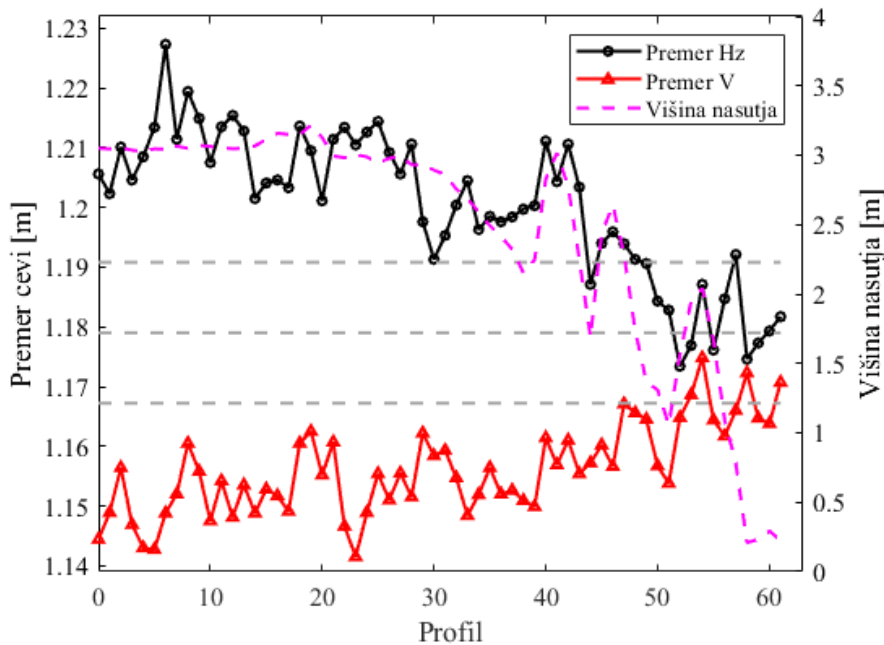
Slika 9: Izravnani premeri ne vgrajene cevi v Hz in V smeri iz oblaka točk skeniranja s stojišča na začetku cevi in iz registriranega oblaka točk dveh stojišč.



Slika 10: Izravnani premeri ne vgrajene cevi v Hz in V smeri iz oblaka točk skeniranja s stojišča na koncu cevi in iz registriranega oblaka točk dveh stojišč.

Rezultati spremembe geometrije zasute cevi

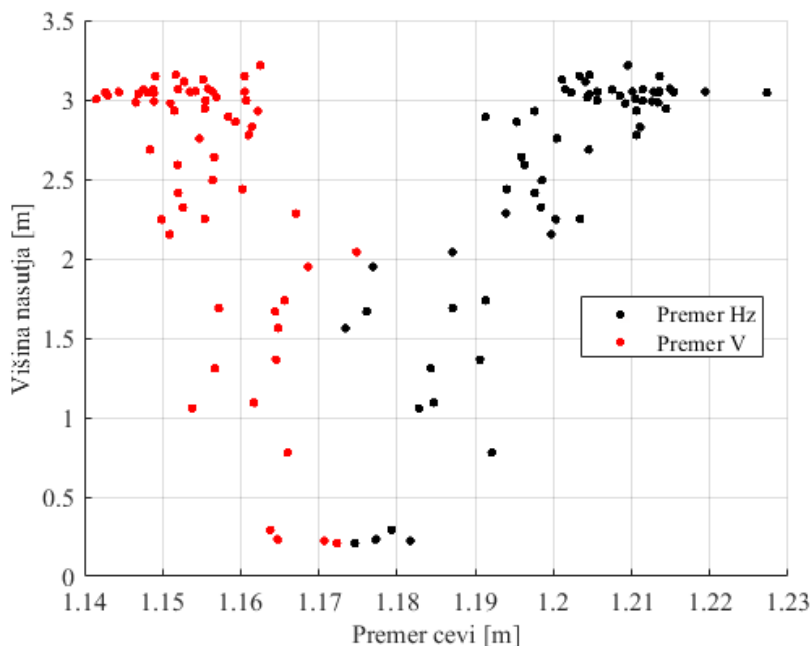
Kadar obravnavamo spremembe geometrije cevi, ki je zasuta s predpisanim materialom – cev 1, ima poleg kakovosti vgradnje zasutega materiala največji vpliv višina nasutja nad temenom cevi. Po pregledu prvih rezultatov izravnave elips za vsak meter 74 m odseka cevi, smo dodatno pregledali oblak točk in izbrisali točke, ki ne predstavljajo pravih odbojev od površja cevi. Pomagali smo si tudi z izrisi, kot ga vidimo na sliki 8. Iz vseh rezultatov smo za nadaljno analizo lahko uporabili 62 profilov oz. prečnih prerezov cevi. Rezultate izračunov premerov prikazujemo na sliki 11. Za interpretacijo rezultatov moramo poznati višine nasutja nad cevjo (slika 11). Višina nasutja je med 0,2 m in 3,2 m. Največje odstopanje horizontalnih premerov je na profilu 6 in sicer za 48 mm oz. 4,1 %. Največje odstopanje vertikalnega premera je na profilu 23, ki znaša 38 mm oz. 3,2 %.



Slika 11: Rezultati za cev 1 - horizontalni in vertikalni premeri cevi ter višina nasutja.

Iz slike 11 vidimo, da se premera približujeta projektirani vrednosti z manjšanjem višine nasutja nad cevjo. Poleg tega pa smo pričakovali, da bodo na mestih največjih horizontalnih premerov, najmanjši vertikalni premeri. Verjetno lahko razlog za ne povsem konsistentne rezultate iščemo v kakovosti odboja laserskega žarka.

Z izračunom koeficientov asimetrije in sploščenosti smo za spremenljivki premerov v vertikalni in horizontalni smeri ugotovili, da se približujeta normalni porazdelitvi. Za spremenljivko višina nasutja smo na enak način ugotovili, da se ne porazdeljuje normalno. Spremenljivko višina nasutja smo zaradi ugotovitve normalne porazdelitve spremenljivk obeh premerov kombinirali z uporabo Spearmanovega koeficienta korelacije. Za spremenljivki horizontalni premer in višina nasutja lahko trdimo, da sta močno in pomembno pozitivno povezani ($\rho = 0,78$). Za spremenljivki vertikalni premer in višina nasutja smo ugotovili, da sta statistično pomembno in zmerno negativno povezani ($\rho = -0,54$) (slika 12). Za določitev povezanosti spremenljivk premerov v horizontalni in vertikalni smeri smo uporabili Pearsonov koeficient korelacije. Sledi, da sta obravnavani spremenljivki pomembno in zmerno negativno povezani ($r = -0,62$). O linearni povezanosti obeh premerov lahko sklepamo tudi iz slike 11.



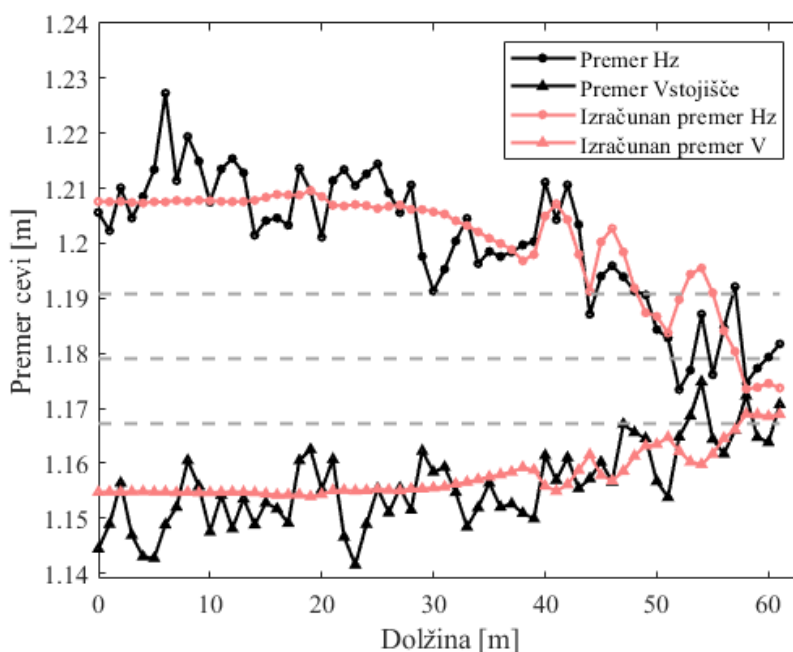
Slika 12: Razsevna grafa premerov cevi v odvisnosti od višine nasutja – cev 1.

Z upoštevanjem višine nasutja (h) lahko zapišemo funkcijsko zvezo, ki omogoča napovedovanje spremembe premera tega tipa cevi v horizontalni (H_p) in vertikalni (V_p) smeri. Pričakovana premera za zasuto cev izračunamo z enačbama:

$$H_p = 1,171 + 0,012 * h \quad (5)$$

$$V_p = 1,170 - 0,005 * h \quad (6)$$

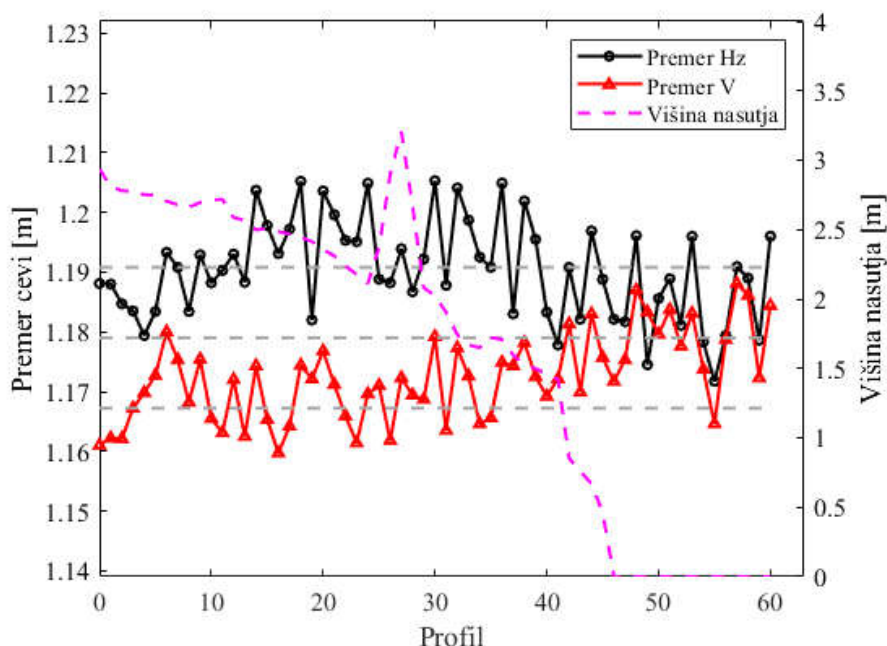
Dejanske premere cevi smo primerjali z izračunanimi iz enačb (5) in (6) (slika 13).



Slika 13: Primerjava izračunanih premerov iz enačb (5) in (6) (rdeča) in izračunanih iz oblaka točk TLS – cev 1.

Rezultati spremembe geometrije betonirane cevi

Drugi način vgradnje deformabilnih cevi, ki ga obravnavamo, je betonirana in zasuta cev – cev 2. V tem primeru obravnavamo del sistema kanalizacijskih cevi v dolžini 64 m. Po pregledu rezultatov izravnaj elips za vsak meter, smo morali zaradi preslabih podatkov izločiti 3 profile. Pričakovano so zaradi betoniranja cevi razlike med premeroma manjše (slika 14). Horizontalni premer od projektiranega premera na več profilih odstopa največ za 27 mm oz. 2,3 %. Vertikalni premer najbolj odstopa na profilu 16 za 19 mm oz. 2,2 %. Več kot polovica vseh premerov se od projektirane razlikuje za manj kot 1 %.

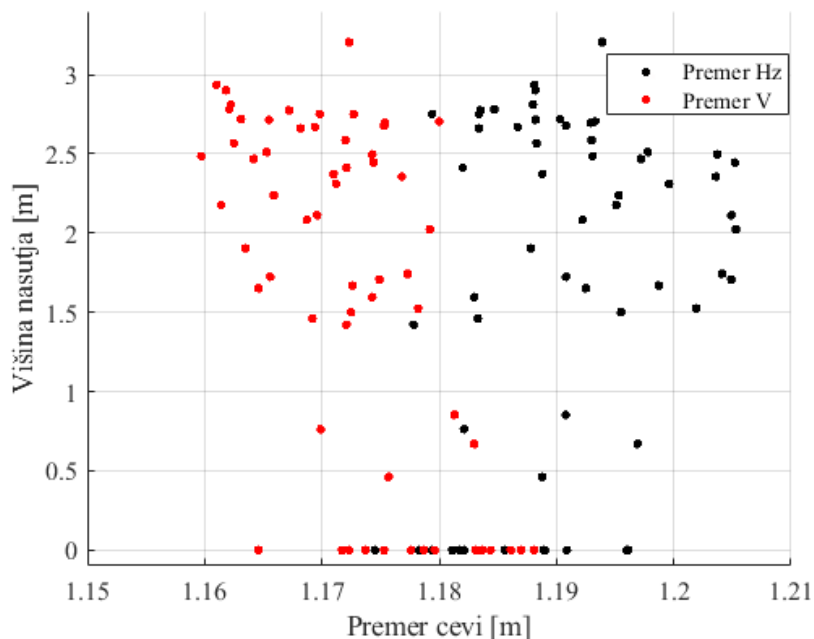


Slika 14: Rezultati za cev 1 - horizontalni in vertikalni premeri cevi.

Na sliki 14 vidimo, da je od profila 46 dalje višina nasutja enaka 0. Cev je bila v času skeniranja le betonirana, ne pa tudi zasuta. Višina nasutja se sicer giblje med 0,4 m (profil 45) in 3,2 m (profil 27). Odstopanja premerov so večja za območje, kjer je poleg betoniranja bila cev že zasuta, vendar ne tako očitno, kot v primeru rezultatov za cev 1, ki je samo zasuta (slika 11).

Postopki statističnih analiz glede porazdelitve in povezanosti posameznih spremenljivk so enaki kot pri obravnavi rezultatov za cev 1. Iz rezultatov o asimetriji in sploščenosti smo prišli do zaključka, da se horizontalni in vertikalni premer porazdelujeta normalno, spremenljivka višina nasutja pa ne. S Spearmanovim koeficientom korelacije smo ugotovili, da je povezava med spremenljivkama premer horizontalno in višina nasutja statistično nepomembna ($\rho = 0,16$). Drugače je pri korelaciji med spremenljivkama premer vertikalno in višina nasutja, kjer ugotovimo, da sta spremenljivki pomembno in zmerno negativno povezani ($\rho = -0,59$). S pomočjo izrisanih razsevnih grafov na sliki 15 lahko vidimo nekoreliranost oz. koreliranost posameznih spremenljivk. Iz dobljenih rezultatov za obravnavan tip cevi lahko trdimo, da se v primeru betoniranja premer horizontalno ne spreminja glede na višino nasutja predpisanega materiala nad temenom cevi.

Spremenljivki premer horizontalno in premer vertikalno se porazdelujeta normalno, zato smo lahko s Pearsonovim koeficientom korelacije preverili povezanost med obema spremenljivkama, ki nista statistično pomembno povezani ($r = -0,13$).



Slika 15: Razsevna grafa premerov cevi v odvisnosti od višine nasutja – cev 2.

Za napovedovanje spremembe geometrije cevi v odvisnosti od višine nasutja lahko v primeru betonirane cevi enačbo zapišemo le za premer vertikalno.

$$V_p = 1,170 - 0,005 * h \quad (5)$$

Zaključek

Na primeru dveh odsekov kanalizacijskih cevi v sklopu gradnje kanalizacijskega kolektorja C0 Medvode – Sneberje, smo preverili uporabo terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 za potrebe ugotavljanja sprememb geometrije vgrajenih cevi. Vgrajene cevi so deformabilne, saj so narejene iz armiranega poliestra oz. GRP. Ugotovili in potrdili smo nekatere prednosti in slabosti uporabljenega skenerja za tovrstne naloge. Glavne prednosti uporabe tega skenerja so v velikosti instrumenta, hitrosti izmere in možnosti registracije oblakov točk v cevi in na terenu nad cevmi. Med slabostmi velja omeniti, da je instrument uporaben le v ceveh z večjimi premeri (obvezna prisotnost operaterja) in da je za kakovostno registracijo oblakov točk, zaradi nerazgibane geometrije notranjosti cevi, potrebno zagotoviti dodatne vezne ploskve. Velika slabost je tudi to, da za določeno območje skeniranja pridobimo točke, ki imajo zaradi slabe obdojne površine (gladka, rahlo sijaj) in uporabljene valovne dolžine laserske svetlobe napačno izmerjeno dolžino. Te točke je potrebno odstraniti, saj imajo lahko velik vpliv na končne rezultate.

Dobljeni rezultati kljub omenjenim težavam omogočajo sprejetje nekaterih zaključkov. Iz rezultatov skeniranja prosto ležeče ne vgrajene cevi smo dokazali, da je izbira stojišča skeniranja pomembna in vpliva na izračunan premer cevi. Dokazali smo tudi, da je sprememba tako premera horizontalno kot vertikalno manjša pri cevi, ki je betonirana. Smiselno si sledijo tudi odstopanja izračunanih premerov glede na višino nasutja, predvsem za cev 1. Za spremenljivke premera horizontalno in vertikalno ter višine nasutja smo v primeru koreliranosti lahko določili približen model za napovedovanje spremembe premera vgrajene cevi.

Literatura in viri

- Bellinghausen, G. et al. (2000). ATV-DVWK-A 127E, 66 p.
- Bosseler, B., Stein, D. (1997). Requirements for recording and analysing deflection measurements in buried flexible pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 12, 98: 27–38.
- Clemens, F., Stanić, N., Van der Schoot, W., Langeveld, J., Lepot, M. (2015). Uncertainties associated with laser profiling of concrete sewer pipes for the quantification of the interior geometry. *Structure and Infrastructure Engineering* 11, 9: 1218–1239.
- Dirksen, J., Clemens, F.H.L.R., Korving, H., Cherqui F., Le Gauffre, P., Ertl, T., Plihal, H., Müller, K., Snaterse, C.T.M. (2013). The consistency of visual sewer inspection data. *Structure and Infrastructure Engineering* 9, 3: 214–228.
- Duran, O., Althoefer, K., Seneviratne, L. (2003). Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 8, 3: 401–409.
- Duran, O., Althoefer, K., Seneviratne, L. D. (2007). Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 4, 1: 118–126.
- Fischler, A. M., Bolles, C. R. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography. *Communication of the ACM*, 24, 6: 381–395.
- Halir, R., Flusser, J. (1999). Numerically stable direct least squares fitting of ellipses: 8 p.
- Howard, A.K. (1996). Pipe Bedding and Backfill. *Geotechnical Training Manual No.7*, Second edition. 77 p.
- Kirkham, R., Kearney, P.D., Rogers, K.J. (2000). PIRAT - A System for Quantitative Sewer Assessment 1 Introduction 2 PIRAT Instrument System. *The International Journal of Robotics Research* 19, 11: 1033–1053.
- Liu, Z., Krys, D. (2012). The use of laser range finder on a robotic platform for pipe inspection. *Mechanical Systems and Signal Processing* 31: 246–257
- Olhoeft, G. (2000). Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 43, 2–4: 175–187.
- Romanova, A., Horoshenkov, K.V., Tait, S.J., Ertl, T. (2013). Sewer inspection and comparison of acoustic and CCTV methods. *Proceedings of the ICE - Water Management* 166, 2: 70–80.
- Stanić, N., Lepot, M., Catieau, M., Langeveld, J., Clemens, F.H.L.R. (2017). A technology for sewer pipe inspection (part 1): Design, calibration, corrections and potential application of a laser profiler. *Automation in Construction* 75: 91–107.
- Stanić, N., Van der Schoot, W., Kuijter, B., Langeveld, J., Clemens, F. (2013). Potential of laser scanning for assessing structural condition and physical roughness of concrete sewer pipes. 7th International Conference on Sewer Processes & Networks, SPN7, August 28-30, Sheffield, UK.
- Stenmark, J. (2018). Pipeline Survey Meets Challenges and Deadline.
- Wirahadikusumah, R., Abraham, D.M., Iseley, T., Prasanth, R.K. (1998). Assessment technologies for sewer system rehab. *Automation in Construction*, 7, 4: 259–270.

Drugi del: zgodovinski pregled delovanja Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ob 25-letnici včlanitve Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko SZGG v Mednarodno zvezo za geodezijo in geofiziko (IUGG)

Prof. dr. Jože Rakovec*

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko je bilo ustanovljeno februarja 1993. Dne 26. februarja je bil namreč na SAZU ustanovni zbor SZGG, na katerem se je zbralo 46 ustanoviteljev. Zboru je prisostvoval tudi predsednik Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (IUGG – International Union of Geodesy and Geophysics) Avstrijec akad. prof. dr. Helmut Moritz. Torej je od ustanovnega zbora minilo 27 let.



Potem je trajalo še dve leti, da je bilo SZGG sprejeto v IUGG. Z glasovanjem per-rolam je bil 3. marca 1994 soglasno potrjen sprejem v članstvo, formalno pa je Svet IUGG na generalni skupščini v Boulderju 2. julija 1995 soglasno izglasoval sprejem SZGG v polnopravno članstvo. Torej bo čez pol leta – letos julija 2020 – od takrat minilo 25 let.

Ustanovitev IUGG pred 100 leti

Mednarodno povezovanje na področju znanosti o Zemlji je že precej staro. Npr. za preučevanje magnetizma sta koordinirala mednarodna merjenja in opazovanja že Alexander von Humboldt že v prvi dekadi 19. stoletja in Karl Friedrich Gauss nekaj desetletij za njim. Mednarodno združenje za geodezijo je nastalo 1886. Predvsem zaradi potreb v pomorskem prometu se je mednarodno povezala meteorologija. Najprej pripravljena konferenca leta 1872, potem pa Mednarodni meteorološki kongres v Leipzigu leta 1872 sta zadolžila Stalni meteorološki odbor, da pripravi pravila in statute mednarodne meteorološke organizacije (IMO) za lažjo izmenjavo vremenskih informacij prek državnih meja. Naloga je bila opravljena v Utrechtu leta 1878, IMO pa je nastala na mednarodnem meteorološkem kongresu, ki je naslednje leto potekal v Rimu¹. Seizmologija se je 1899 povezala v Stalno seizmološko komisijo, ki se je štiri leta kasneje preoblikovala v Mednarodno seizmološko združenje. Oceanografe je leta 1900 v Pomorsko združenje povezal monaški princ Albert I. Očitno so potrebo po mednarodni povezanosti bolj ali manj potrebovale vse vede, ki preučujejo naš planet – Zemljo. Tako so torej že pred prvo svetovno vojno obstajale mednarodne organizacije za geodezijo, seizmologijo, meteorologijo (vključujoč tudi geomagnetizem in geoelektriko) in oceanografijo (po EOS 2009, vol 51, dosegljivo na <http://www.iugg.org/>).

Po koncu prve svetovne vojne so se 1918 zbrali v Londonu in Parizu znanstveniki iz več držav in ustanovili Mednarodni raziskovalni svet (International Research Council, Bruselj, 1919). V njegovem okviru je 28. julija 1919 nastala tudi Mednarodna zveza za geodezijo in geofiziko (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG) kot mednarodna nevladna in neprofitna organizacija – v začetku samo devetimi državami članicami in s

* Ustanovni član Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

¹ IMO je delovala je do leta 1950, ko se formalno preoblikovala v agencijo Združenih narodov – Svetovno meteorološko organizacijo (WMO)

šestimi sekcijami za geodezijo, seizmologijo, meteorologijo, zemeljski magnetizem in elektriko, fizično oceanografijo in vulkanologijo. Tri leta kasneje se je pridružila tudi sekcija za hidrologijo, medtem ko je sekcija za kriosfero zelo mlada – v okviru IUGG od leta 2007.

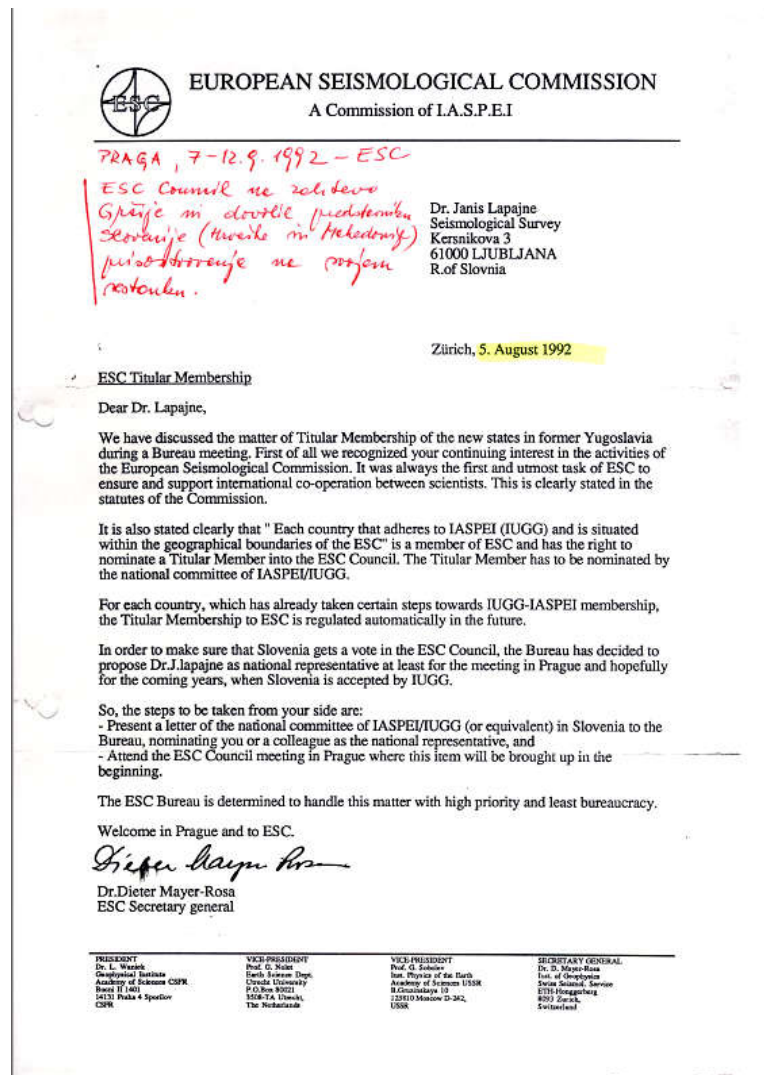
Slovensko druženje za geodezijo in geofiziko SZGG

Kaj je bil vzrok za ustanovitev SZGG in kaj povod? Bilo jih je več:

- Slovenija je postala samostojna država in vključevala se je v mednarodne organizacije, konvencije, združenja. Eno od takih je tudi IUGG – Mednarodno združenje za geodezijo in geofiziko².
- Nekatere sedanje sekcije so že prej imele svoja društva ali združenja, nekatere pa ne: in namesto, da bi ustanovljale svoja društva, so raje vzpodbudile bolj ambiciozen podvig – nacionalno telo po vzoru IUGG.
- Bil pa je tudi povod ...

Izgleda, da je bil povod za ustanovitev Slovenske zveze za geodezijo in geofiziko dogodek na sestanku Evropske seizmološke komisije (ESC) v Pragi od 7. do 12. septembra 1992. Mesec prej – 2. avgusta – je pomočnika direktorja Seizmološkega zavoda R Slovenije dr. Janeza Lapajneteta generalni sekretar ESC povabil na sestanek in ga imenoval za nacionalnega predstavnika Slovenije – ad hoc, vsaj za prihajajoči sestanek v Pragi. Na tem sestanku pa Grčija ni dovolila, da bi Slovenija, Hrvaška in Makedonija sodelovale pri delu Sveta ESC in podala veto (skoraj zagotovo ne zaradi Slovenije ali Hrvaške).

(Arhiv SZGG, fascikel 1992-1993)



² Jugoslavija je bila članica od 1924 do 1991 – iz International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, 2. del, str. 1557, ured. William H.K. Lee, Hiroo Kanamori, Paul Jennings, Carl Kisslinger

To je spodbudilo dr. Lapajneto, da je začel iskati alternativne načine za vključitev v mednarodne povezave. Pregledal je pravila Mednarodnega združenja za geodezijo (IAG) in Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (IUGG) ter ugotovil, da je najprimerneje, da se slovenski geodezija in geofizika včlanita v IUGG.

Najprej je po telefonu idejo preveril pri več kolegih in presodil, koga naj povabi k iniciativi za Nacionalni komite. Potem pa je – seizmolog – na prvi sestanek Nacionalnega komiteja Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko s svojim pismom 25. septembra 1992 povabil hidrologa, štiri geodete, dva geofizika (v ožjem smislu besede), meteorologa, dva oceanografa ter vulkanologinjo/geologinjo.

Vsi od enajstih vabljenih se prvega sestanka 1. oktobra 1992 niso mogli udeležiti, so se pa kasnejših. Na sestanku iniciativne skupine 1. 10. so poleg razprave kako in kdaj ustanoviti SZGG, sprejeli še tri vsebinske sklepe:

- v komiteju naj bo izražen znanstveno-raziskovalni vidik,
- k sodelovanju naj se povabijo tudi meteorologi iz Univerze v Ljubljani,
- na ustanovnem zboru naj bodo prikazane posamezne dejavnosti.

(Arhiv SZGG, fascikel 1992-1993)

NACIONALNI KOMITE MEDNARODNE ZVEZE ZA GEODEZIJU IN GEOFIZIKO v ustanavljanju		
UDELEŽENCI SESTANKA INICIATIVNE SKUPINE, 1.10.1992		
IME IN PRIIMEK	INSTITUCIJA, NASLOV, TEL, FAX	PODPIS
Branke Mihelič	Zveza geodetov Slovenije, Lj., Saranovičeva 12	<i>Branke Mihelič</i>
POLONA KRALI	Geodetski zavod Ljubljana, IUGG Dimičeva 14, Ljubljana	<i>Polona Krali</i>
A. BREZIGAR	IZL, IUGG, Dimičeva 14	<i>A. Brezigar</i>
DUSAN KOGOJ	FAGG - geodezija Jamova 2 Lj.	<i>Dusan Kogoj</i>
VLADO KALACIČ	IBU, Moravske biobčane postaja Pitan	<i>Vlado Kalacič</i>
MITJA BRILLY	SLOV. KOMITE ZA HIĐROLOŠKE RAZISKAVE	<i>Mitja Brilly</i>
Raouik Lovrič	Vocitavskih, Univerza	<i>Raouik Lovrič</i>
Janez Lapajna	Seizmološki zavod RS	<i>Janez Lapajna</i>

O ustanavljanju je iniciativna skupina obvestila IUGG in dobila od glavnega tajnika Georgesa Balmina (gravimetrist) čestitke za entuziazem ter njegovo obvestilo, da je o iniciativi obvestil tedanjega predsednika IUGG Akad. Prof. Dr. Helmuta Moritza, geodeta iz Gradca. To je prišlo še kako prav, saj je predsednik z veseljem prišel v Ljubljano na ustanovno skupščino – če bi bil npr. z drugega konca sveta, bi ga težje privabili.

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko je bilo potem ustanovljena 26. februarja 1993, ko se je na SAZU na ustanovnem zboru SZGG zbralo 46 ustanoviteljev. Zboru je prisostvoval tudi predsednik IUGG akad. prof. dr. Moritz.

Ustanovni zbor je februarja 1993 imenoval trinajst ustanoviteljev združenja, da ga bodo registrirali na sodišču (potem jih je bilo na koncu deset). Izvolil je izvršni odbor, nadzorni odbor in častno razsodišče. Sklenil je tudi, da izvršni odbor (razen blagajnika) predstavlja Slovenski nacionalni komite IUGG.

Po ustanovnem zboru je bilo potrebno postoriti še to in ono. Izvršni odbor je izvolil prvega predsednika SZGG – to je postal seizmolog dr. Janez Lapajne, tedaj namestnik direktorja Seizmološkega zavoda R Slovenije.³

29. junija 1993 je bilo združenje vpisano v slovenski register društev, septembra je dobilo bančni račun in 28. septembra je obvestilo Ministrstvo za znanost in tehnologijo, da se namerava vključiti v IUGG ter napovedalo, da upa, da bo MZT lahko plačevalo članarino v IUGG (ob majhnosti SZGG minimalno možno – 1000 US \$). SZGG odda septembra 1993 prošnjo za sprejem v IUGG in 9. marca 1994 mu predsednik IUGG sporoči in čestita, da je Slovenija korespondenčno soglasno izvoljena za članico IUGG. Glede na pravila je bilo treba glasovati še na skupščini IUGG in 2. julija 1995 je bilo SZGG uradno sprejeto v članstvo IUGG – na Generalni skupščini v Boulderju, ZDA – že pod novim predsednikom IUGG Petrom J. Wylliem (petrolog).

Torej ponovimo: od ustanovnega zbora SZGG je minilo 27 let, od sprejetja v IUGG pa bo julija 2020 minilo 25 let. Povejmo še, da je konec leta 1995 SZGG organiziralo svoj prvi letni strokovni posvet: 5. decembra 1995. Tudi letni posveti torej praznujejo svoj jubilej - letošnji je že 25. po vrsti – sočasno s 25-letnico sprejema SZGG v IUGG in ob 100-letnici IUGG.

Po včlanitvi v IUGG

Ob ustanovitvi je imela SZGG sedem sekcij – tako kot tedaj tudi IUGG.

Do sedaj ga je vodilo sedem predsednikov:

Dosedanji
predsedniki
Slovenskega
združenja za
geodezijo in
geofiziko



Janez Lapajne
1993 – 1997
fizik, seizmolog



Florjan Vodopivec
1998 – 2001
geodet, montanist



Mitja Brilly
2002 – 2006
hidrolog

³ Seizmološka služba je bila do leta 1980 formalno del Astronomsko geofizikalnega observatorija AGO pri Fakulteti za matematiko in fiziko FMF, ki se je ukvarjal z astronomijo, astrofiziko, gravitacijo in seizmologijo.



Polona Kralj
2006 – 2010
geologinja,
vulkanologinja



Jože Rakovec
2010 – 2014
meteorolog



Rudi Čop
2014 – 2018
elektrotehnik



Polona Vreča
2018 –
geologinja

Kot že rečeno: že pred 25 leti je SZGG organiziralo tudi svoje prvo strokovno posvetovanje in izdalo svoj prvi letni zbornik. Ta je bil v celoti posvečen razvoju nekaterih geodetskih in geofizikalnih ved na Slovenskem – ne pa še vulkanologije in kemije notranjosti Zemlje, geomagnetizma in aeronomije (pa tudi ne kriologije – ta je tudi v IUGG nastala šele 2007). Tudi drugi zbornik je imel podobno vsebino.

Predgovor	1
F. Vodopivec, Razvoj šolstva in raziskovalne dejavnosti na področju geodezije.....	5
B. Demšar, Geodetske evidence v Sloveniji - zemljiški kataster	15
V. Ribarič, Kratka zgodovina seizmologije na Slovenskem	31
D. Ravnik, Rezultati raziskav uporabne geofizike v Sloveniji	49
J. Rakovec, Razvoj meteorologije na Slovenskem	69
M. Kolbezen, Hidrološka služba v Republiki Sloveniji	91
M. Brilly, Razvoj hidrološke znanosti v Sloveniji	103
V. Malačič, Začetki oceanografije na Slovenskem	109

(Prvi Zbornik predavanj na Strokovnem srečanju SZGG decembra 1995)

Predgovor	1
B. Demšar, Zemljiški kataster v Sloveniji - stanje in perspektive	5
M. Brilly in A. Mužič, Perspektive razvoja hidrologije v Sloveniji	19
M. Mikoš, Vodna erozija v slovenskem prostoru	27
M. Car, B. Tomšič, A. Gosar, D. Rajver in R. Stopar, Zgodovina, stanje in perspektive uporabne geofizike v Sloveniji.....	43

(Drugi Zbornik predavanj na Strokovnem srečanju SZGG decembra 1996)

Na četrtem letnem srečanju so bila prvič predstavljena tudi letna poročila sekcij in tedaj se je predstavila še vulkanologija in kemija notranjosti Zemlje, na petem prvič aeronomija

in geomagnetizem, raziskave na področju kriosfere pa so bile prvič predstavljene še kasneje – v zborniku leta 2011. Naslednje leto, ko je bilo na letnem srečanju prvič podano poročilo na nove ustanovljene sekcije za kriologijo, je bila s spremembo statuta SZGG 29. januarja 2013 vanj vključeno še manjkajoča – osma sekcija za kriologijo. Od tedaj ima SZGG enake sekcije kot IUGG. Toda sekcija za aeronomijo in geomagnetizem dolgo ni zares živela: npr. zapisnik letne skupščine januarja 2006 ugotavlja, da se s tema področjema nihče ne ukvarja in ta sekcija je bila »ponovno ustanovljena« januarja 2009.

Člani SZGG so imeli tudi nekatere pomembne zadolžitve v svojih mednarodnih društvih ali združenjih, npr. Peter Suhadolc je bil v letih 2003-2015 glavni tajnik IASPEI (IASPEI Secretary-General) pred tem pa glavni tajnik ESC, Ina Cecić pa je bila v letih 2016-2018 predsednica ESC (President).

Na redni letni skupščini 12. decembra 2002 je takratni predsednik prof. Mitja Brilly sporočil, da je Izvršni odbor SZGG sprejel tudi pravilnik o podeljevanju priznanj SZGG. Do sedaj bilo podeljenih 17 priznanj SZGG, večinoma za uspešne doktorske disertacije. Največ, 11 jih je predlagala sekcija za hidrologijo, 4 sekcija za geodezijo in 2 sekcija seizmologijo in fiziko notranjosti Zemlje. Druga področja pa svojih magisterijev in doktoratov do sedaj niso nominirala za priznanja SZGG.

Naziv častnega člana SZGG so do sedaj dobili: dr. Janez Lapajne, prof. Danilo Ravnik, prof. Helmut Moritz iz Tehniške univerze v Gradcu, prof. Janko Bleiweis, prof. Januzs Śledzinski iz Varšavske Tehnološke univerze, prof. Florjan Vodopivec, prof. Jože Rakovec in prof. Mitja Brilly.



prof. Danilo Ravnik
1923 – 2016
geofizik



prof. Helmut Moritz
* 1933
geodet



prof. Janko Bleiweis
1909 – 2005
hidravlik



prof. Januzs Śledzinski
* 1931
geodet

Pregled delovanja sekcije Geodezija Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko v obdobju 1993-2019

Bojan Stopar¹, Božo Koler¹, Oskar Sterle¹, Miran Kuhar¹, Polona Pavlovčič Prešeren¹, Sandi Berk², Klemen Medved², Dalibor Radovan³

Povzetek

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko je bilo ustanovljeno dve leti po nastanku samostojne države Republike Slovenije. Geodezija je ena izmed ustanovnih sekcij in je del SZGG od samega začetka. O večini nalog s področja geodezije smo poročali na rednih letnih skupščinah SZGG. Opravljene naloge so bile temeljne državotvorne naloge, ki jih je morala opraviti državna geodetska služba samostojne države. Najpomembnejša naloga je bila vzpostavitev novega državnega koordinatnega sistema in zagotavljanje podpore uporabnikom pri praktični uporabi. Aktivnosti so potekale v okviru domačih raziskovalnih projektov in raziskovalnih programov, ki jih je (so)financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, rednega programa dela ministrstva, pristojnega za prostor, oziroma Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS), in projektov, ki so bili izvedeni s pomočjo sofinanciranja iz dveh donacij Norveškega finančnega mehanizma in Finančnega mehanizma Evropskega gospodarskega prostora. Nekaj aktivnosti so financirala tudi druga ministrstva, GURS pa je poskrbel za ustrezno integracijo rezultatov v uradne evidence geodetske službe in zakonodajno ureditev področja. Poleg vzpostavitve novega državnega koordinatnega sistema so potekale tudi druge raziskovalne aktivnosti, kot npr. spremljanje geodinamičnega dogajanja na slovenskem ozemlju, uvajanje sodobnih tehnologij v geodetsko prakso, razvoj modelov zbirke prostorskih podatkov, prostorske informatike, nepremičninskih evidenc ter upravljanja zemljišč za podporo prostorskemu načrtovanju.

Ključne besede: državni koordinatni sistem, geodinamika, prostorske zbirke, GNSS

Key words: national coordinate system, geodynamics, spatial records, GNSS

Dejavnost geodetov v okviru SZGG in mednarodnih združenj

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko je bilo ustanovljeno 26. februarja 1993. Geodezija je ena izmed ustanovnih sekcij in je del SZGG od samega začetka. SZGG je ustanovilo 12 predstavnikov različnih strok. Ustanovitelji društva s področja geodezije so bili Andrej Bilc, Dušan Miškovič, Dušan Mravlje in prof. dr. Florijan Vodopivec. Ustanovnega zbora SZGG se je udeležilo 54 predstavnikov različnih strok, od tega 14 geodetov. Prvi predsednik SZGG je bil dr. Janez K. Lapajne in podpredsednik prof. dr. Florijan Vodopivec. Član Izvršnega odbora je bil Miroslav Črnivec, dr. Dušan Kogoj je bil član Nadzornega odbora, Franc Černe je bil predstavnik geodezije v Častnem sodišču. Prof. dr. Florijan Vodopivec je bil predsednik združenja od 1997 do 2000 in od 2005 častni član SZGG.

Prvi predstavnik geodetske sekcije v SZGG je bil Andrej Bilc, od leta 1997 do 2001 je bil predstavnik sekcije doc. dr. Miran Kuhar, od 2001 do 2005 doc. dr. Aleš Breznikar in od 2005 do 2010 dr. Dalibor Radovan. Od leta 2010 je predstavnik geodezije prof. dr. Bojan Stopar. Od leta 1997 do 1999 je bil tajnik SZGG mag. Dušan Miškovič, ki ga je leta 2000

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

² Geodetska uprava Republike Slovenije, Zemljemerska ulica 12, 1000 Ljubljana

³ Geodetski institut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

nasledil doc. dr. Miran Kuhar, ki je do danes ostal zadolžen za številne naloge povezane z delovanjem SZGG, ki jih zelo uspešno opravlja.

Za odmevnejša doktorska dela so priznanja SZGG dobili dr. Polona Pavlovčič Prešeren, za leto 2003, dr. Oskar Sterle za leto 2015, dr. Klemen Kregar za leto 2016 in dr. Tilen Urbančič za leto 2017.

Prvo strokovno posvetovanje, v okviru letne skupščine SZGG je bilo organizirano leta 1995. Razen leta 1998 smo na vsakem posvetovanju predstavili vsaj en prispevek. Skupno je bilo na temo geodezije objavljenih 63 prispevkov. Večino prispevkov so prispevali avtorji in soavtorji, zaposleni na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani, Geodetskem inštitutu Slovenije, Geodetski upravi Republike Slovenije in Znanstveno raziskovalnem centru SAZU. Velik delež prispevkov je bil povezan s strokovnim, razvojnim in raziskovalnim delom, ki je bilo opravljeno v okviru številnih nalog povezanih z vzpostavitvijo novega državnega koordinatnega sistema in raziskav na področju geodinamike na območju Slovenije. Omenjene naloge so na kratko predstavljene v nadaljevanju.

Geodeti aktivno sodelujemo v številnih mednarodnih združenjih. Tako smo preko SZGG vključeni v delovanje Mednarodne zveze za geodezijo (IAG, angl. International Association of Geodesy), ki je del Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (IUGG, angl. International Union of geodesy and Geophysics), ki je bila ustanovljena 1919 v Bruslju. IUGG oziroma IAG je leta 1987 v Vancouvru ustanovila novo podkomisijo EUREF (angl. European Reference Frame), v kateri aktivno sodelujemo. Redno se udeležujemo simpozijev, ki jih organizira EUREF, na katerih predstavljamo poročila o delu v okviru državnega koordinatnega sistema. Organizacija simpozija EUREF v letu 2020 je bila zaupana Geodetski upravi Republike Slovenije. Simpozij bo potekal od 27. do 29. maja. 2020 v Ljubljani.

Geodeti smo vključeni tudi v razvojno-raziskovalne aktivnosti na področju novih tehnologij za pridobivanje in združevanje prostorskih podatkov, geoinformatike, opazovanja Zemlje, kartografije in vizualizacije prostora in drugih. Ta področja so zastopana v drugih strokovnih in znanstvenih stanovskih združenjih, kot so Mednarodna zveza geodetov (FIG, fr. Federation Internationale des Geometres), Mednarodno združenje za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje (ISPRS, angl. International Society of Photogrammetry and Remote Sensing), ter Mednarodnem kartografskem združenju (ICA, angl., International Cartographic Association) in druge.

Vzpostavitev novega državnega prostorskega koordinatnega sistema

Vzpostavitev novega državnega koordinatnega sistema je potekala v okviru strategije, ki jo je leta 2004 sprejela Vlada Republike Slovenije. Opravljeno delo je izjemno obsežno in je potekalo skoraj tri desetletja. Danes imamo v Sloveniji vzpostavljen sodoben državni koordinatni sistem, ki izpolnjuje potrebe geodezije in vseh drugih strok, ki delujejo v prostoru, pa tudi zahteve mednarodne in čezmejne skladnosti.

Novi državni koordinatni sistem Slovenije je realizacija evropskega prostorskega referenčnega sistema ESRS (angl. European Spatial Reference System) na ozemlju Slovenije. ESRS naj bi zagotavljal dolgoročno stabilno referenčno osnovo za potrebe vseh strok in dejavnosti, ki proizvajajo ali uporabljajo podatke, vezane na prostor. ESRS sestavljata horizontalni sistem ETRS89 (angl. European Terrestrial Reference System 1989) in vertikalni sistem EVRS (angl. European Vertical Reference System). Ob vzpostavitvi novega državnega koordinatnega sistema smo definirali tudi novo državno kartografsko projekcijo.

Vzpostavitev novega državnega horizontalnega koordinatnega sistema

S pojavom geografskih informacijskih sistemov in pričakovano široko praktično uporabo tehnologije GNSS so se konec osemdesetih let prejšnjega stoletja pojavile zahteve za vzpostavitev enotnega horizontalnega geodetskega referenčnega sistema na območju Evrope. Naloga je bila na zasedanju generalne skupščine IUGG oziroma IAG leta 1987 zaupana novo ustanovljeni podkomisiji EUREF pri IAG. Naloga komisije je bila zagotovitev možnosti za povezave novega in obstoječih (starih) državnih koordinatnih sistemov v enotno referenčno osnovo.

V maju 1989 so tako v okviru podkomisije EUREF na območju Evrope začele izvajati geodetske izmere GNSS. Leta 1994 so potekale izmere EUREF na območju Slovenije in Hrvaške ter Romunije. Prvi izmeri EUREF na območju Slovenije sta sledili še druga in tretja v letih 1995 in 1996. Vse so bile namenjene vzpostavitvi geodetske referenčne osnove in za prihodnje geodinamične raziskave našega ozemlja. Na osnovi izmer in pravil EUREF so bile določene koordinate geodetskih referenčnih točk v koordinatnem sistemu ETRS89. Izračun koordinat EUREF izmere na območju Slovenije v letu 1994 je bil objavljen leta 1995, rezultati druge in tretje izmere EUREF pa leta 1997. Koordinate točk, določene v posameznih izmerah so se razlikovale za več kot 3 cm in so bile za takratne in predvidene bodoče potrebe premalo kakovostne.

Ob koncu 90-ih let prejšnjega stoletja je postajalo jasno, da star državni koordinatni sistem ne more več izpolnjevati vse višjih zahtev glede kakovosti in da bo potrebno uvesti novi državni koordinatni sistem Slovenije. S podelitvijo koordinacijske vloge Geodetskemu inštitutu Slovenije in razvojne vloge Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo UL je GURS pristopila k postopni izdelavi seznama nalog, projektov in metodoloških smernic razvoja osnovnega geodetskega sistema. Prvi korak je predstavljala izdelava strategije razvoja državnega omrežja stalnih postaj GPS (kasneje GNSS), ki je postalo temeljna infrastruktura za razvoj ostalih komponent državnega geodetskega sistema. Vzporedno s tem smo od 2001 do 2004 v aplikativnem projektu ARRS, *Zasnova vzpostavitve novega državnega koordinatnega sistema Slovenije*, zasnovali podrobno tehnično in procesno metodologijo za vzpostavitev novega državnega koordinatnega sistema Slovenije (Stopar in sod., 2004). V okviru skupnega izračuna vseh izmer EUREF smo pridobili koordinate v koordinatnem sistemu ETRS89, ki so predstavljale uradno materializacijo novega državnega horizontalnega koordinatnega sistema Slovenije z oznako ETRS89/D96. Rezultat izmer in izračuna je bil verificiran s strani EUREF.

V drugi polovici 2016 je GURS izvedla GNSS-izmero EUREF Slovenija 2016. Osnovni cilji te izmere so bili izboljšanje skladnosti koordinat v mreži EUREF-točk in stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL, povezati mrežo EUREF-točk in omrežje SIGNAL s kombinirano geodetsko mrežo 0. reda, ter ugotoviti vplive trenutne tektonike na kakovost referenčnega koordinatnega sistema v Sloveniji. Rezultat je nova realizacija ETRS89 v Sloveniji z oznako ETRS89/D17. Tudi to realizacijo je verificiral EUREF TWG.

Zaradi različnih terestričnih referenčnih sistemov obeh realizacij državnega koordinatnega sistema, in dobrih dveh desetletij tektonskih vplivov so koordinatne razlike med realizacijama D96 in D17 za EUREF-točke v Sloveniji presegle 8 cm. Velike koordinatne razlike med realizacijama D96 in D17 danes pomenijo težavo. Če bi želeli uveljaviti D17 kot novi državni referenčni koordinatni sistem, bi morali izvesti novo transformacijo koordinat vseh zbirk prostorskih podatkov, kar pa je nesprejemljivo, zato je bila izbrana pragmatična rešitev. Za izboljšanje kakovosti in skladnosti koordinat GNSS-mrež je bila uporabljena optimalna podobnostna prostorska transformacija iz D17 v D96. Nove koordinate z oznako ETRS89/D96-17 oz. kar D96-17 v največji možni meri ohranjajo tako koordinate EUREF-točk kot tudi koordinate stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL.

Spremembe koordinat so kar se le da majhne in hkrati upoštevajo geometrijske odnose v obeh mrežah v času izvedbe GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016. Nove koordinate so bile v omrežju SIGNAL uvedene s 1. januarjem 2020.

Vzpostavitev omrežja stalno delujočih postaj GNSS

Za doseganje višje kakovosti koordinat na osnovi meritev GNSS so se v začetku 90-ih let prejšnjega stoletja začele vzpostavljati stalno delujoče postaje GNSS. Za določitev koordinat z GNSS s cm točnostjo na nekem območju je bilo potrebno zagotoviti veliko gostoto stalno delujočih postaj GNSS, saj je cm točnost, dosegljiva le na oddaljenostih 10-20 km od referenčne postaje. V Sloveniji je bila prva referenčna postaja GNSS vzpostavljena na stavbi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL v začetku 90-ih let in je služila za raziskovalne namene. Prva stalno delujoča postaja GNSS v Sloveniji, ki je bila del uradne prostorske podatkovne infrastrukture v Sloveniji, je bila vzpostavljena v Ljubljani leta 2000, ki je predstavljala tudi začetek vzpostavitve državnega omrežja postaj GNSS, imenovanega SIGNAL (Slovenija-Geodezija-NAVigacija-Lokacija), ki je v lasti Geodetske uprave RS. Omrežje SIGNAL je bilo dokončano in je operativno delujoče od začetka leta 2007. Danes ga sestavlja 16 postaj GNSS na ozemlju Slovenije in 14 postaj v sosednjih državah; poleg stalno delujočih postaj GNSS sem sodita tudi Služba za GNSS, ki jo sestavljata podatkovni in analitični center in deluje v okviru GURS, nadzorne funkcije pa izvaja Geodetski inštitut Slovenije. Omrežje SIGNAL omogoča danes najpreprostejši način za določitev koordinat visoke točnosti s tehnologijo GNSS v državnem koordinatnem sistemu.

Vzpostavitev novega državnega vertikalnega koordinatnega sistema

Za vzpostavitev novega državnega vertikalnega koordinatnega sistema, ki ga predstavljajo osnovna gravimetrična mreža Slovenije, višinski datum, sodoben višinski sistem in model geoida oziroma višinska referenčna ploskev, so bile v preteklih 25 letih izvedene številne obsežne raziskovalno-razvojne naloge. Sodoben državni vertikalni koordinatni sistem je del Evropskega višinskega referenčnega sistema (EVRS), ki je realiziran z EVRF2019 (Evropski višinski referenčni sestav 2019), je bil vzpostavljen v projektu *Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav* oziroma podprojekta *Geodetski referenčni sestav*. Projekt je bil sofinanciran z donacijo Finančnega mehanizma Evropskega gospodarskega prostora za leta 2009–2014 (FM EGP), izvajala ga je GURS v sodelovanju z Ministrstvom za kmetijstvo in okolje ter s projektnima partnerjema Norveško geodetsko upravo (nor. Statens Kartverk) in Geodetsko upravo Islandije (isl. Landmaelingar Islands). Kakor horizontalni, tudi državni vertikalni koordinatni sistem izpolnjuje potrebe geodezije in vseh drugih strok, ki delujejo v prostoru.

Državna in regionalna gravimetrična izmera na območju Slovenije

V Sloveniji je bilo med letoma 1995 in 1996 v sodelovanju z Mednarodno komisijo za gravimetrijo pri IAG, IGC (angl. International Gravimetric Commission), SZGG in GURS vzpostavljenih šest absolutnih gravimetričnih točk. Absolutne vrednosti težnega pospeška so bile določene z absolutnimi gravimetričnimi meritvami, opravljenimi med letoma 1995 in 2000. Ponovna izmera na t. i. absolutnih gravimetričnih točkah je bila opravljena leta 2014, v okviru podprojekta Geodetski referenčni sestav, ki je bil financiran z donacijo

Finančnega mehanizma Evropskega gospodarskega prostora (FM EGP). Absolutne gravimetrične točke tvorijo gravimetrično mrežo 0. reda in predstavljajo osnovo za določitev državne gravimetrične mreže in nadaljnja gravimetrične meritve v Sloveniji. Na osnovi raziskovalne naloge Študija stanja del na gravimetrični mreži v Republiki Sloveniji in predlog nadaljnjih del ([Radovan in sod., 2005](#)) je bila državna gravimetrična mreža v Sloveniji dopolnjena še z 29 točkami 1. reda, na katerih so bile vrednosti težnega pospeška določene z relativnimi gravimetri. Tekom vsakoletnih projektov Razvoj OGS 2007-2010 - Prehod na nov koordinatni sistem, ki je bil sofinanciran z Norveškim finančnim mehanizmom, je bila izvedena relativna gravimetrična izmera ([Radovan in sod., 2006](#)) in izračunane vrednosti težnega pospeška za gravimetrične točke 1. reda Slovenije ([Berk in sod., 2008](#)).

Za potrebe uvedbe novega višinskega sistema oz. sanacije nivelmanske mreže je bila na več kot 2000 reperjih nivelmanske mreže 1. reda opravljena gravimetrična izmera, ki se je izvajala od 2009 do 2016. Gravimetrični podatki omogočajo izračun geopotencialnih višin reperjev, kar predstavlja osnovo za vzpostavitev sodobnega višinskega sistema. Za potrebe izračuna novega geoida oz. višinske referenčne ploskve se je izvedla regionalna gravimetrična izmera Slovenije v obliki celične mreže z velikostjo celice $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, ki je potekala od leta 2015 do 2019 ([Stopar in sod., 2016a](#)). Vsi gravimetrični podatki v Sloveniji se nanašajo na parametre mednarodne standardne gravimetrične mreže (angl. International Gravity Standardisation Network 1971 – IGSN71).

Vzpostavitev novega višinskega sistema

Izračun stare nivelmanske mreže leta 2000 je bil izveden v sistemu normalnih-ortometričnih višin in v višinskem datumu Trst (1875). V izračunu določene višine reperjev so predstavljale realizacijo državnega višinskega sistema z oznako SVS2000.

Za uvedbo novega sodobnega fizikalnega višinskega sistema, ki bi zadovoljil potrebe uporabnikov, potrebujemo kakovostne podatke o izmeri nivelmanske (višinske) in gravimetrične mreže Slovenije. Zato je GURS od leta 2006 sistematično izvajala sanacijo nove nivelmanske mreže 1. reda, ki je bila zaključena leta 2015. Parametri novega državnega višinskega sistema so določeni z *Uredbo o določitvi parametrov višinskega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema* ([Uradni list RS, št. 80/2018](#)). Ime novega državnega višinskega sistema je Slovenski višinski sistem 2010 z oznako SVS2010 (datum Koper). Višinsko izhodišče je vezano na mareografsko postajo v Kopru (višinski datum Koper), ki se nanaša na opazovanja gladine morja na tej mareografski postaji v Kopru. Upoštevane so bile meritve za obdobje 18,6 let, pri čemer je za srednjo epoho izmere izbran datum 10. 10. 2010. Ta sovpada s srednjo epoho izvedenih nivelmanskih meritev mreže 1. reda ([Stopar in sod., 2016b](#)).

Razlika med novim višinskim datumom Koper in starim višinskim datumom Trst, merjena na vodomerni lati v Kopru, znaša 15,5 cm. Razlike višin med SVS2010 in SVS2000 na območju Slovenije zaradi različnih razlogov niso konstantne in znašajo od $-5,1 \text{ cm}$ do $-20,9 \text{ cm}$ (Koper–Trst na vzorcu 8239 reperjev). Srednja vrednost razlik višin vseh reperjev, določenih v obeh višinskih datumih znaša $-13,1 \text{ cm}$.

Nova mareografska postaja

Agencija RS za okolje (ARSO) je v okviru evropskega projekta FP5 ESEAS–RI (Framework Programme 5 European Sea Level Service – Research Infrastructure) in nacionalnega projekta posodobitve hidrološke mreže prenovila in nadgradila mareografsko postajo Koper. Po priporočilih medvladne oceanografske komisije IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), je posebej pomembna nedvoumna in kakovostna povezava opazovanj nivoja morja s terestričnimi koordinatnimi sistemi (vir). Da pridobimo »pravi« nivo morja kot funkcijo časa, moramo spremljati stabilnost mareografske postaje (GNSS, geometrični nivelman) (Stopar in sod., 2006, 2007a). Z geodetskega stališča je MP Koper pomembna za določitev višinskega datuma. Z določitvijo srednjega nivoja morja je povezan tudi globinski datum, ki je pomemben za izdelavo pomorskih kart in zagotavljanje varne plovbe na območju slovenskega morja (Koler in sod., 2018).

Določitev državnega modela geoida oziroma državne višinske referenčne ploskve

Z uporabo GNSS pridobimo elipsoidno višino nad geocentričnim referenčnim elipsoidom. Običajne nadmorske višine se nanašajo na referenčno–ničelno ekvipotencialno ploskev Zemlje (srednji nivo morja), torej na geoid oz. kvazi-geoid. Če želimo določiti višino točke v težnostnem polju Zemlje s satelitskimi metodami izmere, moramo v merjeni točki poznati razliko med (kvazi)geoidom in elipsoidom, ki jo imenujemo geoidna višina (ondulacija). Določanje (kvazi)geoida je zapleten postopek fizikalne geodezije. Izračunani (kvazi)geoid nato vpneemo–povežemo z državnim višinskim sistemom. S tem dobimo višinsko referenčno ploskev (angl. height reference surface), ki nam omogoča posredno določanje višin v državnem višinskem sistemu s pomočjo GNSS-tehnologije – t. i. GNSS-višinomerstvo.

Stari model geoida (višinska referenčna ploskev), ki se je uporabljala v višinskem sistemu SVS2000 (datum Trst), nosi oznako SLO_AMG2000/Trst, kar je okrajšava za SLOvenski Absolutni Model Geoida iz leta 2000, datum Trst (Vodopivec in sod., 1999a). Stari model geoida ni omogočal kakovostnega izvajanja GNSS višinomerstva. Tako je bila nova višinska referenčna ploskev za območje Slovenije (SLO_VRP2016/Koper) izračunana v okviru projekta *Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav*, ki se je zaključil leta 2016. V izračun modela so bili vključeni globalni geopotencialni model (EGM2008), terestrična gravimetrična opazovanja na območju Slovenije in sosednjih držav ter podatki o topografiji terena. Nanaša se na geocentrični elipsoid GRS80. Vklon modela kvazi-geoida v novi višinski sistem SVS2010 (datum Koper) je izveden na 66 GNSS/nivelman točkah. Model je podan v celični mreži 241×321 celic, ki so velikosti $30'' \times 45''$, kar v naravi predstavlja kvadrat s stranico dolžine približno 900 m (Stopar in sod., 2016c).

Vzpostavitev državne kombinirane geodetske mreže

Sčasoma so se pojavile zahteve uporabnikov za hkratno določitev položaja v trirazsežnem prostoru, brez ločevanja na horizontalno in vertikalno komponento. Državni koordinatni sistem naj bi namreč uporabnikom zagotavljal pogoje za določitev horizontalnih koordinat in višin z enako kakovostjo na celotnem državnem ozemlju. Ob koncu 90-ih let pr. stol. se je za izpolnitev te naloge pojavila zamisel o vzpostavitvi t. i. kombiniranih geodetskih mrež

oziroma omrežij. Točke kombinirane geodetske mreže naj bi bile vzpostavljene po zgledu sodobnih geodetskih observatorijev, v okviru katerih se z uporabo razpoložljivih tehnologij določajo koordinate v različnih koordinatnih sistemih.

Državna kombinirana geodetska mreža Slovenije je bila vzpostavljena z namenom zagotovitve povezave horizontalnega in vertikalnega državnega koordinatnega sistema v enoten prostorski koordinatni sistem. Drugi razlog pa so težave z dolgoročno stabilnostjo in uporabo lokacij oziroma objektov, na katerih se nahajajo postaje GNSS v omrežju SIGNAL. V okviru vzpostavitve kombinirane geodetske mreže Slovenije smo tako vzpostavili povezavo točk EUREF, postaj omrežja SIGNAL, gravimetrične in nivelmanske mreže na enotni geodetski osnovi ter po drugi strani vzpostavili omrežje stalno delujočih postaj GNSS, ki je nadrejeno omrežju SIGNAL. Državna kombinirana geodetska mreža je geodetska mreža najvišjega reda (imenujemo jo tudi državna geodetska mreža 0. reda) in predstavlja osnovo za kakovostno realizacijo državnega prostorskega koordinatnega sistema ([Stopar in sod., 2015](#)).

Kombinirano geodetsko mrežo Slovenije sestavlja šest geodetskih točk. Izbira lokacij, fizična postavitvev lokacij ter izbira in namestitvev merske opreme je bila opravljena v skladu s standardi ECGN (angl. European Combined Geodetic Network), priporočili za vključitev postaj GNSS v EPN (angl. EUREF Permanent GNSS Network). Fizična vzpostavitvev kombinirane geodetske mreže je bila izvedena v okviru projekta *Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav* oziroma podprojekta *Geodetski referenčni sestav*, ki je bil eden od štirih podprojektov ([Stopar in sod., 2016a](#)).

V letu 2019 pa je bil zaključen ciljni raziskovalni projekt ARRS *Povečanje zanesljivosti javnih omrežij GNSS SIGNAL in 0. red* tako s stališča uporabnikov, tehničnega delovanja obeh omrežij in nadzora procesov kakovostnega določanja položaja ([Triglav Čekada in sod., 2019](#)).

Določitev dnevni koordinat v omrežju SIGNAL in geodetski mreži 0. reda

Vzpostavitvev koordinatnega sistema predstavlja le prvi korak k sodobnemu in kakovostnemu koordinatnemu sistemu. Zagotovitev kakovosti državnega koordinatnega sistema na dolgi rok je možna preko obdelave opazovanj GNSS stalno delujočih postaj GNSS za vsak dan posebej in preko vzpostavljenih časovnih vrst koordinat točk, ki realizirajo koordinatni sistem. Koordinate točk se v času spreminjajo, z analizo časovnih vrst pa lahko vrednotimo kakovost realizacije državnega koordinatnega sistema.

Prva konkretnjša obdelava dnevni opazovanj GNSS vseh stalno delujočih postaj GNSS na območju Slovenije in njene okolice je bila opravljena za opazovanja GNSS za obdobje od leta 1999 do 2010 za stalno delujoče postaje GNSS in za časovno obdobje od 1994 do 2010 za geodinamične točke na območju Slovenije in Hrvaške ([Sterle, 2015](#)). Stalno delujoče postaje GNSS so postaje omrežju SIGNAL na območju Slovenije ter omrežij EPN in IGS v okolici Slovenije. Rezultati so ponovno pokazali, da je območje Slovenije geodinamično aktivno in da se geometrija območja Slovenije spreminja do nekaj mm v enem letu. Posledica tega dejstva je, da kakovost koordinatnega sistema, v katerem zanemarimo geodinamično dogajanje Slovenije, pade na raven nekaj centimetrov v roku 10-ih let in s tem ne zagotavlja več osnovnega namena – zagotovitve realizacije državnega koordinatnega sistema za vse potrebe z visoko kakovostjo.

V letu 2016 se je zato začela redna obdelava opazovanj GNSS na dnevni osnovi. Obdelava pa poteka v skoraj realnem času in to za obe omrežji stalno delujočih postaj, SIGNAL in kombinirano geodetsko mrežo Slovenije. Trenutno so obdelana opazovanj

GNSS v obeh omrežjih za tri leta, to je za obdobje od 2016 do 2019 (Sterle in Stopar, 2019). Potekajo pa tudi aktivnosti za obdelavo opazovanj od 2010 do 2016. Kakovost časovnih vrst je na milimetrskem nivoju za ponovljivost dnevnih koordinat in je dovolj visoka, da lahko na osnovi dnevnih koordinat določamo vektorje hitrosti spreminjanja koordinat, kakor tudi možne lokalne vplive na položaj točk.

Povezava starega in novega državnega koordinatnega sistema

V aplikativnem projektu ARRS *Razvoj modelov prehoda v nov državni koordinatni sistem s sistemom opisa kakovosti prostorskih podatkov*, ki je potekal od 2004 do 2007, smo ovrednotili različne vrste geodetskih podatkov, ki so bili pridobljeni v preteklosti in bi jih lahko uporabili pri vzpostavitvi novega državnega koordinatnega sistema Slovenije (Stopar, 2007b). V projektu smo začeli razvijati tudi modele za transformacijo prostorskih podatkov iz starega v nov državni koordinatni sistem.

Za potrebe praktične uporabe tehnologije GNSS v starem državnem koordinatnem sistemu in za združevanje novo pridobljenih položajnih podatkov z obstoječimi smo že v začetku praktične uporabe tehnologije GNSS v Sloveniji izdelali programsko opremo, ki je omogočala transformacije med koordinatnimi sistemi v geodeziji. Za praktično uporabo tehnologije GNSS v geodetski praksi smo izdelali dve aplikaciji, SiTra, ki je na razpolago pooblaščenim inženirjem geodezije in SiTraNet, ki je prosto dostopna na spletnem naslovu <http://www.sitranet.si> (Kozmus Trajkovski in Stopar, 2007).

Za potrebe prehoda položajno najnatančnejših podatkovnih zbirk je GURS zagotovil vsedrjavni model trikotniške transformacije. Trikotniška transformacija je odsekoma afina ravninska transformacija, ki je neprekinjena (zvezna) in povratna (reverzibilna) na celotnem območju države in širše okolice, kar omogoča tudi transformacijo vseh državnih sistemskih kart, ki pokrivajo območja sosednjih držav, kot tudi uporabo na morju. Temelji na pravilni trikotniški mreži in virtualnih veznih točkah, deformacije dolžin so manjše od 6 cm/km, deformacije površin so manjše od 0,9 m²/ha, točnost transformacije pa je višja od 10 cm za pretežni del ozemlja države (Berk in sod., 2016).

V letih 2014–2016 je bila kakovost trikotniške transformacije dodatno preverjena na vzorcih zemljiškokatastrskih točk po vsej državi, posebej tam, kjer je kakovost podatkov najvišja (npr. večja urbana središča). Vključenih je bilo 80 testnih območij s približno 2500 ponovno izmerjenimi zemljiškokatastrskimi točkami. Po naknadni zgostitvi veznih točk na nekaterih območjih države – tudi s točkami izmeritvenih mrež – na skupaj 3540 točk je bil pripravljen končni model trikotniške transformacije, različica 4.0, ki je bil nato tudi uporabljen za transformacijo prostorskih podatkovnih zbirk GURS. Slednja je bila končana v začetku leta 2019. Geodetska uprava je zagotovila tudi brezplačni program 3tra. Program omogoča transformacijo prostorskih podatkov med D48/GK in D96/TM v nekaterih bolj razširjenih vektorskih in rastrskih formatih (shp, dxf, csv, txt, xyz, jpg, tif ...). Namenjen je posebej transformacijam tistih prostorskih podatkovnih zbirk, ki niso v pristojnosti GURS.

Nove državne kartografske projekcije

Poleg novega državnega koordinatnega sistema, s katerim je določen sistem pravil za dodeljevanje koordinat objektov, pojavov in stanj v prostoru smo določili tudi sistem državnih kartografskih projekcij, s katerimi je omogočeno prikazovanje prostora na območju Slovenije v dvorazsežni obliki, v obliki vseh vrst načrtov in kart.

Slovenske državne topografske karte so izdelane v modulirani prečni Mercatorjevi TM (Transverse Mercator oziroma Gauß-Krügerjevi – GK) projekciji na referenčnem elipsoidu GRS-80 (angl. Geodetic Reference System 1980). Mercatorjeva (pokončna) projekcija pa je po standardih IHO (angl. International Hydrographic Organization) zahtevana za vse pomorske karte in jo uporabljamo tudi v Sloveniji za prikazovanje podmorske topografije in batimetrije v priobalnem pasu in na odprtem morju že od izdelave prve slovenske pomorske karte naprej. V Slovenski vojski je zaradi članstva Slovenije v zvezi NATO v rabi pravokotni koordinatni sistem univerzalne prečne/transverzalne Mercatorjeve projekcije (UTM).

Zakonodajna ureditev novega državnega koordinatnega sistema

Državni prostorski koordinatni sistem je uradno veljavni koordinatni sistem na območju države. Zato ga je bilo potrebno tudi uzakoniti. Že *Zakon o evidentiranju nepremičnin – ZEN* (Ur. l. RS, št. 47/2006 in naslednji) je v 139. členu s 1. 1. 2008 uvedel uporabo novega koordinatnega sistema pri vzdrževanju podatkov v zemljiškem katastru. Vse zemljiškokatastrske točke (mejniki), ki so bili izmerjeni po tem datumu, imajo koordinate določene tudi v novem državnem koordinatnem sistemu, kar je bilo podrobneje opredeljeno s *Pravilnikom o urejanju mej ter spreminjanju in evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru* (Ur. l. RS, št. 8/2007 in naslednji).

Sistemsko pa je novi koordinatni sistem uredil *Zakon o državnem geodetskem referenčnem sistemu – ZDGRS* (Ur. l. RS, št. 25/2014), ki podrobneje opredeljuje državni geodetski referenčni sistem ter naloge in pristojnosti za njegovo vzpostavitev, vodenje in vzdrževanje. Hkrati je zakon opredelil tudi transformacijo podatkov vseh uradnih zbirk prostorskih podatkov v novi koordinatni sistem.

Njegovi podzakonski akti podrobneje definirajo tako horizontalno kot vertikalno sestavino. Tu sta pomembni predvsem *Uredba o določitvi parametrov horizontalne sestavine in gravimetričnega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema, imen teh sestavin in državne kartografske projekcije* (Ur. l. RS, št. 57/2014) in *Uredba o določitvi parametrov višinskega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema* (Ur. l. RS, št. 80/2018).

Druge raziskovalne aktivnosti na področju geodezije

Geodinamične raziskave na območju Slovenije

Prva praktična uporaba tehnologije GNSS na območju Slovenije je bila uporaba v okviru geodinamičnih raziskav v okviru t. i. geodinamičnih geodetskih mrež. Od 1993 do 1999 je potekal mednarodni geodinamični projekt CERGOP 1 (angl. Central European Geodynamical Project), katerega namen je bilo spremljanje geodinamičnih procesov na širšem območju srednje Evrope. V okviru projekta je bila vzpostavljena mreža geodetskih točk CEGRN (angl. Central European Geodynamic Reference Network). Koordinate točk so bile določene vsako leto na osnovi opazovanj GPS. Številne točke mreže CEGRN so z leti postale stalno delujoče postaje GNSS. Slovenija je bila v mrežo CEGRN vključena najprej z eno točko (na strehi UL FGG), kasneje pa še s petimi geodinamičnimi točkami v Sloveniji. Nadaljevanje projekta CERGOP 1 je bil projekt 5. OP raziskav evropske komisije CERGOP 2/Environment, ki je potekal v obdobju od 2003 do 2006. Nacionalni koordinator obeh projektov v Sloveniji je bil prof. dr. F. Vodopivec.

Prof. dr. F. Vodopivec je vodil tudi dva nacionalna raziskovalna geodinamična projekta *Projekt stalnega geodetskega določanja tektonskih premikov v okolici jedrske elektrarne Krško*, ki je potekal v obdobju od 1996 do 1998 (Vodopivec in sod., 1998) ter *Projekt stalnega določanja tektonskih premikov vzdolž Orliškega preloma*, ki je potekal v obdobju od 1999 do 2001 (Vodopivec in sod., 1999b). Kot je razvidno iz naslovov, sta bila namenjena vzpostavitvi geodinamične mreže in spremljanju geodinamičnega dogajanja na območju Krške kotline.

Na osnovi primerjave nadmorskih višin starih nivelmanskih izmer so bili določeni vertikalni pomiki na območju Slovenije. V sodelovanju z geologi so bile identificirane potencialno aktivne strukture vzdolž reke Save in trenutna aktivnost regionalnih geoloških struktur v zahodni Sloveniji. Od leta 2009 do leta 2011 smo z Geološkim zavodom Slovenije in Oddelkom za geologijo Naravoslovno tehniške fakultete UL, sodelovali na aplikativnem projektu ARRS *Seizmotektonski model Ljubljanske kotline* (Bavec in sod., 2013).

Od leta 2010 sodelujemo v projektu EPOS (angl. European Plate Observing System), ki je najprej potekal v 7. OP raziskav evropske komisije. EPOS je integrirana raziskovalna infrastruktura na področju geo-znanosti, ki jo je Evropski strateški forum za raziskovalne infrastrukture ESFRI (angl. European Strategy Forum on Research Infrastructures) vključil v svoj razvojni načrt. Cilj projekta EPOS je, da se zagotovijo pogoji za inovativne pristope, ki bi vodili v boljše razumevanje fizikalnih procesov, ki spodbujajo tektoniko in dinamiko zemeljskega površja. V letu 2014 je projekt EPOS prešel v »Fazo vzpostavitve« (angl. EPOS Implementation Phase) in je v obdobju 2015–2019 financiran v okviru raziskovalnega programa Horizon 2020. Geodezija sodeluje v projektu EPOS v okviru osrednjega tematskega servisa (angl. EPOS Thematic Core service) GNSS Data & Products, katerega namen je vzpostavitev odprte platforme za distribucijo podatkov opazovanj GNSS stalno delujočih postaj, meta podatkov, produktov in programskih rešitev za podporo raziskavam čvrste Zemlje na območju Evrope.

Raziskave na področju tehnologije GNSS

V okviru 6. OP raziskav Evropske komisije smo sodelovali v projektu GEOLOCALNET (*Innovative Concepts for High Accuracy Local Geodetic Networks*), v okviru katerega smo raziskovali možnosti uporabe bodočega evropskega GNSS-sistema Galileo v geodinamičnih raziskavah. Prav tako v okviru 6. OP raziskav evropske komisije smo delovali v vlogi supernadzornika v projektu MONITOR (*Land Surveying and Civil Engineering Monitoring–Applications, Analysis and Assessment*), v katerem je sodelovalo 20 partnerjev (14 podjetij in 6 univerz). Glavni namen tega projekta je bila ocena možnosti uporabe GNSS sistema Galileo v aplikacijah zaščite premoženja in življenja.

V obdobju 2010 do 2013 smo sodelovali v raziskovalnem projektu ARRS *Določitev in ocena vplivov izrednih Sončevih aktivnosti na satelitsko določanje lokacije*. Glavni cilj projekta je bila identifikacija in ocena vrst Sončeve aktivnosti, ki vplivajo na dostopnost, uporabnost in kakovost določanja položaja v globalnih navigacijskih satelitskih sistemih.

Zaključek

V prispevku smo predstavili nekaj aktivnosti, ki so potekale v okviru sekcije Geodezija SZGG v obdobju do njene ustanovitve do 2009. Naštete raziskovalne aktivnosti so, razen v okviru naštetih projektov, potekale tudi v okviru raziskovalnega programa *P2-0227 Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije* Javne agencije za

raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS, ki poteka na Oddelku za geodezijo UL FGG in je bil do leta 2018 edini raziskovalni program ARRS na področju geodezije. V letu 2019 smo na področju geodezije pridobili nov raziskovalni program *P2-0406 Opazovanje Zemlje in geoinformatika*, ki poteka na Oddelku za geodezijo UL FGG in ZRC-SAZU.

Rezultate raziskovalnega dela smo predstavljali na domačih in mednarodnih znanstvenih in strokovnih konferencah, objavljali v znanstvenih revijah s področja geodezije in sorodnih strok. Skupaj smo objavili 80 znanstvenih člankov v znanstvenih revijah, ki so uvrščene v bazi WoS v 1. kvartil revij na svojih področjih, 30 v revijah v 2. kvartilu, 26 v revijah v 3. kvartilu in 208 člankov v revijah 4. kvartila. Ta dela so bila v zadnjih 10 letih citirana 2300 krat v revijah iz baze WoS in 3000 krat v revijah, vključenih v bazo SCOPUS.

Kot pomembno štejemo tudi uredništvo slovenske znanstvene revije s področja geodezije *Geodetski vestnik*, ki se je razvila v eno izmed mednarodno najbolj prepoznanih znanstvenih revij, ki jih izdajamo v Sloveniji.

V prispevku smo predstavili nekaj aktivnosti, ki so vsebinsko povezane s področji delovanja IAG, kot najvišjega mednarodnega znanstvenega združenja s področja geodezije. Omejili smo se na aktivnosti, ki so potekale v okviru vzpostavitve sodobne temeljne državne prostorske podatkovne infrastrukture in so v znatni meri tudi že dokončane.

Literatura

- Bavec, M., Ambrožič, T., Atanackov, J., Celarc, B., Gosar, A., Jamšek Rupnik, P., Jemec Auflič, M., Kogoj, D., Koler, B., Komac, M., Kozmus Trajkovski, K., Kuhar, M., Markič, M., Novak, M., Pavlovčič Prešeren, P., Rajver, D., Savšek, S., Sterle, O., Vrabc, M., Žibret, L. (2013): Seizmotektonski model Ljubljanske kotline: zaključno poročilo raziskovalnega projekta. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2013. 22 str.
- Berk, S., Bajec, K., Fajdiga, D., Klanjšček, M., Likovič, D., Mahnič, G., Mesner, N., Radovan, D., Koler, B., Kozmus Trajkovski, K., Kuhar, M., Sterle, O., Stopar, B. (2008): Razvoj DGS 2007: prehod na nov koordinatni sistem: končno poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2008. 3 zv. (loč. pag.).
- Berk, S., Fabiani, N., Bric, V., Žagar, T., Janežič, M., Mivšek, E., Oven, K., Lisec, A., Čeh, M., Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. (2016): Kontrola, izboljšava in verifikacija modela trikotniške transformacije za potrebe prehoda sloja ZK in drugih prostorskih zbirk iz D48/GK v D96/TM: končno poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2016. 70 str.
- Koler, B., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Urbančič, T., Triglav Čekada, M., Ritlop, K., Karničnik, I., Bric, V., Radovan, D. (2018): Določitev državnega globinskega referenčnega sistema na morju: izračun geoida na morju in realizacija globinskega datuma: končno poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2018. 147 str.
- Kozmus Trajkovski, K., Stopar, B. (2007): Navodila za uporabo spletne aplikacije za transformacije koordinatnih sistemov SiTraNet: v1.0. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2007. 19 str.
- Radovan, D., Koler, B., Kuhar, M., Medved, K., Mesner, N. (2005): Študija stanja del na gravimetrični mreži v Republiki Sloveniji in predlog nadaljnjih del: končno poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2005. 73 str.
- Radovan, D., Berk, S., Koler, B., Kuhar, M., Barišič, B., Grgič, I., Liker, M. (2006): Izmera osnovne gravimetrične mreže: končno poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2006. 26 str.
- Sterle, O. (2015). Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska disertacija. Ljubljana, Slovenija, 2015, 194 str.
- Sterle, O., Stopar, B. (2019): Analitični del delovanja GNSS omrežij. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za matematično in fizikalno geodezijo ter navigacijo, 2019. 216 str.

- Stopar, B., Ambrožič, T., Berk, S., Kogoj, D., Koler, B., Kozmus Trajkovski, K., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Radovan, D., Vodopivec, F. (2004): Zasnova vzpostavitve novega državnega koordinatnega sistema Slovenije: za obdobje 2001-2004: zaključno poročilo o raziskovalnem projektu L2-3033. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za matematično in fizikalno geodezijo ter navigacijo, 2004.
- Stopar, B., Kogoj, D., Koler, B., Ambrožič, T., Savšek, S., Sterle, O., Kuhar, M., Radovan, D. (2006): Izvedba geodetskih del na modernizirani mareografski postaji Koper: tehnično poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2006. 75 str.
- Stopar, B., Kogoj, D., Koler, B., Ambrožič, T., Kuhar, M., Savšek, S., Sterle, O. (2007a): Izvedba dodatnih geodetskih del na modernizirani mareografski postaji Koper: tehnično poročilo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2007. 74 str.
- Stopar, B. (2007b). Vzpostavitev ESRS v Sloveniji. Geodetski vestnik, 51 (4), str. 763–776.
- 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., Bajec, K., Mesner, N., Fabiani, N., Caserman, M., Bric, V., Triglav Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2015): Razvoj geodetskega referenčnega sistema 2014: zaključni elaborat. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, 2015. 295 str.
- 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 Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2016a): 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, 2016. 537 str.
- 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 Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2016b): Implementacija kombinirane geodetske mreže in višinske komponente ESRS v državni geodetski referenčni sistem: končno poročilo. Sklop 2. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: Geodetski inštitut Slovenije, 2016. 151 str.
- 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 Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2016c): Implementacija kombinirane geodetske mreže in višinske komponente ESRS v državni geodetski referenčni sistem: končno poročilo. Sklop 1. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: Geodetski inštitut Slovenije, 2016. 216 st.
- Triglav Čekada, M., Berk, S., Janežič, M., Barborič, B., Kete, P., Radovan, D., Pegan Žvokelj, B., Brajnik, M., Režek, P. (2008): Podrobna opredelitev protokola prehoda prostorskih podatkovnih zbirk Geodetske uprave RS v nov državni koordinatni sistem: končno poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2008.
- Triglav Čekada, M., Ritlop, K., Oven, K., Fabiani, N., Bric, V., Radovan, D., Pavlovčič Prešeren, P., Sterle, O., Kuhar, M., Stopar, B. (2019): Povečanje zanesljivosti javnih omrežij GNSS SIGNAL in 0. red: končno poročilo. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, 2019. 138 str.
- Uradni list Republike Slovenije, št. 47/2006. Zakon o evidentiranju nepremičnin – ZEN. Uradni list Republike Slovenije, št. 47/2006, spr. 65/2007-odl. US št. U-I-464/06-13. Ljubljana.
- Ur. l. RS, št. 8/2007. Pravilnik o urejanju mej ter spreminjanju in evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru. Uradni list Republike Slovenije, št. 8/2007, z dne 22. 1. 2007, Ljubljana.
- Uradni list Republike Slovenije, št. 25/2014. Zakon o državnem geodetskem referenčnem sistemu – ZDGRS. Uradni list RS, št. 25/2014 z dne 11.4.2014, Ljubljana.
- Uradni list Republike Slovenije, št. 57/2014. Uredba o določitvi parametrov horizontalne sestavine in gravimetričnega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema, imen teh sestavin in državne kartografske projekcije. Uradni list RS, št. 57/2014 z dne 25.6.2014, Ljubljana.

- Uradni list Republike Slovenije, št. 80/2018. Uredba o določitvi parametrov višinskega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema, Uradni list RS, št. 80/2018 z dne 7.12.2018, Ljubljana.
- Vodopivec, F., Kogoj, D., Koler, B., Breznikar, A., Stopar, B., Kuhar, M., Jaklič, S. (1998): Projekt stalnega določanja tektonskih premikov v okolici JE Krško. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, 1998.
- Vodopivec, F., Pribičević, B., Stopar, B., Kuhar, M. (1999a): Nov preračun geoida Republike Slovenije: elaborat raziskovalne naloge. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, 1999.
- Vodopivec, F., Kogoj, D., Breznikar, A., Koler, B., Stopar, B., Kuhar, M., Savšek, S., Ambrožič, T., Jaklič, S., Pavlovčič Prešeren, P. (1999b): Projekt stalnega določanja tektonskih premikov vzdolž Orliškega preloma. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, 1999.

25 let sodelovanja Slovenije v Mednarodni zvezi za seizmologijo in fiziko notranjosti Zemlje (IASPEI)

Andrej Gosar*

Sto let Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (IUGG)

Mednarodna zveza za geodezijo in geofiziko (IUGG) je mednarodna nevladna organizacija za znanstvene raziskave Zemlje in vseh njenih okolij ter deloma tudi vesolja z uporabo geofizikalnih in geodetskih raziskovalnih metod. Ustanovljena je bila leta 1919 v Bruslju z namenom spodbujati in koordinirati predvsem fizikalno, kemično in matematično raziskovanje planeta Zemlja. To vključuje njeno geometrijsko obliko, notranjo zgradbo, težnostno in magnetno polje, seizmičnost, vulkanizem, hidrološki krog, ledenike, oceane, atmosfero, ionosfero in magnetosfero Zemlje. Dodatno pokriva tudi solarne, lunarne in planetarne raziskave. Ena izmed pomembnih nalog je spodbujanje raziskovanja naravnih pojavov, ki povzročajo naravne nesreče, da bi jih bolje razumeli in blažili njihove posledice.

Zgodovino IUGG je treba gledati tudi v perspektivi burne zgodovine človeštva v zadnjih sto letih, ko mednarodno znanstveno sodelovanje zaradi vojn, blokovske razdelitve, hladne vojne ter kompleksnih družbenih, političnih in ekonomskih razmer dvajsetega stoletja ni bilo vedno mogoče, oziroma je bilo vsaj močno oteženo. Nekatera najpomembnejša geofizikalna spoznanja o planetu Zemlji, kot je oblikovanje celovite *Teorije o tektoniki litosferskih plošč* pred okoli 55 leti, so bila mogoča šele, ko je mednarodno sodelovanje pri seizmološkem monitoringu ali batimetriji oceanskega dna doseglo takšen obseg, da je pokrilo večino površja Zemlje. Na višku hladne vojne to ni bilo preprosto in raziskovalci so morali biti vselej vsaj en korak pred politiki. Poslanstvo IUGG zato ni bilo nikoli le čim kakovostnejša znanost, ampak tudi povezovanje in izobraževanje ter posredovanje znanja odločevalcem in politikom.

Mednarodna zveza za geodezijo in geofiziko je ena izmed 40 znanstvenih zvez v okviru *Mednarodnega znanstvenega sveta (International Science Council – ISC)*. Sestavlja jo osem večinoma avtonomnih združenj, ki pokrivajo različna področja znanosti. Vsake štiri leta organizira generalno skupščino, ki se je udeleži več tisoč znanstvenikov. Do zdaj je bilo 27 takšnih skupščin, prva leta 1922 v Rimu, jubilejna ob stoletnici pa je bila julija 2019 v Montrealu. Uradna jezika IUGG sta angleščina in francoščina. Trenutno je v IUGG 59 držav polnopravnih članic in 13 pridruženih članic.

Znotraj IUGG je veliko raziskovalnih dejavnosti, ki zahtevajo interdisciplinarno sodelovanje različnih zvez, ki so prav zato povezane v krovno organizacijo. Zato so nekatera interdisciplinarna področja še posebej formalizirana kot medzvezne komisije:

- Skupna komisija za cunamije (IAPSO, IASPEI, IAVCEI),
- Mednarodna komisija za Zemljin toplotni tok (IASPEI, IAVCEI),
- Komisija za fiziko in kemizem Zemljinih surovin (IASPEI, IAVCEI),
- Komisija za vulkansko seizmologijo in akustiko (IASPEI, IAVCEI),
- Mednarodno omrežje oceanov (IAGA, IASPEI),
- Delovna skupina za študij elektromagnetizma potresov in vulkanov (IAGA, IASPEI, IAVCEI),
- Delovna skupina o subdukcijskih conah v državah v razvoju (IASPEI, IAVCEI),

- Komisija o interakciji med vulkani in ledom (IACS, IAVCEI).

Največ interdisciplinarnih komisij povezuje raziskovalce iz *Mednarodne zveze za vulkanologijo in kemijo notranjosti Zemlje* (IAVCEI) ter *Mednarodne zveze za seizmologijo in fiziko notranjosti Zemlje* (IASPEI), kar je razumljivo, saj so največje geološko pogojene nevarnosti povezane z območji subdukcije litosferskih plošč, pri čemer nastajajo najmočnejši potresi in vulkanski izbruhi, posledično pa tudi cunamiji.

Mednarodni raziskovalni programi IUGG

IUGG je dosegla največjo prepoznavnost kot pobudnik in spodbujevalec številnih letnih ali večletnih globalnih raziskovalnih programov. Za področje naravnih nesreč je bil najpomembnejši program *Mednarodna dekada za zmanjšanje posledic naravnih nesreč* (*International Decade for Natural Disaster Reduction*, 1990–1999). Cilj desetletnega programa, ki so ga razglasili Združeni narodi, je bil z mednarodnim sodelovanjem zmanjšati število žrtev, gmotno škodo, socialne in ekonomske posledice naravnih nesreč, predvsem v državah v razvoju. Za koordinacijo so pri Združenih narodih v Ženevi ustanovili posebno pisarno, ki je bila tesno povezana z *Organizacijo združenih narodov za pomoč ob naravnih nesrečah* (*United Nations Disaster Relief Organization* – UNDRO).

Pozneje je na področju naravnih nesreč potekal program Ekstremne naravne nevarnosti in vplivi na družbo (*Extreme Natural Hazards and Societal Implications*, 2010–2014), trenutno pa poteka program Integrirane raziskave ogroženosti zaradi naravnih nesreč (*Integrated Research on Disaster Risk*).

Med drugimi raziskovalnimi programi IUGG so izstopali *Mednarodno geofizikalno leto* (1957–1958), s katerim so zaznamovali 50-letnico mednarodnega sodelovanja na področju geofizike, pomembne preboje v raziskovanju vesolja in globalne geofizike in vsaj deloma oživili sodelovanje raziskovalcev iz zahoda in vzhoda, ki je bilo zaradi hladne vojne več let skoraj povsem prekinjeno.

Za področje seizmologije in ogroženosti zaradi potresov sta bila najpomembnejša raziskovalna programa: *Projekt raziskav zgornjega dela Zemljinega plašča* (1964–1970) in *Projekt geodinamika Zemlje* (1972–1979). Najpomembnejši program, ki poteka že od leta 1980, pa je *Mednarodni program za litosfero* (*International Lithosphere Program*), ki sta ga ustanovila IUGG in *Mednarodna zveza za geološke znanosti* (IUGS) zaradi raziskav izvora, dinamike in razvoja Zemljine litosfere, v kateri potekajo najpomembnejši geološki procesi, ki so vzrok za nastanek naravnih nesreč.

Mednarodna zveza za seizmologijo in fiziko notranjosti Zemlje (IASPEI)

IASPEI je eno izmed ustanovnih združenj IUGG, saj je bilo prvo mednarodno seizmološko združenje ustanovljeno že leta 1903. Sedanje ime je dobilo na 9. generalni skupščini IUGG leta 1951 v Bruslju. IASPEI spodbuja in koordinira raziskave potresov, širjenja potresnih valovanj ter notranjo zgradbo Zemlje, njene lastnosti in procese. Delo poteka predvsem znotraj naslednjih tematskih področij:

- zgradba Zemlje in geodinamika,
- procesi nastajanja potresov – fizika, modeliranje, opazovanja in napovedi,
- potresna nevarnost in ogroženost,

- mehanika v žarišču potresov,
- toplotni tok Zemlje,
- seizmološka opazovanja in interpretacija,
- tektonofizika in zgradba Zemljine skorje,
- izobraževanje.

Znotraj IASPEI delujejo štiri regionalne seizmološke komisije v Evropi, Aziji, Afriki in Latinski Ameriki. *Evropska seizmološka komisija* je najpomembnejše Evropsko seizmološko združenje. Mednarodno izmenjavo seizmoloških podatkov v okviru IASPEI koordinira *Mednarodna federacija digitalnih omrežij seizmografov* (FDSN).

Slovensko delovanje v okviru Mednarodne zveze za seizmologijo in fiziko notranjosti Zemlje (IASPEI)

Kmalu po osamosvojitvi Slovenije se je pokazala potreba po ustanovitvi *Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko* (SZGG), saj je ustrezen nacionalni komite pogoj za včlanitev v IUGG. Pobudnik za ustanovitev SZGG in njen prvi predsednik je bil dr. Janez K. Lapajne. Kot strokovno društvo je bila SZGG ustanovljena 26. februarja 1993 in je imela takrat 40 članov. Leta 1995 je bila Slovenija po daljšem prizadevanju vodstva združenja na konferenci v Boulderju sprejeta v IUGG. Od takrat je izvršni odbor SZGG hkrati tudi nacionalni komite Slovenije pri IUGG in poleg znanstvenih nalog skrbi tudi za poravnavanje mednarodne članarine, ki jo sofinancira *Javna agencija za raziskovalno dejavnost* (ARRS). Kasneje so se slovenski raziskovalci s področji, ki jih pokriva IASPEI, aktivno udeležili še generalne skupščine IUGG v Birminghamu (1999) ter generalnih skupščin IASPEI v Solunu (1997), Hanoiu (2001), Cape Townu (2009) in Goeteborgu (2013). Med leti 2003 in 2015 je bil generalni tajnik IASPEI prof. Peter Suhadolc iz Univerze v Trstu, ki že dolgo let tesno sodeluje s SZGG in se pogosto udeležuje tudi njenih letnih skupščin in posvetovanj. Še bolj kot v IASPEI smo slovenski seizmologi dejavni v *Evropski seizmološki komisiji*, ki je ena od štirih regionalnih seizmoloških komisij znotraj IASPEI. Nacionalna predstavnika Slovenije v IASPEI sta bila med leti 1998 in 2014 dr. Andrej Gosar ter med leti 2015 in 2020 dr. Martina Čarman. Področje IASPEI je imelo v SZGG dva častna člana: prof. dr. Danilo Ravnik (1923–2016) in dr. Janez K. Lapajne (1937–2012).

Od leta 1995 organizira SZGG ob redni letni skupščini tudi strokovno posvetovanje in ta tradicija do danes še ni bila prekinjena. Prvi dve posvetovanji sta bili posvečeni zgodovini slovenske geodezije in geofizike, tretje je imelo naslov *Novejši dosežki na področju geodezije in geofizike v Sloveniji*, naslednji dve pa *Raziskovalni projekti s področja geodezije in geofizike*. Od leta 2000 se je za ta posvetovanja ustalil naziv *Raziskave s področja geodezije in geofizike*. Od leta 2013 naprej so prispevki v zborniku tudi recenzirani. S področja IASPEI je bilo v zbornikih posvetovanj do sedaj objavljenih 47 prispevkov od tega 30 seizmoloških, 9 s področja geofizike, 5 s področja geotermije in trije s področja tektonike. Seznam vseh objavljenih prispevkov je na koncu tega članka.

Od leta 2002 SZGG podeljuje priznanja mlajšim raziskovalcem, predvsem za odmevnejša doktorska ali magistrska dela. Leta 2010 je za področje IASPEI priznanje dobil dr. Janez Rošer (UL-NTF) za doktorsko disertacijo *Raziskave vpliva sedimentov na potresno nihanje tal na območju Ljubljane z metodo mikrotremorjev* in leta 2017 mag. Gregor Rajh (UL-NTF) za magistrsko delo *Analiza seizmotektonskih podatkov v Sloveniji z uporabo GIS orodij za verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti*.

Raziskovalna in strokovna dejavnost na področjih, ki jih pokriva IASPEI je v Sloveniji v zadnjih 25 letih potekala na različnih inštitucijah. Področje seizmologije je v letih 1993 in 1994 pokrival še *Seizmološki zavod Slovenije*, med leti 1995 in 2001 pa *Uprava RS za geofiziko* v okviru *Ministrstva za okolje in prostor*. Leta 2001 je bila ustanovljena *Agencija RS za okolje* in znotraj nje *Urad za seizmologijo in geologijo*, ki pod imenom *Urad za seizmologijo* deluje še danes. Leta 2017 je bil v Sloveniji sprejet *Zakon o državni meteorološki, hidrološki, oceanografski in seizmološki službi*, ki ureja seizmološko dejavnost. Osnovne naloge so monitoring potresne dejavnosti z vzpostavljanjem in vzdrževanjem državne mreže potresnih opazovalnic, zbiranje makroseizmičnih podatkov o učinkih potresov, analize in opredeljevanje osnovnih parametrov potresov ter obveščanje služb za zaščito in reševanje in javnosti o potresih na ozemlju Slovenije in bližnje okolice. Nadaljnje naloge so povezane z ocenjevanjem potresne nevarnosti, razvojno-raziskovalno delo ter mednarodno sodelovanje. Rezultate rednega monitoringa in raziskovalnega dela seizmologi objavljamo v letni publikaciji *ARSO Potresi v letu*, v strokovni reviji *Ujma* ter v mednarodni znanstveni literaturi.

Geofizikalne raziskave se v Sloveniji izvajajo predvsem na treh inštitucijah. Na *Geoinženiringu*, ki je nastal leta 1998 z reorganizacijo *Inštituta za geologijo, geotehniko in geofiziko* je tradicija raziskav na področju geofizike najdaljša. Pred tem je bilo težišče raziskav predvsem na geoelektričnih, gravimetričnih, magnetometričnih in seizmičnih raziskavah tudi z večjim globinskim dosegom, kar je bližje raziskovalnim področjem IASPEI. Kasneje pa so bile raziskave predvsem na področju inženirske geofizike z manjšim globinskim dosegom, vendar višjo ločljivostjo. Glavne metode so električna tomografija, vertikalno električno sondiranje, refrakcijska seizmika in seizmična tomografija ter georadarske raziskave. Na *Geološkem zavodu Slovenije* je zelo dolga tradicija raziskav na področju geotermije, ki imajo z izdelavo kart temperatur v različnih globinah ter karte gostote toplotnega toka ali analizo paleoklimatskih sprememb v globokih vrtinah tako temeljni kot aplikativni značaj, do raziskav za izkoriščanje plitvih geotermalnih virov, ki imajo predvsem aplikativni značaj. Kasneje se je na *Geološkem zavodu Slovenije* med raziskovalnimi metodami uveljavila tudi visokoločljiva plitva refleksijska seizmika, predvsem za raziskave v sedimentnih bazenih in aktivno tektoniko. Zelo razvite so tudi geofizikalne karotažne meritve v vrtinah. Na *Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani* v zadnjih desetih letih izvajajo raziskave podpovršja z nizkofrekvenčnim georadarjem v okviru strukturnogeoloških raziskav in raziskav kraških pojavov. Sodelujejo tudi pri raziskavah morskega dna v Tržaškem zalivu z refleksijsko seizmiko in podpovršinskim sonarjem. Cilj teh raziskav je boljše razumevanje tektonske aktivnosti na podlagi tektonske geomorfologije potopljenih rečnih korit.

Objave v zbornikih posvetovanj SZGG s področja IASPEI (kronološko)

- Ravnik, D., Stopar, R., Car, M., Živanović, M., Gosar, A., Rajver, D., Andjelov, M. 1995: Rezultati raziskav uporabne geofizike v Sloveniji
- Car, M., Gosar, A., Rajver, D., Stopar, R., Tomšič, B. 1996: Zgodovina, stanje in perspektive uporabne geofizike v Sloveniji
- Uran, B., Car, M., Živanović, M. 1997: Sodobne tehnike uporabne geofizike za podrobne geofizikalne preiskave
- Car, M., Stopar, R., Uran, B. 1997: Metapodatkovna baza geofizikalnih raziskav v Sloveniji
- Rajver, D. 1997: Geotermične meritve v slovenskem delu avtocestnega predora Karavanke
- Vidrih, R., Sinčič, P. 1997: Posodabljanje slovenskega omrežja potresnih opazovalnic

- Lapajne, J., Zabukovec, B., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. 1997: Nova karta potresne nevarnosti Slovenije
- Gosar, A. 1997: Primerjava pogojev za seizmične refleksijske raziskave v flišnih bazenih zahodne in molasnih bazenih vzhodne Slovenije
- Lapajne, J. 1998: Vpliv bovškega potresa na obravnavanje potresne problematike v Sloveniji
- Sinčič, P., Vidrih, R. 1998: Posledice potresa v Posočju in instrumentalna opazovanja popotresne dejavnosti
- Cecić, I. 1998: Projekt BEECD – A basic European earthquake catalogue and a database
- Gosar, A. 1999: Geofizikalne raziskave v okolici jedrske elektrarne Krško – projekt PHARE
- Gosar, A., Živčič, M., Jesenko, T. 2000: Raziskave za izbor lokacij nove mreže potresnih opazovalnic v Sloveniji
- Prosen, T., Bajc, J., Živčič, M. 2000: Občutljivost potresne opazovalnice Velika Štanga
- Sinčič, P., Vidrih, R. 2000: Projekt posodobitve državne mreže potresnih opazovalnic (PM 2000)
- Uran, B. 2000: Obdelava seizmogramov z valčki
- Bajc, J., Aoudia, M., Živčič, M., Sarao, A., Suhadolc, P. 2001: Velikonočni potres in popotresi 1998
- Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. 2001: Potresna nevarnost Slovenije: karta projektnega pospeška tal
- Suhadolc, P., Fitzko, F., Aoudia, A., Panza, G.F. 2001: Constraints on the location and mechanism of the 1511 Western-Slovenia earthquake from active-tectonic studies and modeling of macroseismic data
- Cecić, I., Musson, R., Mayer-Rosa, D. 2001: Macroseismic Survey Team for Severe Earthquakes in Europe and the Mediterranean Basin (FITESC)
- Rajver, D., Ravnik, D. 2001: Geotermalne značilnosti Krške kotline na osnovi geofizikalnih raziskav
- Torkar, M., Cecić, I., Živčič, M. 2001: Potresna aktivnost v Sloveniji od 1. januarja do 30. septembra 2001.
- Gosar, A. 2002: Projekt Alp 2002 - 3D seizmične refrakcijske raziskave litosfere na območju jugovzhodnih Alp
- Živanović, M. 2002: Nedestruktivna raziskovalna metoda – Georadar
- Šebela, S. 2003: Potresi v kraških jamah
- Šebela, S., Gosar, A. 2004: Začetek meritev premikov ob prelomih v zahodni Sloveniji s 3D ekstenziometri TM-71
- Sinčič, P., Vidrih, R. 2005: Potek izgradnje državne mreže potresnih opazovalnic
- Rajver, D., Šafanda, J., Dedeček, P. 2005: Opazovanje segrevanja podzemlja in povezanost temperatur zraka in tal v Sloveniji
- Lapajne, J. 2005: Skrajševanje dneva zaradi potresa ob Sumatri in Andamanskih otokih 26.12.2004 (kratka notica)
- Šebela, S., Koštak, B., Mulec, J., Stemberk, J. 2007: Merjenje tektonskih premikov v Postojnski jami
- Fernandez, M.G., Cecić, I., Walker, A.B. 2007: Evropska seizmološka komisija - preteklost, sedanjost in prihodnost
- Sinčič, P., Vidrih, R. 2008: Delovanje državne mreže potresnih opazovalnic
- Lapajne, J. 2009: Protitokovni plimski val
- Šebela, S. 2009: O podrtem kapniku ob Cerkljanskem potresu (1926), ter o raziskovalni postaji s horizontalnimi nihali v Postojnski jami
- Sinčič, P., Vidrih, R., Godec, M. 2009: Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad
- Cecić, I., Godec, M., Vidrih, R. 2009: Potres 6. april 2009 v osrednjih Apeninih
- Rošar, J., Gosar, A. 2010: Raziskave vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal na območju Ljubljane z metodami analize mikrotremorjev
- Bajc, J., Zaplotnik, Ž., Živčič, M., Čarman, M. 2011: Izračun lokalnih magnitud potresov iz podatkov Državne mreže potresnih opazovalnic
- Šebela, S. 2014: Večletno merjenje tektonskih mikro premikov v kraških jamah
- Gosar, A. 2015: Skalni podori ob potresu leta 1998 v Krnskem pogorju in možnost njihove uporabe za oceno seizmičnih intenzitet po Environmental Seismic Intensity lestvici (ESI 2007)
- Trobec, A., Šmuc, A., Poglajen, S., Vrabec, M. 2015: Raziskave strukture sedimentnega morskega dna v Strunjanskem zalivu s podpovršinskim sonarjem

- Cecić, I., Meurers, R., Tertulliani, A., Grünthal, G., Kaiser, D., Pazdirková, J., Sović, I. 2016: Potres 6. maja 1976 v Furlaniji - reevaluacija makroseizmičnih podatkov
- Rajh, G., Zupančič, P., Živčič, M., Gosar, A., Čarman, M. 2016: Analiza največjih magnitud in globin žarišč potresov v Sloveniji za namen ocenjevanja potresne nevarnosti
- Trobec, A., Šmuc, A., Poglajen, S., Vrabec, M. 2016: Je Obala res tektonsko aktivna? Tektonska geomorfologija potopljenih rečnih korit v Tržaškem zalivu
- Cecić, I., Nečak, D., Berus, M. 2017: Ob 101. obletnici brežiškega potresa
- Rajh, G., Šket-Motnikar, B., Živčič, M., Zupančič, P., Gosar, A. 2017: Preliminarna analiza nivoja potresne aktivnosti po prelomnih potresnih izvorih v Sloveniji
- Gosar, A. 2018: Meritve tektonskih mikro-premikov v prelomni coni Idrijskega preloma v dolini Učje

Geomagnetne meritve na ozemlju Republike Slovenije

Rudi Čop¹

Povzetek

Geomagnetne meritve na ozemlju Republike Slovenije so v članku predstavljene na osnovi dosegljivih dokumentov vse od leta 1848 pa do danes. V tem obdobju je to ozemlje pripadalo najprej Avstro–Ogrski monarhiji, nato Kraljevini Jugoslaviji in del tudi Kraljevini Italiji, ter po koncu druge svetovne vojne nekdanji Jugoslaviji. Leta 1890 so bile na štirih mestih na ozemlju Slovenije izpeljane prve uporabne geomagnetne meritve. Takoj po koncu prve svetovne vojne so bile ponovljene na istih merilnih mestih. Da so bile to edine geomagnetne meritve na ozemlju Slovenije vse do sredine dvajsetega stoletja je predvsem posledica razmer v Kraljevini Jugoslaviji, ki je bila edina država v takratni Evropi brez svojega geomagnetnega observatorija. Sistematične meritve zemeljskega magnetnega polja po celotnem ozemlju Slovenije so bile narejene šele v nekdanji Jugoslaviji. Stanje teh meritev v ostalih republikah, nastalih po razpadu nekdanje Jugoslavije, so opisane v zaključku tega članka.

Ključne besede: geomagnetne meritve, Slovenija

Key words: geomagnetic measurements, Slovenia

Uvod

V 19. stoletju se je povečalo zanimanje za zemeljsko magnetno polje in njegovo proučevanje. Alexander von Humboldt (1769–1859) je na svojih dolgih potovanjih po Latinski Ameriki in Rusiji, ki so se začela leta 1798, sistematično meril deklinacijo, inklinacijo in relativno jakost geomagnetnega polja. Proučeval je pojave magnetnih neviht in s svojim pionirskim delom veliko prispeval k razumevanju lastnosti zemeljskega magnetnega polja, merjenega na površini Zemlje (Mandea et al, 2010).

Karel Kreil (1798–1861) je leta 1837, še kot upravnik observatorija v Pragi, opravil prve terenske meritve geomagnetnega polja v Evropi in sicer na področju beneških lagun (Courtilot & Le Mouel, 2007). Kot prvi direktor Osrednjega zavoda za meteorologijo in geomagnetizem na Dunaju pa je vodil obsežne meritve na področju Avstro–Ogrske monarhije, južne Evrope, obal Jadranskega in Črnega morja ter Anatolije. Rezultati teh meritev, ki so bili objavljeni kot geomagnetni zemljevid dobe 1850.0, so se uporabljali za navigacijo v pomorstvu in kot izhodišče za nadaljnje raziskave v tedanji Avstro–Ogrski monarhiji.

Tako Alexander von Humboldt kot tudi Karel Kreil sta bila člana Magnetnega kluba (nem. Magnetischer Verein), ki je bil ustanovljen v Goettingenu leta 1838 v takratni Prusiji. Najvidnejši član tega kluba je bil Carl Friedrich Gauss (1777–1855) (Garland, 1979).

Geomagnetne meritve na ozemlju Slovenije pred drugo svetovno vojno

Leta 1848 je bil na Dunaju ustanovljen Osrednji zavod za meteorologijo in geomagnetizem, ki je pokrival tudi slovenske dežele, takrat kot del Avstro–Ogrske monarhije (Zbornik, 1979). Leta 1860 je bil v Trstu ustanovljen prvi hidrografski zavod na

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje

področju Jadranskega morja, ki pa so ga leta 1866 ukinili. Njegova oprema je bila preseljena v Pulj, kjer je bil nato leta 1869 ustanovljen Hidrografski zavod Cesarsko kraljeve Vojne mornarice (Dobrić, 2009). V okviru tega Hidrografskega zavoda je deloval tudi Astronomski observatorij – Zvezdarnica, ki so ga sestavljali: astronomski, meteorološki in geomagnetni observatoriji ter observatorij za morsko plimovanje. Leta 1895 je Hidrografski zavod v Pulju dobil tudi oddelek za geofiziko.

Cesarsko kraljeva Vojna mornarica je od leta 1866 do leta 1870 opravila kartografske meritve vzhodne obale Jadranskega morja. Na osnovi teh meritev so nato v Pulju in na Dunaju izdelali pomorske zemljevide vzhodnega dela Jadrana. Pomorski zemljevidi Cesarsko kraljeve Vojne mornarice so omogočali varno plovbo po Jadranu in so bili osnova za vse nadaljnje jugoslovanske in italijanske pomorske zemljevide. Na Jadranskem morju je Hidrografski zavod iz Pulja v letih 1889 in 1890 izpeljal geomagnetne meritve. Leta 1890 so bile narejene geomagnetne meritve tudi v Celju, Ljubljani, Mariboru in Novem mestu. Na teh štirih merilnih mestih je leta 1918 Osrednji zavod za meteorologijo in geomagnetizem z Dunaja meritve ponovil (Mokrović, 1948).

Po razpadu Avstro–Ogrske monarhije je leta 1919 v Ljubljani nastal Zavod za meteorologijo in geodinamiko, po drugi svetovni vojni pa iz tega Meteorološki zavod Republike Slovenije. Že iz nazivov teh ustanov je moč razbrati, da se je področje geomagnetizma na ozemlju Sloveniji omejeno razvijalo le v času Avstro–Ogrske monarhije in to v glavnem za potrebe Cesarsko kraljeve Vojne mornarice. Tudi vzdrževanje objektov za pomorski promet tako v Kraljevini Italiji kot tudi v Kraljevini Jugoslaviji ni doseglo nivoja iz časov Avstro–Ogrske (Volpi–Lisjak, 1997). Kraljevina Madžarska, ki ji je do uveljavitve Trianonske pogodbe iz leta 1920 pripadalo Prekmurje, pa je imela na področju geomagnetnih meritev zelo bogato tradicijo. Meritve zemeljskega magnetnega polja se na Madžarskem sistematično opravljajo že od leta 1768 (Csontos et al, 2007).

Meritve vertikalne komponente na področju Slovenije

Geomagnetne raziskave po drugi svetovni vojni so prispevale predvsem k boljšemu poznavanju ležišč rudnih bogastev in geološke zgradbe ozemlja. Celoten projekt meritev in izdelavo regionalne magnetične karte Slovenije je izpeljal Geološki zavod Ljubljana. Za te meritve so uporabili torzijski magnetometer za merjenje vertikalne komponente zemeljskega magnetnega polja ali magnetno tehtnico (Haalck, 1956) (Slika 1).

V letih od 1951 do 1964 je bil podrobno izmerjen jugozahodni in severovzhodni del Slovenije (Miklič, 1968). Na Primorskem in na delu Notranjske je bila izmerjena vertikalna komponenta zemeljskega magnetnega polja južneje od zveznice Anhovo – Trnovski gozd – Nanos – Rakek – Rupa, v Prekmurju z delom Štajerske pa severneje od zveznice Šentilj – Rače – Hudinja – Konjice – Planina – Sevnica – Bizeljsko ob Sotli. Na teh dveh delih je bilo opravljeno preko 13.500 meritev ali 2 meritvi na vsak 1 km². Pri meritvi osrednjega dela Slovenije v letih 1968 in 1969 so zaradi čimbolj enakomerne porazdelitve merilnih mest 30% vseh meritev opravili na težje dostopnih krajih. Gostota meritev je bila tokrat v povprečju 1 meritev na 5 km². Nekoliko redkeje so bila razporejena merilna mesta v Alpah in na težje dostopnih krajih ter v okolici Ljubljane. Tam so se morali izogibati mest z močnim vplivom enosmerne električne železnice.

Dnevna variacija geomagnetnega polja je bila izmerjena delno na samem merilnem mestu, delno z uporabo magnetometra na bazni postaji. Sekularne spremembe so bile upoštevane na osnovi variometričnih meritev na geomagnetnem observatoriju Tihany ob Blatnem jezeru na Madžarskem. Ocenjena merilna točnost je bila okoli 10 nT. Vse meritve

komponente Z so bile naknadno reducirane na takratno mrežo ponavljalnih postaj razreda B (Jankowski & Sucksdorff, 1996), enakomerno razporejenih po ozemlju nekdanje Jugoslavije.

Za končno poročilo vseh meritev vertikalne komponente zemeljskega magnetnega polja v Sloveniji, opravljenih v obdobju od leta 1951 do leta 1969, je bila njegova normalna komponenta izračunana po enačbi (EEMP, 1997):

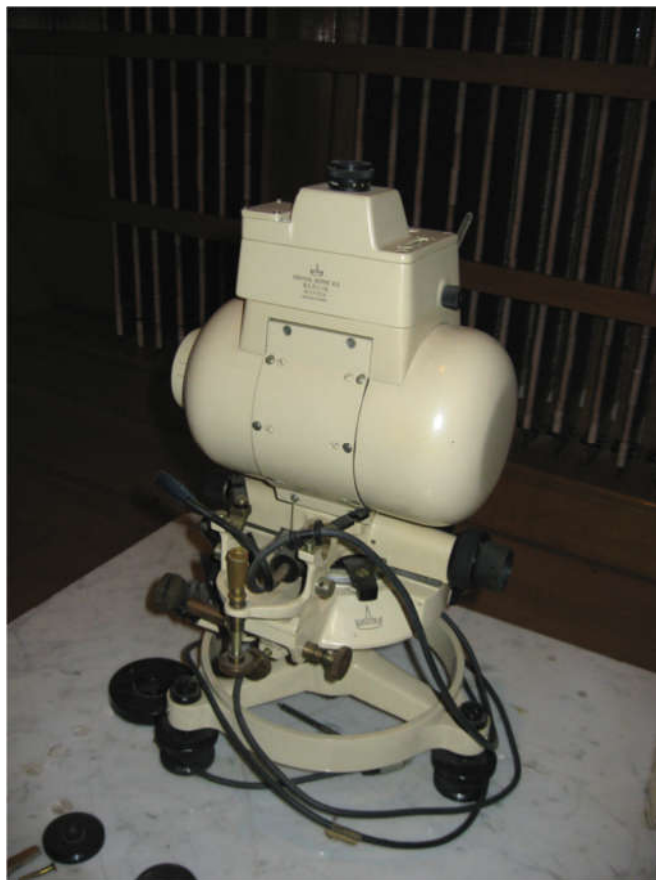
$$Z_n = Z_0 + a \Delta\varphi + b \Delta\lambda + c (\Delta\varphi)^2 + d (\Delta\lambda)^2 + e \Delta\varphi\Delta\lambda,$$

kjer so:

Z_n, Z_0 ... normalna vrednost vertikalne komponente izmerjene na določeni φ in λ ;

$\Delta\varphi, \Delta\lambda$... odstopanje od referenčne zemljepisne širine φ in zemljepisne dolžine λ .

Koeficienti a, b, c, d in e so bili določeni za merilno obdobje 1950.5 in 1956.5 ter za $44^\circ\text{N} < \varphi < 48^\circ\text{N}$ in $12^\circ\text{E} < \lambda < 18^\circ\text{E}$. S pomočjo linearne ekstrapolacije so bili ti koeficienti izračunani še za merilno obdobje 1969.0



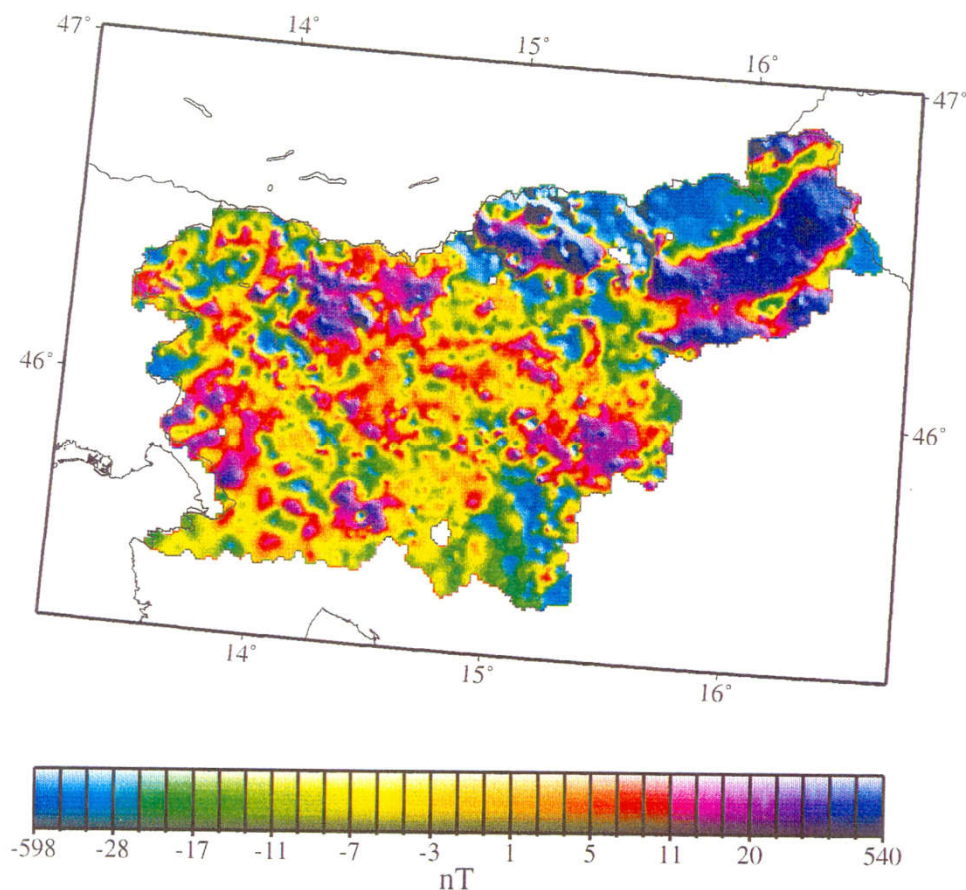
Slika 1: Magnetna tehnica, ki jo je podjetje Askania Werke A.G. iz Berlina izdelovalo serijsko.

Regionalna magnetična karta Slovenije

Meritve vertikalne komponente geomagnetnega polja so bile osnova za izdelavo regionalne magnetične karte Slovenije v letu 1969. Iste meritve so bile nato uporabljene pri izdelavi zemljevida anomalij vertikalne komponente celotnega ozemlja nekdanje Jugoslavije v letu 1971 (Stojković et al, 1974).

Geomagnetna območja Slovenije se ne ujemajo z geotektonskimi enotami, ki so se oblikovale v geološki preteklosti (Slika 2). Anomalije vertikalne komponente geomagnetnega polja so odraz sedanjega stanja v geodinamičnem razvoju tega ozemlja. So rezultat razmerja med zgornjim pokrivnim plaščem in posameznimi plastmi v zemeljski skorji.

Glede na anomalije vertikalne komponente geomagnetnega polja Slovenijo sestavljajo tri območja: Alpidi, Dinaridi in Panonska nižina. Tako za Alpe kot za Dinaride so značilne visoke gorske verige, ki so se dvignile v neogenu in kvartarju. Za Dinaride so značilne izrazite anomalije geomagnetnega polja spremenljivega predznaka, ki pa so omejene na manjša področja v obliki otokov. Na njihovih površjih so sicer nemagnetne karbonatne geološke formacije, vendar so v globinah magmatske kamenine, ki prevladujejo s svojim magnetizmom. Te anomalije se ne prekinjajo niti na velikih geoloških prelomih.



Slika 2: Sprememba vertikalne komponente zemeljskega magnetnega polja ΔZ [nT] v Sloveniji (EEMP, 1997). Izmerjena je bila $\sim 1,7$ m nad površino zemlje v mreži merilnih točk v medsebojni razdalji 1 km.

Alpidi so le v severnem delu Slovenije nad prelomnico, ki se iz Avstrije vleče čez Črno in Mozirsko planino ter se nadaljuje proti vzhodu na Madžarsko. K pravim Alpidom spadajo le Pohorje ter nižji hribi severno od zveznice Črna – Šoštanj – Maceljski Hribi. Vzdolž te meje se pojavljajo močnejše poudarjene anomalije z negativnim in pozitivnim predznakom. Tam prihajajo na površje starejše geološke formacije in magmatske

kamenine, ki povzročajo anomalije precej večjih vrednosti, kot so bile izmerjene na področju sosednjih Dinaridov. V podaljšku Alpidov v Panonsko nižino ima prevladujoči vpliv zgornja plast zemeljske skorje. Na njej so debeli sloji terciarnih sedimentov: konglomeratov, peščenjakov in laporja. Debelina teh zgornjih plasti zemeljske skorje odloča o velikosti anomalije vertikalne komponente geomagnetnega polja.

Projekt EEMP, Report 9: Slovenia

Report 9: Slovenia (EEMP, 1997) iz decembra 1997 je bil izdelan v okviru projekta Eastern Europe Magnetic Project – EEMP. Namenjen je bil pregledu anomalij vertikalne komponente geomagnetnega polja v državah nekdanje Vzhodne Evrope, ki so se takrat želele vključiti v Evropsko Unijo. Zbrani in obdelani so bili vsi razpoložljivi podatki meritev komponente Z in združeni v poenotene in med seboj primerljive digitalne baze podatkov, ki so namenjene odkrivanju nahajališč nafte in mineralov.

Pri projektu EEMP je sodeloval tudi Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko iz Ljubljane. Poleg merilnih podatkov, ki so bili že uporabljeni za izdelavo regionalnega zemljevida anomalij vertikalne komponente geomagnetnega polja na ozemlju Republike Slovenije izdelanem v letu 1969, so bili pri tem projektu uporabljeni tudi merilni podatki meritev zemeljskega magnetnega polja iz leta 1988 in 1989 (Slika 2). Na področju severno od črte Tržič – Kamnik – Velenje – Mežica je bilo takrat merjeno s sodobnimi merilnimi instrumenti in s pomočjo letala. Za izračun normalnega magnetnega polja se je uporabljal način izračunavanja Geomagnetnega observatorija Grocka za merilno obdobje 1960.0. Kvadratna srednja vrednost pogreška teh meritev je znašala ± 1 nT pri napaki določitve pozicije letala znotraj razdalje 100 m.

Geomagnetne meritve od leta 1958 do leta 1989 - GMO Grocka

Prve sodobne tri komponentne meritve geomagnetnega polja so bile narejene v času nekdanje Jugoslavije v obdobju od leta 1958 do leta 1960 (Mihajlovic et al., 2006). V Sloveniji so bile tedaj narejene meritve prvega reda na 34 ponavljalnih postajah (repeat stations) razreda C. Te so bile enakomerno porazdeljene po njenem ozemlju v medsebojni razdalji približno 30 km. Na vsaki od teh postaj je bilo eno samo merilno mesto za absolutne meritve. Meritve na ponavljalnih postajah razreda C se ponavljajo vsakih deset let (Jankowski & Sucksdorff, 1996).

Dve ponavljalni postaji za sekularne meritve razreda B sta bili tudi na ozemlju Slovenije: Kranjska gora in Lendava. Vsako tako ponavljalno postajo sestavljata dve merilni mesti v medsebojni razdalji do 5 km. Na enem merilnem mestu potekajo neprekinjene meritve vseh treh komponent geomagnetnega polja, na drugem merilnem mestu pa se po protokolu opravlja dvakrat dnevno absolutne meritve zemeljskega magnetnega polja. Posamezna meritev traja neprekinjeno najmanj tri dni. V času od leta 1960 do leta 1989 se je na ponavljalnih postajah razreda B ponavljalo merjenje v razdobjih od treh do petih let. Te meritve so bile osnova za spremljanje sekularnih sprememb geomagnetnega polja na celotnem ozemlju nekdanje Jugoslavije.

V času od leta 1958 do leta 1990 so bile narejene redukcije merilnih vrednosti geomagnetnega polja na ozemlju nekdanje Jugoslavije za devet obdobj: 1960.0, 1965.0, 1971.0, 1974.0, 1977.5, 1980.0, 1983.5, 1986.5 in 1989.5. Vse merilne vrednosti so bile reducirane na referenčne meritve v Geomagnetnem observatoriju Grocka (GCK), ki deluje od leta 1958 v vasi Brestovik poleg Grocke, okoli 36 km vzhodno od Beograda. Na

geomagnetnem observatoriju tečejo meritve vseh komponent geomagnetnega polja nepretrgoma preko celega leta in se opravljajo absolutne meritve vsaj enkrat tedensko. Stalne meritve na observatoriju so zato najbolj zanesljiv vir podatkov o spremembah zemeljskega magnetnega polja (Newitt et al., 1997).

Geomagnetne meritve leta 1998 - ZAMG Dunaj

Centralni inštitut za meteorologijo in geodinamiko – ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) iz Dunaja je pri geomagnetnih meritvah v obdobju 1995 – 1998 uporabil pristop, ki se je zadnjih dvajset let razvijal v delovni skupini MagNetE (Magnetic Network of Europe) pri mednarodni organizaciji IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Ponavljalne postaje se obravnavajo enakovredno in imajo zato vektorski značaj (De Michelis & Duma, 2012). Od 19. do 22. oktobra 1998 so merilci ZAMG-a izmerili vrednosti geomagnetnega polja na štirih ponavljalnih postajah na ozemlju Republike Slovenije: Beltinci, Rogoza, Letališče Jožeta Pučnika Ljubljana in Kobarid (Duma, 1998). Te postaje so od 30 do 50 km južno od meje z Avstrijo. Pri njihovi določitvi so sodelovali Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko ter Geodetska uprava Republike Slovenije iz Ljubljane. Vse izmerjene vrednosti deklinacije, inklinacije ter absolutne vrednosti geomagnetnega polja, ki so bile leta 1998 izmerjene na ozemlju Slovenije, so bile reducirane na srednjo vrednost geomagnetnega polja (obdobje 1997.0), izmerjenega dne 21. oktobra 1998 na observatoriju Wien – Kobenzl (WIK) pri Dunaju (Berger et al., 2008).

Geomagnetne meritve v Sloveniji po letu 2000

Na Javno agencijo za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ARRS je bil 2006 neuspešno naslovljen predlog raziskovalno–razvojnega projekta 'Daljinsko merjenje anomalij zemeljskega magnetnega polja' (Čop & Fefer, 2006). Naslednje leto pa je bila na isto agencijo uspešna prijava projekta z naslovom 'Določitev magnetne deklinacije za območje Slovenije in primerjava z globalnimi modeli zemeljskega magnetnega polja' v okviru ciljnega raziskovalnega projekta Znanje za varnost in mir 2006–2010 (M4-225). Vodstvo tega projekta je prevzela Fakulteta za elektrotehniko pri Univerzi v Ljubljani, sodelovali pa so še Geodetski inštitut Slovenije in Fakulteta za pomorstvo in promet (Čop et al., 2008). Eden od rezultatov tega projekta je bil Model magnetne deklinacije za Slovenijo, ki ga je v končni obliki financirala Kontrola zračnega prometa Slovenije (Žagar & Radovan, 2012).

Vzporedno s projektom, ki ga je financirala ARRS, je potekalo iskanje primernege mesta za geomagnetni observatorij na ozemlju Slovenije (Paliska et al., 2010). Postavitev geomagnetnega observatorija je bila del aktivnosti ob ustanavljanju Visokošolskega središča Sežana, kjer je bil organiziran tudi Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo. Geomagnetni observatorij Sinji vrh se je začel postavljati po zaključku projekta M4-225 leta 2009. Njegova gradnja je potekala v dveh fazah in se je zaključila z njegovo vključitvijo v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET (*International Real-time Magnetic Observatory Network*) za izmenjavo merilnih podatkov o stanju zemeljskega magnetnega polja v skoraj realnem času. Observatorij je bil vključen v vozlišče EDI (Edinburgh, Scotland) kot observatorij TEST (Čop et al., 2011).

Po ukinitvi Visokošolskega središča Sežana in s tem tudi Geomagnetnega observatorija Sinji vrh so se začela pripravljala dela za postavitev geomagnetnega observatorija na robu

vasi Sv. Peter nad Dragonjo. Z mednarodno kodo PIA (Piran, Slovenia) je začel 1. januarja 2015 redno pošiljati merilne podatke o stanju geomagnetnega polja v mednarodno vozlišče EDI (Čop, 2015b). Za zanesljivo in varno delovanje tega observatorija je bilo potrebno razviti in zgraditi zanesljivo zaščito pred atmosferskimi razelektritvami (Čop et al, 2014) in proučiti vpliv Sonca na mobilno telefonijo (Čop, 2016a). Ker stoji observatorij v jugozahodnem delu Slovenije, v predelu z največjo gostoto strel v Evropi, se je temu prilagodila tudi enkratna konstrukcija triosnega magnetometra fluxgate zgrajenega posebej za observatorij PIA (Flux–Gate, 2014). Zato je ta observatorij postal vzorčni primer geomagnetnega observatorija za področja z veliko pogostostjo atmosferskih razelektritev (Čop, 2019). Pri njegovi gradnji je s svetovanjem in z merilnimi instrumenti za absolutne meritve (Jankowski & Sucksdorff, 1996; Čop, 2016b) sodeloval tudi V-OBS (IAGA Division V Working Group) (Support, 2019). Na njem so se izpeljale tudi originalne raziskave naravnih izvorov šuma v geomagnetnem polju: vpliv vremenskih front (Čop, 2015a) in vpliv napetosti Jadranske tektonske mikroplošče (Čop, 2017), na kateri je observatorij PIA skupaj z observatorijem CTS (Castello Tesino, Italy) edino merilno mesto te vrste.

Zaključek

Geomagnetni zavod Grocka je v nekdanji Jugoslaviji skrbel za geomagnetne meritve na celotnem njenem ozemlju. Po razpadu Jugoslavije je Geomagnetni zavod Grocka nadaljeval meritve na ozemlju Srbije in Črne gore (Mihajlović et al., 2006). V preteklem desetletju je bil vključen v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET kot observatorij IMO (INTERMAGNET Observatory).

Prizadevanja, da bi se tudi v drugih republikah nekdanje Jugoslavije nadaljevalo z geomagnetnimi meritvami in postavilo geomagnetne observatorije, so se v preteklem desetletju začela v Hrvaški, v Severni Makedoniji (Delipetrov, 2006) in v Sloveniji. Njihov razvoj je bil v vseh treh državah precej podoben in prepuščen tako imenovanemu prostemu trgu. Dogajanja v Sloveniji je opisano v predhodnem poglavju. V Severni Makedoniji so raziskovalci na področju geomagnetizma iz te države, kljub dobrem začetku, ostali pri terenskih meritvah na ponavljalnih postajah (Delipetrov et al., 2013). Na Hrvaškem ozemlju so geomagnetne meritve na ponavljalnih postajah naredili sodelavci Fakultete za geodezijo Univerze v Zagrebu (Brkić et al., 2012). Člani Geofizikalnega oddelka Prirodoslovne fakultete Univerze v Zagrebu pa so postavili geomagnetni observatorij v Lonjskem polju z mednarodno kodo LON (Mandic et al., 2016). Ta observatorij je bil v tem desetletju vključen tudi v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET kot observatorij IMO. Vzdržujejo ga usposobljeni in mednarodno priznani merilci geomagnetnega polja iz generacije srednjih let (Mandic & Korte, 2017).

Literatura

- Berger, J. Duma, G. Leichter, B. (2008). Geomagnetic Measurements in Slovenia 1998 Performed during the Geomagnetic Survey of Austria 1995-1998. Presented on International scientific conference on Magnetism-Geomagnetism-Biomagnetism MGB – 2008. Sezana: VSS Sezana.
- Brkić, M. Šugar, D. Pavasović, M. Vujić, E. Jungwirth, E. (2012). Croatian geomagnetic field maps for 2008.5 epoch. *Annals of geophysics*, 55 (6), 1061–1069.
- Courtillot, V., Le Mouel, J-L. (2007). The study of Earth's magnetism (1269–1950): a foundation by Peregrinus and subsequent development of geomagnetism and paleomagnetism. *Reviews of Geophysics*, 45, RG3008.

- Csontos, A. Hegymegi, L. Heilig, B. Kovács, P. Merényi, L. Szabó, Z. (2007). 50 Years of History of the Tihany Geophysical Observatory. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. Monographic Volume C-99 (398). Editor Jan Reda. XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory, Instruments, Data Acquisition and Processing. Belsk, 19-24 June 2006. Warszawa; Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, 32–37.
- Čop, R. (2015a). Snowstorm at the geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation Methodes and Data Systems*, 4, 155–159.
- Čop, R. (2015b). Zemeljsko magnetno polje in njegov vpliv na telekomunikacije. Kritična infrastruktura in IKT. Zbornik referatov. Uredil Tomi Mlinar. VITEL – Enaintrideseta delavnica o telekomunikacijah; 11. in 12. maja 2015 Brdo pri Kranju, Slovenija. Ljubljana: Elektrotehniška zveza Slovenije; Slovensko društvo za elektronske komunikacije, 29–33.
- Čop, R. (2016a). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (2), 197–211.
- Čop, R. (2016b). Absolutne meritve zemeljskega magnetnega polja. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015. Uredniški odbor. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 73–84.
- Čop, R. (2017). Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju. *Elektrotehniški vestnik*, 84 (4), 148–154.
- Čop, R. (2019). Poletna nevihta na geomagnetnem observatoriju. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018. Uredniški odbor. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 7–14.
- 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. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 71–80.
- Čop, R. Deželjin, D. Mihajlović, J. S. Kosovac, P. (2011). Preliminary Measurements of Geomagnetic-field Variations in Slovenia. *Elektrotehniški vestnik*, 78 (3), 96–101.
- Čop, R. Fefer, D. (2006). Nature of Earth's magnetic field and its application for commercial flight navigation. *Geomagnetics for Aeronautical Safety. A Case Study in and around the Balkans. NATO Security through Science Series*. Editors: Jean L. Rasson, Todor Delipetrov. Dordrecht (Netherlands): Springer Netherlands, 115–126.
- 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.
- Delipetrov, M. (2006). Activities completed toward establishing a geomagnetic observatory in the Republic of Macedonia. *Geomagnetics for Aeronautical Safety. A Case Study in and around the Balkans. NATO Security through Science Series*. Editors: Jean L. Rasson, Todor Delipetrov. Dordrecht (Netherlands): Springer Netherlands, 309–324.
- Delipetrov, M. Novkovski, N. Delipetrov, T. (2013). New geomagnetic measurements in the Republic of Macedonia. *Annals of geophysics*, 56 (3), R0327.
- De Michelis, P. Duma, G. (2012). Preface. 5th European Repeat Station (MagNetE) Workshop Rome, Italy 2011. *Annals of Geophysics*, 55 (6), 1051.
- Dobrić, B. (2009). Zbivanje u Puli krajem prvog svjetskog rata. Reformiranje Carske i kraljeve Ratne Mornarice i potopanje bojnog broda Viribus Unitis. *Storia Iustinopolitana, Annus II*, 1 (1), 43-64. Koper: Osrednja Knjižnica Srečka Vilharja.
- Duma, G. (1998). Results of geomagnetic measurements in Slovenia. Internal raport. Wien: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.
- EEMP. (1997). Eastern Europe Magnetic Project; Report 9: Slovenia. Report Number: G9753, Contract Code: G3594. Leeds (UK): University of Leeds; Department of Earth Sciences; Geophysical Exploration Technology (GETECH).
- Flux–Gate Magnetometer LEMI-022_SI. (2014). User Manual; S/N: 021. Lviv (Ukraine): KMS Technologies; Laboratory for Electromagnetic Innovations.
- Garland, G. D. (1979). The contributions of Carl Friedrich Gauss to geomagnetism. *Historia Mathematica*, 6, 5–29.
- Haalck, F. (1956). A Torsion-Magnetometer for Measuring the Vertical Component of the Earth's Magnetic Field. *Geophysical Prospecting*, 4, 4, 424 - 441.

- Jankowski, J. Sucksdorff, C. (1996). IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- 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*, 1, 63–76.
- Mandic, I. Korte, M. (2017). On the possibility of producing definitive magnetic observatory data within less than one year. *Acta Geophysica*, 65 (2), 275–286.
- Mandic, I. Vujic, E. Heilig, B. Pelajic, I. Herak, D. (2016). Recent efforts toward the establishment of the Lonjsko Polje Geomagnetic Observatory. *Acta Geophysica*, 64 (5), 1311–1339.
- Mihajlovic, J. S. Popeskov, D. Lazovic, C. Smiljanic, N. (2006). Geomagnetic Field Measurements at Magnetic Repeat Stations in Former Yugoslavia. *Geomagnetics for Aeronautical Safety. NATO Security through Science Series*. Edited by Jean L. Rasson and Todor Delipetrov. Dordrecht (NL): Springer Netherlands, 43-60.
- Miklič, F. (1968). Letno poročilo o regionalni magnetometrični izmeri območja centralne Slovenije in izdelavi regionalne magnetične karte SR Slovenije: 4. kvartal 1968. Opr. št. 222/1. Ljubljana: Geološki zavod.
- Mokrović, J. (1948). K problemu geomagnetizma u FNRJ. *Geodetski list, glasilo geodetskih sekcija Saveza inženjera i tehničara F. N. R. Jugoslavije*, II (718), 177–186.
- Newitt, L.R. Barton, C.E. Bitterly, J. (1997). IAGA Guide for Magnetic Repeat Station Surveys. International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- Paliska, D. Čop, R. Fabjan, D. Drobne, S. (2010). Izbira lokacije za postavitev geomagnetnega observatorija v Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 2010, 54 (3), 469–480.
- Stojković, M. Ćirić, B. Damjanović, K. (1974). Tolmač za geomagnetno katro SFR Jugoslavije, Anomalije vertikalne komponente, 1:500 000. Izdelal Geomagnetni inštitut Grocka. Beograd: Zvezni geološki zavod.
- Support for observatories. (2019). International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG; International Association of Geomagnetism and Aeronomy – IAGA; DIVISION V: Geomagnetic observatories, surveys and analyses – V-OBS, 2014. <https://www.bgs.ac.uk/iaga/vobs/> (17.10.2019)
- Volpi–Lisjak, B. (1997). Uporaba vulkanske zemlje z otoka Santorina za pomorske gradnje na vzhodnem in severnem Jadranu v času Avstrijske oblasti (Iz Državnega arhiva v Trstu). *Annales, Anali za istrske in mediteranske študije; Series historia et sociologia* 4, 10, 163–174.
- Zbornik za zgodovino naravoslovja in tehnike; History reviews-science and technology. (1979). Zvezek 4. Ljubljana: Slovenska matica.
- Žagar, T. Radovan, D. (2012). Model magnetne deklinacije za Slovenijo. *Geodetski vestnik*, 56 (2), 267–274.

Meteorološka sekcija v okviru SZGG

Gregor Skok*

Povzetek

Začetki meteorologije na Slovenskem segajo daleč v preteklost. Prve meteorološke opazovalnice na Slovenskem so bile postavljene v drugi polovici 18. stoletja. Takoj po prvi svetovni vojni je prejšnji dunajski Zavod za meteorologijo in geodinamiko (1851) zamenjal ljubljanski z enakim imenom (1919), po drugi svetovni vojni pa je bil 1947 ustanovljen Hidrometeorološki zavod Slovenije – vsi ti so delovali kot meteorološka (in na koncu tudi kot hidrološka) služba v Sloveniji. Na Univerzi v Ljubljani, kjer je meteorologija na tak ali drugačen način obstajala že od samega začetka univerze, je študij zaključilo približno 120 meteorologov (sicer z nekoliko različnimi nazivi tekom let). Meteorologija je ena izmed ustanovnih sekcij SZGG in tekom let je bilo v zbornikih srečanj SZGG na temo meteorologije objavljenih približno 33 prispevkov.

Ključne besede: zgodovina meteorologije, Slovenija

Keywords: history of meteorology, Slovenia

Uvod

Meteorološka sekcija v okviru Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (SZGG) je del širše zgodovine meteorologije na Slovenskem. O zgodovini meteorologije na Slovenskem je bilo že precej napisanega. O tej temi govori knjiga »Razvoj vremenoslovja na Slovenskem«, ki jo je leta 1980 napisal J. Pučnik (Pučnik, 1980). O razvoju meteorologije na Slovenskem je na prvem srečanju SZGG govoril tudi prof. Jože Rakovec (Rakovec, 1995). Pozneje je prof. Rakovec o zgodovini pisal še v prispevku v Vetrnici (Rakovec, 2018) in v publikaciji, ki jo je Fakulteta za matematiko iz fiziko izdala ob 100 letnici univerze (Rakovec, 2019). O zgodovini meteorološke službe je pisal tudi Jožef Roškar (Roškar, 2019).

V nadaljevanju sledi zelo kratek pregled zgodovine meteorologije, ki se naslanja predvsem na zgoraj omenjene vire. Pregledu splošne zgodovine meteorologije sledi še kratek pregled meteoroloških prispevkov, ki so bili predstavljeni na vsakoletnih strokovnih srečanjih SZGG.

Kratek pregled zgodovine meteorologije na Slovenskem

Začetki meteorologije na Slovenskem segajo daleč nazaj. Kot navaja Pučnik (1980) je Janez Vajkard Valvasor (1641-1693) v svojem obširnem delu *Slava Vojvodine Kranjske* (*Die Ehre deß Hertzogthums Crain*, Ljubljana, 1689) opisal vreme in podnebje deleže Kranjske, pri čemer pa njegovi opisi podnebja, vremena in vremenskih pojavov niso temeljili na strokovnih merjenjih, temveč le na preprostih, vizualnih, občasnih opazovanjih. Nekoliko pozneje je Anton Muznik (1726-1803), sicer zdravnik, napisal knjigo o klimi Goriške (*Clima Goritiense*, Goriška kmetijska družba, 1781). Prve meteorološke opazovalnice na Slovenskem, tedaj še pod Habsburžani, so bile postavljene v

* Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Univerza v Ljubljani

drugi polovici 18. stoletja. Najstarejše so opazovalnice v Trstu (od 1779), Gorici (od 1781) in Tolminu (od 1784). Po razpadu Avstro-Ogrske se je ljubljanska meteorološka opazovalnica preoblikovala v Zavod za meteorologijo in geodinamiko (ZMG) in prevzela naloge dunajskega Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Po 2. svetovni vojni je bila v Sloveniji leta 1947 ustanovljena Hidrometeorološka služba, ki je bila leta 1957 preimenovana v Hidrometeorološki zavod Ljudske republike Slovenije (HMZ), ta pa je bil leta 2001 preimenovan v Agencijo Republike Slovenije za okolje (ARSO) (Roškar, 2019).

Kot navaja Rakovec (2019) je na Univerzi v Ljubljani meteorologija na tak ali drugačen način obstajala že od same zamisli leta 1918 in začetka leta 1919. Prvotna zamisel je bila, da se jo vključi na Tehniško fakulteto in da je bil zanjo že na samem začetku predviden docent, vendar je - ker ni bilo primerne učitelja - menda Ferdinand Seidl (slednji bi bil primeren) predlagal, da se jo uvrsti h geografiji na Filozofski fakulteti, kjer je bila bolj ali manj deskriptivna vse do leta 1950. Pozneje je meteorologija prešla na Prirodoslovno matematično fakulteto, nato na Fakulteto za naravoslovje in tehnologijo in po razcepitvi te fakultete na več fakultet na Fakulteto za Matematiko in Fiziko (FMF), kjer je še danes. Prehod na obravnavo dogajanj v ozračju iz fizikalnih principov in z matematičnim orodjem je pričel Oskar Reya, pri katerem so diplomirali prvi tako izobraženi meteorologi. Reyo je nasledil Zdravko Petkovšek, pomagal pa mu je Andrej Hočevnar, sicer profesor Biotehniške fakultete. Petkovška so nasledili Jože Rakovec, Tomaž Vrhovec, Nedjeljka Žagar in Gregor Skok, sodelovali pa so tudi Janko Pučnik, Vital Manohin, Marijan Čadež (profesor na beograjski PMF), Bojan Paradiž, Lučka Kajfež-Bogataj (BF), Vlado Malačič (Morska biološka postaja Piran, Nacionalni inštitut za biologijo (NIB)) in Mark Žagar (ARSO in Vestas).

Kot naprej navaja Rakovec (2019) je do uvedbe študija »po bolonjsko« je študij končalo 116 meteorologov (sicer z nekoliko različnimi nazivi tekom let), nato pa z enakovrednim bolonjskim magisterijem še 6, znanstvenih magisterijev pa je bilo skupaj 17. Na UL FMF (in njenih predhodnicah) je bilo tudi 17 doktoratov iz meteorologije. Kar nekaj je še meteoroloških doktoratov, ali pa močno povezanih z meteorologijo na drugih fakultetah UL (prednjači BF) ali na drugih slovenskih univerzah. Študij meteorologije, najprej na PMF, potem na FNT in sedaj na FMF, je ves čas zagotavljal približno "ravno pravnje" število meteorologov za slovensko operativno meteorološko službo: za napoved vremena pa tudi za druge meteorološke dejavnosti, kot so kontrola in arhiv podatkov, klimatologija, varstvo zraka pred onesnaževanjem, meteorološke osnove za operativno hidrologijo itd. Vsi diplomanti so se brez težav zaposlili - seveda pa ne vsi v meteorološki službi. Po grobi oceni se jih je tam zaposlila okrog polovica, četrtnina kje drugje, a še vedno v meteorologiji, četrtnina pa kje povsem drugje. Tesno sodelovanje z operativno meteorologijo je neposredno pomagalo tudi študiju: strokovnjaki iz bivšega HMZ in sedanje ARSO so pomagali pri nekaterih predmetih (predvsem eksperimentalnih) in pri zaključnih delih: ali z idejami zanje, ali pa kot mentorji ali somentorji. Posebej je treba poudariti tudi pomoč Andreja Hočevnarja in Lučke Kajfež-Bogataj z Biotehniške fakultete z njunimi predavanji iz fizike ozračja, klimatologije, klimatskih sprememb idr.

Meteorologija v okviru SZGG

Meteorologija je ena izmed ustanovnih sekcij in je del SZGG že od samega začetka. Tekom let so bili predstavniki meteorološke sekcije prof. dr. Jože Rakovec, doc. dr. Tomaž

Vrhovec, dr. Mark Žagar, prof. dr. Nedjeljka Žagar in doc. dr. Gregor Skok. Prof. dr. Jože Rakovec je bil v obdobju 2010 – 2014 tudi predsednik SZGG.

V nadaljevanju je prikazan seznam vseh prispevkov iz področja meteorologije, ki so bili objavljeni v zbornikih srečanj SZGG. Skupno je bilo na temo meteorologije objavljenih približno 33 prispevkov. Vsebine nekaterih drugih prispevkov so sicer tudi precej prepletene s področjem meteorologije, a teh prispevkov nisem dodal na seznam saj bi jih lažje uvrstili pod kakšno drugo področje – na primer študije mikroklimе v različnih jamskih sistemih ali pa študije povezane s meritvami padavin, ki se primarno uporabijo za hidrološke namene. Glede na meteorološke prispevke lahko celotno obdobje, od začetka SZGG do danes, razdelimo na tri podobdobja.

V začetnih letih (od 1995 do 2001) sta bila avtorja prispevkov večinoma prof. dr. Jože Rakovec in doc. dr. Tomaž Vrhovec. V tem obdobju so bile predstavljene različne teme: zgodovina meteorologije na Slovenskem, numerični model za napovedovanje vremena ALADIN, priprave in delo v okviru mezometeorološkega alpskega programa MAP, modeliranje vetrov nad morjem v povezavi z morskimi tokovi in onesnaženjem v morju ter analiza obdobja intenzivnih padavin v zahodni Sloveniji.

Sledilo je drugo obdobje dolgo nekaj let (od 2002 do 2007), ko ni bilo meteoroloških prispevkov (razen leta 2004). Leta 2004 sta bila objavljena dva prispevka: uporaba modela ALADIN za klimatološke namene ter interpolacija 24-urnih padavin, izmerjenih na postajah, v pravilno mrežo.

Sledi zadnje obdobje, od leta 2008 naprej, ko je bil vsako leto objavljen vsaj en meteorološki prispevek (razen leta 2009). Še posebej v zadnjih letih je število prispevkov naraslo in v povprečju so vsako leto predstavljeni približno trije meteorološki prispevki. Tako avtorji kot predstavljene teme so precej raznolike: vetrovnost in sončna energija v Sloveniji, regionalno klimatsko modeliranje, študije podnebja in podnebnih sprememb, raznorazne študije povezane s kakovostjo zraka, uporaba meteoroloških meritev izmerjenih iz satelitov in iz tal, analiza pojavnosti in detekcija toče ter asimilacija meritev v meteorološke modele.

Seznam meteoroloških prispevkov v zbornikih srečanja SZGG:

- Zbornik za leto 1995
 - J. Rakovec - Razvoj meteorologije na Slovenskem
- Zbornik za leto 1997
 - T. Vrhovec, M. Žagar - Napovedovanje pojavov v meteorološki mezoskali z modelom ALADIN/SI
- Zbornik za leto 1998
 - T. Vrhovec - Mezometeorološki alpski program
- Zbornik za leto 1999
 - T. Vrhovec - Nekatera obdobja intenzivnih padavin v času MAP SOP
- Zbornik za leto 2000
 - T. Vrhovec, V. Malačič, G. Gregorič, B. Petelin - Numerično modeliranje vetrov in morskih tokov - disperzija polutantov v Koprskem zalivu
- Zbornik za leto 2001
 - J. Rakovec, T. Vrhovec - Meteorološka analiza padavin oktobra in novembra 2000 v zgornjem Posočju
- Zbornik za leto 2004
 - J. Cedilnik - Uporaba modela ALADIN v klimatološke namene

- G. Skok, T. Vrhovec - Interpolacija izmerjenih 24-urnih padavin v pravilno mrežo za namen primerjave z numeričnim modelom za napovedovanje padavin
- Zbornik za leto 2008
 - J. Rakovec, R. Bertalanič, J. Cedilnik, G. Gregorič, G. Skok, M. Žagar, N. Žagar - Vetrovnost v Sloveniji
 - J. Rakovec, D. Kastelec, K. Zakšek - Sončna energija v Sloveniji
- Zbornik za leto 2010
 - J. Rakovec, N. Žagar - Kaj vse za potrebe napovedovanja in opazovanja vremena in klime merimo s satelitov?
 - N. Žagar, J. Rakovec, G. Skok, L. Honzak - Izzivi regionalnega klimatskega modeliranja
- Zbornik za leto 2011
 - M. Rus, R. Žabkar, J. Rakovec - Modeliranje ozona in delcev za območje Slovenije z modelskim sistemom ALADIN-CAMx
- Zbornik za leto 2012
 - B. Breznik, P. Mlakar, M. Z. Božnar, B. Grašič - Modeliranje možnih neugodnih izpustov iz NE Krško z Lagrangeevim modelom delcev
 - G. Skok, B. Strajnar, J. Rakovec - Analiza toče v Sloveniji z uporabo radarskih podatkov: karta pogostosti, analiza trajektorij in uspešnost modelske napovedi
- Zbornik za leto 2013
 - R. Žabkar, L. Honzak - Napovedovanje kakovosti zraka z modelom WRF/Chem
 - G. Vertačnik, M. Dolinar, M. Nadbath - Od meteoroloških meritev do klimatoloških produktov
 - M.Z. Božnar, B. Grašič, P. Mlakar - Diagnoza in prognoza onesnaženja ozračja nad Slovenijo
- Zbornik za leto 2014
 - V. Hladnik, G. Skok - Objektiva analiza padavin iz satelitskih meritev, reanaliz ERA-Interim ter modela WRF na območju Evrope in Severnega Atlantika
 - M. Z. Božnar, B. Grašič, P. Mlakar, A.P. de Oliveira, J. Soares, D. Gradišar, J. Kocijan - Modeliranje difuznega sončnega obseva
- Zbornik za leto 2015
 - B. Strajnar, N. Žagar - Kaj in zakaj določa vpliv opazovanj na kvaliteto vremenskih napovedi: primer letalskih opazovanj Mode-S MRAR in prognostičnega modela ALADIN-Slovenija
 - M. Mole, L. Wang, A. Gregorič, K. Bergant, L. Drinovec, G. Močnik, S. Stanič, J. Vaupotič, M. Vučkovič - Študij atmosferskih procesov v Vipavski dolini na podlagi razširjanja aerosolov
 - M. Z. Božnar, B. Grašič, S. Vrbinc, D. Popović, D. Kokal, P. Mlakar - Novo orodje "sončnica" za analizo meritev z dnevnimi cikli
- Zbornik za leto 2016
 - S. Stanič, M. Mole, M. Živec - Meritve hitrosti gibanja zračnih mas v troposferi
 - K. Kozjek, M. Dolinar, G. Skok - Objektivna opredelitev podnebnih regij Slovenije
- Zbornik za leto 2017

- M. Šavli, N. Žagar - ADM-Aeolus: zgodovinski korak v merjenju vetra iz vesolja in priložnost za izboljšanje napovedi vremena
- M.Z. Božnar, P. Mlakar, B. Grašič, F. Gabrovšek - Avtomatske meritve vetra
- B. Paradiž, J. Cedilnik, H. Kočevar, I. Malešič, J. Turšič - Projekt Sinica-nadgradnja sistema za ocenjevanje kakovosti zraka in ugotavljanje vzrokov čezmernih obremenitev v Sloveniji
- G. Stržinar, G. Skok - Optimizacija algoritmov radarske detekcije toče za območje Slovenije (povzetek)
- Zbornik za leto 2018
 - M. Z. Božnar, P. Mlakar, B. Grašič, B. Breznik, J. Kocijan - Avtomatizacija procesov za sprotno ocenjevanje vpliva nuklearke na okolico
 - Medved, G. Vertačnik - Odprava pristranskosti v regionalnih podnebnih modelih
 - R. Bertalanič, G. Vertačnik, N. Lokošek, A. Medved, Ž. Vlahovič, M. Dolinar - Projekcije sprememb temperature zraka in padavin v Sloveniji do konca 21. stoletja
 - Ž. Zaplotnik, N. Žagar - Luščenje vetra iz aerosolov in vlage v 4D-Var asimilaciji opazovanj pri numeričnem napovedovanju vremena (povzetek)

Zaključki

Tako kot nekdanj tudi sedaj meteorologija ostaja pomembna veda. Meteorološka sekcija je, če zanemarimo nekajletno obdobje brez prispevkov v letih od 2002 do 2007, prispevala pomemben del prispevkov na letnih srečanjih SZGG – skupno približno 33 prispevkov. Vsebine prispevkov so odražale meteorološke teme, ki so bile takrat aktualne. Prof. dr. Jože Rakovec je bil v obdobju 2010 – 2014 tudi predsednik SZGG.

Literatura

- Pučnik, J. 1979: Razvoj vremenoslovja na Slovenskem, Zbornik za zgodovino naravoslovja in tehnike (Slovenska matica) 4, 9.
- Rakovec, J., 1995: Razvoj meteorologije na Slovenskem, Zgodovina slovenske geodezije in geofizike, 1.del, zbornik predavanj, SZGG.
- Rakovec, J., 2018: Sto let od ustanovitve Zavoda za meteorologijo in geodinamiko v Ljubljani. Vetrnica, 11, 11-18.
- Rakovec, J., 2019: Meteorologija. Prvih 100 let, FMF UL.
- Roškar, J.: 60 Let slovenske državne meteorološke službe. http://www.meteo-drustvo.si/data/upload/60_let_Meteo_2009.pdf. Dostop: 23.12.2019.

Razvoj hidrologije v Sloveniji

Mitja Brilly*, Katarina Zabret*, Klaudija Sapač*, Nejc Bezak*, Andrej Vidmar*, Matjaž Mikoš*, Mira Kobold*, Andrej Kryžanowski* in Mojca Šraj*

Uvod

Razvoj hidrologije ima v Sloveniji dolgo tradicijo, ki sega v drugo polovico 19. stoletja. Vzrok so bile predvsem potrebe izkoriščanja vodnih sil, posegi v vodotoke zaradi povečanja obdelovalnih površin in zaščita pred poplavami. Tako smo imeli prve vodomerne postaje postavljene že v sedemdesetih letih devetnajstega stoletja. Kresnik je svojo enačbo za izračun poplavnih pretokov objavil koncem 19. stoletja. Bolj sistematične meritve pretokov so se nadaljevale z ustanovitvijo urada za hidrologijo pri ministrstvu za gradnje Avstro-Ogrske monarhije, ki je skrbela za meritve in podatke objavljala v zbornikih. Strokovno delo po prvi svetovni vojni je povezano z ustanovitvijo Banske vodne uprave v Kraljevini Jugoslaviji. Meritve in opazovanja je takrat prevzela hidrometeorološka služba. Danes izredno dragoceni podatki meteoroloških in hidroloških meritev, so se sistematično zbirali in objavljali v letopisih. Po drugi svetovni vojni je razvoj dobil nov zagon zaradi melioracij in potreb izkoriščanja vodnih sil ter urejanja prostora. Najprej je bil ustanovljen zavod, ki je prerasel v Inštitut za vodno gospodarstvo, hidrologija pa je postala sestavni del kurikulumoma inženirskih znanosti. Hidrološke meritve so se izvajale pod okriljem Hidrometeorološkega zavoda. Nastala je obsežna mreža hidrometeoroloških postaj, predvsem za potrebe razvoja ugotavljanja in izkoriščanja hidroenergetskega potenciala. Opisna hidrologija se je po svoje razvijala znotraj geografskih znanosti.

Eksploziven razvoj v svetovnem merilu je hidrologija doživela z mednarodnim hidrološkim desetletjem v obdobju 1965-1975. Prišlo je do sodelovanja hidrologov tedaj sprtih držav ZDA in SSSR. Sodelovanje se je nadaljevalo v Mednarodnem hidrološkem programu IHP UNESCO, ustanovljenem leta 1975. V času SFRJ je delovalo zvezno društvo hidrologov, ki je vsake dve leti organiziralo znanstvena srečanja in objavljalo navodila za izvajanje hidroloških analiz in meritev. Takšno srečanje smo organizirali tudi na Bledu v letu 2008. Nad strokovnim delom slovenskega hidrometeorološkega zavoda je bedel Zvezni hidrometeorološki zavod, ki je v letopisih objavljajal preverjene merjene meteorološke in hidrološke podatke.

Pred samo osamosvojitvijo Slovenije, smo leta 1989 organizirali mednarodno srečanje »Regionalizacija v hidrologiji«. Srečanje je bilo organizirano s strani Združenja hidroloških znanosti (IAHS). Slovenski organizacijski odbor je vodil profesor Brilly, ki je bil sočasno tudi predsednik Jugoslovanskega društva hidrologov. Tako smo imeli ob osamosvojitvi neposredni stik z IAHS in bili seznanjeni z njeno organizacijo in delovanjem. Pogoj za priključitev v IAHS je bila organizacija slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko in njegovo članstvo v IUGG. Ker so tudi ostala društva, predvsem seizmologi in meteorologi imela podoben problem, je bil organiziran iniciativni odbor za ustanovitev SZGG, ki ga je vodil dr. Lapajne. Hidrološka sekcija je aktivno delovala vse od ustanovitve SZGG, to je od leta 1993 naprej.

Sočasno smo se povezali z Uradom za UNESCO v ustanavljanju in organizirali slovenski nacionalni odbor za mednarodni hidrološki program (IHP) UNESCO. IHP nam je omogočil sodelovanje pri različnih projektih IHP UNESCO. Tako smo se vključili v program FRIEND

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

(Flow Regimes from International Experimental and Network Data) in leta 1997 organizirali mednarodno konferenco v Postojni, FRIEND'97 - Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management (IAHS Publ. 246). Z vzpostavitvijo in vzdrževanjem številnih eksperimentalnih porečij v Sloveniji (npr. Brilly et al., 2002; Brilly in Globevnik, 2003; Brilly et al., 2004; Šraj, 2004; Brilly et al., 2006; Šraj et al., 2016) smo se aktivno vključili v ERB (Euromediterranean network of experimental and representative basins). Leta 1999 smo stopili v stik z Vrije Universitet Amsterdam in vzpostavili eksperimentalno opazovanje prestreženih padavin na porečju Dragonje. Rezultate raziskav na različnih eksperimentalnih porečjih smo objavili v znanstvenih člankih in predstavili na številnih konferencah ERB. V koordinacijo nacionalnih odborov IHP UNESCO porečja reke Donave smo bili vključeni takoj po osamosvojitvi. V letu 2008 smo organizirali tudi XXIV mednarodno konferenco na Bledu. V letu 2010 smo objavili knjigo »Hydrological Processes of the Danube River Basin Perspectives from the Danubian Countries« z dotodanjimi rezultati raziskav v porečju reke Donave. Na XXVII konferenci v Zlatih peskih, Bolgarija je bila Sloveniji zaupana koordinacija NO povodja reke Donave, na sestanku sveta IHP leta 2019 pa članstvo v Biroju IHP.

Koncem devetdesetih let 20. stoletja smo si uspeli izboriti področje Vodarstvo pri ARRS in tako zagotoviti raziskovalna sredstva na področju voda. V raziskovalnem delu smo bili vključeni v številne NATO, COST, Interreg, LIFE, Horizon, bilateralne in druge EU projekte, domače ARRS in druge projekte, kar je Katedri za splošno hidrotehniko (KSH) UL FG omogočilo izvajanje raziskav, sodelovanje na mednarodnih srečanjih, nabavo merilne opreme in vzdrževanje številnih eksperimentalnih porečij.

Leta 2016 smo dobili častni naslov UNESCO katedre za zmanjševanje tveganj ob vodnih ujmah na Univerzi v Ljubljani.

Članstvo v združenju CUAHSI (Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science) v ZDA, nam je omogočilo sodelovanje in prenos znanja vrhunskih dosežkov hidrologije. Bili smo med prvimi, ki so uporabili kopula funkcije pri statističnih hidroloških analizah (npr. Šraj et al., 2015; Bezak et al., 2014) in regularizacije pri umerjanju hidroloških modelov.

Dosežki hidrologije v preteklem obdobju so zasnovani predvsem na meritvah na eksperimentalnih porečjih, ki so bila osnova za več doktorskih disertacij in drugih zaključnih del v Sloveniji in v tujini. V 20-letnem obdobju je KSH vložila v merilno opremo sredstva v višini okoli milijon EUR. Oprema za mikro in makro meritve hitrosti vode v 3D tehniki je v vrhu svetovne opreme in enako velja za opremo za meritev temperature s pomočjo optičnega kabla. Trenutno je na terenu in v skladišču na razpolago več deset merilnikov padavin in sond za merjenje gladine vode, več disdrometrov za merjenje padavin, oprema za avtomatični odvzem vzorcev vode, merilnikov kalnosti in avtomatskih meteoroloških merilnih postaj (slike 1 – 17).



Slika 1 – Dežemer



Slika 2 – Merilnik snežnih padavin



Slika 3 – Vremenska postaja



Slika 4 – Disdrometer



Slika 5 – Sonda za merjenje globine vode



Slika 6 – Večnamenska sonda



Slika 7 – Merilnik hitrosti vode

Slika 8 – Merilnik hitrosti z merilnikom kalnosti



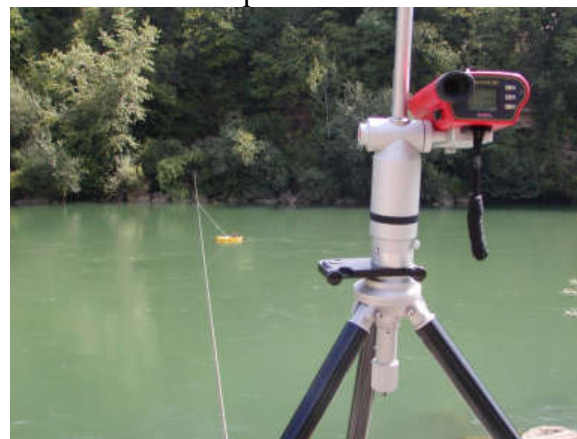
Slika 9 – Merjenje pretoka z metodo razredčenja



Slika 10 – Merjenje pretoka s trikotnim prelivom



Slika 11 – Merjenje pretoka s 3D sondo



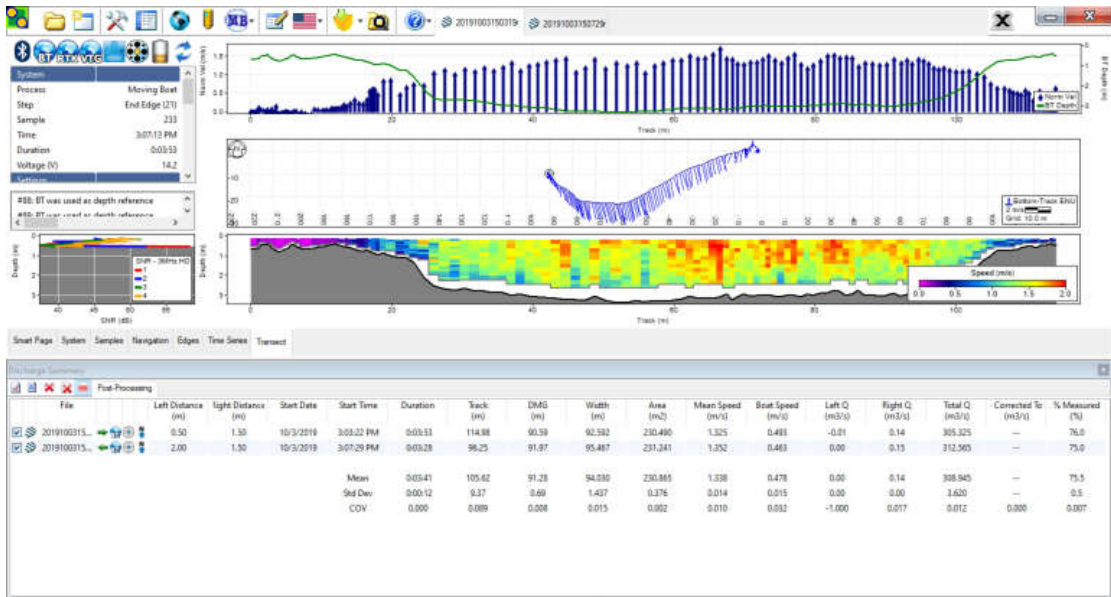
Slika 12 – Merjenje pretoka s 3D merilnikom



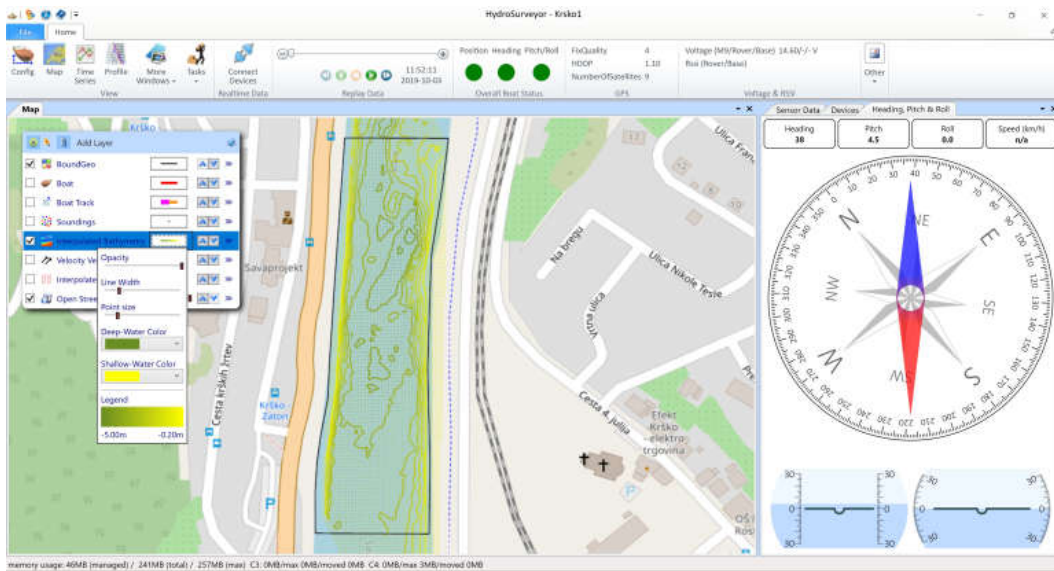
Slika 13 – Multiparameterska sonda



Slika 14 – Instrument za avtomatski odvzem vzorcev vode



Slika 15 – Rezultat meritev 3D hitrosti v prečnem profilu



Slika 16 – Rezultat meritve globlin v strugi reke Save



Slika 17 – Oprema za zbiranje in posredovanje podatkov

Eksperimentalna porečja – osnova za razvoj hidrologije v Sloveniji

Meritve prestrežanja padavin na KSH izvajamo že 20 let, vse odkar je bilo porečje Dragonje leta 1999 izbrano za eksperimentalno porečje. V sodelovanju z Vrije University of Amsterdam so na tem področju potekale različne raziskave o vplivih naravnega zaraščanja gozda na hidrološke pogoje (Šraj, 2004). Za meritve prestrežanja padavin sta bili izbrani dve raziskovalni ploskvi, na severnem in južnem pobočju, kjer smo merili padavine nad krošnjami mešanega listnatega gozda, prepuščene padavine ter odtok po deblu (slika 18) (Šraj, 2009). Rezultati meritev so pokazali, da je prestrežanje padavin gozdov v porečju Dragonje na letni ravni v povprečju enako 25-28 %, kar je znatno več od primerljivih študij in najverjetneje tudi razlog za zmanjšan površinski odtok (Šraj et al., 2008a). Meritve prestrežanja padavin smo na KSH leta 2004 dopolnili še s postavitvijo dodatne raziskovalne ploskve v Ljubljani, ob stavbi Oddelka za okoljsko gradbeništvo (Šraj et al., 2008b). Zaradi lokacije meritve omogočajo tudi analizo vplivov dreves na zmanjšanje odtoka v urbanem okolju (Zabret in Šraj, 2019a). Prepuščanje padavin in odtok po deblu na tej lokaciji spremljamo pod dvema vrstama dreves, navadno brezo in črnim borom (slika 19) (Zabret in Šraj, 2018a). Prav tako kot na Dragonji, tudi tukaj merimo količino padavin na prostem, količino prepuščenih padavin ter odtok po deblu. Merska oprema pa je tukaj dopolnjena še z dvema disdrometroma, s katerima na bližnji strehi in pod drevesi spremljamo tudi število, velikost in hitrost dežnih kapljic (Zabret in Šraj, 2018a). V zadnjem obdobju meritev (2014 – 2018) je breza v povprečju prestregla 23 %, bor pa kar 47 % padavin (Zabret et al., 2017). Analize vplivov meteoroloških spremenljivk na prestrežanje padavin so pokazale, da imajo največji vpliv količina padavin, njihova intenziteta in število dežnih kapljic (Zabret et al., 2018b; Zabret in Šraj, 2019b). Večje in hitrejše dežne kapljice hipoma povečajo prepuščanje padavin pod borom, ki se lahko poveča za 25 do 47 %, med tem ko lastnosti kapljic nimajo vidnejšega vpliva na prepuščanje padavin pri brezi (Zabret et al., 2017). Omenjana opazovanja so objavljena v 13 znanstvenih člankih.



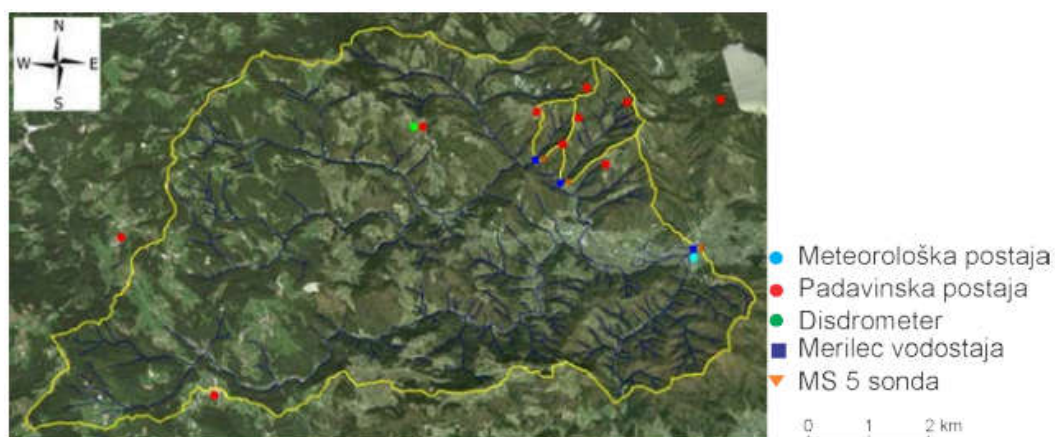
Slika 18 – Meritve odtoka po deblu na eksperimentalnem porečju Dragonje



Slika 19 – Raziskovalna ploskev v Ljubljani

Eksperimentalno porečje reke Gradaščice je eno izmed eksperimentalnih hidroloških porečij na območju Slovenije (npr. Šraj et al., 2016). Meritve na porečju Gradaščice so se izvajale tako na vodotoku Glinščica kot na vodotoku Gradaščica in njenih pritokih (Šraj et al., 2016). Meritve na porečju Gradaščice so se začele bolj intenzivno izvajati v sklopu mednarodnega projekta SedAlp (<http://www.sedalp.eu/>), ki je bil del programa Alpine Space, in se je osredotočil na integralno upravljanje s sedimenti na Alpskem območju. Tako sta bili manjši hudourniški porečji Kuzlovec in Mačkov graben določeni kot testni območji

v okviru omenjenega projekta (slika 20). Z namenom preučevanja dinamike erozijsko-sedimentacijskega kroga smo tako na omenjenih porečjih začeli z meritvami transporta sedimentov in erozijskih procesov (npr. Bezak et al., 2017a; Bezak et al., 2017b). Dodatno smo izvajali tudi meritve gladine vode, padavin in periodične meritve pretokov (npr. Bezak et al., 2013; slika 21). Na porečju Gradaščice pa smo za namen preučevanja erozivnosti padavin postavili tudi optični disdrometer, ki omogoča meritve hitrosti in velikosti dežnih kapljic (Ciaccioni et al., 2016). Meritve omenjenih spremenljivk oziroma procesov se na eksperimentalnem porečju Gradaščice še vedno izvajajo.



Slika 20 – Prispelno območje reke Gradaščice do vodomerne postaje Dvor in označeni lokaciji porečij Kuzlovec (manjše levo območje) in Mačkov graben (malce večje desno območje). Na sliki je prikazana tudi lokacija merske opreme. Povzeto po Bezak et al. (2013).



Slika 21 – Hudournik Kuzlovec v poletnih mesecih.

V letu 2018 smo predhodno vzpostavljeno mrežo merilnikov padavin na porečju Gradaščice (predvsem na območju Kuzlovca in Mačkovega grabna) nadgradili z dodatnimi dežemeri, obstoječe pa smo posodobili s sodobnejšimi zapisovalniki podatkov. Trenutno je na omenjenem eksperimentalnem porečju Kuzlovca, za katerega je značilna naravna raba tal (predvsem mešani gozd), poudarek na spremljanju dinamike vnosa in spiranja nitratnega dušika. Z več parametrskim merilnikom na iztoku s porečja z 20-minutnim časovnim korakom spremljamo naslednje fizikalne in kemijske parametre: temperaturo vode, pH, elektro prevodnost in koncentracijo nitratnega dušika (NO₃-N). Z meritvami želimo ugotoviti, kako različni padavinski dogodki (npr. intenziteta padavin in količina padavin) v

različnih letnih časih vplivajo na količino in dinamiko spranega nitratnega dušika iz porečja brez antropogenih vplivov. Prenosni, več parametrski merilnik, ki ga za zagotavljanje ustreznosti podatkov treba redno umerjati v laboratoriju, je na terenu nameščen predvsem v času padavinskih dogodkov. Ne glede na to pa smo v času od začetka meritev z znatno količino podatkov zabeležili tudi dogajanje v vodotoku v času baznega odtoka, ko lahko predvsem na podlagi temperature, pH in koncentracije nitratnega dušika, zaznamo dnevno dinamiko omenjenih parametrov. Ker predvidevamo, da na dinamiko spiranja in koncentracijo NO₃-N poleg hidrometeoroloških razmer vpliva tudi vegetacija, na porečju nekajkrat letno izvedemo tudi meritve indeksa listne površine (glej poglavje o prestrezanju padavin), s katerimi bomo opredelili vpliv fenoloških faz na količino NO₃-N v vodotoku. Dodatno pa smo v letu 2019 mersko opremo na porečju Kuzlovca dopolnili še z merilniki vlažnosti tal (slika 22) v treh globinah enega pedološkega profila (15, 40 in 70 cm), ki podatke o vsebnosti vode, natančneje volumen vode na volumen zemljine, prav tako beleži s časovnim korakom 20 minut. Ti podatki bodo pri analizi dinamike spiranja NO₃-N v veliki meri pripomogli k identifikaciji virov NO₃-N oziroma na splošno vode v vodotoku (površinsko spiranje, izcejanje iz globljih delov).



Slika 22 – Senzorji za merjenje vsebnosti vlage v tleh pred zasutjem profila (levo) in zapisovalnik podatkov s senzorjev (desno).

Zvezne meritve hidrometeoroloških razmer in kemizma vode (nitrat, amonij) z relativno kratkim časovnim korakom so se izvajale že v letih 2006 in 2007 na območju gozdnatega območja vodotoka Padež, za katerega je značilna hitra odzivnost na padavinske dogodke. Na podlagi hidrogramov, posnetih v času izvajanja meritev so bile zaznane močne povezave med hidrološkimi in biogeokemičnimi kontrolnimi mehanizmi (Rusjan et al., 2008). Ugotovitve, izhajajoče iz merjenih podatkov in njihovih analiz, so pokazale, da je vloga posebnih hidroloških dogodkov (različna intenziteta in količina padavin, trajanje padavin ipd.) zelo pomembna za napovedovanje koncentracij spiranja hranil s porečja, vendar pa se njihova količina lahko bistveno spreminja glede na podnebne, pedološke in vegetacijske dejavnike v porečju (Rusjan et al., 2008; Rusjan in Mikoš, 2008). Izmerjeni podatki imajo veliko vrednost pri izračunih masnih bilanc hranil. V obeh letih meritev se je izkazalo, da je bilo v porečje z atmosfersko depozicijo vnesena večja količina raztopljenega anorganskega dušika, kot se ga je iz porečja spralo (Rusjan in Vidmar, 2017). Še več informacij pa je

razkrila mesečna obravnava podatkov, ki je pokazala, da porečje v zimskih in zgodnjih spomladanskih mesecih deluje kot vir dušika, medtem ko preostali del leta igra vlogo ponora (Rusjan in Vidmar, 2017).

Porečje Ljubljaniče lahko zaradi obsežnih kraških sistemov opredelimo kot hidrogeološko nehomogeno. Sledenje in vrednotenje poti vodnega tok vzdolž porečja predstavlja zato zelo kompleksno nalogo. Vendar pa so se v preteklih nekaj desetletjih tudi na področju hidrologije začeli uporabljati podatki stabilnih izotopov (predvsem kisika in vodika), ki so naravno prisotni v vodi, da bi pomagali odgovoriti na vprašanja kam se steka voda po padavinskih dogodkih in kako pride do vodotokov. Na območju celotnega porečja Ljubljaniče, ki meri približno 1880 km², smo tako med majem 2016 in majem 2018 spremljali vsebnost izotopov kisika in vodika ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) v padavinskih vzorcih in vzorcih, zajetih v ponorih, jezerih in izviri. Padavine smo vzorčili na 7 lokacijah, medtem ko smo za zajem površinskih voda določili 14 lokacij na celotnem porečju (Rusjan et al., 2019). V vzorcih so bile poleg koncentracij izotopov izmerjene tudi druge fizikalno-kemijske lastnosti: temperatura, pH, elektro prevodnost. Vzorce smo analizirali enkrat mesečno, pri čemer so bili padavinski vzorci kumulativni (celotne padavine enega meseca so bile zbrane v posodi, shranjeni v temnem in hladnem prostoru), vzorce površinskih vod pa smo zajeli enkrat na mesec v različnih hidroloških razmerah (visoki pretoki, nizki pretoki). Izmerjene podatke smo dopolnili s podatki o pretokih in padavinah z merskih postaj Agencije za okolje RS.

Simulacija hidroloških procesov s pomočjo hidroloških modelov ima dolgo zgodovino in pester razvoj. Relativno velika odstopanja med rezultati simulacije in meritvami so še vedno izziv številnim raziskovalcem in so v večji meri posledica pomanjkanja znanja. Vzroki za odstopanja so različni od pomanjkanja podatkov, napak pri meritvah vhodnih in izhodnih spremenljivk do strukture modela in določanja njegovih parametrov. Zaradi nelinearnih enačb in številnih parametrov je postopek umerjanja modela zelo pomemben. Kakovost umerjanja ocenjujemo s sintetičnimi rezultati. Rezultat računa z znanimi parametri upoštevamo kot osnovo za umerjanje. Zadnje čase je vse bolj popularen postopek pri kateri iščemo inverzne rešitve enačb determinističnega konceptualnega modela s pomočjo Gaussu-Marquardt-Levenbergu (GLM) transformacije z uporabo singularnega razcepa in Tihonovo regularizacijo. Program PEST, ki se je uveljavil pri umerjanju parametrov modela podtalnice, smo uporabili za umerjanje modela HBV-light in dobili skoraj popolno skladanje med računi in meritvami (preglednica 1).

Preglednica 1 – Primer rezultatov učinkovitosti modela

Učinkovitost modela	Računski šum	GLM	GAP
Determinacijski koeficient	0.99999986	0.99999985	0.98427475
NSE	0.99999986	0.99999985	0.98003139
Kling-Gupta	0.99999026	0.99998011	0.93638967
Učinkovitost za log(Q)	0.99999888	0.99999887	0.94828924
Pretočno utežena učinkovitost	0.99999997	0.99999996	0.98843674
Povprečna razlika	0.00282528	0.00382001	18.47635686
Učinkovitost za konice	0.99999998	0.99999997	0.98586698
Napaka v volumnu	0.99999044	0.99998708	0.93748858

Literatura

- Bezak, N., Mikoš, M., Šraj, M. (2014b). Trivariate Frequency Analyses of Peak Discharge, Hydrograph Volume and Suspended Sediment Concentration Data Using Copulas, *Water Resources Management*, 28, 2195–2212.
- Bezak, N., Grigillo, D., Urbančič, T., Mikoš, M., Petrovič, D., Rusjan, S. 2017a. Geomorphic response detection and quantification in a steep forested torrent. *Geomorphology*, 291, 33-44.
- Bezak, N., Rusjan, S., Kramar Fijavž, M., Mikoš, M., Šraj, M. 2017b. Estimation of Suspended Sediment Loads Using Copula Functions. *Water*, 9, 628.
- Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2013. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben. *Acta hydrotechnica*, 26(45), 85-97.
Dostopno na: http://ksh.fgg.uni-lj.si/KSH/acta_articles/a26nb.htm
- Brilly, M., Globevnik, L. 2003. Sustainable water resources management in the Dragonja catchment, Slovenia, *Water resources systems-hydrological risk, management and development : proceedings of an international symposium. The XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Sapporo, Japan*, 334-340.
- Brilly, M., Mikoš, M., Petkovšek, G., Šraj, M., Kogovšek, J., Drobne, D., Štraus, L. 2002. The experimental monitoring of the water regime in the Reka river, *Acta carsologica*, 31(1), 65–74.
- Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar, A. 2006. Monitoring the impact of urbanisation on the Glinscica stream. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 31(17), 1089–1096.
- Brilly, M., Toman, M.J., Rusjan, S. 2004. Monitoring the impacts of urbanisation on the ecological state of river water bodies in the Gradascica catchment. *Progress in surface and subsurface water studies at the plot and small basin scale: 10th Conference of the Euromediterranean network of experimental and representative basin (ERB) Turin, Italy*, 41-52.
- Ciaccioni, A., Bezak, N., Rusjan, S. 2016. Analysis of rainfall erosivity using disdrometer data at two stations in central Slovenia. *Acta hydrotechnica*, 29(51), 89-101. Dostopno na: http://ksh.fgg.uni-lj.si/KSH/acta_articles/a29ac.htm
- Rusjan, S., Brilly, M., Mikoš, M. 2008. Flushing of nitrate from a forested watershed: An insight into hydrological nitrate mobilization mechanisms through seasonal high-frequency stream nitrate dynamics. *Journal of hydrology* 354 (1-4): 187-202.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.009>
- Rusjan, S., Mikoš, M. 2008. Assessment of hydrological and seasonal controls over the nitrate flushing from a forested watershed using a data mining technique. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12: 645-656. <https://doi.org/10.5194/hess-12-645-2008>
- Rusjan, S., Vidmar, A. 2017. The role of seasonal and hydrological conditions in regulating dissolved inorganic nitrogen budgets in a forested catchment in SW Slovenia. *Sci Total Environ* 575: 1109-1118. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.178
- Rusjan, S., Sapač, K., Petrič, M., Lojen, S., Bezak, N. 2019. Identifying the hydrological behavior of a complex karst system using stable isotopes. *Journal of hydrology* 577: 123956.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123956>
- Šraj, M. 2004. Določanje indeksa listne površine listnatega gozda na povodju Dragonje. Del 2, Rezultati in diskusija. Part 2, Results and discussion. *Acta hydrotechnica* 22, 36, 1-15. Dostopno na: <ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a36ms.pdf>
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2008a. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and forest meteorology* 148, 1, 121-134.
- Šraj, M., Lah, A., Brilly, M. 2008b. Meritve in analiza prestreženih padavin navadne breze (*Betula pendula* Roth.) in rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.) v urbanem okolju. *Gozdarski vestnik* 66, 9, 406-416.
- Šraj, M. 2009. Prestrežne padavine : meritve in analiza. *Geografski vestnik* 81, 1, 99-111.
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. 2015. Bivariate flood frequency analysis using the copula function: A case study of the Litija station on the Sava River, *Hydrological Processes* 29(2), 225-238.
- Šraj, M., Bezak, N., Rusjan, S., Mikoš, M. 2016. Review of hydrological studies contributing to the advancement of hydrological sciences in Slovenia. *Acta hydrotechnica*, 29(50), 47-71. Dostopno na: http://ksh.fgg.uni-lj.si/KSH/acta_articles/a29ms.htm

- 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* 12, 8, 1-15.
- Zabret, K., Šraj, M. 2018a. Spatial variability of throughfall under single birch and pine tree canopies. *Acta hydrotechnica* 31, 54, 1-20. Dostopno na:
http://ksh.fgg.uni-lj.si/KSH/acta_articles/a31kz.htm
- Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M. 2018b. 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. 2019a. Rainfall interception by urban trees and their impact on potential surface runoff. *Clean - soil, air, water* 47, 8, 1-8.
- Zabret, K., Šraj, M. 2019b. Evaluating the influence of rain event characteristics on rainfall interception by urban trees using multiple correspondence analysis. *Water* 11, 12, 2659, 1-13.

Fizikalna oceanografija v Sloveniji: kratek oris ob petindvajsetletnici delovanja Slovenskega društva za geodezijo in geofiziko

Matjaž Ličer*, Dušan Žagar** in Vlado Malačič

V tem prispevku bomo orisali nekatere ključne korake v razvoju fizikalne oceanografije v Sloveniji. Pri tem se bomo zlasti naslonili na eksperimentalne in modelske napore, ki so v preteklih desetletjih potekali na Morski biološki postaji (MBP) Nacionalnega inštituta za biologijo, na numerične modele morja, ki so jih in jih še razvijajo na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FGG). Izpostavili bomo tudi morske merilne postaje, ki danes delujejo v okviru Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). Kot bomo videli, lahko zaradi omenjenih naporov danes trdimo, da slovensko morje, vsaj kar se tiče postavitve in gostote merilnih postaj in numeričnih modelov, sodi med dobro pokrita območja. Če pomislimo, da je slovensko morje plitko ter izpostavljeno številnim antropogenim pritiskom (luki v Kopru in Trstu, poseljenost obalnega pasu, rast turizma in pomorskega prometa), je to nadvse dobrodošlo dejstvo, saj brez tovrstnih podatkov ni mogoče sprejemati utemeljenih odločitev o trajnostnem ravnanju z morjem.

Opazovanja

Med zaslužnimi, ki so utirali pot meritvam fizikalnih parametrov in lastnosti severnega Jadrana, s tem pa tudi slovenski oceanografiji, velja izpostaviti morskega biologa prof. dr. Jožeta Štirna, ki je leta 1965 vodil prva sistematska vzorčenja stanja morja v severnem Jadranu. Rezultate teh vzorčenj je kasneje (1968) obravnaval geograf France Bernot ter v besedilu opisal razširjenost oslajene vode, ki izteka iz ustja reke Pad.

V letu 1970 se je prof. Štirn vključil v delo Morske biološke postaje (MBP), ki je bila tedaj ustanovljena v okviru Inštituta za biologijo Univerze v Ljubljani. Prof. Štirn je MBP v obdobju 1970-1977 tudi vodil. Z ustanovitvijo MBP je oceanografija kot znanstvena panoga dobila svoj prvi institucionalizirani oziroma znanstveni prostor. To ni zanemarljivo, saj so za uspešno znanstveno delo potrebni tako usposobljeno osebje kot primerna infrastruktura.

Prve uspešne in zabeležene meritve tokovanja so raziskovalci MBP opravili v letih 1986-1987, čeprav so bili prvi, a žal neuspešni poskusi, opravljeni že v sedemdesetih letih. V devetdesetih letih so vpeljali redna mesečna vzorčenja Tržaškega zaliva, ki so predpogoj za analizo sezonske dinamike stanja morja. Leta 1991 so na MBP vpeljali prve sistematične meritve slanosti s t.im. 'file scale profiler' sondo (University of Western Australia, Perth), boljše izvedenko 'CTD' sonde (conductivity, temperature depth), ki so temeljile na meritvah električne prevodnosti morske vode. Pred tem so slanost merili z določevanjem koncentracije kloridov v morski vodi. S tem so si odprli vrata v kvantitativno obravnavo stratifikacije (vertikalnega profila gostote) vodnega stolpca in zalivske geostrofske cirkulacije, o čemer je v devetdesetih letih pisal prof. dr. Vlado Malačič.

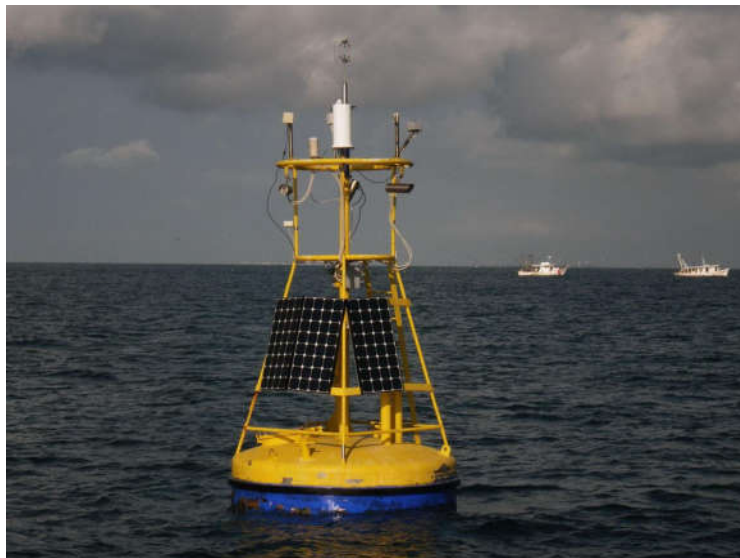
V letu 2000 so na pozicijo današnje boje Vida (dva kilometra severno od Piranskega rta Madona) postavili prvo testno oceanografsko merilno postajo, ki je bila leta 2002 zamenjana z operativno in delujočo oceanografsko bojo COSP (Coastal Oceanographic Station Piran)

* Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Fornače 41, Piran

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

s podatkovno bazo in zajemom podatkov v realnem času. Leto 2002 tako pomeni začetek operativne eksperimentalne oceanografije na MBP. Operativne meritve odtlej potekajo neprekinjeno. Iz njih smo se naučili, da se lahko tokovanje na površini celo v plitkih morjih, kot je severni Jadran, bistveno razlikuje od tistega pri dnu, in da za dober modelski opis pogosto potrebujemo visoko ločljive tridimenzionalne numerične modele. Neprekinjen niz meritev omogoča vpogled v spremembe morskega okolja na desetletni časovni skali.

Nabor parametrov, ki jih je merila boja COSP, je leta 2008 zrasel, bojo pa so preimenovali v Vido. Danes boja Vida predstavlja merilni sistem s senzorji za valove, temperaturo, slanost, koncentracijo klorofila-a ter raztopljeni kisik. V bližine boje je na morskem dnu akustični Dopplerski merilnik morskih tokov (ADCP), ki na svoji lokaciji meri horizontalne tokove na vsak vertikalni meter vodnega stolpca. Meritve so v realnem času javno dostopne na spletni strani MBP, kjer so poleg podatkov na voljo tudi osnovne vizualizacije merjenih parametrov. Merjeni podatki so na voljo tudi v vseh najpomembnejših okoljskih podatkovnih servisih Evropske unije, kot sta EMODnet in SeaDataNet.



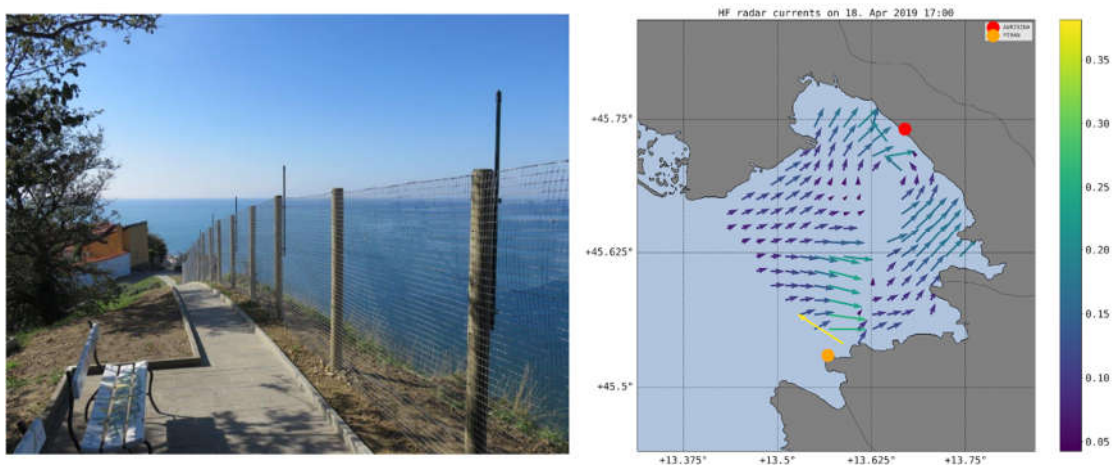
Slika 1. Oceanografska boja Vida. Fotografija: Tihomir Makovec, NIB.

ARSO zagotavlja meritve nivoja gladine v Kopru od leta 1961 dalje. Prvotni mareograf je stal na Ukmarjevem trgu, leta 2005 pa so zaradi zagotavljanja kontinuitete meritev na isto mesto postavili novo mareografsko postajo ter poskrbeli za homogenizacijo meritev ob prehodu med obema senzorjema. Ti podatki so v kontekstu podnebnih sprememb ključni za spremljanje letne in desetletne spremenljivosti morske gladine v Tržaškem zalivu. Te meritve kažejo, da smo v zadnjih tridesetih letih priča pospešenemu dvigu srednje gladine morja, ki znaša približno 5 mm na leto. Enako rast izkazujejo tudi podatki s Tržaške mareografske postaje.

Na ARSO so v januarju 2014 v okviru projekta BOBER zasidrali dve novi oceanografski boji, ter ju krstili za Zoro in Zarjo. Boji na svojih lokacijah merita višino in smer valovanja, površinsko temperaturo morja ter tokove po vodnem stolpcu.

Omenjene meritve, ki jih zagotavljajo boje in mareografska postaja v Kopru, so točkovne meritve. V zadnjih letih pa so postali cenovno relativno dostopni tudi (dvodimenzionalni) radijski merilniki površinskih tokov in valov. Ti merilniki merijo Dopplerske premike radijskih elektromagnetnih valov, ki se sipljejo na morskih površinskih valovih ter na podlagi frekvenčnih premikov zaradi gibanja vodnih mas in Braggovega uklona omogočajo dvodimenzionalno rekonstrukcijo tokovnega polja v celotnem merilnem območju sistema.

Tak sistem sta v Tržaškem zalivu postavila MBP ter italijanski Inštitut za oceanografijo in eksperimentalno geofiziko OGS iz Trsta. S tem merilnim sistemom lahko naenkrat izmerimo celotno površinsko tokovno polje v Tržaškem zalivu. To nam po eni strani omogoča edinstven vpogled v površinsko tokovanje na raznolikih prostorskih in časovnih skalah, po drugi pa odpira možnost kalibracije ter izboljšanja natančnosti numeričnih oceanskih modelov.



Slika 2. Levo: radijske antene merilnika površinskih tokov in valov. Desno: izmerjeno površinsko tokovanje v Tržaškem zalivu.

Poleg naštetih merilnih sistemov ekipa MBP z lastnim raziskovalnim plovilom že desetletja opravlja redne mesečne meritve temperature, slanosti in raztopljenega kisika na merilnih postajah v Slovenskem akvatoriju, opravili pa so tudi meritve drsenja plovcev v površinskih plasteh morja.

Numerični oceanografski modeli

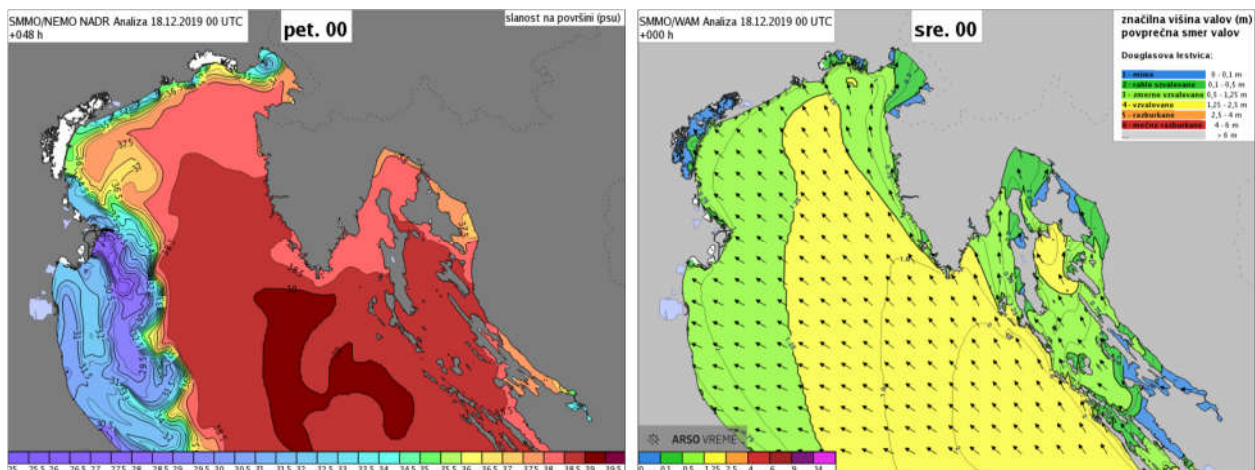
Poenostavljene probleme cirkulacije vodnih mas lahko rešujemo analitično, kompleksnejše, ki zajemajo hkrati več odvisnosti med fizikalnimi opazljivkami, pa rešujemo z računalniškimi simulacijami oziroma numeričnimi modeli. Med analitičnimi pristopi omenimo prof. dr. Draga Bajca, ki je v sedemdesetih letih obravnaval lastna nihanja Jadranskega bazena ter ocenil njegove najnižje lastne periode, ter Braneta Solomuna, ki je v diplomskem delu z modelom končnih elementov reproduciral temeljne lastnosti plimovanja Jadranskega morja. V devetdesetih letih se je z analitičnim vertikalno povprečenim opisom odziva morja na potujoče valove v zračnem pritisku intenzivno ukvarjal prof. dr. Vlado Malacič.

Numerični modeli so v raziskave vodnih mas skozi glavna vrata vstopili šele v poznih osemdesetih letih, ko je računalniška procesorska moč postala široko dostopna. Takrat je prof. dr. Rajar na UL FGG začel razvoj 3D numeričnih modelov za račun cirkulacije, hkrati pa tudi razvoj modelov turbulence. S temi modeli so bili izvršeni prvi računi cirkulacije slovenskega morja in Severnega Jadrana. Tridimenzionalni model PCFLOW3D je bil zasnovan na modelu TEACH-2 in razširjen v tretjo dimenzijo z upoštevanjem hidrostatične aproksimacije in možnostjo upoštevanja spremenljive gostote zaradi vpliva slanosti in temperature. Preizkušene so bile tudi različne numerične sheme in enostavni modeli turbulence.

V zgodnjih devetdesetih letih se je nadaljevala uporaba teh modelov v računih kakovosti morja, vedno s poudarkom na predhodno določeni cirkulaciji. Model PCFLOW3D je dobil dopolnitev v modelu sledenja delcev PTM3D, ki je bil uporabljen tudi kot operativno orodje Ministrstva za obrambo ob potencialnih razlitjih nafte. Nadaljnje dopolnitve modela zajemajo nadgradnjo z BGK modulom za živo srebro, privzdigovanje in transport sedimenta in nanj vezanih onesnažil.

Raziskave cirkulacije in transporta onesnažil z modelom PCFLOW3D so potekale na različnih območjih (Sredozemlje, Tržaški zaliv, Koprski zaliv, Yatsushiro Sea, Minamata Bay, lagune v Mehiki, otočje Fangataufa). V model PCFLOW3D so bili sčasoma dodani novejši modeli turbulence, model za privzdigovanje in transport sedimentov pa je bil dopolnjen z možnostjo obravnave kohezivnih sedimentov. Končna verzija modela omogoča račun privzdigovanja sedimenta zaradi kombiniranega vpliva tokov, valov in plovbe. V nekaterih primerih se je za simulacije valovanja izkazala primerna metoda SPH (smoothed particle hydrodynamics), ki omogoča opis naglih sprememb gladine, obobalnih pojavov (odboj, sipanje, interferenca, rušenje); pri teh je bil uporabljen model Dual SPHysics.

V istem obdobju, tj. v devetdesetih letih, sta Vlado Malačič in Boris Petelin na MBP vzpostavila prve numerične modele plimovanja Jadranskega morja ter severnega Jadrana, ter jih uporabila za študije cirkulacije ter za opis poldnevne plime kot superpozicije Kelvinovih valov. Prve različice modelov, ki so kasneje (december 2009) postale operativne in so se dnevno zaganjale za prognozo cirkulacije, so temeljile na javno dostopni kodi z univerze Princeton (Princeton Ocean Model - POM) in so omogočale dnevno izračunavanje plimovanja, cirkulacije, elevacije proste gladine ter temperaturnih in slanostnih polj v celotnem modelskem bazenu, ki je bil tedaj omejen na področje severnega Jadrana zahodno od Istre ter Tržaški zaliv. Z modelom POM, postavljenim na severnem Jadranu, je bila potrjena topografska kontrola vetrnih tokov, ter razvita podrobnejša slika izmenjave vodne mase Tržaškega zaliva s severnim Jadranom. Jadranska različica modela POM je bila uporabljena za študije interakcij atmosfere in oceana med močno burjo. Raziskovalci z MBP so skupaj s kolegi z ARSO ter s kolegi z Oddelka za fiziko in modeliranje oceanov Univerze v Atenah uspešno izpeljali dvosmerno sklopitev med atmosferskim modelom ALADIN SI ter modelom Jadranskega morja (Adriatic POM ali ADRIPOM). Z dvosmerno sklopljenim sistemom je bilo možno podrobno študirati medsebojne vplive ter turbulentne pretoke prek morske gladine, pa tudi vpliv morja na atmosfero med močnimi lokalnimi padavinskimi dogodki. Sodelovanje med MBP in UL FGG je vodilo v študijo vpliva interakcij med morjem in atmosfero na izhlapevanje živega srebra iz (Jadranskega) morja z globokim mešanim slojem.



Slika 3. Levo: slanostno polje cirkulacijskega modela NEMO. Desno: značilna višina in smer površinskih gravitacijskih valov iz modela WAM. Oba modela se dnevno zaganjata na superračunalniku ARSO.

Po letu 2015 so raziskovalci na MBP in ARSO začeli uporabljati najnovejše in najkompleksnejše numerične modele morja, kot sta ROMS in NEMO. Ti modeli so bili uporabljeni za študije širjenja meduz v Jadranu ob prisotnosti antropogenih struktur (npr. naftne ploščadi) ter za izboljšane operativne ansambelske napovedi obalnih poplav ob izrednih vremenskih dogodkih. Za izračune generacije in propagacije površinskih gravitacijskih valov je trenutno na ARSO v uporabi najnovejša verzija modela WAM, ki ga razvijajo in vzdržujejo na Evropskem centru za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF).

V zadnjem času so postala možna tudi podatkovna rudarjenja po ogromnih količinah merjenih in modelskih podatkov, ki se naslanjajo na nove pristope za učinkovito analizo in interpretacijo. Raziskovalci na MBP so se tako v zadnjih letih ukvarjali z algoritmi teorije grafov za iskanje značilnih struktur v površinski cirkulaciji, ter z njimi študirali sezonsko in medletno spremenljivost, pa tudi dolgoročne prehodne pojave kot je denimo desetletna oscilacija vrtinčnosti v površinski plasti Jonskega morja.

Zaključek in projekcije

Naše razumevanje dogajanja v morju je odvisno od treh dejavnikov: količine javno dostopnih opazovanj, numeričnega modeliranja ter teoretičnega znanja. Število meritev v globalnih morjih močno zaostajajo za denimo meteorologijo, se pa z novimi sateliti ter novimi bojami in obalnimi merilnimi sistemi stanje izboljšuje. Numerični modeli, ki se po eni strani naslanjajo na vedno zmogljivejše superračunalnike, po drugi na nova fizikalna spoznanja, ravno tako napredujejo. Oboje je vsekakor razlog za optimizem. Bolj zaskrbljujoče je, da znanstveniki že dolgo opozarjajo na temeljno vlogo oceanov v klimatski dinamiki našega planeta, pa imajo njihovi napori vseeno močno omejen doseg. Temeljni izzivi oceanografije so po znanstveni plati najbrž dokaj jasni: dobro razumeti ocean v vsej njegovi kompleksnosti in pestrosti, ter na podlagi tega razumevanja oblikovati ustrezne okoljske, energetske in ekonomske politike. Domet osvojenega znanja pa bo dobro izkoriščen le, če bodo odločevalci imeli posluš za znanost.

Zgodovina Sekcije za kriosfero pri Slovenskem združenju za geodezijo in geofiziko

Mihaela Triglav Čekada*, Polona Vreča**

Povzetek

V Sloveniji se različni strokovnjaki ukvarjajo s preučevanjem snega in ledenikov že vrsto let. Da bi bolje povezali raziskovalce in znanje na tem področju, predstavili njihove dejavnosti in bolj usklajeno delovali tako v Sloveniji kot na širšem mednarodnem področju ter se včlanili v International Association of Cryospheric Sciences (IACS), smo leta 2012 v okviru Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (SZGG) ustanovili Sekcijo za kriosfero. V članku je podan pregled delovanja sekcije od ustanovitve do danes.

Ključne besede: kriosfera, sneg, led, Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, IACS, IUGG

Key words: cryosphere, snow, ice, Slovenian association of geodesy and geophysics, IACS, IUGG

Uvod

Kriosfera obravnava vse pojavnosti snega in ledu ter stalno zamrznjenih tal (permafrost). Obravnava njihovo današnjo kot tudi historično pojavnost. V okviru raziskav kriosfere med drugim lahko preučujemo: metamorfozo snega in ledu, fizikalne lastnosti snežne odeje (višina snežne odeje, snežni plazovi), kemijsko sestavo snega in ledu, vpliv snega in njegovega taljenja na napajanje vodonosnikov in površinski odtok, pojavnost in obnašanje današnjih snežišč in ledenikov, preučevanje pretekle poledenitve iz geoloških in geomorfoloških ostalin (npr. pleistocenska poledenitev), preučevanje obnašanja današnjega in preteklega permafrosta (npr. preučevanje reliktnih kamnitih ledenikov), preučevanje poledenitev in permafrosta v jamah (npr. poligonalna tal). Tudi v Sloveniji se različne inštitucije že dolgo ukvarjajo z različnimi zgoraj opisanimi temami. Omenimo lahko preučevanje in poučevanje geomorfologije ledeniškega reliefa, ki ju že dolgo izvajajo na Filozofski fakulteti Univerze v Ljubljani (npr. Kunaver, 1975, 2014) ter na Geografskem inštitutu Antona Melika ZRC SAZU (npr. Šifrer, 1955), kjer že od leta 1946 naprej redno spremljajo Triglavski ledenik in Ledenik pod Skuto (npr. Gabrovec et al., 2014) ter preučujejo snežne plazove (npr. Gams, 1955; Pavšek, 2002). Pri preučevanju ledenikov oz. preučevanju geomorfologije so nujne tudi detajlne geodetske izmere, zato so bili različni geodeti že zelo zgodaj vključeni v preučevanje ledenikov. Tako je že leta 1952 Marjan Jenko prvič tahimernično izmeril Triglavski ledenik, redne skoraj vsakoletne geodetske meritve Triglavskega ledenika pa je začel izvajati leta 1999 današnji Geodetski inštitut Slovenije (Triglav Čekada, 2012).

Veliko aktivnosti je v preteklosti potekalo tudi na področju povečanja varstva in zaščite pred snegom in snežnimi plazovi, kjer sodelujejo Gorska reševalna zveza Slovenije (GRZS), Agencija RS za okolje (ARSO) in Geografski inštituti Antona Melika ZRC SAZU. Na tem področju je bil že od šestdesetih letih preteklega stoletja zelo aktiven Pavle Šegula, ki je spremljal raziskave na področju snega, ledu, plazov in ledenikov ter leta 1995

*Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana in Univerza v Ljubljani in Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana.

** Odsek za znanosti o okolju, Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

pripravil tudi šestjezični slovar sneg in plazovi, bil pa je tudi pobudnik ustanovitve Podkomisije za snežne plazove (danes Komisije za reševanje iz plazov) pri Gorski reševalni službi Slovenije (Pavšek, 2019).

Monitoring kemijske sestave padavin, tudi snežnih, izvaja na izbranih lokacijah ARSO, v gozdnih sestojih pa Gozdarski inštitut Slovenije (GozdIS). V Sloveniji poteka tudi raziskovalni monitoring izotopske sestave kisika in vodika v padavinah. Prve izotopske raziskave padavin, tudi snežnih, so bile opravljene v obdobju 1972-1975 na lokacijah Šmarata, Postojna in Logatec (Gospodarič in Habič, 1976). Kasneje so pričeli izvajati raziskave na Institutu "Jožef Stefan" v sodelovanju z International Atomic Energy Agency (IAEA) in Hidrometeorološkim zavodom (danes ARSO), ko so leta 1981 v Ljubljani pričeli mesečno spremljati izotopsko sestavo padavin (Pezdič, 1999, Vreča et al. 2008). Od leta 1997 pa so potekale raziskave, ki so jih izvajale različne institucije, na več kot 30 različnih lokacijah po Slovenij (Vreča in Malenšek, 2016). O sistematičnih kemijskih raziskavah snežne odeje podatkov v dostopni literaturi nismo našli, vendar je potrebno poudariti, da podroben zgodovinski pregled rezultatov raziskav kriosfere v Sloveniji do danes ni bil opravljen.

V mednarodnem prostoru je na področju raziskav kriosfere dejavno Mednarodno združenje za znanosti o kriosferi (International Association of Cryospheric Sciences – IACS), ki deluje pri Mednarodni zvezi za geodezijo in geofiziko (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG) od leta 2007 dalje. Slovenija v IACS do leta 2013 ni mogla sodelovati, saj ni imela nacionalnega predstavnika. Zato je prišlo v letu 2012 do pobude, ki je kot bo opisano v nadaljevanju, privedla do ustanovitve Sekcije za kriosfero pri Slovenskem združenju za geodezijo in geofiziko (SZGG) in nam omogočila nova povezovanja tudi v okviru IACS.

Ustanovitev Sekcije za kriosfero pri SZGG

Na letni skupščini Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (SZGG) leta 2012 smo dr. Polona Vreča (Institut "Jožef Stefan"), mag. Miha Pavšek (Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU) in dr. Mihaela Triglav Čekada (Geodetski inštitut Slovenije) ugotovili, da bi bilo smiselno v okviru društva ustanoviti samostojno Sekcijo za kriosfero, ki bi pokrivala področje dela mednarodnega združenja za znanosti o kriosferi (International Association of Cryospheric Sciences - IACS). Različne dejavnosti, ki bi sicer lahko sodile v to sekcijo, so bile predstavljene že pred tem v okviru ostalih obstoječih sekcij združenja, kot so Sekcija za geodezijo, Sekcija za hidrologijo in Sekcija za meteorologijo in atmosfere znanosti. Tudi med referati je že bilo v zadnjih deset letih predstavljenih nekaj tem, ki so bile s tem področjem direktno povezane: npr. daljinsko zaznavanje snega (Horvat et al. 2009), izotopska sestava padavin (Vreča in Brenčič, 2009) ter zgodovina geodetskih in fotogrametričnih izmer na Triglavskem ledeniku (Triglav Čekada, 2012). Z ustanovitvijo sekcije in njeno vključitvijo v IACS, bi se članom SZGG med drugim odprle večje možnosti za mednarodne izmenjave raziskovalcev ter bi imeli hitrejši dostop do podatkov o mednarodnih simpozijih in delavnicah z obravnavanega področja. Zato je 22. 5. 2012 dr. Mihaela Triglav Čekada poslala na SZGG skupno pobudo za ustanovitev Sekcije za kriosfero pri SZGG. Pobudo je izvršni odbor SZGG (IO SZGG) obravnaval na dopisni seji v maju 2012, na kateri so vsi člani IO podprli ustanovitev osme sekcije znotraj SZGG-ja, t.j. Sekcije za kriosfero. Formalno je bila ustanovitev Sekcije za kriosfero potrjena na redni letni skupščini SZGG v januarju 2013. Na isti dopisni seji IO SZGG so predlagali dr. Polono Vreča (Institut "Jožef Stefan") za začasno predstavnico novo ustanovljene sekcije, ki je bila na redni letni skupščini 2013 potrjena tudi kot prva

zastopnica Sekcije za kriosfero ter izvoljena v IO SZGG. Na redni letni skupščini v januarju 2013 je dr. Polona Vreča tudi predstavila ustanovitev sekcije ter delo različnih strokovnjakov v preteklem letu, ki se v Sloveniji ukvarjajo s snegom ali ledom, v obliki prve predstavitve delovanja Sekcije za kriosfero na SZGG (Vreča, 2013). Dr. Polona Vreča je sekcijo vodila med leti 2013 in 2017, v letu 2018 pa je bila izvoljena za predsednico društva SZGG. V mandatu 2018-2022 vodi Sekcijo za kriosfero dr. Mihaela Triglav Čekada.

Dejavnost sekcije za kriosfero med leti 2012 in 2019

Na vsakoletni redni letni skupščini v januarju tekočega leta zastopnica sekcije predstavi delo iz preteklega leta na področju kriosfere v Sloveniji. Prva predstavitev je bila za dejavnosti opravljene v letu 2012 (Vreča, 2013), potem pa so sledile še predstavitve za vsa naslednja leta (Vreča et al., 2014, 2015, 2016, 2017, 2018; Triglav Čekada et al., 2019). Predstavitve so prosto dostopne na spletnem mestu SZGG.

V letu 2012 smo pred ustanovitvijo sekcije opravili kratek pregled aktivnosti na področju raziskav kriosfere in ugotovili, da na tem področju deluje vsaj 27 raziskovalcev, ki so izkazali interes za sodelovanje s Sekcijo za kriosfero. Vendar pa so o svojih dejavnostih v nadaljnjih letih poročali le nekateri. Vseskozi so o svojem delovanju poročale med leti 2012 in 2018 naslednje inštitucije:

- Agencija RS za okolje (ARSO)
- Geodetski inštitut Slovenije (GI)
- Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU (GIAM)
- Gozdarski inštitut Slovenije (GozdIS)
- Gorska reševalna zveza Slovenije (GRZS)
- Institut "Jožef Stefan" (IJS)
- Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU (IZKR)
- Slovenski meteorološki formu (Slometeo)
- Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za podiplomski študij, Krasoslovje (UNG)

Občasno pa so poročali o svojem delovanju še:

- Geološki zavod Slovenije (GeoZS)
- Športno društvo Freeapproved (Freeapproved)
- Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo (FF UL)
- Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehnična fakulteta, Oddelek za geologijo (NTF UL)

Sodelujoči so letno izpostavljali različne projekte, ki so se nanašali na raziskave kriosfere, poročali o prenosu ugotovitev strokovni in širši javnosti v obliki referatov, člankov in delavnic, ki so jih organizirali ali se jih udeležili. Glavne aktivnosti različnih inštitucij vključenih v sekcijo za kriosfero iz tega obdobja so bile:

- Spremljanje trenutnega stanja Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto: pri katerem sta sodelovala GIAM in GI
- Obdelava arhivskih podatkov o slovenskih in okoliških ledenikih: GI in GIAM
- Spremljanje snežnih razmer in izdelava kart nevarnosti pred snežnimi plazovi: GIAM, GI in ARSO
- Terenska opazovanja lastnosti snežne odeje: GRZS, ARSO, IJS in GIAM
- Monitoring izotopske sestavine padavin, tudi snega: IJS in ARSO

- Modeliranje metamorfoze snega s pomočjo stabilnih izotopov v vodi: IJS in NTF
- Raziskave kroženja vode, vključno z vplivom snega ter njegovim vplivom na vodni krog z uporabo H in O izotopov: IJS in NTF
- Sodelovanje pri opisu trenutno uporabnih metod izmere snega, ki se uporabljajo v Evropi, v sklopu izdelave knjige »European Snow Booklet«: ARSO, GozdIS, GIAM, IJS
- Razvoj, postavitve samodejnih meteoroloških postaj za spremljanje mikrometeoroloških meritev v različnih gozdnih sestojih: GozdIS
- Dolgoletno redno spremljanje podnebnih razmer v mrziliščih: GozdIS, Slometeo in Freeapproved
- Popis vsakoletnega reševanja v gorah: GRZS
- Usposabljanje gorskih reševalcev: GRZS in GIAM
- Sestava rednih plazovnih biltenov: ARSO in GIAM
- Obdelava in homogenizacija dolgoletnih nizov meteoroloških opazovanj povezanih s snegom (višina snežne odeje, št. dni s snežno odejo...) za spremljanje in napovedovanje podnebnih sprememb: ARSO
- Raziskovanje ledenih jam in preučevanje kriogenih oblik v jamskih tleh (npr. poligonalna tla v jamah): IZKR in UNG
- Preučevanje razvoja poledenitve od poznega glaciala do danes: FF UL, GeoZS in GIAM
- Raziskave večinoma reliktnega permafrosta (npr. kamniti ledeniki) v slovenskih Alpah: GI, GIAM in GeoZS

Od ustanovitve sekcije v letu 2013 do danes smo člani SZGG na rednih skupščinah predstavili tudi povprečno en referat na leto, ki je bil vsebinsko povezan s kriosfero:

- Izotopska sestava padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank (Vreča et al., 2013)
- Zračno lasersko skeniranje zasneženega površja (Triglav Čekada et al., 2013)
- Snežni plazovi in preventiva v Srednjih Karavankah (Volk Bahun et al., 2015)
- Lasersko skeniranje Slovenije in akumulacijske reliefne oblike v slovenskem visokogorju (Triglav Čekada et al., 2016)
- Ledeniki na kartah vojaške izmere avstro-ogrske monarhije (Triglav Čekada, 2018)
- Pavle Šegula (1923-2017) in njegov pomen za poznavanje domačih in tujih raziskav s področja kriosfere (Pavšek, 2019)
- Spreminjanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem (Mihevc in Urbančič, 2019)

Dejavnosti, ki obsegajo raziskave kriosfere, pa so seveda tesno povezane z ostalimi sekcijami SZGG, kjer med predstavljenimi referati prednjači velika povezanost s Sekcijo za geodezijo. Prej opisane vsakoletne dejavnosti pa so močno povezane še s Sekcijo za meteorologijo in atmosferske znanosti ter s Sekcijo za hidrologijo.

Sklep

Kratek zgodovinski pregled delovanja Sekcije za kriosfero pokaže, da je v Sloveniji pestrost raziskav snega in ledu zelo velika, a precej razpršena. Zato je izmenjava in prenos znanja še vedno omejen na manjše interesne skupine, med katerimi se nekatere posamezni

problematiki posvečajo že zelo dolgo, sistematično in detajlno (npr. spremljanje Triglavskega ledenika). Tudi strokovnjaki, ki se z različnimi povezanimi problematikami ukvarjajo manj časa, predstavljajo pomembne izsledke tako v slovenskem kot mednarodnem prostoru. Za razumevanje pojavnosti kriosfere, poznavanje njenih lastnosti in preobrazbe ter vplivov na naravo in družbo je zato zelo pomembno povezovanje strokovnjakov iz različnih področij. Takšno povezovanje omogoča tudi sodelovanje v Sekciji za kriosfero pri SZGG.

Literatura

- Gabrovec, M., Hrvatina, M., Komac, B., Ortar, J., Pavšek, M., Topole, M., Triglav Čekada, M., Zorn, M., Kladnik, D., Perko, D. (2014). Triglavski ledenik. Geografija Slovenije, 30. Ljubljana: Založba ZRC.
- Gams, I. (1955). Snežni plazovi v Sloveniji v zimah 1950-1954. Geografski zbornik, 121-215.
- Gospodarič, R., Habič, P. (1976). Underground water tracing; investigations in Slovenia 1972-1975. ZRC SAZU, Postojna, 309 p.
- Horvat, A., Vidmar, A., Petan, S., Brilly, M. (2009). Uporabnost daljinskega zaznavanja snega v Sloveniji. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008: zbornik predavanj, Ljubljana, 22. januar 2009, 35-47.
- Kunaver, J. (2014). Kaninski skednji in drugi sledovi ledeniške erozije v Zgornjem Posočju. Ekskurzije in povzetki, 3. zborovanje slovenskih geomorfologov, Livške Ravne, 30. 5. - 1. 6. 2014. Ljubljana.
- Kunaver, J. (1975). H geomorfološkem razvoju Bovške kotline v pleistocenu. Geografski vestnik, 11-41.
- Mihevc, A., Urbančič, T. (2019). Spreminjanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del, Ljubljana, 31. januar 2019, 121-130.
- Pavšek, M. (2019). Pavle Šegula (1923-2017) in njegov pomen za poznavanje domačih in tujih raziskav s področja kriosfere. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del, Ljubljana, 31. januar 2019, 145-153.
- Pavšek, M. (2002). Snežni plazovi v Sloveniji. Geografija Slovenije 6. Ljubljana, 212 p
- Pezdich, J. (1999). Izotopi in geokemijski procesi. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Ljubljana, 269 p.
- Šifrer, M. (1955). Dolina Tolminke in Zalašče v pleistocenu. Geografski zbornik, 253-295.
- Vreča, P., Triglav Čekada, M., Pavšek, M., Polajnar, D., Sinjur, I., Vertačnik, G., Poredoš, A., Merše, J., Blažica, V., Košutnik, J., Žebre, M. (2018). Sekcija za kriosfero: poročilo o delu v letu 2017. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2017/SZGG_IACS_2017.pdf
- Vreča, P., Triglav Čekada, M., Pavšek, M., Ortar, J., Polajnar, D., Sinjur, I., Vertačnik, G., Košutnik, J., Žebre, M. (2017). Sekcija za kriosfero: poročilo o delu v letu 2016. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, 2017. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2016/SZGG_IACS_2016.pdf
- Vreča, P., Malenšek, N. (2016). Slovenian Network of Isotopes in Precipitation (SLONIP) – a review of activities in the period 1981-2015. Geologija, 59/1, 57-73, doi.org/10.5474/geologija.2016.004.
- Vreča, P., Triglav Čekada, M., Pavšek, M., Ortar, J., Polajnar, D., Sinjur, I., Košutnik, J., Brenčič, M., Vertačnik, G., Mihevc, A. (2016). Sekcija za kriosfero: pregled aktivnosti v letu 2015. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2015/SZGG_IACS_2015.pdf
- Vreča, P., Triglav Čekada, M., Pavšek, M., Polajnar, D., Sinjur, I., Košutnik, J., Brenčič, M., Vertačnik, G., Mihevc, A. (2015). Sekcija za kriosfero: poročilo o delu v letu 2014. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2014/SZGG_IACS_2014.pdf
- Vreča, P., Triglav Čekada, M., Pavšek, M., Polajnar, D., Sinjur, I., Košutnik, J., Brenčič, M., Ogrin, M. (2014). Sekcija za kriosfero: poročilo o delu za leto 2013. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2013/Porocilo_IACS_2013.pdf
- Vreča, P. (2013). Sekcija za kriosfero: Ustanavljanje in pregled aktivnosti v letu 2012. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2012/Porocilo_IACS_2012.pdf
- Vreča, P., Brenčič, M., Sinjur, I., Vertačnik, G., Volk Bahun, M., Ortar, J., Torkar, A., Stibilj, V., Pavšek, M. (2013). Izotopska sestava padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012: zbornik predavanj. Ljubljana, 29. januar 2013, 17-25.
- Vreča, P., Brenčič, M. (2009). Izotopska sestava padavin in v Sloveniji in njen pomen za raziskave kroženja vode. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008: zbornik predavanj. Ljubljana, 22. januar 2009, 7-18.

- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Leis, A., Brenčič, M. (2008). Isotopic composition of precipitation in Ljubljana (Slovenia). *Geologija*, 51/2, 169–180, doi:10.5474/geologija.2008.018.
- Volk Bahun, M., Zorn, M., Ortar, J., Pavšek, M. (2015). Snežni plazovi in preventiva v Srednjih Karavankah. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2014: zbornik del, Ljubljana, 29. januar 2015, 103-113.
- Triglav Čekada, M., Sinjur, I., Polajnar, D., Vreča, P., Pavšek, M., Bajcer, B., Košutnik, J. (2019). Sekcija za kriosfero: poročilo o delu v letu 2018. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila/2018/SZGG_IACS_2018.pdf
- Triglav Čekada, M. (2018). Ledeniki na kartah vojaške izmere avstro-ogrske monarhije. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2017: zbornik del, Ljubljana, 25. januar 2018, 153-165.
- Triglav Čekada, M., Barborič, B., Zorn, M., Ferk, M. (2016). Lasersko skeniranje Slovenije in akumulacijske reliefne oblike v slovenskem visokogorju. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015: zbornik del, Ljubljana, 28. januar 2016, 51-65.
- Triglav Čekada, M., Bric, V., Klanjšček, M., Barborič, B., Pavšek, M. (2013). Zračno lasersko skeniranje zasneženega površja. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012: zbornik del, Ljubljana, 29. januar 2013, 85-93.
- Triglav Čekada, M. (2012): Geodetske in fotogrametrične meritve Triglavskega ledenika. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011: zbornik predavanj, Ljubljana, 26. januar 2012, 7-17.