



Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

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

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2021

zbornik del

27. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 27. januar 2022

UREDNIŠKI ODBOR

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

RECENZIJA

Martin Knez
Katarina Kosovelj
Gregor Skok
Mojca Šraj
Nina Rman
Nec Bezak
Stanka Šebela
Mihaela Triglav Čekada
Jurij Pahor
Tilen Urbančič
Miran Kuhar
Aleš Marjetič

ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko
Jamova 2, Ljubljana

Elektronska izdaja

E dostop:
http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2022/SZGG_Zbornik_2022_E_publikacija.pdf

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

[COBISS.SI-ID 94969603](#)

ISBN 978-961-95299-2-8 (PDF)

Predgovor

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko (SZGG, <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/>) deluje v okviru Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG, <http://www.iugg.org/>) in je interdisciplinarno združenje, ki povezuje slovenske strokovnjake s področja raziskav planeta Zemlje. SZGG je bilo ustanovljeno leta 1993, leta 1995 pa se je formalno včlanilo v IUGG. Ob začetku leta 2022 je bilo v IUGG registriranih 73 članic iz celega sveta.

Tudi v letu 2021 so se nadaljevale spremembe v načinu delovanja celotne družbe kot posledica pandemije COVID-19, ki je zajela svet v letu 2020. Dogajanje je seveda vplivalo tudi na aktivnosti SZGG in leta 2021 brez podpore članov in donatorjev ne bi uspeli uspešno prekrmariti. Januarja 2021 je redno letno srečanje na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo odpadlo, a je bilo vseeno organizirano s pomočjo videokonferenčnega sistema Zoom, ene izmed tehnologij, ki so se v tem času zelo razvile. Srečanje je bilo dobro obiskano, udeleženci pa kljub oddaljenosti zadovoljni.

V 27. zborniku del, ki je pred nami in ga najdete tudi na spletni strani SZGG (<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati.htm>), so zbrani prispevki predstavljeni na strokovnem posvetu »Raziskave s področja geodezije in geofizike – 2021«, ki je potekalo januarja 2022 s pomočjo videokonferenčnega sistema Zoom. Upam, da boste zbornik del z zanimanjem prebrali ter pobrskali tudi po poročilih sekcij in ostalih informacijah o delovanju SZGG, dostopnih na spletnih straneh združenja.

V okviru SZGG je delovalo v letu 2021 sedem različnih sekcij s področja geodezije, seizmologije in fizike notranjosti Zemlje, geomagnetizma, meteorologije in atmosferskih znanosti, hidrologije, fizikalne oceanografije in kriosfere. V letošnjem zborniku del boste našli 16 prispevkov in 2 povzetka iz vseh področij delovanja SZGG, skupaj torej 18, kar je največ v zgodovini delovanja SZGG.

Za uvodni prispevek srečanja smo izbrali predstavitev novega častnega člana SZGG, Petra Suhadolca, ki podaja pregled znanih potresov na slovenskem. Prispevku sledi predstavitev mlade nagrajenke SZGG 2021, Klaudije Lebar, ki je bila nominirana kot nagrajenka s področja delovanja Sekcije za hidrologijo in podaja konceptualizacijo časovnega razvoja procesov oblikovanja padavinskega odtoka na porečju z uporabo meritev koncentracije nitrata dušika v vodotoku.

Poleg tega se boste ob branju seznanili z opisom Nobelove nagrade 2021 za raziskave klime in klimatskih sprememb in kompleksnih sistemov nasploh, napovedmi dnevnih ekstremov temperatur, dekompozicijo prispevkov k intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije, spreminjanjem koncentracije metana in ogljikovega dioksida v Lepih jamah, ohranjenostjo državnih trigonometričnih mrež na območjih Menišije in Žužemberka, Slovensko mrežo opazovanj izotopske sestave padavin (SLONIP), raziskavami izotopske sestave padavin in reke Save na območju Ljubljanskega polja, rezultati hidrogeokemičnih in izotopskih raziskav podmorskih in kopenskih izvirov pri Izoli, uporabo novih tehnologij za geološko kartiranje površja krasi in kraških jam, sortiranostjo tal v jamah kot pokazateljem podobnosti med jamami in periglacialnim okoljem, novim modelom potresne nevarnosti Slovenije, povezanostjo med magnetnim poljem in kresnicami, avtomatskim sistemom za analizo SEVESO dogodka, primerjavo različnih načinov naknadne obdelave trajektorije leta pri laserskem skeniranju z daljinsko vodenim letalnikom, ki je bil uporabljen za meritve snežnih plazov v Zgornji soški dolini, novimi kartami gravimetričnih anomalij na območju Republike Slovenije ter analizo geometrijskih lastnosti nedokončanega železniškega predora v Godoviču.

Z letom 2022 se zaključuje tudi štiriletno obdobje vodenja SZGG, ki smo ga skupaj kljub nepredvidenim situacijam uspešno preživeli. V obdobju 2018–2022 smo med drugim posodobili Pravila SZGG in spletno stran, objavili v zbornikih del povprečno 15 prispevkov na leto, podelili tri častna članstva in tri priznanja mlajšim raziskovalcem ter se redno srečevali tudi virtualno. Uspešno smo sledili zastavljenim ciljem kot je predstavljeno v letnih poročilih na spletni strani, kjer smo uvedli rubriko »Program« (<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/program.htm>). O delovanju posameznih sekcij pa so poročali odgovorni predstavniki kot je predstavljeno v rubriki »Poročila« (<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/porocila.htm>). Januarja 2020 smo organizirali Slavnostno akademijo ob 25-letnici sprejema nacionalnega komiteja SZGG v IUGG in v 25. zborniku del zbrali prispevke o zgodovinskem pregledu delovanja SZGG in sekcij (<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati.htm>). Na srečanju se nam je pridružil tudi generalni tajnik IUGG, dr. Alexander Rudloff, ki je svoje vtise o obisku Slovenije predstavil v IUGG poročilu za leto 2020 (<http://www.iugg.org/publications/reports/report2020.pdf>).

Vsem, ki se trudite, da SZGG uspešno nadaljuje pot, načrtano pred 29 leti, se iskreno zahvaljujem in se veselim dneva, ko se bomo ponovno srečali v živo na FGg na tradicionalnem januarskem srečanju.

Predsednica SZGG

Dr. Polona Vreča

Vsebina

Predgovor	5
Prvi del: recenzirani prispevki	
Klaudija Lebar, Simon Rusjan - Konceptualizacija časovnega razvoja procesov oblikovanja padavinskega odtoka na porečju z uporabo meritev koncentracije nitratnega dušika v vodotoku.....	7
Jože Rakovec - Nobelova nagrada 2021 za raziskave klime in klimatskih sprememb in kompleksnih sistemov nasploh.....	17
Matic Pikovnik, Žiga Zaplotnik - Dekompozicija prispevkov k intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije	23
Stanka Šebela - Koncentracije metana in ogljikovega dioksida v Lepih jamah, Postojnska jama	37
Polona Vreča, Aljaž Pavšek - Slovenska mreža opazovanj izotopske sestave padavin (SLONIP) – predstavitev spletne strani https://slonip.ijs.si	45
Kaja Šušmelj, Petra Žvab Rožič, Polona Vreča, Tjaša Kanduč, Timotej Verbovšek, Klara Nagode, Tea Zuliani, Barbara Čenčur Curk, Boštjan Rožič, Branko Čermelj - Hidrogeokemične in izotopske raziskave podmorskih in kopenskih izvirov pri Izoli	55
Klara Nagode, Aljaž Pavšek, Urška Pavlič, Polona Vreča - Izotopska sestava padavin in reke Save na območju Ljubljanskega polja med leti 2020 in 2021	65
Uroš Novak - Uporaba novih tehnologij pri geološkem kartiranju kraškega površja in jam	79
Mitja Prelovšek - Geodetski monitoring pomika potencialno nestabilne skalne gmote na vhodu v Križno jamo	83
Matej Blatnik, Jaroslav Obu, Jure Košutnik, Alojzij Blatnik, Simon Filhol, Luc Girod, Simon Zwieback, Paul Overduin, Julia Boike - Sortirana tla v jamah – pokazatelj podobnosti med jamami in periglacialnim okoljem	89
Barbara Šket Motnikar, Polona Zupančič, Mladen Živčić, Jure Atanackov, Petra Jamšek Rupnik, Martina Čarman, Vanja Kastelic, Andrej Gosar - Nov model potresne nevarnosti Slovenije (2021)	97
Mihaela Triglav Čekada, Roka Maver, Dušan Kogoj - Ohranjenost državnih trigonometričnih mrež na območjih Menišije in Žužemberka	109
Rudi Čop – Magnetna polja in kresnice	117

Klemen Medved, Oleg Odalović, Božo Koler - Nove karte gravimetričnih anomalij na območju Republike Slovenije 123

Tilen Urbančič, Božo Koler, Anže Kovačič - Analiza geometrijskih lastnosti nedokončanega železniškega predora v Godoviču..... 141

Drugi del: razširjeni povzetki

Boštjan Grašič, Marija Zlata Božnar , Primož Mlakar, Bernarda Podgoršek, Barbara Kolar, Nikolaja Podgoršek Selič - Avtomatski sistem za analizo SEVESO dogodka, primer Cinkarne Celje..... 153

Gregor Skok, Doruntina Hoxha, Žiga Zaplotnik - Napoved dnevnih ekstremov temperatur iz radiosondažnih meritev z uporabo nevronske mreže..... 155

Konceptualizacija časovnega razvoja procesov oblikovanja padavinskega odtoka na porečju z uporabo meritev koncentracije nitratnega dušika v vodotoku

Klaudija Lebar¹, Simon Rusjan¹

Povzetek

V prispevku so predstavljeni rezultati uporabe meritev koncentracij nitratnega dušika z 20-minutnim časovnim korakom v vodotoku Kuzlovec (območje občine Dobrova-Polhov Gradec) za namen konceptualizacije časovnega razvoja procesov oblikovanja padavinskega odtoka. V analizo je bilo vključenih 43 padavinskih dogodkov, ki so se zgodili v obdobju med aprilom 2018 in aprilom 2020. Meritve koncentracij nitratnega dušika dopolnjujejo podatki meritev padavin (sedem lokacij), meritev pretokov, volumetrične vsebnosti vode v tleh, električne prevodnosti vode in indeksa listne površine, preko katerega smo opredelili fenološko fazo gozda, ki predstavlja poglavitno rabo tal na porečju. Rezultati analiz kažejo, da je hitrost tvorbe padavinskega odtoka najhitrejša na površini tal in upada z globino, o čemer smo sklepali na podlagi podatkov o časovni spremenljivosti pretoka in električne prevodnosti vode v vodotoku med padavinskim dogodkom. Podrobna analiza je pokazala, da je konica koncentracije nitratnega dušika dosežena pozneje kot konica hidrograma in električne prevodnosti vode v vodotoku. To kaže, da je najpomembnejši vir nitratnega dušika tik pod površino tal in nato z globino upada, kar je posledica sprememb vsebnosti vode v tleh in oblikovanja odtoka v talnih horizontih, ki je najhitrejši v sloju pod površino tal in se z globino upočasnjuje. Z raziskavo smo pokazali, da lahko z informacijami, pridobljenimi na podlagi meritev koncentracij nitratnega dušika v vodotoku, podrobneje in z večjo gotovostjo opredelimo časovni razvoj procesov tvorbe padavinskega odtoka.

Ključne besede: nitratni dušik, oblikovanje padavinskega odtoka, meritve s kratkim časovnim korakom,

Key words: nitrate nitrogen, rainfall-runoff formation, high-frequency measurements

Uvod

Oblikovanje padavinskega odtoka predstavlja enega najbolj kompleksnih delov vodnega kroga, ki se začne z začetkom padavin, taljenjem snežne odeje ali umetnim namakanjem površin. Vplivne dejavnike oblikovanja padavinskega odtoka v osnovi delimo med meteorološke dejavnike in fizikalne karakteristike porečja. Med prve spadajo vrsta padavin, intenziteta padavin, trajanje padavin, količina padavin, prostorska porazdelitev padavin, smer gibanja padavin, predhodne padavine, temperatura zraka, veter, relativna vlažnost zraka idr. Med fizikalnimi karakteristikami porečja so najpomembnejše raba tal, vegetacija, vrsta tal, oblika porečja, naklon, topografija, nadmorska višina (USGS, 2021).

Za razumevanje oblikovanja padavinskega odtoka, predvsem pa poti stekanja, nam poleg običajnih hidrometeoroloških podatkov in podatkov o lastnostih porečja, lahko pomagajo tudi opazovanja in meritve koncentracij snovi v vodotoku (Exner-Kittridge et al., 2016), kot je recimo hranilo nitratni dušik. Ti podatki omogočajo tudi odkrivanje novih znanj (Aubert et al., 2016), lociranje virov opazovane snovi (Bernal et al., 2006) ter napovedovanje, kako

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

nitratnega dušika, električno prevodnost in volumetrično vsebnost vode v tleh smo merili in/ali preračunali na 20-minutni časovni korak, kar je z vidika hidrometeoroloških in biogeokemičnih meritev relativno velika časovna resolucija na eni strani ter redek tovrsten podatkovni niz gledano svetovno literaturo na drugi strani. Pretežno z gozdom pokrito porečje, na katerem ni prisotnih človekovih vplivov in/ali dejavnosti, smo izbrali zaradi zagotavljanja referenčnega naravnega stanja, ki je za področje spiranja hranil med drugim pomembno tudi za razumevanje procesov in stanj na na območjih, kjer obstajajo antropogeni vplivi na kroženje in količino hranil (Rodríguez-Blanco et al., 2018).

Metode analize podatkov

Za analizo podatkov smo uporabili metodo določitve časovnega zamika med odzivi posameznih procesov na padavine ter individualno analizo identificiranih časovnih dogodkov v obravnavanem obdobju. Kot padavinski dogodek smo opredelili čas od prvega zabeleženega podatka padavin na dežemeru do vključno 6 ur po zadnjem zabeleženem podatku ob pogoju, da je kumulativno padlo vsaj 10 mm padavin. Skupaj smo identificirali 43 padavinskih dogodkov, za katere smo imeli vse potrebne podatke, tj. o padavinah, pretokih, koncentracijah nitratnega dušika, električni prevodnosti. Za 24 od teh dogodkov smo imeli na voljo tudi podatke o spremembah volumetrične vsebnosti vode v tleh. V preglednici 1 so predstavljene osnovne statistične vrednosti lastnosti padavinskih dogodkov, in sicer količine padavin, trajanja padavin, najvišje enourne in srednje intenzitete padavin, najvišji pretok, najvišja izmerjena koncentracija, najvišji dosežen iznos nitratnega dušika, število dni pred dogodkom brez padavin, višjih od 10 mm.

Preglednica 1 – Osnovne statistike posameznih lastnosti padavinskih dogodkov (N = 43)

Spremenljivka	Povprečje	Standardna deviacija	Najvišja vrednost	Najnižja vrednost	Mediana
Količina padavin [mm]	32,1	21,4	95,0	10,0	24,3
Trajanje padavin [min]	964,2	704,6	3040,0	20,0	760,0
Srednja intenziteta padavin [mm/h]	3,7	5,8	34,2	0,6	2,0
Najvišja 60-minutna intenziteta padavin [mm/h]	15,9	14,4	85,5	2,7	10,2
Najvišji pretok [l/s]	11,8	13,6	75,9	2,0	8,1
Najvišja koncentracija nitratnega dušika [mg/l]	1,4	0,7	3,5	0,8	1,2
Najvišji iznos nitratnega dušika [g/20 min]	17,2	17,1	82,4	2,3	11,1
Število predhodnih dni brez padavin [dnevi]	8,0	10,3	53,2	0,3	4,1

Metoda časovnih zamikov temelji na določitvi centroidov diagramov pretokov, iznosa nitratnega dušika in volumetrične vsebnosti vode v tleh glede na pojav centroida histograma padavin (preglednica 2). Metodo smo povzeli po Banasik et al. (2005), ki so na enak način določili časovne zamike med pretoki in transportom sedimentov s porečja. Vseh 43 dogodkov smo analizirali tudi individualno glede na grafični prikaz časovnega razvoja

omenjenih procesov. Na podlagi grafičnih prikazov smo pridobili predvsem informacije o časih odziva na padavine, konice posamezne opazovane spremenljivke ter povratka v stanje, kot je bilo pred začetkom dogodka.

Preglednica 2 – Metoda določitve časovnih zamikov s pojasnjenimi pojmi in enačbami za izračun (LAGQ, LAGN, LAGSM15, LAGSM40 in LAGSM70 so oznake za čas pojava centroidov diagramov pretoka, iznosa nitratnega dušika ter vsebnosti vode v tleh na globinah 15, 40 in 70 cm)

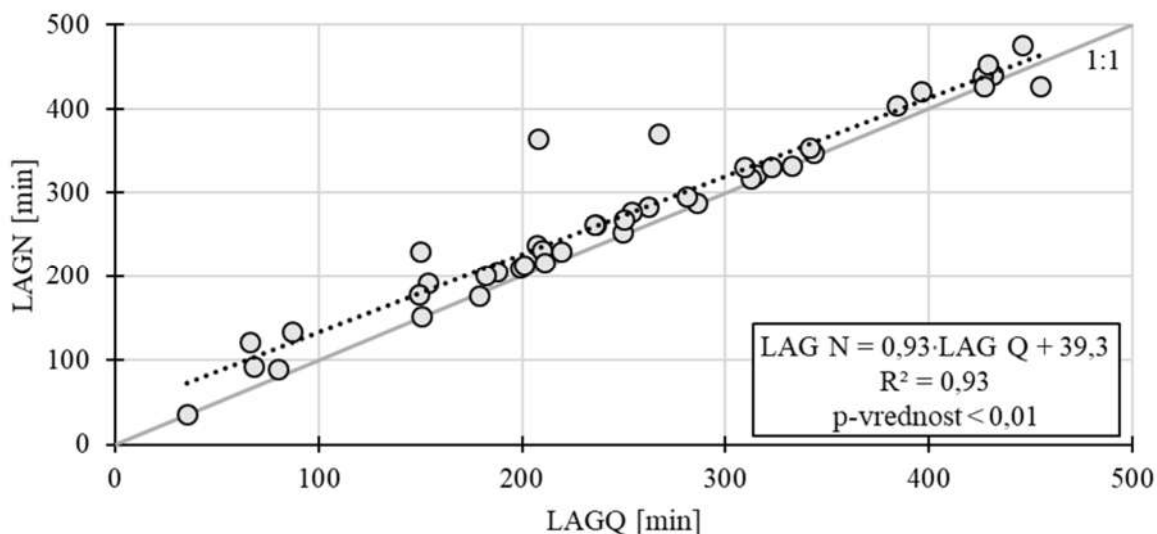
Centroid diagrama	Oznaka centroida	Oznaka časa pojava centroida	Enačba časa zakasnitve
padavin (hietografa)	M _P	/	/
pretoka (hidrograma)	M _Q	LAGQ	LAGQ – LAGP
iznosa nitratnega dušika	M _N	LAGN	LAGN – LAGP
vsebnosti volumetrične vsebnosti vode v tleh na globini 15 cm	M _{SM15}	LAGSM15	LAGSM15 – LAGP
vsebnosti volumetrične vsebnosti vode v tleh na globini 40 cm	M _{SM40}	LAGSM40	LAGSM40 – LAGP
vsebnosti volumetrične vsebnosti vode v tleh na globini 70 cm	M _{SM70}	LAGSM70	LAGSM70 – LAGP
Splošna enačba določitve centroida (M_x)			
$M_x = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n Y_i}; t_i \dots \text{časovni korak (20 minut); } Y_i \dots \text{vrednost posamezne spremenljivke v časovnem koraku } t_i$			

Rezultati in diskusija

Za 43 dogodkov, vključenih v analizo, smo ugotovili, da so časi zakasnitve pretoka (LAGQ) in iznosov nitratnega dušika (LAGN) močno linearno povezani s koeficientom determinacije 0,93 (slika 2), na podlagi česar sklepamo, da so količine iznesenega nitratnega dušika odvisne od hidroloških razmer med padavinskimi dogodki na porečju. V povprečju se je centroid diagrama iznosa nitratnega dušika zgodil 24 minut za pojavom centroida hidrograma. V primerjavi s predhodnimi raziskavami, kjer je bil poudarek na iskanju povezav med časovnim pojavom konice hidrograma in konice koncentracije opazovanega hranila, je uporaba časov pojava centroida hidrograma in diagrama iznosa nitratnega dušika ustrežnejša, saj na ta način zajamemo celotni časovni razvoj dogodka. Podobno močno linearno zvezo ($R^2 = 0,99$) so ugotovili tudi Banasik et al. (2005) za pet karpatskih porečij, vendar je v njihovem primeru prišlo do centroida diagrama iznosa sedimentov prej kot do centroida hidrograma. Časovna zakasnitev pojava centroida diagrama nitratnega dušika kaže poleg tega, da se spiranje nitratnega dušika dogaja v času padajočega dela hidrograma, tudi na oddaljenost virov nitratnega dušika od neposredne bližine rečne mreže (Sapač et al., 2020).

Močno linearno povezavo smo ugotovili tudi med časi zakasnitve LAGQ in volumetrične vsebnosti vode v tleh (LAGSM) v vseh treh globinah ($R^2 = 0,71-0,75$, p-vrednost $< 0,001$). Do pojava težišča diagrama volumetrične vsebnosti vode v tleh je prišlo v vseh treh globinah približno hkrati, kar kaže na dobro vertikalno povezanost talnih horizontov. Pri 24

analiziranih dogodkih se je v povprečju težišče v najplitvejšem sloju pojavilo v 241 min, v srednjem in najglobljem sloju pa v 243 min.



Slika 2 – Linearna povezanost časov zakasnitve iznosa nitratnega dušika (LAGN) s časom zakasnitve pretoka (LAGQ)

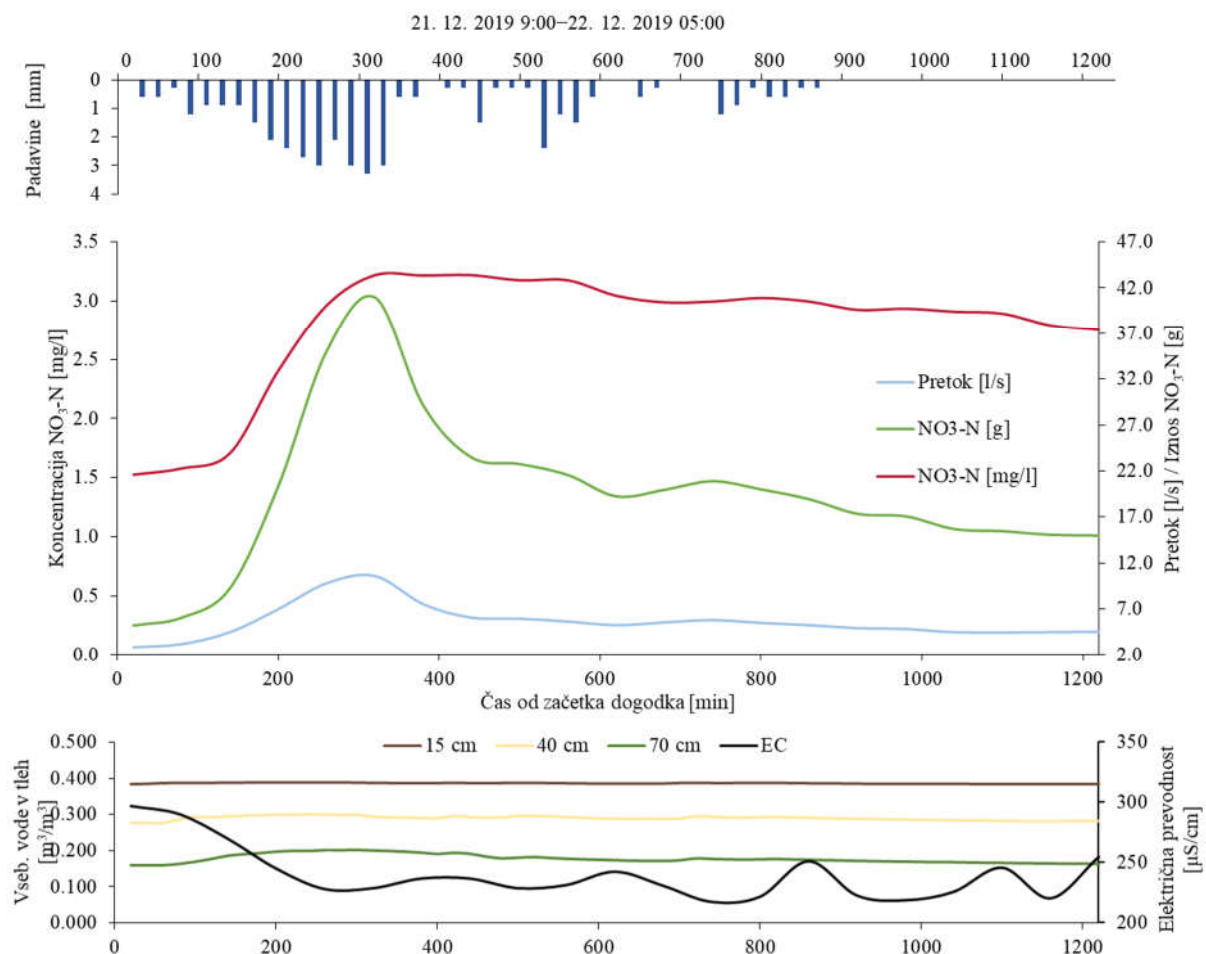
Izračunani časi zakasnitve pretokov, iznosa nitratnega dušika in vsebnosti vode v tleh ter njihova medsebojna primerjava nam je omogočila vpogled v časovno povezanost procesov, vendar pa samo na podlagi te analize nismo mogli upoštevati ostalih lastnosti padavinskih dogodkov (npr. jakosti). Raziskavo smo zato dopolnili z analizami posameznih padavinskih dogodkov, pri čemer smo opazovane spremenljivke dogodkov, tj. padavine, pretok, iznos nitratnega dušika, električno prevodnost in spremembe vsebnosti vode v tleh na treh globinah, najprej analizirali na podlagi grafičnih prikazov (npr. slika 3), nato pa smo opažanja še kvantificirali s pomočjo pridobljenih podatkov meritev.

V prispevek smo vključili primer podrobne analize enega dogodka (slika 3), ki se je zgodil decembra 2019. Med dogodkom je padlo skupaj 43,5 mm padavin s srednjo intenziteto 3 mm/h. Dogodek je skupno trajal 1220 min. Absolutna konica pretoka je bila dosežena 2 uri in 20 min pred absolutno konico koncentracije nitratnega dušika, medtem ko je med časom pojava težišča diagramov, ki upoštevata celotno časovno dinamiko dogodka, približno 30 min razlike. Težišča volumetrične vsebnosti vode v tleh pa so se zgodila skoraj sočasno, približno 15 min po težišču diagrama koncentracije nitratnega dušika. Iz grafa na sliki je opaziti tudi, da je bila najnižja električna prevodnost dosežena približno sočasno s konicama pretoka in koncentracij nitratnega dušika. Podrobnejše analize posameznih dogodkov pa so predstavljene v disertaciji Lebar (2021).

Električno prevodnost vode smo v analizo vključili, ker lahko na podlagi teh podatkov ugotovimo časovno spreminjanje deleža nove vode (padavin) v strugi vodotoka. Najnižje vrednosti električne prevodnosti kažejo na prisotnost največjega deleža padavin v strugi, ki niso bile v (daljšem) stiku s tlemi in so strugo vodotoka dosegle s hitrim površinskim odtokom ali pa so padle neposredno v strugo vodotoka. Najnižje vrednosti električne prevodnosti so se v splošnem zgodile pred konico pretoka, konica pretoka pa pred konico koncentracije nitratnega dušika, kar kaže na to, da največji vir nitratnega dušika ni površina tal, ampak plitvi talni horizonti. Prisotnost nitratnega dušika v talnih horizontih smo preverili z laboratorijsko analizo tal (Kmetijski inštitut Slovenije, 2018), ki je pokazala, da ga je največ v najplitvejših delih pod površino tal (razgradnja organske snovi), nato pa z globino

izrazito pade. Razlog, da večji del padavin odteče kot lateralni oziroma površinski odtok, lahko pripišemo predvsem zelo strmemu naklonu porečja, ki v povprečju znaša 50 %, najvišji nakloni pa celo več kot 100 % (Bezák et al., 2013).

Analizirani padavinski dogodki so bili med seboj zelo raznoliki glede na lastnosti padavin (npr. količina, intenziteta, trajanje) in hidrološke razmere v porečju (npr. predhodna namočenost, predhodna evapotranspiracija) (Sapač et al., 2020). Ne glede na to so bile hkratne meritve različnih spremenljivk, ki so medsebojno odvisne, ključnega pomena za interpretacijo procesov spiranja nitratnega dušika in oblikovanja padavinskega odtoka.

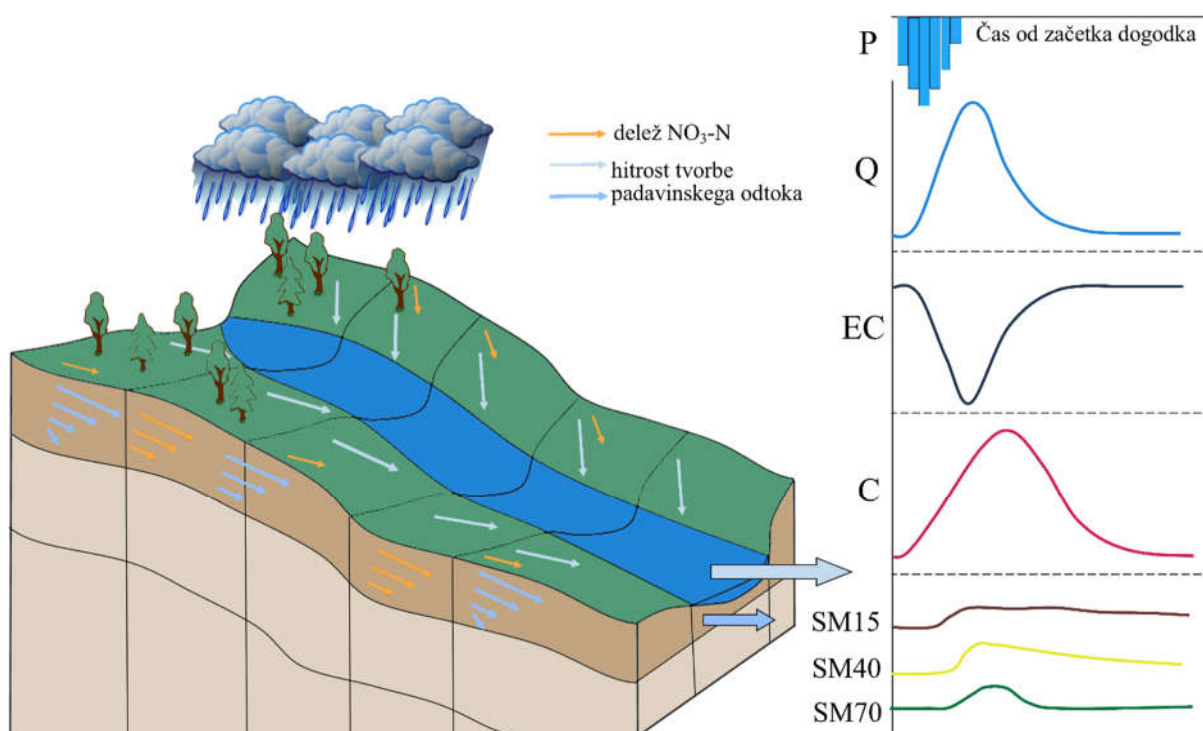


Slika 3 – Časovni potek padavin, pretoka, koncentracije in iznosa nitratnega dušika, električne prevodnosti v vodotoku in sprememb vsebnosti vode v tleh med padavinskim dogodkom, ki se je zgodil med 21. decembrom 2019 9:00 in 22. decembrom 2019 05:00.

Na sliki so prikazana urna povprečja podatkov.

Na podlagi zgoraj predstavljenih rezultatov smo za obravnavano porečje izdelali shemo časovnega razvoja opazovanih procesov, s poudarkom na iznosih nitratnega dušika in odtoka s porečja (slika 4). Modre puščice označujejo poti stekanja in hitrost tvorbe odtoka, oranžne puščice pa delež celotnega iznosa nitratnega dušika s porečja. Shemo dopolnjejo grafi časovnih sprememb padavin (P), pretoka (Q), električne prevodnosti (EC), koncentracije nitratnega dušika v vodotoku (C) volumetrične vsebnosti vode v tleh na treh globinah

(SM15, SM40, SM70). Koncentracija nitratnega dušika doseže vrh pozneje kot hidrogram, električna prevodnost pa prej kot hidrogram, na podlagi česar sklepamo, da hitrost tvorbe odtoka pada z globino tal. Skupaj z rezultati kemijskih analiz vzorcev talnih horizontov lahko sklepamo, da se glavni vir nitratnega dušika nahaja v najplitvejših delih pod površino tal. Temu pritrujejo tudi ugotovitve uporabe modelov multiple linearne regresije za pojasnitev pojava centroidov hidrograma in diagrama nitratnega dušika, ki so pokazali, da sta v modelu za LAGN statistično značilni spremenljivki spremembi volumetrične vsebnosti vode v tleh v zgornjih dveh slojih, medtem ko sprememba v najglobljem sloju (70 cm) ni bila statistično značilna (Sapač et al., 2020).



Slika 4 – Koncept časovnega razvoja oblikovanja padavinskega odtoka na porečju vodotoka Kuzlovec na osnovi analiz podatkov, pridobljenih z meritvami z 20-minutnim časovnim korakom. Oranžne in modre puščice kažejo delež nitratnega dušika k celotnemu iznosu oziroma hitrost tvorbe padavinskega odtoka. Grafi na desni strani kažejo časovni razvoj opazovanih procesov na porečju (P so padavine, Q je pretok, EC električna prevodnost, C pa koncentracija nitratnega dušika).

Zaključki

Za konceptualizacijo časovnega razvoja procesov oblikovanja padavinskega odtoka na porečju in določitev virov nitratnega dušika smo uporabili metodo časov zakasnitve težišč diagramov pretoka, iznosa nitratnega dušika in volumetrične vsebnosti vode v tleh. Izkazalo se je, da so procesi oblikovanja odtoka hitrejši od procesov spiranja opazovanega hranila ter da se viri nitratnega dušika ne nahajajo v neposredni bližini rečne mreže. To ugotovitev dopolnjujejo analize časovnih sprememb volumetrične vsebnosti vode v tleh, ki so pokazale, da so glavni vir nitratnega dušika, ki se sprosti v vodotok med padavinskimi dogodki, gozdna tla. Gozdna tla oziroma odtok skozi gozdna tla pa glede na močno linearno zvezo med težišči

vseh treh analiziranih diagramov predstavlja enega glavnih kontrolnih mehanizmov spiranja nitratnega dušika s porečja.

Zahvala

Raziskava, predstavljena v prispevku, je bila finančno podprta s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna v okviru usposabljanja mladih raziskovalcev prve avtorice ter raziskovalnega programa P2-0180. Dodatno je bila raziskava sofinancirana s strani Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport, Medvladnega hidrološkega programa UNESCO IHP.

Reference

- Aubert, A.H., Thrun, M.C., Breuer, L., Ultsch, A. (2016). Knowledge discovery from high-frequency stream nitrate concentrations: Hydrology and biology contributions. *Sci. Rep.* 6, 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep31536>
- Banasik, K., Madeyski, M., Mitchell, J.K., Mori, K. (2005). An investigation of lag times for rainfall-runoff-sediment yield events in small river basins. *Hydrol. Sci. J.* 50, 857–866. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.5.857>
- Bernal, S., Butturini, A., Sabater, F. (2006). Inferring nitrate sources through end member mixing analysis in an intermittent Mediterranean stream. *Biogeochemistry* 81, 269–289. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9041-7>
- 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 = Comparison Between Two Adjacent Experimental Torrential Watersheds: Kuzlovec and Mačkov Graben. *Acta Hydrotechnica* 45, 85–97.
- Brilly, M., Zabret, K., Sapač, K., Bezak, N., Vidmar, A. (2020). Razvoj hidrologije v Sloveniji, V: Zbornik referatov Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko za leto 2020. Ljubljana, pp. 123–133.
- Exner-Kittridge, M., Strauss, P., Blöschl, G., Eder, A., Saracevic, E., Zessner, M. (2016). The seasonal dynamics of the stream sources and input flow paths of water and nitrogen of an Austrian headwater agricultural catchment. *Sci. Total Environ.* 542, 935–945. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.151>
- Kmetijski inštitut Slovenije. (2018). Poročilo o preskusu vzorcev iz talnih horizontov na lokaciji porečja Kuzlovec. Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije: 4 str.
- Lebar, K. (2021). Vpliv hidrometeoroloških in vegetacijskih razmer na dinamiko spiranja nitratnega dušika. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- OTT. (2020). Hydrolab MS5 - Multparameter Mini Sonde. Dostopno na: <https://www.ott.com/products/water-quality-2/hydrolab-ms5-multparameter-mini-sonde-57/>. (Pridobljeno 15. maja 2019)
- Pellerin, B.A., Bergamaschi, B.A., Gilliom, R.J., Crawford, C.G., Saraceno, J., Frederick, C.P., Downing, B.D., Murphy, J.C. (2014). Mississippi river nitrate loads from high frequency sensor measurements and regression-based load estimation. *Environ. Sci. Technol.* 48, 12612–12619. <https://doi.org/10.1021/es504029c>
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Arias, R., Taboada-Castro, M.T. (2018). Inter- and Intra-Annual Variability of Nitrogen Concentrations in the Headwaters of the Mero River. *Nitrogen Agric.* <https://doi.org/10.5772/intechopen.69996>
- Rusjan, S., Mikoš, M., Bezak, N. (2014). Vodna erozija v porečju Gradaščice. *Ujma* 21, 79–84.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.178>

- Sapač, K., Vidmar, A., Bezak, N., Rusjan, S. (2020). Lag Times as Indicators of Hydrological Mechanisms Responsible for NO₃-N Flushing in a Forested Headwater Catchment. *Water* 12, 1092.
- Schwab, M.P., Klaus, J., Pfister, L., Weiler, M. (2017). How runoff components affect the export of DOC and nitrate: a long-term and high-frequency analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–21. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-416>
- 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, 47–71.
- USGS. (2021). Runoff: Surface and Overland Water Runoff. Water Science School. Dostopno na: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/runoff-surface-and-overland-water-runoff> (Pridobljeno 8. decembra 2021)

Nobelova nagrada 2021 za raziskave klime in klimatskih sprememb in kompleksnih sistemov nasploh

Jože Rakovec¹

Nobelovo nagrado za fiziko 2021 so podelili "za prelomne prispevke k našemu razumevanju kompleksnih sistemov". Dva meteorologa: Syukuro Manabe in Klaus Hasselmann – skupaj eno polovico nagrade, sta jo prejela "za fizikalno modeliranje klime na Zemlji, kvantificiranje variabilnosti in zanesljivo napovedovanje globalnega segrevanja". Drugo polovico pa prejel teoretični fizik Giorgio Parisi "za odkritje medsebojnega delovanja nereda in fluktuacij v fizičnih sistemih od atomske do planetarne skale" – in pri tej planetarni skali so se področja njihovih raziskav »srečala«. V članku predvsem opisujemo, kaj sta meteorologa odkrila in sta prišla do teh odkritij, o raziskavah teoretičnega fizika pa le na kratko.

Naj na začetku navedemo kar tekst s spletne strani Kraljeve Švedske akademije znanosti o letošnjih Nobelovih nagrajencih iz fizike

(<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/>). Tam piše:

»Trije nagrajenci si letos delijo Nobelovo nagrado za fiziko za svoje študije kaotičnih in očitno naključnih pojavov. Syukuro Manabe in Klaus Hasselmann sta postavila temelje našega znanja o klimi na Zemlji in kako človeštvo vpliva nanj. Giorgio Parisi je nagrajen za svoje revolucionarne prispevke k teoriji neurejenih materialov in naključnih procesov. Za kompleksne sisteme je značilna naključnost in neurejenost in jih je težko razumeti. Letošnja nagrada se zaveda pomembnosti novih metod za njihovo opisovanje in napovedovanje njihovega dolgoročnega vedenja.

Eden od zapletenih sistemov, ki so ključnega pomena za človeštvo, je klima Zemlje. Syukuro Manabe je pokazal, kako povečane ravni ogljikovega dioksida v ozračju vodijo do povišanja temperatur na površini Zemlje. V šestdesetih letih prejšnjega stoletja je vodil razvoj fizikalnih modelov klime in bil prvi, ki je raziskal interakcijo med sevalnim ravnovesjem in vertikalnim transportom zračnih mas. Njegovo delo je postavilo temelje za razvoj sedanjih klimatskih modelov.

Približno deset let pozneje je Klaus Hasselmann ustvaril model, ki povezuje vreme in klimo, s čimer je odgovoril na vprašanje, zakaj so klimatski modeli lahko zanesljivi, čeprav je vreme spremenljivo in kaotično. Razvil je tudi metode za prepoznavanje specifičnih signalov, prstnih odtisov, ki jih tako naravni pojavi kot človekove dejavnosti vtisnejo v podnebje. Njegove metode so bile uporabljene kot dokaz, da je povišana temperatura v ozračju posledica človeških emisij ogljikovega dioksida.

Okoli leta 1980 je Giorgio Parisi odkril skrite vzorce v neurejenih kompleksnih materialih. Njegova odkritja so med najpomembnejšimi prispevki k teoriji kompleksnih sistemov. Omogočajo razumevanje in opis številnih različnih in na videz povsem naključnih pojavov in neurejenih sistemov, ne le v fiziki, ampak tudi na drugih, zelo različnih področjih, kot so matematika, biologija, nevroznanost in strojno učenje.«

¹ Upokojeni profesor meteorologije na UL FMF Fizika

Metode preučevanja klime

Za preučevanje klimatskih razmer na Zemlji so dokaj uporabni enodimenzionalni (1-D) konceptualni modeli, saj za Zemljo kot celoto uspejo zelo natančno napovedati npr. temperaturo pri tleh in prevladujočo temperaturo ozračja. Ker pa so le 1-D, seveda ne morejo razlikovati med razmerami v tropih, v zmernih geografskih širinah, v polarnih predelih, med kopnim, oceani, z ledom pokritimi predeli Zemlje, ipd. Za kaj takega je potrebno uporabiti tridimenzionalni (3-D) klimatski model, če je le mogoče, sklopljen z modelom oceanov. To so modeli, podobnimi tistim za napoved vremena, a z njimi računajo dolgo, tako dolgo, da dogajanje v njih že »pozabi« na razmere, od katerih so model pognali. Zato dogajanje ne določajo več začetni pogoji, ampak spreminjajoče se razmere glede sevanja, vegetacije itd. skozi letne čase. Dogajanje v modelih – in s tem simulacijo dogajanja v ozračju in oceanih – opisujejo nelinearne parcialne diferencialne enačbe: za gibalno količino, termodinamska energijska enačba (dodajanje topote, stiskanje/razpenjanje, fazne spremembe vode), pa zakon o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba) in edina »lahka« enačba je enačba stanja. Temu je treba dodati še precej procesov, ki jih te enačbe ponavadi ali ne zajamejo eksplicitno, ker bi bile potem še precej bolj zahtevne, ali pa, ker so ti procesi prostorsko ali časovno predrobni, da bi jih zajeme metode reševanja teh enačb, ipd.

Sodoben 3-D klimatski model je načeloma tak, kot model za napoved vremena, toda najpopolnejši vključujejo še mnoga dogajanja, ki jih pri simulaciji vremena skozi dva tedna lahko zanemarimo, pri klimi skozi mesece in leta pa jih ne smemo; npr. podrobno sestavo in kemijo ozračja, podrobnosti izmenjav z vegetacijo, s planktonom, itd. Ponavadi je njihova ločljivost po horizontali okrog 25 km krog in krog Zemlje, po vertikali imajo skozi ozračje do 80 in več plasti, v oceanih pa med 30 in 60 plasti in s tem računskih nivojev, po nekaj nivojev v kopnih tleh... Ker klimatske modele poganjajo skozi mesece, leta, desetletja, torej – kot smo že rekli – pozabijo svoje začetno stanje in se obnašajo predvsem glede na kemijsko sestavo ozračja in sončno obsevanje posameznih predelov Zemlje ter s tem glede na letne čase. Računanje za tako dolgo obdobje seveda pomeni tudi, da zahtevajo ogromno računskega časa, ker pa imajo tudi skoraj tako ločljivost, kot modeli za napoved vremena, pa je tudi zahtevana računska moč zelo, zelo velika (več sto Tflops).

Kako sta raziskovala meteorologa in kaj sta odkrila

Syukuro Manabe je meteorolog japonskega rodu, ki je meteorologijo doštudiral v Tokiu in se po doktoratu 1959 preselil v Združene države, kjer se je vključil v raziskovanje splošnega kroženja ozračja.

Nobelovo nagrado 2021 je dobil predvsem za to, ker je razložil vpliv toplogrednih plinov na klimo na Zemlji. Z predelanim Phillipsovim numeričnim modelom za splošno kroženje ozračja (general circulation model GCM) je s sodelavci raziskal ne samo sevalno energijsko bilanco ozračja in tal, ampak je v energijsko bilanco vključil tudi vodni cikel (1965), razporeditve vlažnosti v ozračju in vpliva količine CO₂ v ozračju (1967), leta 1969 povezal model ozračja z modelom oceanov ter ker je 1975 s 3-D modelom, kako podvojitve količine CO₂ v ozračju na dogajanje in spremenljivke v modelu splošnega kroženja ozračja vpliva na gibalno količino, temperaturo, količino padavin, debelino snežne odeje itd. Tu prikažimo samo, kaj sta z Wetheraldom ugotovila glede razporeditve temperature skozi ozračje.

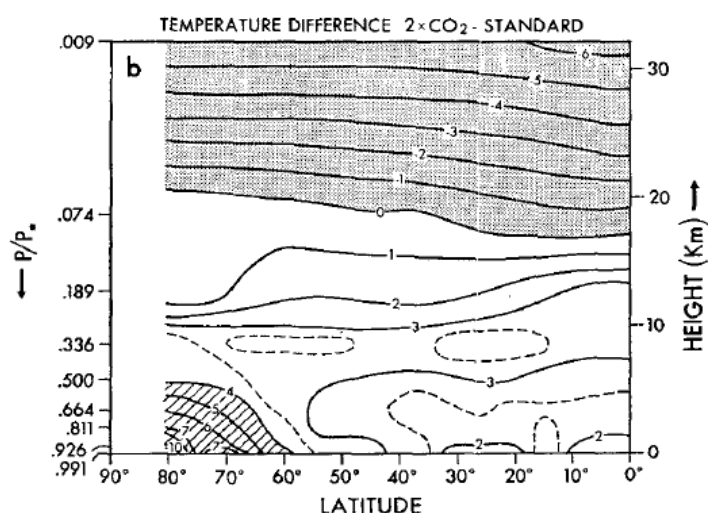


FIG. 4. Latitude-height distribution of the zonal mean temperature (K) for the standard case (a) and of the increase in zonal mean temperature (K) resulting from the doubling of CO_2 concentration (b). Stippling indicates a decrease in temperature.

Slika kaže, kako se spremeni zonalno povprečna temperatura v ozračju, če se v model splošne cirkulacije ozračja vstavi podvojeno količino CO_2 . Temperatura naj bi se po tej simulaciji pri tleh zvišala okrog ekvatorja za kaki dve stopinji, v visokih geografskih širinah pa tudi do 10 stopinj. Znatno pa naj bi se ohladila stratosfera. Iz članka S. Manabeja in R. T. Wetheralda v J. Atm. Sci. 32, 1975.

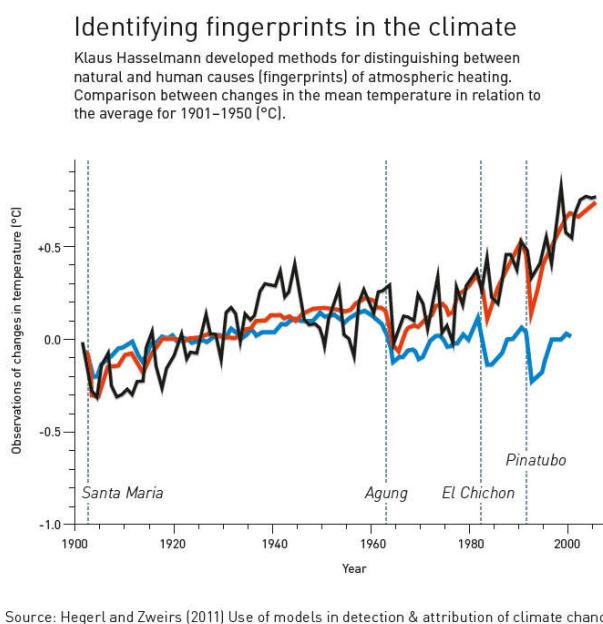
Slika kaže, kako se spremeni zonalno povprečna temperatura v ozračju, če se v model splošne cirkulacije ozračja vstavi podvojeno količino CO_2 . Temperatura naj bi se po tej simulaciji pri tleh zvišala okrog ekvatorja za kaki dve stopinji, v visokih geografskih širinah pa tudi do 10 stopinj. Znatno pa naj bi se ohladila stratosfera. Iz članka v J. Atm. Sci. 32, 1975.

Syukuro Manabe je torej raziskoval predvsem tako, da je z modelom za splošno kroženje ozračja numerično raziskoval, kako razni dejavniki v modelu (suho ozračje/vlažno ozračje, konvekcija da/konvekcija ne, več CO_2 /manj CO_2 ,...) vplivajo na procese v ozračju po daljšem času – na simulirano klimo.

Klaus Hasselmann je raziskoval nekoliko drugače – po eni strani na bolj teoretični način, pa tudi s pomočjo sklopljenega modela ozračja in oceanov. Ustanovil je Inštitut Maxa Plancka za meteorologijo (IMP) v Hamburgu in bil od leta 1975 do novembra 1999 tudi njegov direktor. Na tem inštitutu so v 90. letih prejšnjega stoletja razvili sklopljeni model - model Evropskega centra za srednjeročno napoved vremena (ECMWF) so povezali s svojim modelom oceanov.

Hasselmann je teoretično je pomagal odgovoriti na vprašanje, zakaj so klimatski modeli lahko zanesljivi kljub spremenljivemu in kaotičnemu vremenu. Ugotovil je, da spremenljivi drobnejši in hitri vremenski procesi vplivajo na stabilnejšo in »počasnejšo« klimo na podoben način, kot pri Brownovem gibanju drobni, naključno premikajoči se delci skupaj porivajo nek večji delec sem in tja. Ta vpliv vremena na klimo je uspel tudi opisati z enačbami in sicer tako, da je raziskoval hitra in počasna dogajanja in spektre teh dogajanj ter enim in drugim dogajanjem priredil pripadajoče vrednosti v spektru. S tem, ko jim je priredil ustrezne vrednosti, je lahko nadaljeval analizo z metodami statistične mehanike in dobil orodje za študij klime in njenih sprememb. Kasneje je tudi teoretično raziskal, kako razločiti »prstne odtise« antropogeno povzročenih klimatskih sprememb od naravnih, npr. od vpliva izbruhov ognjenikov – kako na optimalen način izluščiti signal sistematičnih klimatskih sprememb iz močne spremenljivosti klime. Za izluščenje od človeka povzročenega signala je predlagal uporabo empiričnih ortogonalnih funkciji in optimalnih

linearnih filtrov. To metodo so nekaj let kasneje na dejanskih podatkih uporabili in dobili prikaz takega razločitve vplivov, kot je prikazan na sliki.



Globalne spremembe temperature od leta 1900 dalje glede na povprečje 1901-1950. Črno – po izmerjenih podatkih, rdeče – naravni in človeški vplivi, modro – samo naravni vplivi. Prikazani so tudi časi najmočnejših vulkanskih izbruhov. Slika je iz obrazložitve Nobelovega odbora za fiziko <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/> in je rezultat ugotovitev v člankih Klause Hasselmanna iz leta 1993, G. C. Hegerl, K. Hasselmann, U. Cubasch, J. F. B. Mitchell, E. Roeckner, R. Voss, J. Waszkewitz iz leta 1997 in iz članka G. Hegerl, F. Zwiers and C. Tebaldi iz leta 2011.

Hasselmann je torej raziskoval precej teoretično, s sodelavci pa seveda teoretično pridobljene metode tudi preskusil na podatkih o klimi skozi različna obdobja.

Za kaj je bil nagrajen teoretični fizik

Polovico fizikalne nagrade 2021 je dobil italijanski teoretični fizik Giorgio Parisi. Šolal se je na La Sapienzi v Rimu, raziskuje pa na področjih kvantne teorije polja, statistične mehanike in kompleksnih sistemov.

Okoli leta 1980 je Giorgio Parisi predstavil svoja odkritja o tem, kako navidezno naključne pojave urejajo skrita pravila. Posebej temeljno pomemben je njegov prispevek k razumevanju obnašanja spinskih stekel na osnovi rešitve problema spontanega zloma simetrije med replikami. Parisijevo delo danes velja za enega najpomembnejših prispevkov k teoriji kompleksnih sistemov.

Sodobne študije kompleksnih sistemov temeljijo na statistični mehaniki, ki so jo v drugi polovici 19. stoletja razvili James C. Maxwell, Ludwig Boltzmann in J. Willard Gibbs, ki so to področje tako poimenovali leta 1884. Statistična mehanika zagotavlja mikroskopsko razlago za makroskopske lastnosti plinov in tekočin, kot sta temperatura in tlak.

Preprost primer iz stohastičnosti in kompleksnosti: delce plina obravnavamo kot kroglice in ko temperatura pade ali se tlak poveča, se kroglice najprej kondenzirajo v tekočino in nato v trdno snov. Ta trdna snov je pogosto kristal, kjer so kroglice organizirane v pravilnem vzorcu. Če pa se ta sprememba zgodi hitro, se lahko kroglice združijo v nepravilen oziroma neurejen vzorec, ki se ne

spremeni, tudi če se tekočina dodatno ohladi ali dodatno stisne skupaj. Pri ponovljenem poskusu bodo kroglice prevzele spet nov, malce drugačen vzorec, kljub temu, da se sprememba (znižanje temperature) zgodi na popolnoma enak način. Te stisnjene kroglice so eden od preprostih modelov za navadno steklo ali za zrnate materiale, kot sta pesek ali gramoz. Vendar je bil predmet Parisijevega prvotnega dela drugačen sistem - spinsko steklo. To je teoretičen model, ki opisuje posebno vrsto kovinske zlitine, v kateri so npr. atomi železa naključno pomešani v mrežo atomov bakra. Čeprav je v mreži le nekaj atomov železa, spremenijo magnetne lastnosti materiala na radikalen in zelo neurejen način. Vsak atom železa se obnaša kot majhen magnet oz. ima magnetni moment, na katerega vplivajo drugi atomi železa v bližini. Pri navadnem magnetu so vsi magnetni momenti ob prisotnosti zunanega polja usmerjeni v isto smer, v spinskem steklu pa so frustrirani: nekateri pari se usmerijo v isto smer, drugi pa v nasprotno smer – kako torej najdejo optimalno orientacijo? Giorgio Parisi je odkril skrito strukturo v tako zapletenih neurejenih sistemih in našel način, kako jih matematično opisati. Tako je našel pomemben ključ za obravnavo kompleksnih sistemov. V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so številni fiziki, vključno z več Nobelovimi nagrajenci, iskali način, kako opisati skrivnostna in frustrirajoča spinska stekla. Leta 1979 pa je Parisi torej naredil odločilen preboj, ko je z genialnim svežim pristopom pokazal, kako je mogoče trik velikega števila – n - replik (n ponovitev primerov dogajanja) uporabiti za reševanje problema spinskih stekel. V replikah je odkril skrito strukturo in našel matematično smiselni način kako to popisati fazni prehod zloma simetrije replik s pomočjo neskončnodimenzionalnega parametra ureditve, nekakšnega tenzorja v abstraktnem vektorskem prostoru, katerega dimenzijo n določa število replik. Ključna ideja metode je korektno izvesti limito, ko gre n proti 0, ki na koncu omogoča konkreten izračun proste energije in drugih termodinamskih količin.

Morda ni presenetljivo, da so v začetku matematiki in bolj strogo misleči matematični fiziki ob tej metodi zmajevali z glavo. Trajalo je kar nekaj let, da se je Parisijeva rešitev izkazala za matematično pravilno in dokazljivo. Tallagrand jo je tako leta 2006 utemeljil v najprestižnejši matematični reviji *Annals of Mathematics* kot »temeljni izrek matematične analize«. Od takrat naprej oziroma že prej pa je bila Parisijeva metoda uporabljena v številnih neurejenih sistemih in je postala temelj teorije kompleksnih sistemov.

Parisijevi prispeki k razumevanju dinamičnih procesov v kompleksnih sistemih in dinamičnih sistemov na splošno ga tematsko tudi približajo delu meteorologov Manabeja in Hasselmanna. Za potrditev te teze samo omenimo Parisijev članek o stohastični resonanci v klimatologiji.

Na koncu še opozorimo, da je podrobnejša razlaga o tem prejeta v objavo v *Obzorniku za matematiko in fiziko* (Rakovec in Prosen, v tisku).

Zahvala

Prof. dr. Tomažu Prosenu, UL FMF Fizika, se zahvaljujem za nekatere poudarke glede raziskav in odkritij Giorgia Parisija.

Viri

Wikipedia Manabe: https://en.wikipedia.org/wiki/Syukuro_Manabe

- S. Manabe, J. Smagorinsky, and R.F. Strickler, 1965: Simulated Climatology of General Circulation with a Hydrologic Cycle, *Monthly Weather Rev.* 93, 769-798.
- S. Manabe and R. Wetherald, 1967: Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, *J. Atmos. Sci.* 24, 241-259.
- S. Manabe and K. Bryan, "Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model," *J. Atmos. Sci.* 26, 786-789.
- S. Manabe and R. T. Wetherald, 1975: The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the climate of a General Circulation Model. *J. Atmos. Sci.* 32(1), 3-5.

- N. A. Phillips, 1956: The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 82, 123-164.
- J. Smagorinsky, S. Manabe, and J.L. Holloway, 1965. Numerical Results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere, *Monthly Weather Rev.* 93, 727-768.
- Wikipedia Hasselmann: https://en.wikipedia.org/wiki/Klaus_Hasselmann
- K. Hasselmann, 1976: Stochastic climate models Part I. Theory, *Tellus*, 28, 473-485, DOI: 10.3402/tellusa.v28i6.11316.
- K. Hasselmann, 1993: Optimal Fingerprints for the Detection of Time-dependent Climate Change. *J. of Climate* 6, 1957-1971.
- G. C. Hegerl, K. Hasselmann, U. Cubasch, J. F. B. Mitchell, E. Roeckner, R. Voss, J. Waszkewitz, 1997: Multi-Fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. *Climate Dynamics* 13, 613-634.
- G. Hegerl, F. Zwiers and C. Tebaldi, 2011: Patterns of change: whose fingerprint is seen in global warming? *Environ. Res. Lett.* 6, 044025 (6pp).
- Wikipedia Parisi: https://en.wikipedia.org/wiki/Giorgio_Parisi
- G. Parisi, 1979: Toward a Mean Field Theory for Spin Glasses, *Phys. Lett. A* **73**, 203.
- G. Parisi, 1979: Infinite number of order parameters for spin-glasses, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 1754.
- R. Benzi, G. Parisi, A. Sutera, A. Vulpiani 1982: Stochastic resonance in climatic change, *Tellus* **34**, 10.
- M. Talagrand, 2006: The Parisi Formula, *Annals of Mathematics*, **163**, 221.

Dekompozicija prispevkov k intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije

Matic Pikovnik*, Žiga Zaplotnik*

Povzetek

Hadleyjeva cirkulacija (HC) je zonalno simetričen del tropske cirkulacije. Opisuje dve zaključeni cirkulacijski zanki (Hadleyjevi celici), ki vključujeta dviganje zraka v ekvatorialnih predelih, raztekanje v zgornji troposferi proti severnim in južnim subtropskim predelom, spuščanje zraka v subtropih ter stekanje s pasatnimi vetrovi nazaj k ekvatorju. Posledično HC določa tudi tipičen transport vlage v spodnji troposferi preko subtropskih oceanov k ekvatorju in tako vpliva na porazdelitev količine padavin, s tem pa tudi na razporeditev rastja in poselitvena območja na Zemlji. Morebitne spremembe v meridionalni razsežnosti in intenzivnosti HC bi lahko tako pomembno vplivale na zemeljsko biosfero. Zonalno povprečeno HC opišemo s tokovno funkcijo v meridionalno-vertikalni ravnini, intenzivnost HC pa je definirana kot povprečje tokovne funkcije na območju dotične HC. V študiji analiziramo intenzivnost HC v modernih reanalizah ERA5 in ERA-Interim Evropskega centra za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF) v obdobju 1979-2018. Z reševanjem Kuo-Eliassenove enačbe za tokovno funkcijo nato poiščemo tiste fizikalne procese, ki v povprečju največ prispevajo k intenzivnosti zonalno in letno povprečene HC. Analiza pokaže, da ima glavni prispevek k skupni intenzivnosti HC meridionalni gradient diabatnega gretja, v spodnji troposferi pa je zelo pomemben prispevek trenja, medtem ko je glavni prispevek meridionalnih pretokov toplote in gibalne količine z vrtinci omejen na zgornjo troposfero izven ekvatorialnega območja.

Ključne besede: Hadleyjeva cirkulacija, Hadleyjeva celica, tokovna funkcija, reanaliza ERA5, Kuo-Eliassenova enačba, diabatno gretje, trenje, meridionalni pretok toplote/gibalne količine z vrtinci

Keywords: Hadley circulation, Hadley cell, stream function, ERA5 reanalysis, Kuo-Eliassen equation, diabatic heating, friction, meridional eddy heat/momentum flux

Uvod

Glavni vir energije in toplote na Zemlji je sončno sevanje. Povprečno letno sončno sevanje je po površju Zemlje neenakomerno porazdeljeno. Najbolj je odvisno od vpadnega kota sončnega sevanja, torej od geografske širine, deloma pa tudi od porazdelitve oblačnosti. Največ sončne energije prejmejo tropski in subtropski predeli, najmanj pa polarni predeli. Razlike v ogrevanju ozračja med tropskimi in polarnimi predeli privedejo do meridionalnega transporta toplote v smeri od tropov proti poloma. Ta transport poteka pretežno s splošno cirkulacijo ozračja, delno pa s tokovi v oceanih. Če Zemlja ne bi bila vrteč se sistem ali pa bi se vrtela zadosti počasi, bi transport toplote v meridionalni smeri od ekvatorja proti poloma potekal direktno – z le eno cirkulacijsko celico na vsaki polobli. Celici bi se stikali ob ekvatorju, vključevali pa bi dviganje zraka ob ekvatorju, prenos toplote v zgornji troposferi proti polarnim predelom, spuščanje v polarnih predelih ter stekanje v spodnjih plasteh ozračja nazaj k ekvatorju (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Ker pa se Zemlja vrti okoli svoje osi, na njej pravokotno na smer gibanja deluje tudi t. i. sistemska Coriolisova sila, ki

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

posamezen gibajoč delec zraka odklanja na severni polobli v desno in na južni polobli v levo. Posledično je meridionalna dimenzija obeh celic omejena – namesto v polarnih predelih pride do spuščanja zraka že v subtropskih predelih, od tam pa se zrak s pasatnimi vetrovi steka proti ekvatorju in zaključuje t. i. Hadleyjevi celici, ki skupaj tvorita Hadleyjevo cirkulacijo (HC). V tropskih predelih, kjer se zrak dviguje, so značilne pogoste padavine, subtropska območja, kjer se zrak spušča, pa so sušna. HC torej bistveno vpliva na količino padavin, ki jo prejmejo posamezna območja, in prek tega na razporeditev rastja in poselitvena območja.

V tej študiji HC opišemo s tokovno funkcijo, nato pa z (razširjeno) Kuo-Eliassenovo enačbo identificiramo fizikalne procese, ki največ prispevajo k časovno povprečni meridionalni cirkulaciji v Hadleyjevi celici, in ovrednotimo njihove prispevke k celotni intenzivnosti HC. Ob tem tudi analiziramo prostorsko porazdelitev prispevkov posameznih procesov k HC.

Najprej opišemo podatke iz reanaliz, ki smo jih uporabili za izračun HC in nato matematično definiramo HC. Sledi predstavitev in opis razširjene Kuo-Eliassenove enačbe, za tem pa identifikacija glavnih dejavnikov HC. Na koncu ovrednotimo še njihov delež k intenzivnosti posamezne Hadleyjeve celice.

PODATKI

Reanalize so analize preteklega vremena, ki nastanejo tako, da v numerične modele za napovedovanje vremena asimiliramo meritve ozračja in spodnjega roba ozračja. Najnovejše modele in asimilacijske algoritme tako uporabimo na starih meritvah za še boljšo rekonstrukcijo preteklega vremena. Asimilacija podatkov je matematični postopek, pri katerem objektivno kombiniramo meritve s predhodno napovedjo (pri čemer upoštevamo njune napake), da dobimo optimalno analizo, ki jo uporabimo kot začetni pogoj za integracijo numeričnega modela v času (napoved). Pri pripravi reanalize integracijo po kratkem času, npr. 12 ali 24 ur, prekinemo, znova asimiliramo meritve in postopek ciklično ponavljamo.

Za analizo Hadleyjeve cirkulacije uporabimo podatke iz dveh modernih reanaliz, ERA-Interim (Dee et al., 2011) in ERA5 (Hersbach et al., 2020), ki ju je pripravil Evropski center za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF). Novejša reanaliza ERA5 ima višjo horizontalno in vertikalno ločljivost modela, izboljšano dinamično jedro (numerične metode) modela, izboljšane fizikalne parametrizacije pod mrežnih procesov in postopke asimilacije podatkov, poleg tega pa asimilira petkrat več podatkov kot ERA-Interim. Vsebuje tudi podatke o temperaturi površine morja in koncentraciji ledu v oceanih, s tem pa se bolje sklada z izmerjeno temperaturo v troposferi, vetrom, vlažnostjo in količino padavin (Hersbach et al., 2020).

Za analizo smo izbrali dnevne podatke ob 00 UTC na horizontalni mreži z ločljivostjo 1° ter na 37 standardnih nivojih tlaka za zonalno in meridionalno komponento hitrosti horizontalnega vetra u in v , vertikalno pritiskovo hitrost ω in temperaturo T . Podatke smo analizirali za obdobje od 1. 1. 1979 do 31. 12. 2018. Standardni nivoji tlaka niso razporejeni enakomerno, u in v sta podani v enotah m/s , ω v enotah Pa/s , T pa v K .

OPIS HADLEYJEVE CIRKULACIJE S TOKOVNO FUNKCIJO

Intenzivnost HC opišemo s tokovno funkcijo ψ na meridionalno-vertikalni (ϕ, p) ravnini. Tokovno funkcijo ψ definiramo na način, da je zonalno in časovno povprečen vektor hitrosti

$[\mathbf{v}] = ([v], [\omega])$ povsod na (ϕ, p) ravnini pravokoten na gradient tokovne funkcije, torej (Peixoto & Oort, 1992):

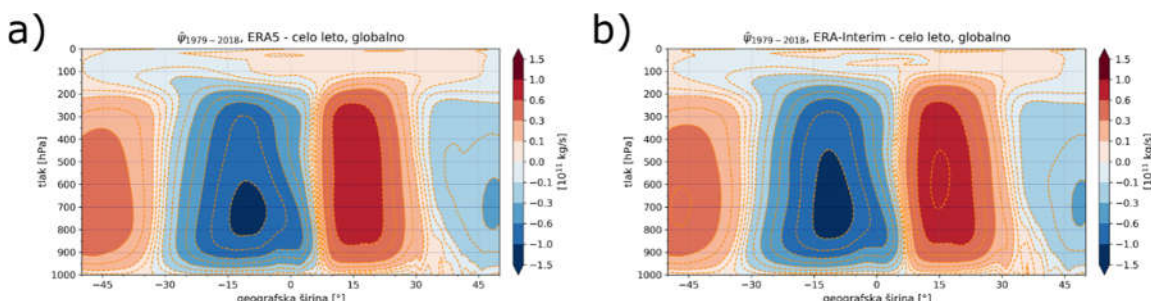
$$[\mathbf{v}] \cdot \nabla \psi = 0.$$

Izolinija tokovne funkcije pa je torej povsod na (ϕ, p) ravnini vzporedna lokalnim vektorjem hitrosti. Za izračun ψ uporabimo zonalno ter letno povprečen meridionalni veter $[v]$ (Peixoto & Oort, 1992):

$$\psi(\phi, p) \frac{2\pi R \cos \phi}{g} \int_0^p [v](\phi, p') dp', \quad (1)$$

kjer privzamemo, da na vrhu atmosfere pri $p = 0$ velja $\psi = 0$. R je polmer Zemlje, g težnostni pospešek, ϕ pa kot geografske širine.

Povprečna intenzivnost zonalno povprečene HC v reanalizah ERA5 in ERA-Interim med letoma 1979 in 2018, izračunana po enačbi (1), je prikazana na sliki 1. V severni Hadleyjevi celici je po definiciji $\psi > 0$, v južni Hadleyjevi celici pa $\psi < 0$. Letno povprečena južna Hadleyjeva celica sega malo čez ekvator na severno poloblo, saj je tudi ekvatorialna konvergenčna cona (ITCZ) pomaknjena za nekaj stopinj geografske širine proti severu. Obe celici se torej stikata na območju ITCZ, zato govorimo o celicah severno in južno od ITCZ ali še bolj preprosto kar o severni in južni celici. Minimum tokovne funkcije $\psi_{\min}$ je v obeh reanalizah v južni celici nižje (pri višjem zračnem tlaku), kot je nivo maksimuma tokovne funkcije $\psi_{\max}$ v severni celici: $\psi_{\min}$ se nahaja na okoli 700 hPa, $\psi_{\max}$ pa na okoli 600 hPa. Absolutna vrednost $\psi_{\min}$ je večja od $\psi_{\max}$, kar pomeni, da je južna celica močnejša od severne celice. Obenem je intenzivnost obeh celic v reanalizi ERA-Interim nekoliko večja kot v ERA5 (Pikovnik, 2021).



Slika 1 – Letno in zonalno povprečje Hadleyjeve cirkulacije v obdobju 1979-2018 na meridionalno vertikalni ravnini za podatke iz reanalize a) ERA5 in b) ERA-Interim (Pikovnik, 2021). Hadleyjevi celici sta celici, ki sta najbližje ekvatorju.

RAZŠIRJENA KUO-ELIASSENOVA ENAČBA

Kuo-Eliassenova enačba povezuje intenzivnost meridionalne cirkulacije s prispevki diabatnega gretja (npr. zaradi sproščanja latentne toplote, radiacijskega gretja itd.), trenja ter meridionalnih pretokov toplote in gibalne količine s cikloni (vrtinci). S Kuo-Eliassenovo enačbo torej lahko ugotovimo, kateri fizikalni procesi največ prispevajo k povprečni meridionalni cirkulaciji v Hadleyjevi celici (Pikovnik, 2021). Osnovna Kuo-Eliassenova enačba upošteva kvazi-geostrofsko aproksimacijo in jo izpeljemo iz sistema štirih zonalno povprečenih enačb: gibalne enačbe za zonalni veter, kontinuitetne enačbe, termodinamične enačbe in enačbe termalnega vetra (Peixoto & Oort, 1992; Chemke & Polvani, 2019). Kvazi-

geostrofska aproksimacija npr. upošteva, da so vertikalna gibanja zanemarljiva napram horizontalnim, kar pa za gibanja v tropskih predelih ne drži, četudi jih zonalno in časovno povprečimo.

Pri izpeljavi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe ne privzamemo kvazi-geostrofskega približka. Ta različica enačbe nam dodatno omogoča ovrednotenje prispevka vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine ter toplote z vrtinci k HC. Magnituda teh procesov (členi z ω) v tropih namreč ni zanemarljiva, zato jih v celoti upoštevamo. Tako dobimo naslednjo obliko razširjene Kuo-Eliassenove enačbe zapišemo v bolj preprosti obliki kot (Zaplotnik in sod., 2022; za celotno izpeljavo glej Pikovnik, 2021):

$$L\psi = D = D_Q + D_{v'T'} + D_X + D_{u'v'} + D_{u'\omega'} + D_{\omega'\theta'}. \quad (2)$$

Povprečna meridionalna cirkulacija, ki jo opisuje ψ , je torej sestavljena iz vsote posameznih prispevkov, ki jih predstavljajo naslednji fizikalni procesi: diabatno gretje D_Q (tako kondenzacijski kot sevalni del), meridionalni pretok toplote z vrtinci $D_{v'T'}$, trenje v zonalni smeri D_X , meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci $D_{u'v'}$, vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci $D_{u'\omega'}$ in vertikalni pretok toplote z vrtinci $D_{\omega'\theta'}$. L je eliptični diferencialni operator 2. reda, ki opisuje vertikalno in meridionalno strukturo zonalno-povprečenega zonalnega vetra in temperature, vključno s statično stabilnostjo ozračja. Velja torej $L\psi \propto -\psi$. Posamezne prispevke zapišemo kot (Zaplotnik in sod., 2022; Pikovnik, 2021)

$$D_Q = \frac{R_d}{p} \frac{\partial [J]}{R \partial \phi}, \quad (3)$$

$$D_{v'T'} = -\frac{R_d}{p} \frac{\partial}{R \partial \phi} \frac{\partial ([v'T'] \cos \phi)}{R \cos \phi \partial \phi}, \quad (4)$$

$$D_X = -f \frac{\partial [F_\lambda]}{\partial p}, \quad (5)$$

$$D_{u'v'} = f \frac{\partial^2 ([u'v'] \cos^2 \phi)}{R \cos^2 \phi \partial p \partial \phi}, \quad (6)$$

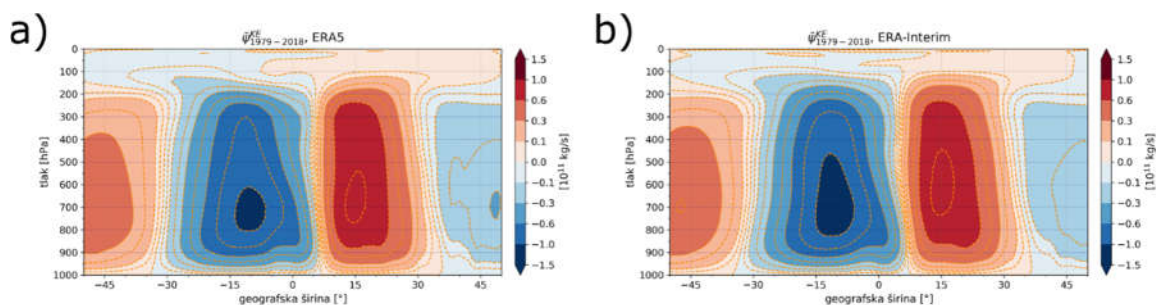
$$D_{u'\omega'} = f \frac{\partial^2 [u'\omega']}{\partial p^2}, \quad (7)$$

$$D_{\omega'\theta'} = -\frac{1}{\rho[\theta]} \frac{\partial}{R \partial \phi} \frac{\partial [\omega'\theta']}{\partial p}. \quad (8)$$

Enačba (3) torej predstavlja meridionalni gradient (zonalno in časovno povprečenega) diabatnega gretja $[J]$, enačba (4) vsebuje meridionalni pretok toplote z vrtinci $[v'T']$, enačba (5) opisuje vertikalni gradient trenja v zonalni smeri $[F_\lambda]$, enačba (6) vsebuje meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci $[u'v']$, enačba (7) vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci $[u'\omega']$, enačba (8) pa vertikalni pretok toplote z vrtinci $[\omega'\theta']$.

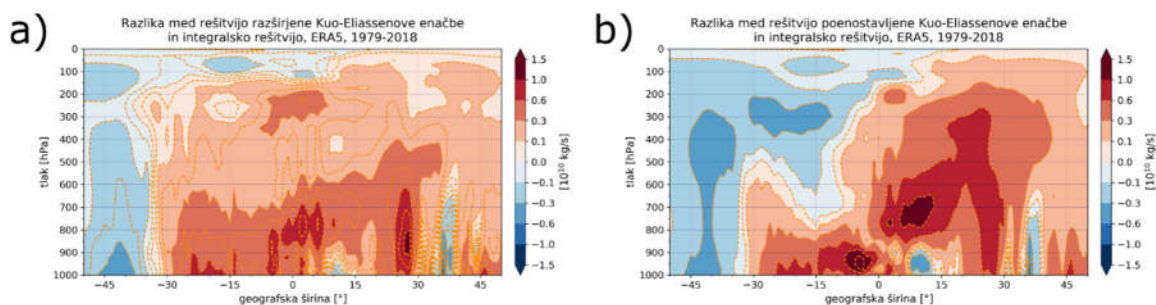
Sistem $L\psi = D$ rešujemo kot matrični sistem numerično z LU-razcepom, rešitev enačbe pa je vektor ψ , v katerega so zložene vrednosti tokovne funkcije v vsaki točki mreže na ravni (ϕ, p) .

Na sliki 2 je prikazana primerjava letnega povprečja intenzivnosti HC v obdobju 1979-2018 po rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe za podatke iz reanaliz ERA5 (slika 2a) in ERA-Interim (slika 2b). Primerjava s sliko 1 potrjuje pravilnost rešitve s Kuo-Eliassenovo enačbo. Če primerjamo npr. sliki 1a in 2a, ugotovimo, da sta si polji podobni, vseeno pa opazimo nekaj razlik. Ena izmed njih je v severni celici, ko gre pri rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe v pasu med 550 hPa in 800 hPa za pozitivno odstopanje vrednosti tokovne funkcije napram direktni metodi (1).



Slika 2 – Primerjava letnega povprečja intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije v obdobju 1979-2018 po rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe za podatke iz a) reanalize ERA5 in b) reanalize ERA-Interim (Pikovnik, 2021).

Na sliki 3 so prikazane še razlike med rešitvijo razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (2) in integralno rešitvijo (1) za podatke iz reanalize ERA5. Odstopanja v točkah mreže so v posameznih letih v ERA5 do 35%, v ERA-Interim pa do 48% manjša od odstopanj pri rešitvi s Kuo-Eliassenovo enačbo. Za obdobje 1979-2018 je odstopanje v ERA5 manjše za 20%, v ERA-Interim pa za 37%. Odstopanje od rešitve po direktni metodi (1) izračunamo tako, da seštejemo absolutne vrednosti razlik med integralno rešitvijo in rešitvijo (razširjene) Kuo-Eliassenove enačbe, primerjamo pa jih kot razmerje med vsoto absolutnih vrednosti razlik pri razširjeni Kuo-Eliassenovi enačbi ("KE full") in vsoto absolutnih vrednosti razlik pri "navadni" Kuo-Eliassenovi enačbi, torej $\sum \Delta\psi_{full}^{KE} / \sum \Delta\psi^{KE}$. Rešitev razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (2) v severni celici precenjuje, v južni celici pa podcenjuje rešitev po direktni metodi, medtem ko rešitev Kuo-Eliassenove enačbe rešitev po direktni metodi precenjuje – na severni polobli v celoti, na južni polobli pa povečini.



Slika 3 – Razlika med a) rešitvijo razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (2) in integralno rešitvijo (1) ter med b) rešitvijo Kuo-Eliassenove enačbe in integralno rešitvijo (1) za podatke iz reanalize ERA5 (Pikovnik, 2021).

NERA POVPREČNE INTENZIVNOSTI CELICE

Za analizo prispevkov različnih fizikalnih procesov k intenzivnosti HC vpeljemo mero povprečne intenzivnosti celice. Pri tej meri prostorsko povprečimo polje tokovne funkcije na območju posamezne celice. Za severno celico tako velja (Pikovnik in sod., 2022):

$$\psi_{NHC} = \langle \psi(\phi, p) \rangle, \text{ kjer velja } \psi \geq 0 \text{ in } (\phi, p) \in [15^\circ, 45^\circ S] \times [1000, 100] \text{ hPa, (9)}$$

pri čemer je korak v meridionalni smeri 1° , v vertikalni smeri pa 50 hPa, s čimer zagotovimo enakomerno vzorčenje HC. Podatke v teh točkah in na teh nivojih namreč že imamo. Za južno celico velja podobno, le da se spremenijo meje območja v meridionalni smeri in da povprečimo negativne vrednosti ψ (Pikovnik in sod., 2022):

$$\psi_{\text{SHC}} = \langle \psi(\phi, p) \rangle, \text{ kjer velja } \psi < 0 \text{ in } (\phi, p) \in [45^\circ\text{J}, 20^\circ\text{S}] \times [1000, 100] \text{ hPa.} \quad (10)$$

POLJA PROCESOV, KI SILIJO HADLEYJEVO CIRKULACIJO

Na sliki 4 levo so predstavljena zonalno in letno povprečena polja diabatnega gretja, meridionalnega pretoka toplote z vrtinci, trenja, meridionalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci ter vertikalnih pretokov zonalne gibalne količine in toplote z vrtinci v reanalizi ERA5. Na sliki 4 desno pa so prikazana polja členov iz desne strani KE enačbe (2), v katerih zgoraj navedena fizikalna polja nastopajo.

Primarni gonilnik HC je diabatno gretje. To je največje na območju ITCZ, skoraj povsem zaradi intenzivnega sproščanja kondenzacijske toplote (ni prikazano; slika 4a). Večje vrednosti diabatnega gretja tik nad površjem so posledica turbulentnega toka zaznavne toplote iz ogretega površja v planetarno mejno plast ozračja ter tudi evaporacije iz površja v ozračje. Območje od nivoja zračnega tlaka 100 hPa navzgor se nahaja izven troposfere, v stratosferi, kjer pride do diabatnega gretja zaradi absorpcije UV sevanja in sproščanja toplote na molekulah ozona. Diabatno stratosfersko gretje na HC ne vpliva, zato ga v nadaljevanju ne omenjamo več. Večji del ozračja je območje neto sevalnega hlajenja, kjer je izsev večji od prejetega sevanja in je diabatno gretje negativno (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Takšna so razsežna območja v subtropski troposferi (slika 4a). V okolici ITCZ v troposferi, kjer je diabatno gretje najmočnejše, je posledično najmočnejši tudi meridionalni gradient diabatnega gretja (slika 4b).

Meridionalni pretok toplote z vrtinci je največji v Ferrelovi celici v zmernih širinah (slika 4c). Ferrelova celica je fiktivna cirkulacijska celica med subtropskimi in subpolarnimi predeli, ki je posledica zonalnega in časovnega povprečevanja planetarnih Rossbyjevih valov, ki skrbijo za prenos toplote in gibalne količine na tem območju. Na območju HC je v zgornji troposferi na severni polobli meridionalni pretok toplote z vrtinci pozitiven, na južni pa negativen, torej imamo v obeh primerih pretok toplote z vrtinci v smeri proti poloma. V subtropih je pretok toplote z vrtinci proti poloma divergenten, ki se odraža v večjem meridionalnem temperaturnem gradientu in tako se krepi intenzivnost HC (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Prispevek meridionalnega pretoka toplote z vrtinci na območju HC se odraža v členu $D_{v'T'}$, ki je največji na območju subtropskega vetrovnega stržena (ang. 'jet stream') na robu obeh Hadleyjevih celic v zgornji troposferi (slika 4d).

Trenje v zonalni smeri je pričakovano največje ob površju (slika 4e). Na območju, kjer se pri stekajočih pasatih zaradi Coriolisove sile in ohranitve vrtilne količine pojavi zonalna komponenta toka in pasati zavijajo v smeri proti zahodu, je trenje v zonalni smeri pozitivno, saj deluje v nasprotni smeri toka (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Močnejši pasati in ekvatorialni vzhodniki torej prispevajo h krepitvi HC. Člen trenja v zonalni smeri D_x je pričakovano največji ob površju (slika 4f), v členu pa je zonalno trenje uteženo še s Coriolisovim parametrom $f = 2\Omega \sin \phi$, kjer je Ω kotna hitrost vrtenja Zemlje. Posledično ima člen D_x maksimum nekoliko dlje od ekvatorja. Trenje samo po sebi ne poganja globalne HC, jo pa pomembno modulira (lahko pa trenje poganja posamezne regionalne Hadleyjeve celice).

Maksimum meridionalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci po absolutni vrednosti sovпада z območjem subtropskega vetrovnega stržena (ang. 'jet stream') na robu

obeh Hadleyjevih celic v zgornji troposferi (slika 4g). Ta pretok praviloma narašča z višino, na območju subtropskega vetrovnega stržena, kjer pihajo splošni zahodniki, pa gre za pretok zonalne gibalne količine z vrtinci iz subtropskih predelov proti zmernim širinam (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Podobno kot meridionalni pretok toplote z vrtinci tudi ta proces kroji predvsem dinamiko v zmernih širinah, v tropskih predelih pa je meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci divergenten, še posebej to velja v zgornji troposferi.

Vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci imata, podobno kot meridionalna pretoka, ravno tako največjo magnitudo na območju subtropskega vetrovnega stržena. Večja sta na južni polobli, saj je tam subtropski stržen močnejši (sliki 4i in 4k). Na območju dviganja zraka ob ITCZ je vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci pozitiven, saj pri dvigu ($\omega' < 0$) pridemo iz območja z močnim vzhodnikom v območje s šibkejšim vzhodnikom, zato je $u' < 0$. Na območju subtropov na robu obeh Hadleyjevih celic pa je $u' > 0$ in ker je tam vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci negativen, to pomeni, da je tudi $\omega' < 0$ in se torej zonalna gibalna količina z vrtinci pretaka navzgor (ni prikazano; Pikovnik, 2021). Prispevek vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci je izrazit na območju subtropskega vetrovnega stržena (slika 4j). Vertikalni pretok toplote z vrtinci ima na območju HC sinusoidni profil po višini. Na območju dviganja zraka ob ITCZ se z vrtinci navzgor pretaka toplejši zrak. Maksimum je tik pod nivojem zračnega tlaka, na katerem je maksimum diabatnega gretja zaradi kondenzacije in sproščanja latentne toplote (Pikovnik, 2021). Prispevek vertikalnega pretoka toplote z vrtinci je majhen, še največji je na območju subtropskega vetrovnega stržena (slika 4l).

ANALIZA POSAMEZNIH PRISPEVKOV K TOKOVNI FUNKCIJI

Da lahko ocenimo prispevek posameznih procesov k celotnemu polju tokovne funkcije, zapišemo ψ v enačbi (2) kot $\psi = \psi_Q + \psi_{v'T'} + \psi_X + \psi_{u'v'} + \psi_{u'\omega'} + \psi_{\omega'\theta'}$. Nato rešimo delne matrične sisteme, torej matrični sistem $L\psi_i = D_i$ za siljenja z $i = Q, v'T', X, u'v', u'\omega', \omega'\theta'$. Polja posameznih prispevkov ψ_i k polju celotne tokovne funkcije ψ za obdobje 1979-2018 so prikazana na sliki 5. Za boljšo predstavbo so na slikah dodane izolinijske tokovne funkcije severne in južne Hadleyjeve celice, ki jih dobimo z reševanjem razširjene Kuo-Eliassenove enačbe.

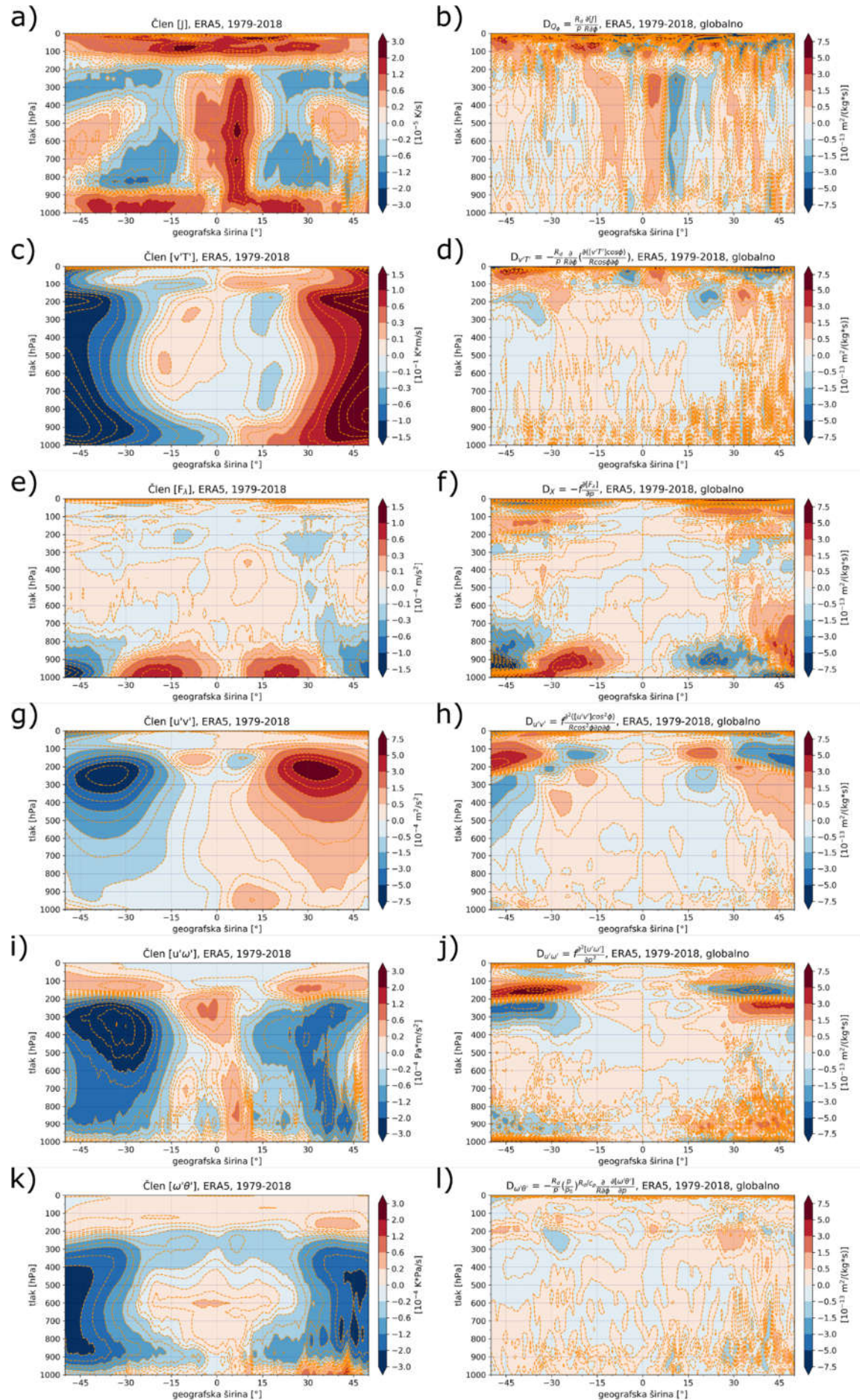
Diabatno gretje, trenje v zonalni smeri ter meridionalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci praktično po celotni severni in južni celici krepijo intenzivnost HC, medtem ko vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci povečini slabita intenzivnost HC v severni in južni celici (glej tudi sliki 6a in 6b).

Največ k intenzivnosti HC pričakovano prispeva diabatno gretje (sliki 5a in 5b). Slednjega tvorita kondenzacijski in sevalni prispevek. Prvi je pomembnejši v tropih in je povezan s kondenzacijo vodne pare ob dviganih v nevihtnih oblakih v ITCZ, pri čemer se sprošča latentna toplota, ki predstavlja primarni vir energije za ozračje v tropskih predelih. Sproščanje latentne toplote v tropih je najbolj intenzivno v srednji troposferi in ima značilen sinusoiden potek temperature z višino (Gill, 1980). Tako je pričakovano tudi prispevek diabatnega gretja največji v srednji troposferi.

Nekoliko manj od diabatnega gretja k intenzivnosti HC prispeva trenje v zonalni smeri (sliki 5e in 5f). Pričakovano je prispevek trenja največji v spodnjih plasteh ozračja, v bližini površja, kjer se stekajo pasati v smeri od subtropov proti ekvatorju.

Meridionalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci k intenzivnosti HC prispevata v podobni meri, le da je prvi nekoliko bolj enakomerno razporejen po vertikali (sliki 5c in 5d), drugi pa je večji v zgornji troposferi (sliki 5g in 5h). Da je prispevek obeh procesov večji v zgornjih plasteh in manjši v spodnjih plasteh ozračja je pričakovano, saj je

meridionalni pretok toplote z vrtinci povezan z pretokom (toplejšega) zraka v zgornjih plasteh ozračja v smeri proti poloma in pretokom (hladnejšega) zraka v spodnjih plasteh ozračja v smeri proti ekvatorju, meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci pa je povezan s subtropskim vetrovnim strženom (ang. 'jet stream'), ki se nahaja na robu Hadleyjeve celice v zgornji troposferi (glej tudi diskusijo v prejšnjem poglavju).



Slika 4 – Letna in zonalna povprečja glavnih fizikalnih procesov (a, c, e, g, i, k) in njihovih pripadajočih siljenj v KE enačbi (2) (b, d, f, h, j, l) v obdobju 1979-2018 za podatke iz reanalize ERA5: diabatno gretje (a, b), meridionalni pretok toplote z vrtinci (c, d), trenje v zonalni smeri (e, f), meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (g, h), vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (i, j) in vertikalni pretok toplote z vrtinci (k, l).

Vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci k intenzivnosti HC po absolutni vrednosti prispevata najmanj, ob tem pa po večini obeh celic prispevata nasprotno od ostalih procesov in tako, sicer v majhni meri, zmanjšujeta intenzivnost HC v obeh celicah. Vertikalni pretok toplote z vrtinci je po obeh celicah razporejen zelo enakomerno (sliki 5k in 5l), medtem ko vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci največ prispeva na območju subtropskega vetrovnega stržena (sliki 5i in 5j).

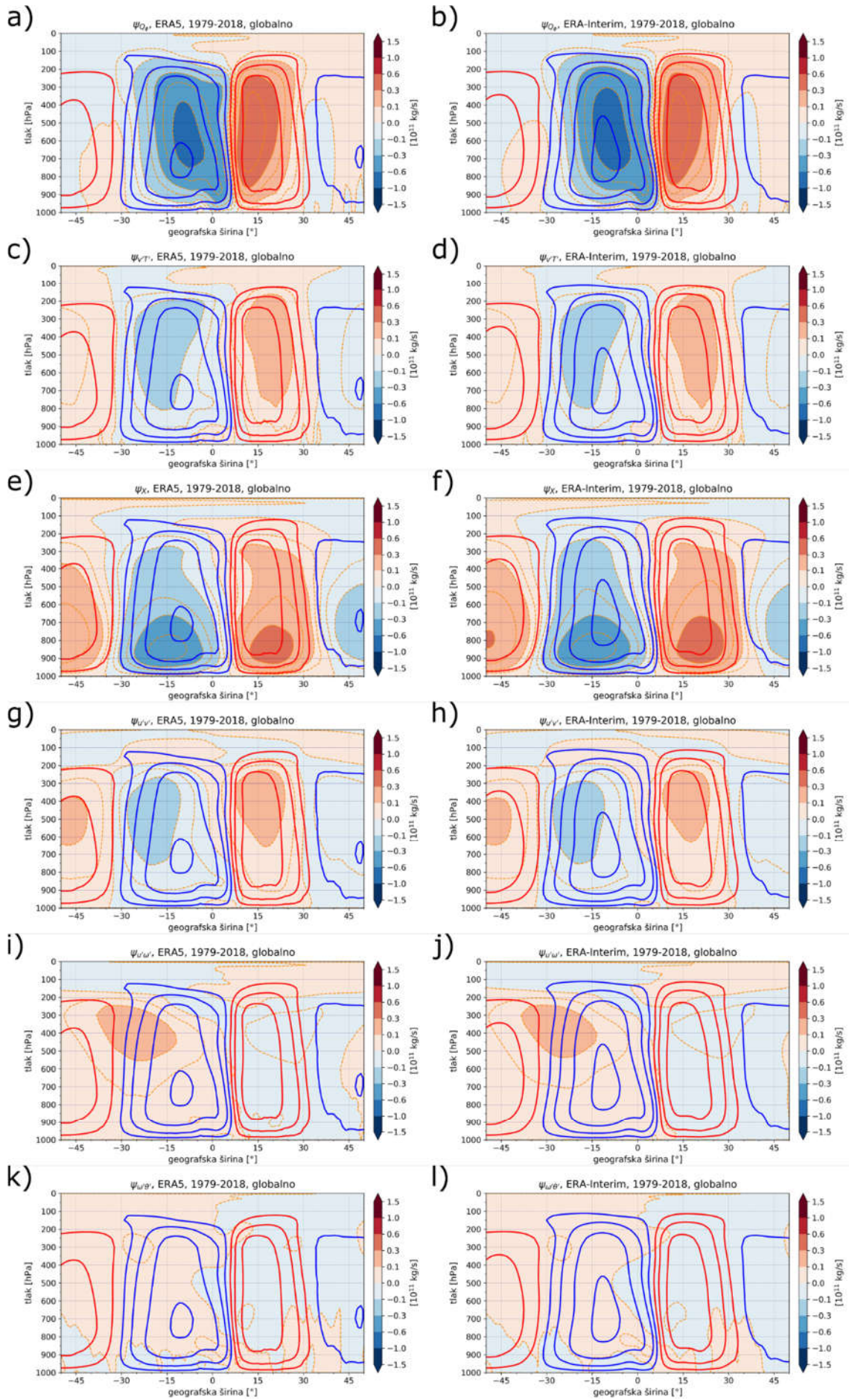
Primerjava med levim stolpcem slike 5, ki prikazuje prispevke posameznih procesov k HC v ERA5, in desnim stolpcem slike 5, ki prikazuje prispevke v ERA-Interim, pokaže, da so si prispevki v obdobju 1979-2018 v obeh reanalizah izjemno podobni kljub različnosti reanaliz (glej poglavje Podatki), kar nakazuje, da so časovno povprečene lastnosti HC v reanalizah natančno opisane, vseeno pa obstajajo precejšnje razlike v trendih intenzivnosti HC, kot je pokazala analiza Pikovnik in sod., 2022.

Nazadnje izračunamo še, kolikšen delež prispevajo k intenzivnosti Hadleyjevih celic (enačbi (9) in (10)) glavni fizikalni procesi za podatke iz reanalize ERA5. Delež R_i , ki ga predstavlja i -ti proces ψ_i (vertikalno in meridionalno ga povprečimo v skladu s povprečevanjem pri enačbah (9) in (10), da dobimo $\langle\psi_i\rangle$) ovrednotimo kot

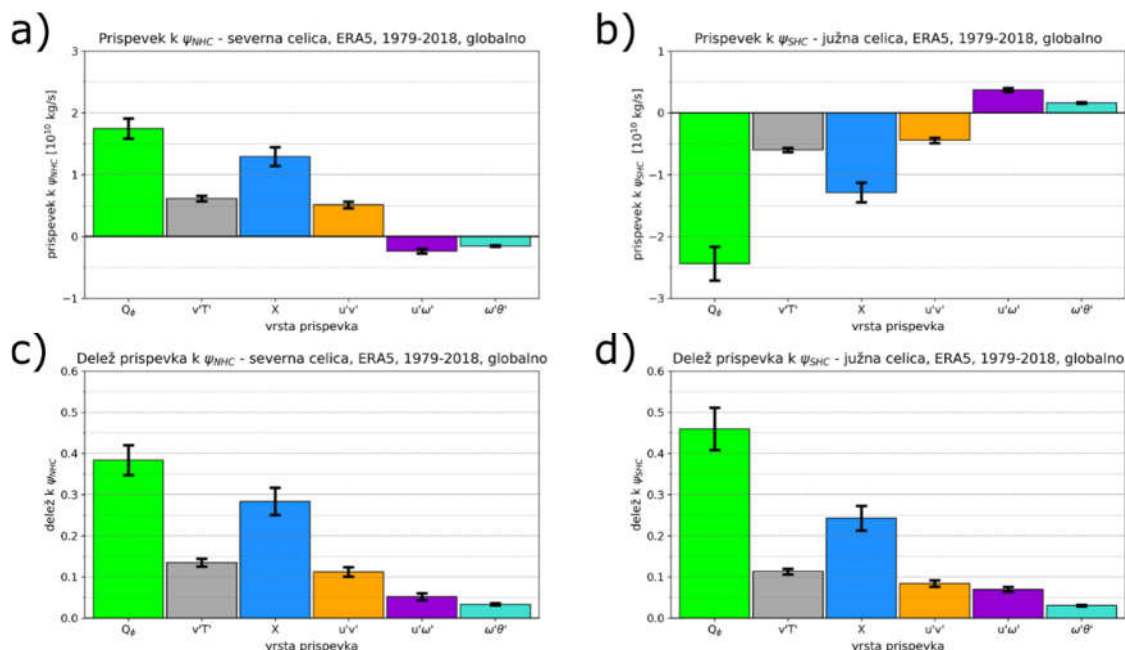
$$R_i = \frac{|\langle\psi_i\rangle|}{\sum_j |\langle\psi_j\rangle|} \quad (11)$$

kjer je $i = Q, v'T', X, u'v', u'\omega', \omega'\theta', \sum_j$ pa predstavlja vsoto po vseh i -jih.

V obeh celicah največji delež HC predstavlja prispevek diabatnega gretja (sliki 6a in 6b): v južni celici omenjeni prispevek predstavlja skoraj polovico celotne cirkulacije (slika 6d), v severni celici pa slabi dve petini (slika 6c). Drugo po deležu prispevka k celotni cirkulaciji je trenje v zonalni smeri, ki v južni celici prispeva približno četrtno celotne cirkulacije, v severni celici pa še nekoliko več. Delež prispevkov ostalih procesov k celotni cirkulaciji je bistveno manjši. Po vrsti si sledijo prispevek meridionalnega pretoka toplote z vrtinci (delež dobrih 10%), prispevek meridionalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci (cca. 10%), prispevek vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci (cca. 5%) in prispevek vertikalnega pretoka toplote z vrtinci (manj kot 5%). Iz omenjenih deležev lahko razberemo, da so prispevki trenja v zonalni smeri ter meridionalnih pretokov toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci v severni celici relativno pomembnejši kot v južni celici. V slednji pa sta relativno bolj pomembna prispevka diabatnega gretja in vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci. Prispevek vertikalnega pretoka toplote z vrtinci je enako relativno pomemben v obeh celicah. Po absolutni vrednosti je prispevek diabatnega gretja v južni celici opazno večji kot v severni celici, medtem ko so prispevki ostalih procesov po absolutni vrednosti primerljivi (sliki 6a in 6b). Iz tega sledi, da je intenzivnost južne celice večja od intenzivnosti severne celice.



Slika 5 – Letna povprečja posameznih prispevkov k tokovni funkciji v obdobju 1979-2018 za podatke iz reanalize ERA5 (a, c, e, g, i, k) in ERA-Interim (b, d, f, h, j, l): diabatno gretje (a, b), meridionalni pretok toplote z vrtinci (c, d), trenje v zonalni smeri (e, f), meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (g, h), vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (i, j) in vertikalni pretok toplote z vrtinci (k, l). Prispevki so prikazani kot barvna območja. S polnimi modrimi in rdečimi črtami je označeno polje letnega povprečja HC po razširjeni Kuo-Eliassenovi enačbi; rdeče črte predstavljajo vrednosti $(0.1, 0.3, 0.6) \cdot 10^{11}$ kg/s, modre črte pa vrednosti $(-0.1, -0.3, -0.6, -1.0) \cdot 10^{11}$ kg/s.



Slika 6 – Prispevki glavnih fizikalnih procesov k celotni Hadleyjevi cirkulaciji (a, b) in njihovi deleži (c, d) v severni (a, c) in južni (b, d) celici v obdobju 1979-2018 za podatke iz reanalize ERA5. Črni intervali označujejo standarden odklon ocene.

ZAKLJUČEK

Z uporabo razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (Zaplotnik in sod., 2022; Pikovnik, 2021) na reanalizah vremena ERA5 in ERA-Interim smo identificirali fizikalne procese, ki v obdobju 1979-2018 največ prispevajo k intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije (HC). To sta diabatno gretje in trenje v zonalni smeri. Ostali procesi, t. j. meridionalna in vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci, so relativno manj pomembni, ne pa zanemarljivi.

Posebej smo analizirali polja omenjenih fizikalnih procesov ter njihove prispevke k polju celotne tokovne funkcije. Ugotovili smo, da je diabatno gretje odgovorno za slabo polovico intenzivnosti celotne cirkulacije, v južni celici nekaj več kot v severni. Prispevek diabatnega gretja je najbolj znaten v srednji troposferi, kjer prihaja do kondenzacije in največjega sproščanja latentne toplote.

Po prispevku k intenzivnosti HC diabatnemu gretju sledi trenje v zonalni smeri, ki predstavlja približno četrtno intenzivnosti celotne cirkulacije. Prispevek trenja je pričakovano največji v spodnji troposferi, torej v bližini površja, hkrati pa je delež trenja pričakovano nekoliko večji v severni celici, saj je tam več kopnega. Trenje ni gonilec globalne HC, jo pa pomembno modulira. Je pa trenje povezano z ekvatorialnimi vzhodniki

lahko gonilec lokalnih Hadleyjevih celic (Zaplotnik in sod., 2022). Prispevki ostalih procesov so omejeni pretežno na zgornjo troposfero oz. na območje subtropskega vetrovnega stržena na robu obeh celic. Diabatsno gretje, trenje v zonalni smeri ter meridionalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci prispevajo h krepitvi intenzivnosti HC, medtem ko vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci prispevata k slabitvi intenzivnosti HC.

Študija je pokazala, da je pri analizi prispevkov k časovno povprečni HC smiselno upoštevati tudi prispevke vertikalnih pretokov zonalne gibalne količine in toplote, ki v tropskih predelih nista zanemarljiva. Slednja smo definirali tako, da smo Kuo-Eliassenovo enačbo izpeljali brez kvazi-geostrofskega približka. Četudi ta dva člena prispevata zanemarljivo malo k nedavnim spremembam intenzivnosti HC, pa imata vseeno nezanimljivo prispevek k njeni povprečni intenzivnosti.

HC nikakor ni zonalno homogena, ne po intenzivnosti niti po razsežnosti. V prihodnosti bomo zato podobno dekompozicijo napravili tudi za lokalne Hadleyjeve celice, npr. za Atlantsko in Pacifiško celico ter celico nad Indijskim oceanom. Tako bomo lahko povezali multidekadne oceanske oscilacije in spremembe HC ter bolje razložili, v kolikšni meri so opažene spremembe HC (Zaplotnik in sod., 2022) posledica multidekadnih internih oscilacij v klimatskem sistemu in v kolikšni meri so neposredno povezane z antropogenimi podnebnimi spremembami.

LITERATURA

- Chemke R., Polvani L. M. (2019). Opposite tropical circulation trends in climate models and in reanalyses. *Nature Geoscience*, 12, 528-532.
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0383-x> (ogled 17.11.2021)
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen I., Kallberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N. in Vitart F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597.
<https://doi.org/10.1002/qj.828> (ogled 17.11.2021)
- ERA-Interim reanalysis, ECMWF.
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>
 (ogled 17.11.2021)
- ERA5 reanalysis, ECMWF.
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
 (ogled 17.11.2021)
- Gill A. E. (1980). Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 447-462.
<https://doi.org/10.1002/qj.49710644905> (ogled 8.12.2021)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S. in Thépaut J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803> (ogled 17.11.2021)
- Peixoto J. P., Oort A. H. (1992). *Physics of climate* / José P. Peixoto and Abraham H. Oort ; foreword by Edward N. Lorenz. American Institute of Physics, New York.

- Pikovnik M. (2021). Analiza sprememb intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije (magistrsko delo). Univerza v Ljubljani, FMF.
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124829> (ogled 18.11.2021)
- Pikovnik M., Zaplotnik Ž., Boljka L., Žagar N. (2022). Metrics of the Hadley circulation strength and associated circulation trends. *Weather and Climate Dynamics* (v recenziji).
- Vallis G. K. (2017). *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*. Second Edition. Cambridge University Press.
- Zaplotnik Ž., Pikovnik M., Boljka L. (2022). Recent Hadley circulation strengthening: a trend or multidecadal variability?. *Journal of Climate* (v recenziji).

Koncentracije metana in ogljikovega dioksida v Lepih jamah, Postojnska jama

Stanka Šebela *

Povzetek

V okviru operacije RI-SI-EPOS, ki sta jo sofinancirala Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj smo v letu 2020 pridobili spektrometer za metan, ki je od 9.9.2020 nameščen v stranskem rovu Lepih jam (Postojnska jama). Najvišje vrednosti metana ~11.000 ppb so bile dosežene aprila 2021, ko je bila jama zaprta za obiskovalce. Glede na zunanje vrednosti metana (~1850 ppb) so koncentracije metana v Lepih jamah v določenih obdobjih precej višje. Tudi glede na meritve metana v nekaterih drugih kraških jamah, so vrednosti v Lepih jamah med višjimi. Razmerje med metanom in ogljikovim dioksidom kaže šibko negativno korelacijo.

Ključne besede: metan, ogljikov dioksid, raziskovalna infrastruktura, RI-SI-EPOS, Postojnska jama, Slovenija.

Keywords: methane, carbon dioxide, research infrastructure, RI-SI-EPOS, Postojna Cave, Slovenia.

Uvod

V okviru projekta »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-EPOS« (<https://izrk.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/ri-si-epos#v>) je vodilni partner ZRC SAZU pridobil spektrometer za metan, ki je od septembra 2020 nameščen v Lepih jamah v Postojnski jami. Gre za prve zvezne meritve koncentracije metana v kraški jami v Sloveniji v povezavi s koncentracijo ogljikovega dioksida, temperaturo in drugimi meteorološkimi parametri.

Metan je toplogredni plin (TGP), ki ima več kot 20-krat močnejši toplogredni učinek od ogljikovega dioksida (<https://www.eea.europa.eu/sl/eea-signali/signali-2013/clanki/podnebne-spremembe-in-zrak>). Značilnost TGP na podnebje našega planeta je, da absorbirajo dolgovalovno sevanje, s čimer vplivajo na sevalno (toplotno) bilanco Zemlje. V skupnem deležu izpustov TGP ima v Sloveniji največji prispevek CO₂ (v letu 2018 kar 82,8%). CO₂ nastaja predvsem pri zgorevanju goriva in tudi pri industrijskih procesih. Sledi metan (11,1 %), ki večinoma izvira iz odpadkov in kmetijstva ter didušikov oksid (4,3 %), ki prav tako nastaja predvsem v kmetijstvu (http://okolje.arso.gov.si/onesnazevanje_zraka/vsebine/toplogredni-plini). Izpusti metana so posledica človekovih dejavnosti (v kmetijstvu, energetiki in pri ravnanju z odpadki), vendar je metan tudi naravnega izvora. Ko se metan sprosti v ozračje, je njegova življenjska doba približno 12 let. Čeprav ga imamo za plin s sorazmerno kratko življenjsko dobo, je njegova življenjska doba dovolj dolga za prenos na daljše razdalje in tako na druga območja (<https://www.eea.europa.eu/sl/eea-signali/signali-2013/clanki/podnebne-spremembe-in-zrak>). Biogeni metan navadno nastaja v manjših globinah (<1 km), medtem ko se termogeni metan dviga iz večjih globin (Vannoli et al., 2021).

* ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna

Leta 1750 je bila koncentracija metana v atmosferi 800 ppb, leta 1998 je bila 1745 ppb, do leta 2010 se je povečala na 1850 ppb. Današnje vrednosti metana so najvišje v zadnjih 400.000 letih (<https://sl.wikipedia.org/wiki/Metan>).

Metan kaže spreminjanje tekom leta z minimalnimi koncentracijami v obdobju poletje-zgodnja jesen. V zgornjem delu severne hemisfere so koncentracije metana višje kot v južni hemisferi (Dlugokencky et al., 1994).

Velika količina metana se nahaja v zemeljski skorji, v globinah oceanov in premafrostu. Glavni viri emisij metana so: razgradnja odpadkov na komunalnih odlagališčih, naravni viri (mokrišča), fosilna goriva, prebavni proces živali, bakterije (mikroorganizmi), ogrevanje ali anaerobna presnova biomase. Od 60 % do 80 % svetovnih emisij je človeškega izvora (premogovniki, deponije, nafta, poslovanje, cevovodi, kmetijstvo) (<https://sl.wikipedia.org/wiki/Metan>).

Emisije metana in CO₂ so povezane tudi s tektonskimi procesi in seizmično aktivnostjo kot so primeri v osrednji Italiji (Vannoli et al., 2021). Emisije metana in blatnih vulkanov prevladujejo v območjih aktivne tektonske kontrakcije (skrčenja) brez prisotnih emisij CO₂ (Vannoli et al., 2021). V Apeninih (Italija) se 54% metana izloča v predelih aktivne tektonske kontrakcije (skrčenja), 15% v področjih post-orogenetske ekstenzije, preostanek je nedoločen (Vannoli et al., 2021).

Metan so odkrili v atmosferi Marsa, Titana, Jupitra, Saturna, Urana, Neptuna in Plutona. Na Mrasu so metan odkrili 1 m nad površjem in tik nad površjem (Preglednica 1) z maksimalnimi vrednostmi do 45 ppb (Safi et al., 2019).

Z dihanjem lahko človek izloča visoke do nizke koncentracije metana in obratno (Polag & Keppler, 2018). Manjši vir atmosferskega metana predstavlja direktna sprostitve metana iz živega človeškega telesa (Polag & Keppler, 2019).

Ponor metana v kraških jamah je bil ugotovljen v Mehiki (Yucatan), kar kaže tudi na povezavo pri razumevanju ogljikovega cikla in delovanju ekosistema v kraških podzemnih estuarijih (Brankovits et al., 2017).

Meritve koncentracije metana v atmosferi, tleh in jamskem zraku v mesečnih intervalih v obdobju štirih let so v jami St. Michaels (Gibraltar) pokazale, da so v tleh povprečne vrednosti za <500 ppb nižje kot v zunanji atmosferi, kjer so 1868 ppb. V jamskem zraku so koncentracije metana nižje kot zunaj in kažejo sezonsko obnašanje, ki je vezano na ventilacijo. Vrednosti metana so nižje, ko so koncentracije CO₂ visoke. Ko pozimi jamski zrak obogaten s CO₂ piha iz jame, kaže močno negativno povezavo z metanom. Med poletno ventilacijo se nivo metana dvigne le na 60% vrednosti metana v zunanji atmosferi. Dinamično prevetrena jama v Gibraltarju lahko deluje kot ponor atmosferskega metana. Metan, ki prihaja v jamo, se uporablja za mikrobno oksidacijo, jamski zrak pa se vrača v atmosfero obogaten s CO₂ in osiromašen s CH₄ (Mattey et al., 2013).

Visoke koncentracije metana v nekaterih jamah so vezane na ekosisteme netopirjev in insektov (Sarbu et al., 1996).

V kraški jami v južni Španiji (Vapour Cave), katere položaj je vezan na aktivne prelome, so koncentracije CO₂ povečane (>10.000 ppm), koncentracije metana pa so le nekoliko višje kot je zunanje ozračje in znašajo 1850 ppm (Fernandez-Cortes et al., 2018).

Namen raziskave je pridobiti večletne podatke koncentracije metana v kraški jami v Sloveniji in ugotoviti dnevne, sezonske in letne cikle spreminjanja koncentracije metana. Hkrati pa tudi pridobiti korelacije med metanom in ogljikovim dioksidom ter določiti vzroke zanje. Zvezne meritve ter določitev izvora metana so pomembni za razumevanje naravnega in/ali antropogenega vpliva na mikro-klimo kraških jam.

Metode

V okviru projekta RI-SI-EPOS smo v letu 2020 pridobili OPSIS LD500 analizator, ki je centralna enota lasersko diodnega sistema za merjenje metana (<https://www.opsis.se/en/Products/Products-CEM-Process/LD500-Laser-Diode-Gas-Analyser>). Spektrometer deluje na principu DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) in je od 9.9.2020 nameščen v stranskem rovu Lepih jam v Postojnski jami (Sliki 1 in 2). Poleg koncentracije metana v zraku (v ppb) izvajamo tudi vzporedne meritve koncentracije ogljikovega dioksida (v ppm), temperature zraka in zračnega tlaka. V neposredni bližini se opravlja 3D monitoring mikro-premikov s tenziometrom TM72. Konec septembra 2021 je bil spektrometer kalibriran. Napaka spektrometra znaša 100 ppb.

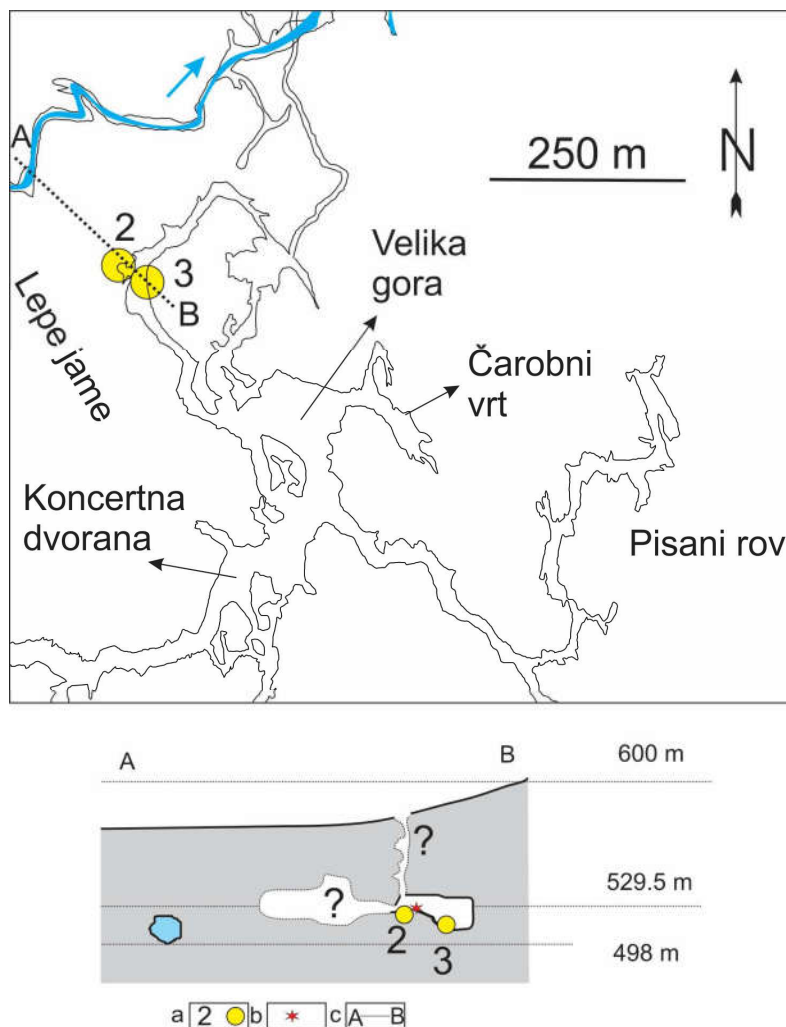


Slika 1 – Laserski diodni spektrometer za merjenje koncentracij metana, Lepe jame, Postojnska jama, foto S. Šebela.

Preliminarni rezultati meritev metana in ogljikovega dioksida v Lepih jamah

V Lepih jamah, ki je najbolj turistično obiskan rov v Postojnski jami, merimo temperaturo zraka in ogljikov dioksid na več mestih. V tem prispevku predstavljamo meritve na mestih Postojna 2 in 3. Lokacija Postojna 3 je tik ob turistični poti, Postojna 2 pa predstavlja stranski delno umetno izkopen rov, ki kaže drugačne mikro klimatske značilnosti od le nekaj metrov oddaljene lokacije Postojna 3 (Šebela & Turk, 2011, 2014; Gregorič et al., 2014), ki so pogojene z morfologijo rova, neznanimi rovi v ozadju in povezavo s površjem.

Meritve metana so se večinoma opravliale v obdobju, ko je bila Postojnska jama zaprta za obiskovalce zaradi pandemije covid-19 (od 26.10. 2020 do začetek poletja 2021).



Slika 2 – Položaj merilnih mest v Postojnski jami. a-merilno mesto Postojna 2 in Postojna 3 (temperatura, ogljikov dioksid), b-merilno mesto za metan, c-prečni profil AB.

Dne 18.9.2020 smo ob obisku štirih ljudi, ki so se zadrževali tik ob spektrometru v manjšem jamskem prostoru opazili, da so se koncentracije metana dvignile za 700 ppb, kar je bilo opisano že v literaturi (Polag & Keppler, 2018, 2019).

Sicer se koncentracije metana v obdobju od 9.9.2020 do 9.6.2021 gibljejo od 0 do 11.000 ppb. Najvišje vrednosti so bile dosežene aprila 2021 (Slika 3), ko je bila jama še zaprta za obiskovalce. V poletnih mesecih leta 2021 se meritve niso opravljale zaradi vzdrževanja opreme in kalibracije.

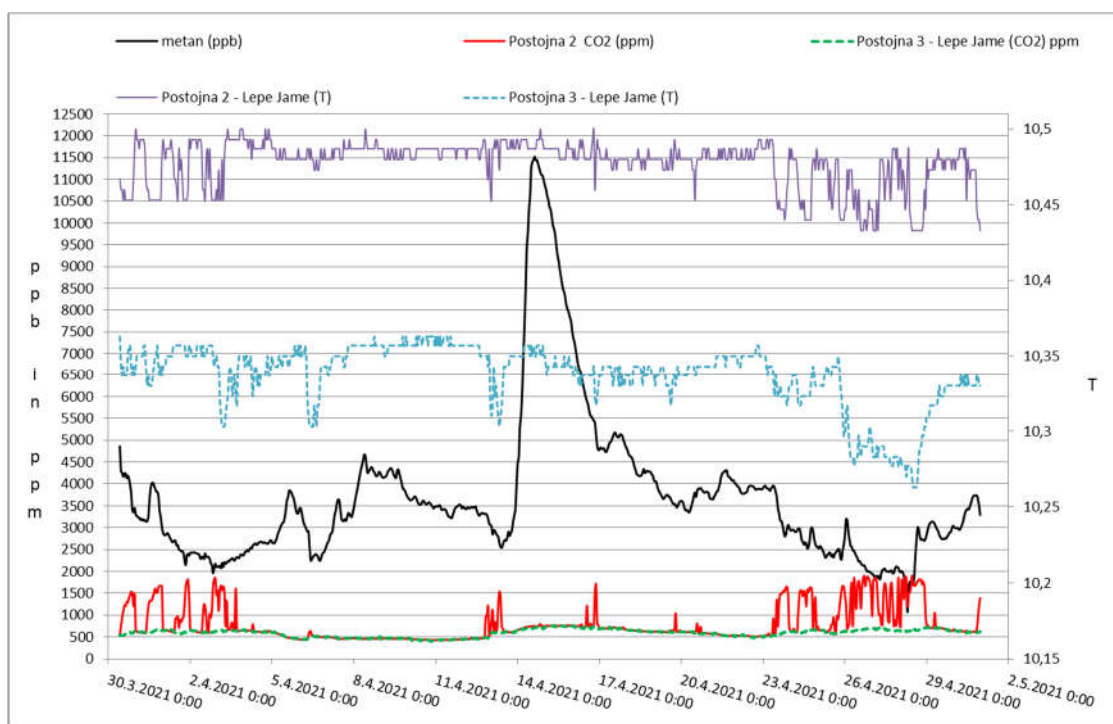
Koncentracije ogljikovega dioksida v stranskem rovu Lepih jamah (Postojna 2, Slika 2) dosegajo najvišje vrednosti do 5500 ppm v jesenskem obdobju 2020 ter v poletno-jesenskem obdobju 2021. Gre za zelo visoke vrednosti, ki so verjetno povezane z ventilacijo z neznanimi rovi v ozadju in samo morfologijo lokacije. Aprilske vrednosti ogljikovega dioksida v Lepih jamah (Postojna 3) so 600-700 ppm. Zimske koncentracije so nižje od poletnih zaradi zimske ventilacije ($T_{out} < T_{cave}$), ko zunanji hladnejši zrak prodira v jamo in znižuje vrednosti ogljikovega dioksida, hkrati pa ohlaja jamski zrak.

Razmerje med metanom in CO_2 kaže šibko negativno korelacijo. Med koncentracijo metana in jamsko temperaturo (Slika 3) ter med metanom in zračnim tlakom ni dobre korelacije. Glede na zunanje vrednosti metana (~1850 ppb) so v Lepih jamah obdobja, ko

so koncentracije metana precej višje od zunanjih. V zimskem obdobju so koncentracije metana v jami višje kot poleti, kar je značilno tudi za zunanjo atmosfero.

Glede na objavljene koncentracije metana v drugih kraških jamah po svetu (Preglednica 1) so vrednosti v Lepih jamah med višjimi, saj dosežejo celo ~11.000 ppb. Podatki v Preglednici 1 kažejo, da so koncentracije metana v drugih jamah podobne kot v zunanji atmosferi. Močno odstopanje predstavlja Molecule Cave v Romuniji, kjer je metan zastopan z 1-2%, ker gre za jamo z izjemnimi pogoji.

Vir metana v Lepih jamah, ostaja predmet nadaljnjih raziskav.



Slika 3 – Meritve urnih vrednosti metana (ppb) in CO₂ (ppm) v Lepih jamah v primerjavi z jamsko temperaturo zraka za obdobje od 30.3.2021 do 30.4.2021.

Preglednica 1. Koncentracije metana (ppb).

	CH ₄ (ppb)	Vir
Vapour Cave (J Španija)	1850	Fernandez-Cortes et al., 2018
Frasassi Cave (Italija)	1900-2200	Jones et al., 2012
Molecule Cave (Romunija)	10.000.000-20.000.000	Sarbu et al., 1996; Hutchens et al., 2004
Cueva de Villa Luz (Mehika)	1880-3670	Webster et al., 2017
Buckner Cave (ZDA)	100-1900	Webster et al., 2016, 2018
St. Michaels (Gibraltar)	1370	Mattey et al., 2013
Jenolan Caves (Avstralija)	max 1775	Waring et al., 2017
Mars (1 m nad površjem)	0,41±0,16 (max 7)	Safi et al., 2019
Mars (tik nad površjem)	33 (max 45)	Safi et al., 2019

Zaključek

Od 9.9.2020 v Lepih jamah v Postojnski jami opravljamo meritve koncentracije metana v zraku. Zadrževanje ljudi pri spektrometru v manjšem jamskem prostoru je povzročilo dvig koncentracije metana za 700 ppb. Sicer so se vrednosti metana v obdobju od 9.9.2020 do 9.6.2021 gibale od 0 do 11.000 ppb. Najvišje vrednosti so bile dosežene aprila 2021, ko je bila jama še zaprta za obiskovalce. Glede na zunanje vrednosti metana (~1850 ppb) so koncentracije metana v Lepih jamah v določenih obdobjih precej višje. Tudi glede na meritve metana v kraških jamah širom po svetu, so vrednosti v Lepih jamah med višjimi.

Koncentracije ogljikovega dioksida v stranskem rovu Lepih jamah (Postojna 2) so najvišje vrednosti do 5500 ppm dosegale v jesenskem obdobju 2020 ter v poletno-jesenskem obdobju 2021. Razmerje med metanom in ogljikovim dioksidom kaže šibko negativno korelacijo.

Raziskava je del projekta »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-EPOS«.

Literatura

- Brankovits, D., Pohlman, J.W., Niemann, H., Leigh M.B., Leewis M.C., Becker K.W., Iliffe T.M., Alvarez F., Lehmann M.F., Philips B. (2017). Methane- and dissolved organic carbon-fueled microbial loop supports a tropical subterranean estuary ecosystem, *Nat Commun* 18, 1835, <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01776-x>
- Dlugokencky, E.J., Steele, L.P., Lang P.M., Masarie, K.A. (1994). The growth rate and distribution of atmospheric methane, *Journal of Geophysical Research* 99, D8, 17, doi:10.1029/94JD01245
- Fernandez-Cortes, A., Perez-Lopez, R., Cuezva, S., Calaforra, J.M., Cañaveras, J.C., Sanchez-Moral, S. (2018). Geochemical Fingerprinting of Rising Deep Endogenous Gases in an Active Hypogenic Karst System, *Geofluids* 4934520, 1-19, <https://doi.org/10.1155/2018/4934520>
- Gregorič, A., Vaupotič, J., Šebela, S. (2014). The role of cave ventilation in governing cave air temperature and radon levels (Postojna Cave, Slovenia), *International Journal of Climatology* 34, 1488–1500. doi: 10.1002/joc.3778
- Hutchens, E., Radajewski, S., Dumont, M.G., McDonald, I.R., Murrell, J.C. (2004). Analysis of methanotrophic bacteria in Movile Cave by stable isotope probing, *Environmental Microbiology* 6, 2, 111-120, <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2003.00543.x>
- <https://izrk.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/ri-si-epos#v> (4.11.2021)
- http://okolje.arso.gov.si/onesnazevanje_zraka/vsebine/toplogredni-plini (10.11.2021)
- <https://sl.wikipedia.org/wiki/Metan> (10.11.2021)
- <https://www.eea.europa.eu/sl/eea-signali/signali-2013/clanki/podnebne-spremembe-in-zrak> (3.11.2021)
- <https://www.opsis.se/en/Products/Products-CEM-Process/LD500-Laser-Diode-Gas-Analyser> (3.11.2021)
- Jones, D.S., Albrecht, H.L., Dawson, K.S., Schaperdorth, I., Freeman, K.H., Pi, Y., Pearson, A., Macalady, J.L. (2012). Community genomic analysis of an extremely acidophilic sulfur-oxidizing biofilm, *The ISME Journal* 6, 158-170, <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.75>
- Mattey, D.P., Fischer, R., Atkinson, T.C., Latin, J.-P., Ainsworth, M., Lowry, D., Fairchild, L.J. (2013). Methane in underground air in Gibraltar karst, *Earth and Planetary Science Letters* 374, 71-80. doi: 10.1016/j.epsl.2013.05.011
- Polag, D., Keppler, F. (2018). Long-term monitoring of breath methane, *Sci Total Environ* 15, 624, 69-77, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.097

- Polag, D., Keppler, F. (2019). Global methane emissions from the human body: Past, present and future, *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116823
- Safi, E., Telling, J., Parnell, J., Chojnacki, M., Patel, M.R., Realff, J., Blamey, N.J.F., Payler, S., Cockell, C.S., Davies, L., Boothroyd, I.M., Worrall, F., Wadham, J.L. (2019). Aeolian abrasion of rock as a mechanism to produce methane in the Martian atmosphere, *Scientific Reports* 9, 8229, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44616-2>
- Sarbu, S.M., Kane, T.C., Kinkle, B.K. (1996). A chemoautotrophically based cave ecosystem, *Science* 272, 1953-1955.
- Šebela, S., Turk, J., (2011). Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring, *Theoretical and Applied Climatology* 105, 371–386. doi: 10.1007/s00704-011-0397-9
- Šebela, S., Turk, J. (2014). Natural and anthropogenic influences on the year-round temperature dynamics of air and water in Postojna show cave, Slovenia, *Tourism management* 40, 233-243, doi: 10.1016/j.tourman.2013.06.011.
- Vannoli, P., Martinelli, G., Valensise, G. (2021). The Seismotectonic Significance of Geofluids in Italy, *Frontiers in Earth Science* 9, 579390, 1-26, doi: 10.3389/feart.2021.579390
- Waring, C.L., Hankin, S.I., Griffith, D.W.T., Kertesz, M.A., Kobylski, V., Wilson, N.L., Coleman, N.V., Kettlewell, G., Zlot, R., Bosse, M., Bell, G. (2017). Seasonal total methane depletion in limestone caves, *Scientific Reports* 7, 8314, doi:10.1038/s41598-017-07769-6
- Webster, K.D., Mirza, Anmar, Deli, J.M., Sauer, P.E., Schimmelmann, A. (2016). Consumption of atmospheric methane in a limestone cave in Indiana, USA, *Chemical Geology* 443, 1-9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.09.020>
- Webster, K.D., Rosales Lagarde, L., Sauer, P.E., Schimmelmann, A., Lennon, J.T., Boston, P.J. (2017). Isotopic evidence for the migration of thermogenic methane into a sulfidic cave, Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico, *J.caves Karst Stud.* 79, 1, 24-34, doi:10.4311/2016ES0125
- Webster, K.D., Drobniak, A., Etiope, G., Mastalerz, M., Sauer, P.E., Schimmelmann, A. (2018). Subterranean karst environments as a global sink for atmospheric methane, *Earth and Planetary Science Letters* 485, 9-18, doi: 10.1016/j.epsl.2017.12.025

Slovenska mreža opazovanj izotopske sestave padavin (SLONIP) – predstavitev spletne strani <https://slonip.ijs.si/>

Polona Vreča¹, Aljaž Pavšek²

Povzetek

Padavine so pomemben del hidrološkega kroga, saj predstavljajo ključni vir vode na kopnem. Poznavanje njihove izotopske sestave v posameznih porečjih nam omogoča sledenje izvora površinskih in podzemnih vod ter določitev dinamičnih značilnosti znotraj posameznih vodnih teles. V prispevku predstavljamo spletno stran Slovenske mreže opazovanj izotopske sestave padavin (v angleščini: SLOvenian Network of Isotopes of Precipitation – SLONIP), ki smo jo na medmrežju vzpostavili aprila 2020 in jo tekom leta 2021 izboljšali in dopolnili z novimi podatki. SLONIP zajema trenutno podatke o izotopski sestavi padavin, ki so bili pridobljeni v okviru različnih raziskav, pretežno v okviru kratkotrajnih raziskovalnih projektov, ki so potekali od leta 1981 na Institutu "Jožef Stefan" v sodelovanju z različnimi organizacijami. Ker so podatki o izotopski sestavi padavin uporabni tako za upravljanje z vodnimi viri, v klimatskih raziskavah in ugotavljanju geografskega porekla hrane, je smiselno po vzoru razvitih držav (npr. Švice) osnovati tudi v Sloveniji nacionalno mrežo opazovanj, ki bi obsegala sistematično spremljanje tako izotopske sestave padavin kot tudi površinskih in podzemnih vod na izbranih lokacijah.

Ključne besede: Izotopska sestava, kisik, vodik, padavine, vodni viri, podatkovna baza

Key words: Isotope composition, oxygen, hydrogen, precipitation, water resources, database

Uvod

Voda je ključnega pomena za vse znane oblike življenja in stalno potuje skozi različne sfere Zemlje v obliki vodnega kroga, ki zajema izhlapevanje, transpiracijo, kondenzacijo, padavine, odtok itd. Poti vodnih molekul v vodnem krogu od padavin do površinskih in podzemnih vod ter naprej do oskrbe s pitno vodo lahko sledimo s pomočjo stabilnih (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^1H , ^2H) in radioaktivnih (^3H) izotopov, ki sestavljajo vodno molekulo. Osnovna teoretična izhodišča smo podrobneje predstavili na 13. strokovnem srečanju Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (Vreča in Brenčič, 2009 in tam navedene reference).

Padavine predstavljajo začetek vodnega kroga in napajajo tako površinske kot podzemne vode, ki so vir pitne vode. Izotopsko sestavo padavin, ki zajema spremljanje razmerij stabilnih izotopov vodika (izraženo kot $\delta^2\text{H}$ v ‰) in kisika (izraženo kot $\delta^{18}\text{O}$ v ‰) ter koncentracije aktivnosti radioaktivnega izotopa vodika (tritija – ^3H v T.U.), ter njihovo časovno in prostorsko porazdelitev, določajo geografske značilnosti področja (geografska širina, oddaljenost od oceanov, nadmorska višina), izvor in mešanje zračnih mas, temperatura, količina padavin, zračna vlaga, evaporacija in sezonske spremembe, in so značilne za posamezno področje (Craig, 1961; Dansgard, 1964; Rozanski et al., 1993; Schotterer et al., 1996; Ingraham, 1998). Ker imajo padavine določeno izotopsko sestavo, nam omogoča spremljanje njihove izotopske sestave in izotopske sestave površinskih in podzemnih vod določiti izvor vode, dinamiko površinskih vod, čas napajanja vodonosnikov in njihovo napajalno zaledje, sezonsko odvisnost napajanja, srednji zadrževalni čas, velikost

¹ Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana; polona.vreca@ijs.si

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana

vodonosnika, hitrost mešanja in cirkulacijo vode kot tudi starost vod (Clark in Fritz, 1997). Zato so podatki o izotopski sestavi komponent vodnega kroga pomembni za raziskave kroženja vode v najširšem pomenu. Ti podatki prispevajo tudi k boljšemu razumevanje izmenjave vode znotraj kritičnega območja, tj. dinamične »kože« Zemlje (v angleščini: »Critical Zone«), ki sega od vegetacijskega pokrova do podzemne vode v vodonosnikih in je ključnega pomena za reševanje okoljskih problemov, povezanih z upravljanjem vodnih virov.

Sočasno z razvojem analiznih tehnik in prvimi spoznanji o zakonitostih v izotopski sestavi padavin je Mednarodna agencija za atomsko energijo (International Atomic Energy Agency – IAEA) v sodelovanju s Svetovno meteorološko organizacijo (World Meteorological Organization – WMO) začela leta 1958 z zbiranjem podatkov o izotopski sestavi padavin po celem svetu. V letu 1961 je nato nastala svetovna mreža postaj (Schotterer et al., 1996), ki so posredovale meteorološke (količina padavin, temperatura zraka in zračna vlaga) in izotopske podatke v bazo podatkov GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), ki jo vzdržuje IAEA. V številnih primerih so opazovalci na postajah zbirali le meteorološke podatke in vzorce padavin, ki so jih nato poslali na IAEA, kjer so opravili analize izotopske sestave vode in rezultate vključili v bazo podatkov GNIP. V nekaterih primerih raziskovalci skrbijo tako za vzorčenje kot tudi za analize vzorcev in nato posredujejo v GNIP le končne rezultate. Sodelovanje v GNIP je prostovoljno (http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), zato so podatki za daljše časovno obdobje (t.j. več kot 40 let) redki, število postaj s podatki pa se s časom spreminja. Od pričetka delovanja GNIP je bilo v mrežo vključenih 1296 različnih postaj, od tega jih je leta 1961 poročalo rezultate 260, za leto 2020 pa do sedaj le 20 (S. Terzer-Wassmuth, osebna komunikacija). Glavni problem GNIP, ki deluje že več kot 60 let, je zato v preteklosti predstavljala počasnost zbiranja in objavljanja podatkov, pomanjkanje podatkov za specifično območje raziskav ter sklicevanje na IAEA tudi v primerih, kjer se zagotavljajo meteorološki in izotopski podatki v celoti na nivoju posamezne države. V preteklosti so bili podatki objavljeni v IAEA publikacijah (http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), danes pa so zbrani na medmrežju na portalu WISER (Water Isotope System for Data Analysis, Visualization and Electronic Retrieval, <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>).

Geografska lega Slovenije in razgiban relief na meji med Sredozemskim morjem, Alpami in Panonsko nižino pogojuje pester meteorološke značilnosti, ki se časovno in prostorsko pod vplivom celinskega, subalpskega oziroma alpskega in submediteranskega podnebja zelo spreminjajo od zahoda proti vzhodu in od severa proti jugu (Dolinar et al., 2008). Geomorfološke danosti in geološka sestava ozemlja pa vplivajo na hidrološke in hidrogeološke značilnosti, zaradi katerih so podatki o izotopski sestavi padavin s tega področja še posebej zanimivi, saj se tako kot podnebje časovno in prostorsko spreminjajo.

Zato ne preseneča, da so prve raziskave izotopske sestave kisika in vodika v padavinah na območju Slovenije potekale v okviru sledilnih poskusov na krasu, ki so se v obdobju 1972-1975 izvajali na območju reke Ljubljanice (Gospodarič in Habič, 1976). Prvo redno in sistematično spremljanje izotopske sestave padavin pa se je pričelo leta 1981 v Ljubljani (Pezdič, 1999; arhiv IJS) in poteka še danes. Raziskave izotopske sestave padavin v Sloveniji so v zadnjih štirih desetletjih potekale na številnih lokacijah v okviru različnih raziskav, (Vreča in Malenšek, 2016; Vreča et al., 2017, Hatvani et al., 2021). Glavna pomanjkljivost preteklih raziskav je, da so potekale pretežno v okviru kratkotrajnih raziskovalnih projektov, ki so jih izvajale različne skupine raziskovalcev iz različnih institucij, mreža opazovanj pa ni organizirana na nacionalnem nivoju kot npr. v Švici (Schürch in sod., 2003), zato je dostopnost podatkov zelo omejena. Identificirali smo tudi številne druge pomanjkljivosti in ugotovili, da v dostopni literaturi ponekod manjkajo podatki o lokacijah (koordinate), o

načinu vzorčenja (vrsta uporabljenega dežemera, obdobje in frekvenca vzorčenja), o odstranjevanju nečistoč iz vzorcev (filtriranje, ločevanje parafinskega olja), o uporabljeni embalaži za hranjenje vzorcev (npr. polietilenska, steklena), o uporabi analiznih metod, zagotavljanju kakovosti meritev in merilni negotovosti rezultatov. Pogosto tudi niso na voljo numerične vrednosti, nadaljnje obdelave podatkov pa so pomanjkljivo opisane (Vreča in Malenšek, 2016).

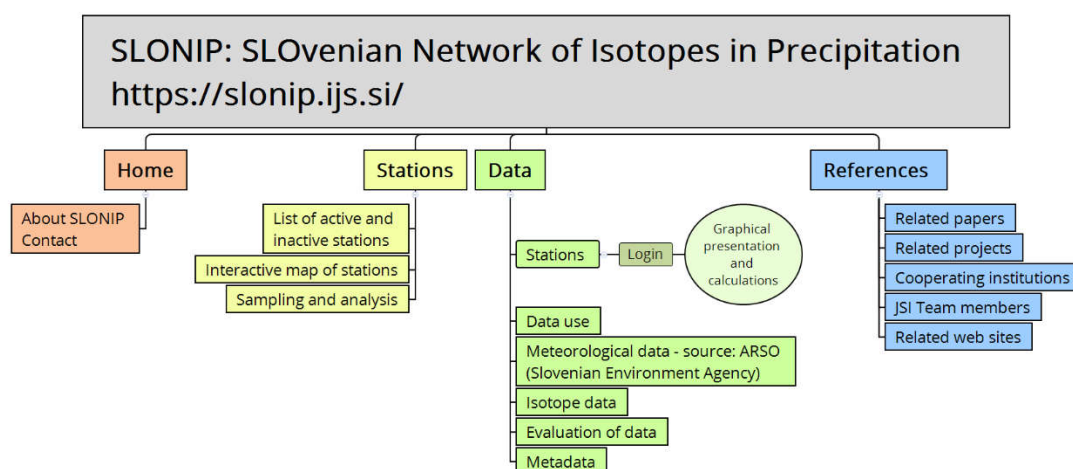
Podatki o izotopski sestavi padavin v Sloveniji so na voljo v GNIP le v manjši meri. Od leta 1984 dalje jih je posredoval Institut "Jožef Stefan" (IJS) v sodelovanju z Institutom Rudjer Bošković (IRB) iz Zagreba in sicer do 2004, za Ljubljano in Zagreb. Za krajše obdobje opazovanj so dostopni tudi podatki za Portorož in Kozino. Ideja, da bi po vzoru GNIP vzpostavili Slovensko mrežo opazovanj izotopske sestave padavin (v angleščini: SLOvenian Network of Isotopes of Precipitation – SLONIP), je bila prvič predstavljena leta 2006 na 2. Slovenskem geološkem kongresu. Sledilo je dolgo prehodno obdobje, ko so potekale različne aktivnosti, ki pa žal niso bile poenotene niti na nacionalnem niti na med inštitutskim nivoju (Vreča in Malenšek, 2016, Vreča et al. 2017). V tem času so potekale tudi programske posodobitve GNIP.

Da bi premostili vrzel med GNIP in opazovanji v Sloveniji in izboljšali dostopnost podatkov, smo zato pričeli leta 2016 na Odseku za znanosti o okolju Instituta "Jožef Stefan" s pripravo gradiva za spletno stran SLONIP (<https://slonip.ijs.si/>), ki je zaživel 1. 4. 2020 in jo sedaj vzdržujemo in postopno dopolnjujemo. Glavni namen spletne strani je zbiranje obstoječih, dostopnih podatkov o izotopski sestavi padavin v Sloveniji, ki so bili pridobljeni v okviru raziskav na IJS ter s tem izboljšati dostopnost do podatkov znanstveno-raziskovalnim skupinam ter ostalim zainteresiranim uporabnikom. V nadaljevanju je predstavljena struktura spletne strani in njene glavne vsebine.

Predstavitev spletne strani SLONIP

Struktura spletne strani

Spletna stran SLONIP je na voljo le v angleškem jeziku. Struktura spletne strani je preprosta in zajema 4 podstrani kot je prikazano na Sliki 1: Home, Stations, Data in References.



Slika 1. Shematski prikaz strukture spletne strani <https://slonip.ijs.si/>

Spletna stran SLONIP ponuja uporabnikom:

- osnovne informacije o SLONIP vključno s pogoji uporabe (podstran Home, <https://slonip.ijs.si/>);
- informacije o postajah, kjer poteka ali je potekal monitoring izotopske sestave padavin (podstran Stations, <https://slonip.ijs.si/stations/>, Slika 2) in so bili rezultati objavljeni v dostopnih virih;
- podatke v grafični obliki in izračune povprečnih mesečnih, sezonskih in letnih vrednosti ter lokalnih meteoroloških premic vključno s pogoji uporabe podatkov, virom meteoroloških podatkov, pojasnili o uporabljenih metodah za obdelavo podatkov in seznamom metapodatkov (podstran Data, <https://slonip.ijs.si/data/> – vsebina je dostopna po registraciji uporabnika);
- sezname referenčnih dokumentov, projektov, sodelujočih institucij in sorodnih spletnih strani (podstran References, <https://slonip.ijs.si/references/>).

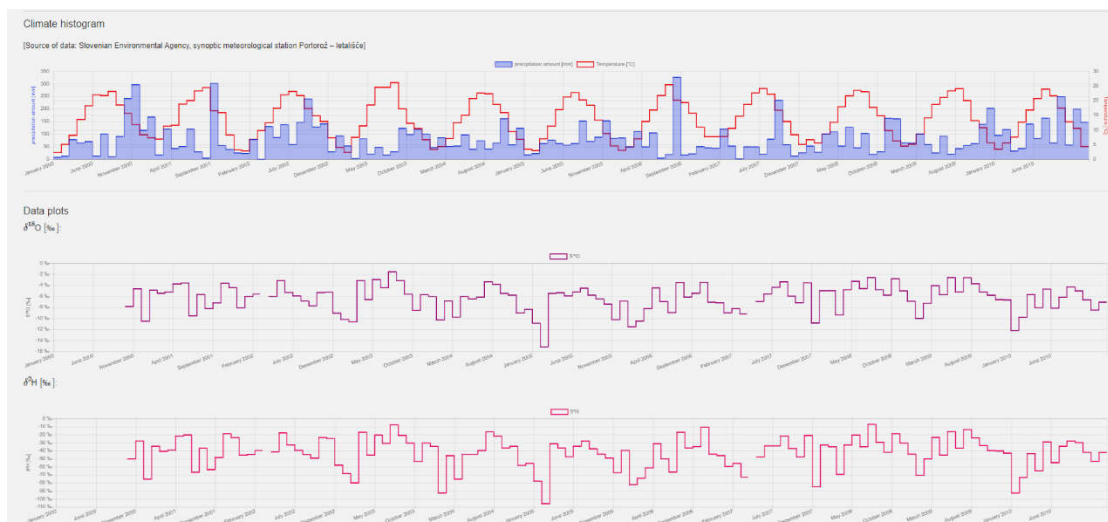


Slika 2. Prikaz postaj, kjer poteka ali je potekal monitoring izotopske sestave padavin s kratkim opisom vzorčenja in analiz

Raziskave v Sloveniji tekom zadnjih desetletij so pokazale, da je za uspešno izvajanje opazovanj najbolj primerno vzorčenje na glavnih meteoroloških, klimatoloških ali padavinskih postajah, ki jih vzdržuje za potrebe meteorologije Agencija RS za okolje (ARSO). Na postajah, ki so del državne meteorološke mreže, izvaja vzorčenje padavin za potrebe izotopskih raziskav osebje postaj dnevno. Zbrani vzorci predstavljajo mesečni kompozit. V nekaterih primerih skrbimo za vzorčenje sodelavci IJS (npr. v Ljubljani na Reaktorskem centru IJS) oziroma nam pomagajo prostovoljci (npr. Sv. Urban). Za pridobitev kakovostnih podatkov je potrebna stalna dobra komunikacija z osebjem postaj, kar je v Sloveniji zaradi majhnosti države lahko izvedljivo in so pretekle izkušnje zelo pozitivne. Natančnejša navodila za vzorčenje padavin so na voljo na IAEA GNIP spletni strani (http://www.naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), nekatera dodatna priporočila pa so podana v pregledu raziskav, ki sta ga opravili Vreča in Malenšek (2016).

Grafični prikaz in obdelava podatkov

Na spletni strani so grafično predstavljeni podatki za izotopsko sestavo kisika ($\delta^{18}\text{O}$), vodika ($\delta^2\text{H}$ v ‰) in tritija (^3H) ter devterijevega presežka d , ki ga je v izotopsko hidrologijo vpeljal Dansgaard (1964; $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$). Numerični podatki o izotopski sestavi padavin, ki so vidni s pomikom po grafu, trenutno še niso v celoti prosto dostopni, posredujemo pa jih na zahtevo zainteresiranega uporabnika. Za vsako postajo je prikazan tudi klimatološki histogram (Slika 3), za katere uporabljamo podatke iz meteorološkega portala ARSO (<https://meteo.arso.gov.si/>).



Slika 3. Primer prikaza klimatskega histograma za postajo Portorož in grafični prikaz spreminjanja izotopske sestave padavin v obdobju 2000-2010.

Ker je za primerjavo podatkov iz različnih postaj pomembno, da leto ovrednotimo na enak način, je na SLONIP podrobno opisano kako so izvedeni izračuni, ki služijo nadalje za numerični in grafični prikaz mesečnih, sezonskih in letnih povprečij ter lokalnih meteornih premic (podstran Data; zavihki Stations data in pojasnilo v Evaluation of data).

The screenshot shows the SLONIP website interface. At the top, there is a navigation bar with 'Home', 'Stations', 'Data', and 'References'. Below this is a header with the SLONIP logo and the full name 'SLOvenian Network of Isotopes in Precipitation'. The main content area is divided into two sections. On the left, under 'Stations data:', there is a list of station names in buttons: Ljubljana, Portorož, Kozina, Kredarica, Sv. Urban, Murska Sobota, Zg. Radovna, and Rateče. On the right, under 'Supplementary data use info:', there is a list of data types in buttons: Data use, Meteorological data, Isotope data, Evaluation of data, and Metadata.

Slika 4. Prikaz zavihka Data

Pri obdelavi podatkov o izotopski sestavi padavin praviloma izhajamo iz osnovnih opisnih statistik (poprečje, minimum in maksimum). Ker pa je izotopska sestava padavin povezana s količino padavin, pri prikazu vrednosti uporabljamo tudi utežena poprečja:

$$\bar{x}_{weighted} = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

in je:

$$w_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2)$$

V enačbah (1) in (2) x označuje izotopsko sestavo (npr. $\delta^{18}\text{O}$), oznaka p pa višino padavin (v mm) in i posamezen mesečni vzorec. Seštevanje praviloma izvedemo preko celotnega niza vzorcev ali pa preko posameznega časovnega obdobja (npr. koledarskega leta, posamezne sezone ali izbranega meseca).

Pomemben del obdelave podatkov v izotopski hidrologiji predstavlja izračun meteornih premic. V procesih izhlapevanja in kondenzacije padavin poteka frakcionacija vodikovih izotopov proporcionalno kisikovim izotopom, zaradi česar je v padavinah izotopska sestava kisika in vodika med seboj povezana in korelira. Na podlagi tega je Craig (1961) prvi definiriral tako imenovano globalno padavinsko premico (Global Meteoric Water Line – GMWL: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$). Craigova (1961) GMWL predstavlja svetovno povprečje in je modelna premica s katero primerjamo naše lokalne podatke. Lokalno spreminjanje izotopske sestave vodika in kisika, ki je posledica različnih klimatskih pogojev, opišemo zato z lokalnimi padavinskimi premicami (Local Meteoric Water Line - LMWL), za katere pa lahko uporabimo različne regresijske metode (Crawford et al., 2014).

Ker je poleg tega, da so podatki o izotopski sestavi padavin v Sloveniji dostopni, naš namen tudi, da so pravilno obdelani za nadaljnjo uporabo v različnih študijah, so na spletni strani metode, ki jih SLONIP uporablja za procesiranje podatkov, podrobneje opisane. Informacije o uporabljenih regresijskih metodah in formule, ki jih v ozadju uporablja SLONIP so navedene na podstrani Data, pod zavihkom Evaluation of data.

Podatki, ki jih uporabimo za izračun letnih povprečij in regresijskih premic so uporabni le, če sta izpolnjena dva pogoja. Prvi pogoj je, da imamo na voljo v posameznem letu vsaj 8 ali več mesečnih podatkov o izotopski sestavi padavin. Drugi pogoj je, da predstavlja skupna količina analiziranih padavin vsaj 70 % letnih padavin.

Za izračun lokalnih padavinskih premic smo izbrali dve različni regresijski metodi, Reduced Major Axis Regression (RMA) in Major Axis Regression (MA), za kateri smo se odločili zaradi dejstva, da moramo vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ upoštevati na enak način in ne smemo nobene tretirati kot neodvisno spremenljivko. Uporabljene regresijske metode so povzete po članku Crawford et al. (2014). Tako kot v omenjenem članku, tukaj navajamo le formule za izračun regresijskih koeficientov, ne pa tudi bolj podrobnih informacij o teh metodah, kot so numerična stabilnost itd.

Posamezne mesečne vrednosti izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in vodika ($\delta^2\text{H}$) bomo označevali z x_i in y_i . Pri navadnih, neuteženih regresijskih metodah (v nadaljevanju označenih z RMA in MA), se naklona premic (a) izračunata po formulah:

$$a_{RMA} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}} \quad (3)$$

in

$$a_{MA} = \frac{(\sum_{i=1}^n V_i^2 - \sum_{i=1}^n U_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n V_i^2 - \sum_{i=1}^n U_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n U_i V_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n U_i V_i} \quad (4)$$

kjer sta:

$$U_i = (x_i - \bar{x}) \quad (5)$$

in

$$V_i = (y_i - \bar{y}) \quad (6)$$

odstopanji posamezne meritve od povprečja.

Presečišče z ordinato (b) je v obeh primerih podano z:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - a \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - a\bar{x} \quad (7)$$

Napaki (standardna deviacija) v koeficientih obeh metod se izračunata po formulah:

$$SE_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad , \quad SE_b = SE_a \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 / n} \quad (8-9)$$

kjer je:

$$\hat{y}_i = ax_i + b \quad (10)$$

izračunan s pomočjo dobljenih regresijskih koeficientov a in b .

Ker količina padavin v Sloveniji tekom leta ni enakomerno porazdeljena, je pomembno mesečno količino padavin v uporabljenih regresijskih metodah upoštevati. Zato so Crawford et al. (2014) predlagali uporabo regresijskih metod, v katerih rezultate $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ utežimo s količino padavin in uporabimo t.i. PWRMA – Precipitation Weighted Reduced Major Axis Regression oziroma PWMA – Precipitation Weighted Major Axis Regression.

Za nadaljnji izračun je prikladno najprej definirati dodatni spremenljivki:

$$U_{wi} = x_i - \bar{x}_w \quad (11)$$

in

$$V_{wi} = y_i - \bar{y}_w \quad (12)$$

kjer sta:

$$\bar{x}_w = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (13)$$

in

$$\bar{y}_w = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (14)$$

s količino padavin uteženi povprečji $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$.

Naklon premic pri PWRMA in PWMA se izračunata kot:

$$a_{PWRMA} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_w)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x}_w)^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2}{\sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2}} \quad (15)$$

in

$$a_{PWMA} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2 - \sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2 + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2 - \sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n w_i U_{wi} V_{wi})^2}}{2 \sum_{i=1}^n w_i U_{wi} V_{wi}} \quad (16)$$

začetni vrednosti pa sta podani s formulo:

$$b_{PW} = \sum_{i=1}^n w_i y_i - a \sum_{i=1}^n w_i x_i = \bar{y}_w - a\bar{x}_w \quad (17)$$

Standardni deviaciji naklona in odseka izračunamo po formuli:

$$SE_{a,PW} = \sqrt{\frac{\frac{n \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}{n \sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (18)$$

in

$$SE_{b,PW} = SE_{a,PW} \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i x_i^2} \quad (19)$$

in je:

$$\hat{y}_i = ax_i + b \quad (20)$$

Navedene formule so implementirane v kodi SLONIP na tak način, da je edina naloga administratorja naložiti nove izotopske podatke v obliki Excelove datoteke, preostala obdelava podatkov se izvede avtomatsko. Tekom izdelave spletne strani je nastal tudi program za osebno uporabo, ki bazira na kodi, ki jo uporablja SLONIP. Program je odprtokoden in bo kmalu na voljo za javnost na portalu Github.

V izotopskih študijah se najbolj pogosto uporablja kot regresijski model za izračun premic metoda najmanjših kvadratov (Ordinary Least Squares Regression – OLSR), kar pa je, glede na naravo izotopskih podatkov, zmotno. Zato bomo verjetno v prihodnosti dodali za primerjavo z izračuni drugod po svetu na spletno stran SLONIP tudi izračun OLSR.

Zaključek

SLONIP (<https://slonip.ijs.si/>) je prva spletna stran, ki vsebuje podatke o izotopski sestavi padavin v Sloveniji skupaj z grafičnimi predstavitvami časovnega spreminjanja posameznih parametrov in numeričnimi izračuni povprečnih mesečnih, sezonskih in letnih vrednosti ter lokalnih meteornih premic padavinskih premic. Osnovana je bila po vzgledu mednarodne podatkovne baze GNIP in nekaterih drugih nacionalnih programov spremljanja izotopske sestave vod (npr. švicarskega modula ISOT) z dopolnitvami na osnovi dolgoletnih raziskav na področju izotopske hidrologije. Trenutno so na SLONIP predstavljeni podatki, ki so bili pridobljeni v okviru različnih raziskav, pretežno v okviru kratkotrajnih raziskovalnih projektov, ki so potekali od leta 1981 na Institutu "Jožef Stefan" v sodelovanju z različnimi organizacijami in so rezultati (numerični podatki) objavljeni v javno dostopnih publikacijah. V prihodnosti nameravamo SLONIP postopoma dopolniti z razpoložljivimi arhivskimi podatki.

V prihodnosti bi bilo smiselno, da bi SLONIP postala del nacionalnega programa pod okriljem ARSO in bi bila mreža sistematičnih opazovanj izotopske sestave vode razširjena tudi na ostale komponente vodnega kroga (npr. površinske in podzemne vode, snežno odejo, vodo iz pip).

Zahvala

Raziskave izotopske sestave padavin potekajo trenutno v okviru nacionalnega raziskovalnega programa (P1-0143) ter IAEA koordiniranih projektov F31006, F33024 in RER7013, v preteklosti pa so se izvajale v okviru številnih projektov navedenih na spletni strani SLONIP. Pomembno finančno podporo za nastanek spletne strani je predstavljal

projekt bilateralnega madžarsko-slovenskega sodelovanja N1-0054, ki ga je sofinancirala ARRS. Avtorja se zahvaljujeva vsem sodelavcem, ki so v preteklih 40 letih kakorkoli pripomogli k nastajanju predstavljene spletne strani, v obliki izvajanja vzorčenja, analiz ali pomoči pri obdelavi podatkov.

Literatura

- Clark, I., Fritz, P. 1997: Environmental isotopes in hydrology, CRC Press, 328p.
- Craig, H. 1961: Isotope variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702-1703.
- Crawford, J., Hughes, C. E., Lykoudis, S. 2014: Alternative least squares methods for determining the meteoric water line, demonstrating GNIP data. *Jurnal of Hydrology*: 519, 2331-2340.
- Dansgaard, W. 1964: Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-468.
- Dolinar, M., Frantar, P., Kurnik, B. (2008). Značilnosti vodne bilance Slovenije v obdobju 1971-2000. *Mišičev vodarski dan 2008*, 19-25.
- Gospodarič, R., Habič, P., 1976. Underground water tracing; investigations in Slovenia 1972–1975. ZRC SAZU, Postojna, 309 p.
- Hatvani, I. G., Szatmári, G., Kern, Z., Erdélyi, D., Vreča, P., Kanduč, T., Czuppon, G., Lojen, S., Kohán, B., 2021: Geostatistical evaluation of the design of the precipitation stable isotope monitoring network for Slovenia and Hungary. *Environment International*: 146, 106263-1-106263-14.
- IAEA, 2021: Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_isohis.html, zadnji dostop 26.11.2021.
- Ingraham, N.L. 1998: Isotopic variations in precipitation. In *Isotope tracers in catchment hydrology*. Kendall C., McDonnell J.J. (Eds.), Elsevier, 87-118.
- Pezdič, J., 1999: Izotopi in geokemijski procesi. Univerza v Ljubljani, 270 str.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R. 1993: Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophys. Monogr.* 78: 1-36.
- Schotterer, U., Oldfield, U., Froehlich, K. 1996: GNIP – Global Network for Isotopes in Precipitation, IAEA, 48p.
- Schürch, M., Kozel, R., Schotterer, U., Tripet, J. P. 2003: Observation of isotopes in the water cycle – the Swiss National Network (NISOT). *Environmental Geology*, 45, 1-11.
- Vreča, P., Brenčič, M., 2009: Izotopska sestava padavin v Sloveniji in njen pomen za raziskave kroženja vode. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008*, Ljubljana, 7-18.
- Vreča, P., Malenšek, N., 2016: Slovenian Network of Isotopes in Precipitation (SLONIP) - a review of activities in the period 1981-2015. *Geologija*: 59, 67-83.
- Vreča, P., Kanduč, T., Kocman, D., Lojen, S., Robinson, J. A., Štok, M., 2017: Slovenska mreža opazovanj izotopske sestave padavin (SLONIP): pregled in možnost uporabe pri upravljanju z vodnimi viri. *Drugi slovenski kongres o vodah*, Ljubljana, 225-234.

Hidrogeokemične in izotopske raziskave podmorskih in kopenskih izvirov pri Izoli

Kaja Šušmelj*, Petra Žvab Rožič*, Polona Vreča**, Tjaša Kanduč**, Timotej Verbovšek*, Klara Nagode**, Tea Zuliani**, Barbara Čenčur Curk*, Boštjan Rožič*, Branko Čermelj***

Povzetek

Nedaleč od obale Izole se pod morjem nahaja dvanajst podmorskih kotanj, poimenovane tudi kot Žumrove kotanje, iz katerih prihaja voda. Da bi razširili razumevanje Žumrovih kotanj oziroma izvirov v njih, smo na podlagi fizikalno-kemijskih parametrov in rezultatov geokemičnih ter izotopskih analiz bolje opredelili njihove značilnosti, ki so osnova za razumevanje dinamike in izvora podmorskih in kopenskih izvirov na območju Izole. Meritve smo izvedli v letih 2020 in 2021 v štirih podmorskih in štirih kopenskih izvirih ter eni vrtini v Izoli. Rezultati fizikalno-kemijskih parametrov, geokemičnih in izotopskih analiz vzorcev podmorskih izvirov v kotanjah in enega kopenska izvira kažejo značilnosti sladke vode, obogatene z žveplom, in nekoliko povišano temperaturo, ki pa se na iztoku takoj zmeša z morsko vodo in je tako pri vzorčenju prišlo do mešanja obeh. Analize so pokazale, da je izvor vode iz karbonatnih kamnin, obogatitev z žveplom pa je verjetno povezana z redukcijo anaerobnih bakterij.

Ključne besede: Žumrove kotanje, podmorski kraški izviri, hidrogeokemija, izotopi

Keywords: Žumer depressions, submarine karstic springs, hydrogeochemistry, isotopes

Uvod

Podmorski izviri so vzdolž kraške obale Sredozemlja pogosti in zanje je značilna sladka ali brakična voda, saj so to potopljene kraški izviri, znani tudi kot brojnice ali vrulje (Gams, 2004). Slanost v njih se običajno spreminja glede na količino padavin in stanje podzemne vode v napajalnem zaledju izvirov. Nekateri podmorski izviri so sezonski in aktivni samo v obdobjih visokega vodostaja (Fleury idr., 2007). Karbonatni priobalni vodonosniki v Sredozemlju so bili od konca miocena dalje pogosto podvrženi nihanju gladine morske vode (Fleury idr., 2007), kar omogoča zakrsevanje. V Sredozemlju je v primerjavi s koncentracijo drugod po svetu sicer veliko več podmorskih izvirov (Bakalowicz, 2018). Najverjetneje je na nastanek vplival mesinski dogodek, ko se je zaprla Gibraltarska ožina zaradi premikanja Afriške plošče proti severu in je bil dotok sladke vode manjši od evaporacije. Gladina morja je bila 1500 do 2500 m nižja od današnje in v karbonatnih kamninah se je razvil globoki kras ter z njim izviri, ki so bili ob koncu mesinskega dogodka s ponovnim odprtjem ožine poplavljeni (Bakalowicz, 2018).

Podmorski izviri pri Izoli se razlikujejo od običajnih brojnic, saj imajo močan vonj po žveplu, v preteklosti pa so poročali tudi o izrazito povišani temperaturi izvirske vode. Podmorske izvire pri Izoli je prvič podrobneje opisal Jože Žumer (2004, 2008) in po njem so danes ti izviri oz. podmorske kotanje tudi poimenovane (Žumrove kotanje). Takrat je naštel osem kotanj z izviri, kasneje pa so jih z detajlnejšimi raziskavami odkrili še več (Slavec, 2012). Žumer je podrobneje opisal izvira Ronek 32 (v tem prispevku M11) in Izola

* UL, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

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

*** Nacionalni inštitut za biologijo - Morska biološka postaja Piran, Fornače 41, 6330 Piran

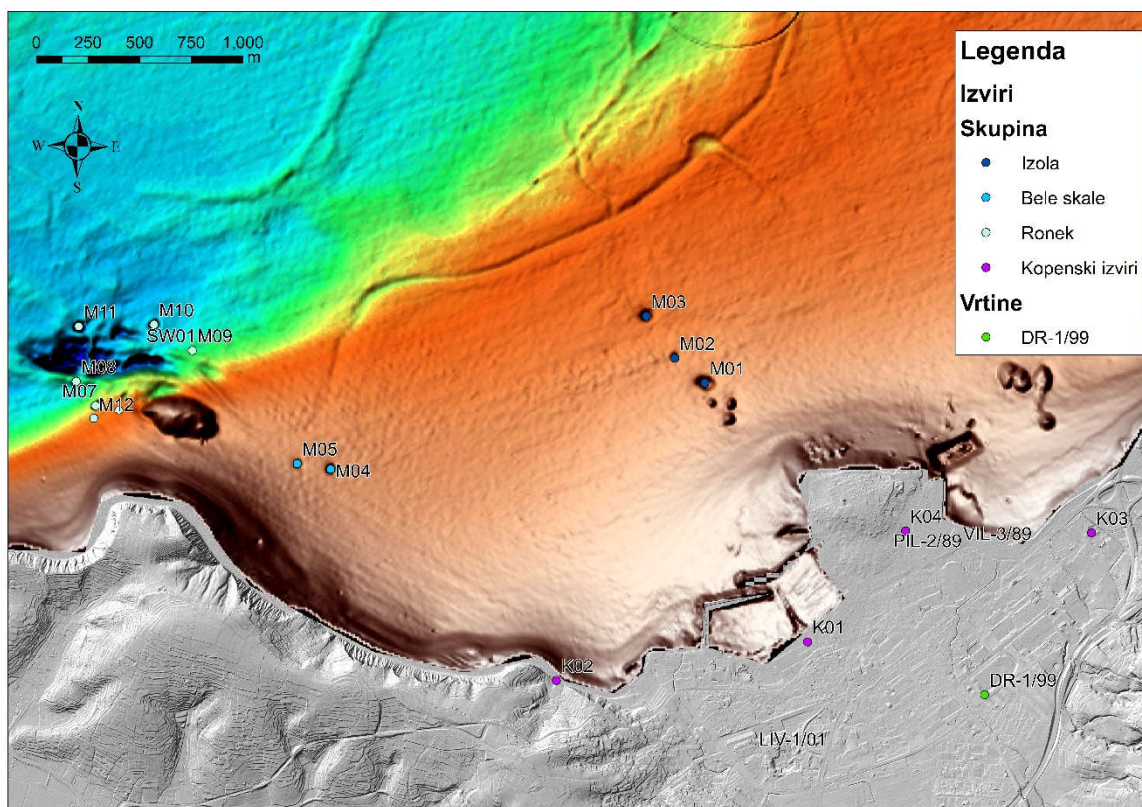
32 (v tem prispevku M03). Faganeli s sodelavci (2005) je opisal nekaj geokemijskih lastnosti izvira M03 (Izola 32). Takrat so mu izmerili slanost 5,5 ‰, voda naj bi imela visoko vsebnost H₂S, namerjene temperature pa so segale do 29,6 °C (Faganeli idr., 2005). Žveplena in toplejša voda je bila na območju Izole poznana že v 17. stoletju, ko je zdravilno vodo omenil škof Tomasini, prve analize pa so opravili v 19. stoletju. Izvir v breznu pri Sv. Petru, ki je bil takrat v medplimskem pasu, naj bi imel 21 °C in visoke vsebnosti amonijaka, žvepla, magnezija, nitrata, bakra in klorida. Še v istem stoletju so začeli vodo iz tega izvira izkoriščati v Izolskih termah (Kramar, 2003). Danes te termalne vode ne izkoriščajo, brezno pri Sv. Petru in Izolansko brezno pa sta zasuti in zazidani na območju nekdanje tovarne Delamaris. Na žvepleno termalno vodo so naleteli tudi v globoki vrtini LIV-1/01 (501 m) v Izoli, ki je bila zvrtna za hidrogeološke raziskave vodonosnika termalne vode in morebitnega zajema vode za nadaljnjo uporabo (Benedik in Rožič, 2002). V njej se mešata spodnja visokomineralizirana Na-Cl voda in pripovršinska Ca-Mg-HCO₃ voda (Lapanje, 2006), ista vrtina je v tem viru zabeležena kot LIV-1/02 (500 m). V vrtini v Luciji pri Portorožu (801 m) so ugotovili visoke koncentracije železa, sulfida in klorida, ki so posledica mešanja morske (31%) in podzemne (69%) vode pod vplivom redukcijskih pogojev v hidrodinamsko zaprtem karbonatnem vodonosniku (Brenčič, 2009).

Namen raziskave je poglobiti poznavanje Žumrovih kotanj in na podlagi fizikalno-kemijskih parametrov in rezultatov geokemičnih ter izotopskih analiz dodatno potrditi obstoj žveplene termalne izvirske vode, razložiti njen izvor ter značilnosti in dinamiko podmorskih izvirov. Zaradi pojavljanja termalne vode na kopnem in za primerjavo s podmorskimi izviri smo poleg Žumrovih kotanj v raziskavo vključili tudi štiri kopenske izvire in eno vrtino v Izoli.

Opis območja raziskav

Blizu Izole, približno 400-1000 m stran od obale, se na morskem dnu nahaja dvanajst lijakastih kotanj, v katerih izvira voda. Kotanje so glede na lokacijo razdeljene v tri skupine. V skupini Izola, ki je najbližje staremu mestnemu jedru, se nahajajo tri kotanje (M01, M02, M03), v skupini Bele skale, nedaleč od plaže Bele skale, sta dve kotanji (M04, M05), najbolj zahodno pri rtiču Ronek pa se nahaja sedem kotanj (M06, M07, M08, M09, M10, M11, M12) skupine Ronek (Slavec, 2012; Žumer, 2004, 2008). Kotanje lijakaste oblike se nahajajo na območju, kjer je dno morja na približno 20 m globine, največje kotanje pa segajo še globlje in dosegajo do 32 m globine. Kotanja M03 (Izola 32) ima na vrhu približno 20 m premera, na dnu pa je široka okoli 2 m (Žumer, 2008). V raziskavo smo za primerjavo vključili tudi štiri kopenske izvire (K01, K02, K03, K04) in vrtino (VK01 oz. DR 1/99) v Izoli (slika 1). Na sliki 1 so prikazane tudi druge vrtine v Izoli, ki v to raziskavo niso vključene zaradi težav z dostopom.

V mezozoiku in začetku kenozoika je bilo območje slovenske obale del Jadransko-Dinarske karbonatne platforme, kjer so v plitvem morju nastajale karbonatne kamnine. V paleogenu je platforma razpadla, območje se je poglobilo, nastajale so flišne kamnine (Šmuc idr., 2019). Danes je ta prostor del Istrsko-Furlanske cone poddrivanja, ki je nastala kot posledica segmentacije Jadranske litosferne mikroplošče v miocenu ali pozneje (Placer idr., 2010). Osrednji element Istrsko-Furlanske cone poddrivanja je Črnokalski oz. Palmanovski narivni prelom, njegov sekundarni element pa je Strunjanska struktura, znotraj katere je več deformacij, med drugim tudi Izolska antiklinala, kjer alveolinsko-numulitni apnenci izdanjajo izpod fliša (Placer, 2005; Pleničar idr., 1973). V apnencih izolske antiklinale, ki se nadaljuje v morje, se nahajajo raziskovani podmorski izviri (Vrabec idr., 2013).



Slika 1 - Lokacije podmorskih in kopenskih izvirov ter vrtine

Vzorčenje, meritve in analize

Podrobnejše raziskave izvirov na območju Izole smo izvedli v letih 2020 in 2021 v treh sklopih, prvi je potekal junija in julija 2020, drugi oktobra 2020, zadnji pa aprila 2021. Potapljači so ob vsakem sklopu vzorčenja vzeli vzorce vode v treh kotanjah, po en vzorec iz vsake skupine izvirov (M03 - Izola, M05 - Bele skale, M10 in M11 - Ronek) (Preglednica 1). Vzorce so odvzeli s 100 ml brizgami, ki so jih namerili v izvir na morskem dnu. Uhajanje izvirne vode je vidno zaradi razlike v gostoti med bolj sladko izvirsko vodo in slano morskó vodo. V zadnjem sklopu smo odvzeli vzorce tudi z 8-litrskim vzorčevalnikom Niskin (vzorci označeni s črko N), pri čemer smo predpostavljali, da bo izvirna voda ob spustu vzorčevalnika v kotanjo izpodrinila morskó.

Takoj, ko so potapljači prinesli vzorce na krov ladje, smo vodi izmerili temperaturo (T), pH, specifično elektoprevodnost (EC), skupno količino raztopljenih snovi (TDS), redukcijsko-oksidacijski potencial (ORP) in vsebnost kisika v mg/l in %. Sočasno smo po isti metodologiji izvedli tudi raziskave štirih kopenskih izvirov (K01, K02, K03, K04) ter kopenske vrtine (VK01) in odvzeli vzorce morske vode (SW01, SW02, SW03) (Preglednica 1). Vzorce smo nato pripravili za nadaljnje geokemične in izotopske analize, ki so predstavljene v preglednici 2 in podrobneje opisane v Žvab Rožič idr. (2021).

Preglednica 1 - Datum vzorčenja, oznake, skupine in lokacije vzorcev

Datum	Oznaka	Skupina	LAT	LONG
8. 10. 2020, 16. 4. 2021	M03, M03/B, M03/N	Izola	45,54853	13,64594
9. 7. 2020, 8. 10. 2020, 23. 4. 2021	M05, M05, M05/B, M05/N	Bele skale	45,54181	13,62447
15. 6. 2020	M10	Ronek	45,54781	13,61543
9. 7. 2020, 23. 4. 2021	M11, M11/B, M11/N	Ronek	45,54767	13,61077
17. 6. 2020, 14. 4. 2021	K01	Kopenski izvir	45,53444	13,65628
17. 6. 2020, 14. 4. 2021	K02	Kopenski izvir	45,53258	13,64075
17. 6. 2020, 14. 4. 2021	K03	Kopenski izvir	45,53939	13,67375
17. 6. 2020, 8. 10. 2020, 14. 4. 2021	K04	Kopenski žvepleni izvir	45,53933	13,66222
17. 6. 2020	SW01	Morje	45,54781	13,61543
8. 10. 2020	SW02	Morje	45,54181	13,62447
16. 4. 2021	SW03	Morje	45,54905	13,63484
8. 10. 2020, 16. 4. 2021	VK01	Vrtina	45,53226	13,66731

Preglednica 2: Opravljene geokemične in izotopske analize

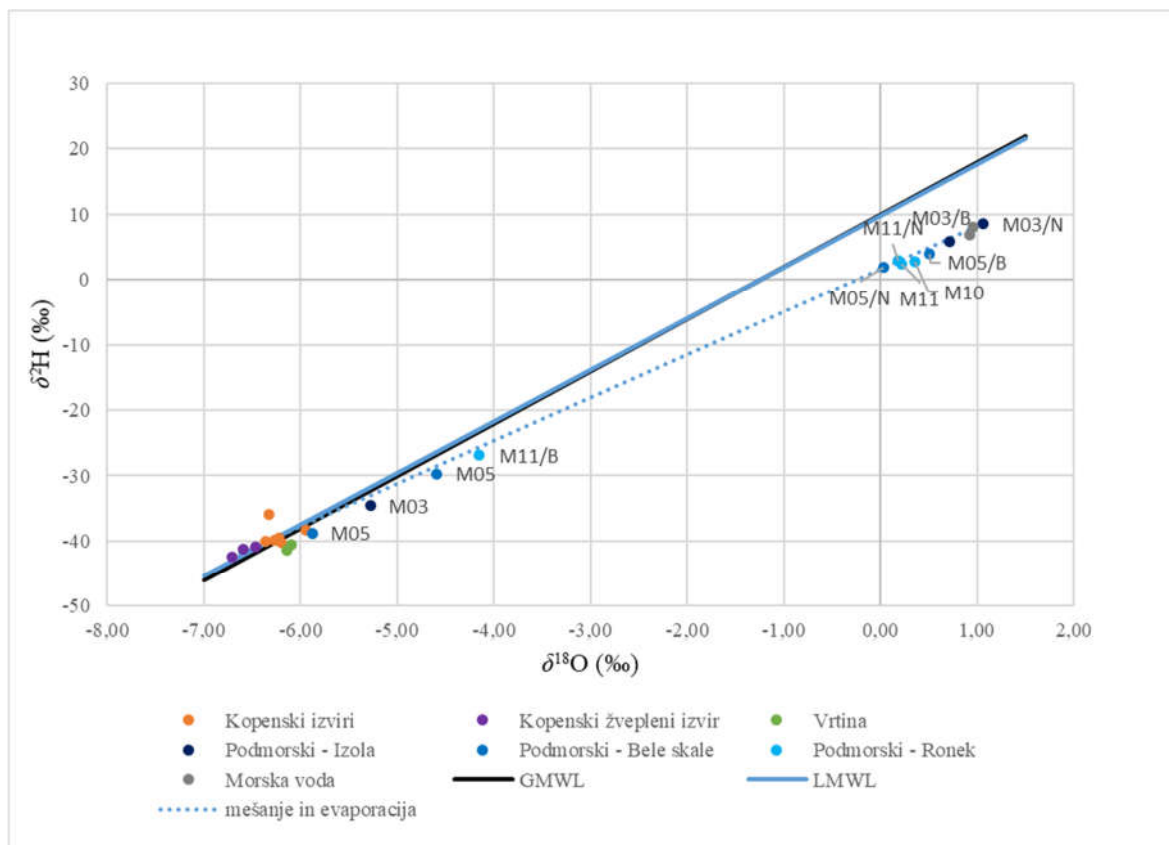
Parameter	Enota	Št. vzorcev	Metoda	Laboratorij
Na, Li, Be, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Hg, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U	µg/L	25	ICP-MS Perkin Elmer Sciex ELAN 9000 ICP/MS, Perkin Elmer Nexion, Thermo icapQ or Agilent 7700, opis metode dostopen na https://actlabs.com/geochemistry/tools-for-buried-deposit-targets/hydrogeochemistry/	ActLabs, Kanada
F, Cl, NO ₂ (kot N), Br, NO ₃ (kot N), PO ₄ (kot P), SO ₄	mg/L	25	Ionska kromatografija z uporabo DIONEX DX-120 Ion Chromatography System, opis metode dostopen na https://actlabs.com/geochemistry/tools-for-buried-deposit-targets/hydrogeochemistry/	ActLabs, Kanada
δ ¹⁸ O in δ ² H	‰	25	Masni spektrometer Finnigan MAT DELTA plus z dvojnimi uvajalnimi sistemom in avtomatskim H ₂ -H ₂ O in CO ₂ -H ₂ O ekvilibratorjem HDOeq48 - postopek uravnovečanja H ₂ -H ₂ O (Coplen et al.,	Institut "Jožef Stefan", Slovenija

Parameter	Enota	Št. vzorcev	Metoda	Laboratorij
			1991) in CO ₂ -H ₂ O (Avak in Brand, 1995; Epstein in Mayeda, 1953)	
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} (\text{‰})$	‰	25	Masni spektrometer s kontinuirnim pretokom Europa-Scientific 20-20 in TG preparacijskim modulom (Spötl, 2005, Kanduč, 2006)	Institut "Jožef Stefan", Slovenija
totalna alkalnost (TA)	mM	25	Granova titracija (Gieskes, 1974)	Institut "Jožef Stefan", Slovenija
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	-	25	Multikolektorski ICP-MS Nu II, Nu Plasma, Ametek	Institut "Jožef Stefan", Slovenija
^3H	TU	17	LSC-GCT Parkin Elmer, selektivna izotopska obogatitev z uporabo elektrolize (Gröning and Rozanski, 2003, Plastino et al., 2007, Villa and Mannjón, 2004), standard IRP (FS-78-15-AKU:1995) in standard MSZ 19387:1987	Wessling, Madžarska
$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ in $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$	‰	6	CF-IRMS ThermoQuest Finnigan Delta PlusXL in CF-IRMS Thermo Electron Delta V, opis metode dostopen na https://www.geo.arizona.edu/node/153	University of Arizona, ZDA

Rezultati in razprava

Rezultati meritev fizikalno-kemijskih parametrov, predvsem specifična elektoprevodnost (EC) in skupna količina raztopljenih snovi (TDS), nakazujejo na mešanje morske in sladke vode v podmorskih izviroh (EC: 16,900–58,500 mS/cm), prav tako prihaja do mešanja z morsko vodo tudi v kopenskem izviru K04 (EC: 3,370–5,410 mS/cm), ki ima tako kot podmorski izviri močan vonj po žveplu. V vzorcih podmorskih izvirov so visoke koncentracije elementov in spojin, značilnih za morsko vodo (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , K^+ , Sr^{2+} , Br^{2+} , SO_4^{2-}), višje vrednosti so tudi v kopenskem žveplenem izviru (K04), kar potrjuje mešanje z morsko vodo. Podmorskim izvirom smo izmerili podobne temperature (T: 12,9–23,6 °C) kot morski vodi (T: 12,4–21,2 °C). Morski vodi so podobne tudi temperature kopenskega žveplenega izvira in vrtine, merjene v istih obdobjih (T: 16,8–19,9 °C), vendar so te v primerjavi s temperaturami ostalih kopenskih izvirov (T: 13,9–17,4 °C) nekoliko višje.

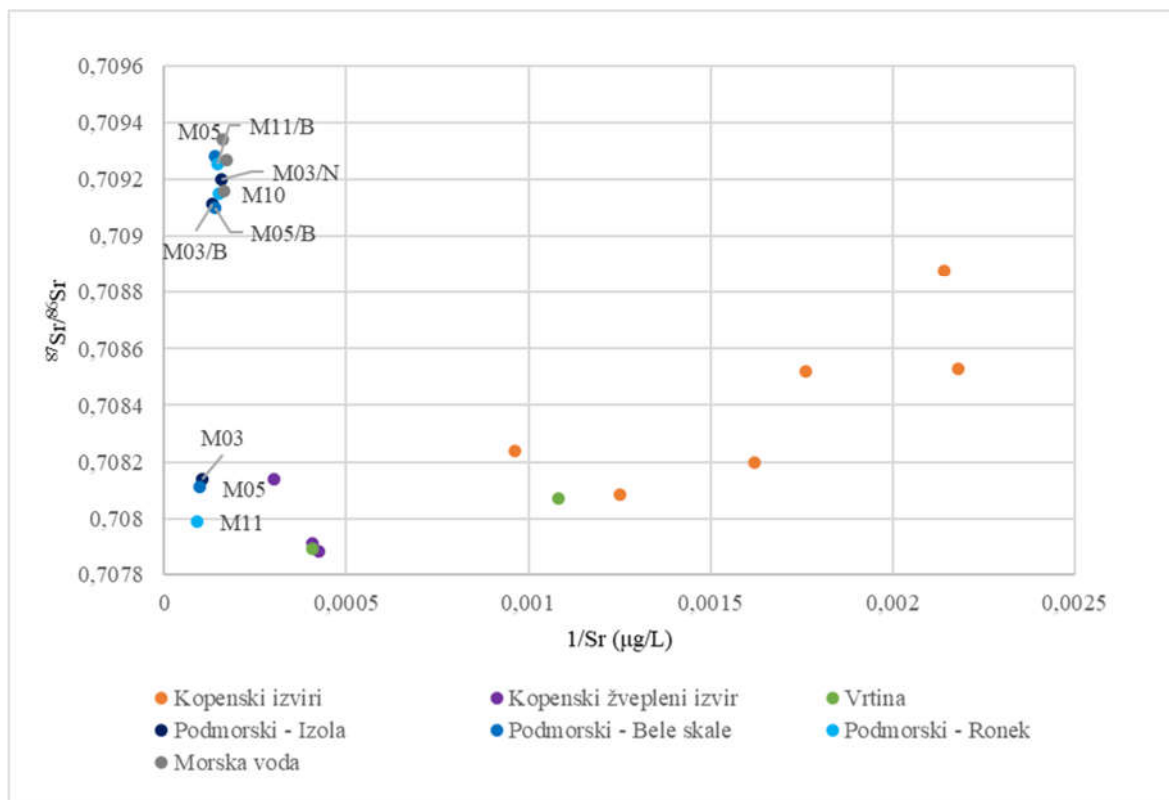
Rezultati izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in vodika ($\delta^2\text{H}$) kažejo na mešanje različnih tipov vod, poleg tega pa dajo tudi informacijo o izvoru vode. Značilne vrednosti morske vode so okoli 0 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ (Clark, 2015), kjer se giblje tudi večina vzorcev podmorskih izvirov, torej je voda teh vzorcev v veliki meri mešana z morsko. Vrednosti vzorcev M03 (8. 10. 2020), M05 (9. 7. 2020), M05 (8. 10. 2020) in M11/B (23. 4. 2021), ki so na grafu pomaknjene proti kopenskemu izvirom, pa kažejo na večji delež kopenskega izvira vode, kar dokazujejo nižje vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$. Ti vzorci postopoma odstopajo od globalne padavinske premice (Global Meteoric Water Line – GMWL, definirane kot $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961) oziroma od lokalne padavinske premice (LMWL) utežene s količino padavin za letališče Portorož (LMWL(2011-2020) $\delta^2\text{H} = 7,87 \cdot \delta^{18}\text{O} + 9,77$; Vreča, neobjavljeni podatki) in ležijo na premici, ki povezuje morske in kopenske vzorce ter nakazuje vpliv evaporacije in mešanja morske in kopenske vode (slika 2).



Slika 2 - Odvisnost med izotopsko sestavo vodika ($\delta^2\text{H}$) in kisika ($\delta^{18}\text{O}$) v raziskanih vzorcih vode

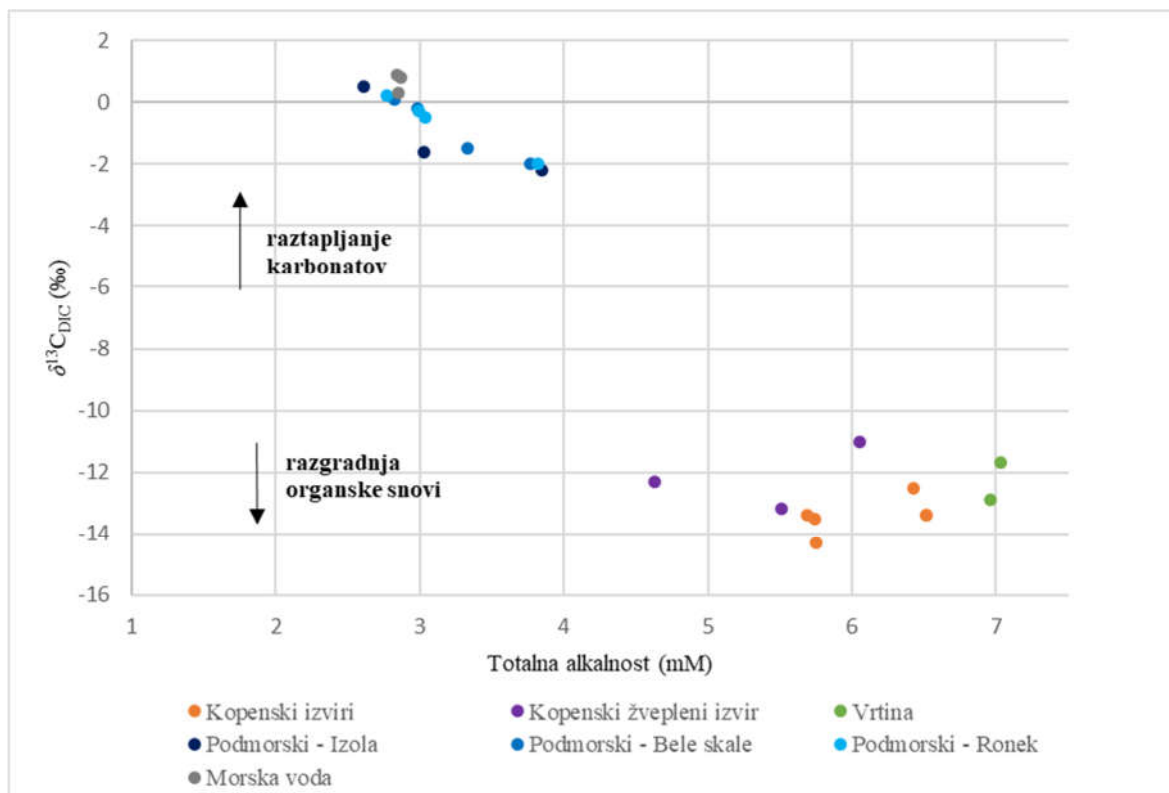
Vzorci, ki odstopajo proti kopenskimi vrednostim, predstavljajo vse tri skupine izvirov: Izola (M03), Bele skale (M05) in Ronek (M11/B). Ti vzorci so bili odvzeti s 100 ml brizgami, vsi vzorci, odvzeti z Niskinom, pa kažejo vrednosti, značilne za morsko vodo. Ker imajo isti vzorci bolj sladkovodne oz. kopenske značilnosti tudi po drugih parametrih, sklepamo, da je odvzem z brizgami bolj uspešen pri zajemu izvirske vode kot odvzem z Niskinom, pri katerem smo zajeli več morske vode.

Koncentracije Sr v vodi so v kopenskih vzorcih nižje (Sr: 0,459–3,300 mg/l) kot v vzorcih morske vode in podmorskih izvirov (Sr: 5,830–11,100 mg/l). Da imajo kotanje dotok kopenske vode, dokazuje razmerje ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Vrednosti vzorcev M03, M05, M11/B ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{M03, M05, M11/B}}$: 0,70799–0,70814), podobno kot pri rezultatih $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$, odstopajo od vrednosti, ki so značilne za morsko vodo ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70917$), vzorcev morja in večine podmorskih izvirov. Bolj značilne so za kopensko okolje, čeprav imajo kopenski izviri in vrtina zelo razpršene vrednosti Sr (slika 3).



Vrednosti tritija (^3H) ločujejo vzorce na morske (0,6–2,12 TU) in kopenske (2,37–4,49 TU) z izjemo vrtnice, kjer smo zajeli podzemno vodo, ta ima nižje vsebnosti (0,7 TU). Nobene vrednosti podmorskih izvirov niso značilne za kopno, najverjetneje zato, ker smo tritij merili v vzorcih podmorskih izvirov, v katerih smo zaznali večje mešanje z morsko vodo. Rezultati vrednosti ^3H tako ne vključujejo vzorcev M03, M05, M11/B, pri katerih se je pokazal kopenski izvor za vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ ter $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Iz rezultatov izotopske sestave ogljika iz raztopljenega anorganskega ogljika ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) in totalne alkalnosti (TA) lahko opazimo dve skupini vzorcev: 1) morske vode in podmorskih izvirov z $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ od -2,2 do 0,9 ‰, kjer je izvor ogljika predvsem iz raztapljanja karbonatov in 2) kopenskih izvirov (žvepljenih in nežvepljenih) in podzemne vode iz vrtine, kjer je večji delež ogljika iz razgradnje organske snovi z $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ od -14,3 do -11,0 ‰ (slika 4).



Slika 4 - Odvisnost med $\delta^{13}\text{C-DIC}$ in totalno alkalnostjo (TA)

Vrednosti izotopske sestave žvepla ($\delta^{34}\text{S}$) in kisika ($\delta^{18}\text{O}$) v sulfatu so za večino vzorcev značilne za morsko vodo, ki ima tipične vrednosti $\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{mor. v.})} = +21 \text{ ‰}$ in $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{mor. v.})} = +9,5 \text{ ‰}$. Vzorec K04 ima nekoliko nižje vrednosti ($\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{K04})} = +20,3 \text{ ‰}$), vzorec M11/B, pri katerem je glede na druge parametre prisotna kopenska voda, pa višje ($\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-}, \text{M11/B})} = +23,6 \text{ ‰}$) od morskih. Njune vrednosti nakazujejo na možen izvor žvepla, povezan z redukcijo zaradi anaerobnih bakterij ($\delta^{34}\text{S}_{(\text{SO}_4^{2-})} > 20 \text{ ‰}$), vedeti pa moramo, da se značilne vrednosti za morsko vodo in značilne vrednosti žvepla, povezanega z redukcijo anaerobnih bakterij, v določenem predelu prekrivajo.

Zaključek

Na podlagi fizikalno-kemijskih meritev, geokemične in izotopske sestave vod smo podrobneje določili lastnosti raziskanih podmorskih in kopenskih izvirov pri Izoli. S pomočjo rezultatov raziskav smo lahko potrdili aktivnost podmorskih izvirov v Žumrovih kotanjah in njihov vsaj deloma kopenski izvor vode. Na podlagi specifične elektroprevodnosti (EC), skupne količine raztopljene snovi (TDS) in koncentracij elementov in spojin, značilnih za morsko vodo, smo ugotovili, da je voda v nekaterih vzorcih podmorskih izvirov mešanica sladke in morske vode, do mešanja z morsko vodo prihaja tudi v kopenskem izviru K04. Izrazito povišanih temperatur nismo zaznali, kar je posledica mešanja s hladnejšo morsko vodo. Ugotovili smo, da so samo vzorci, odvzeti s 100 ml brizgami, imeli večji delež sladke kopenske vode, zato sklepamo, da vzorčenje z Niskinom ne omogoča ustreznega odvzema vode iz podmorskih izvirov. Tudi pri vzorčenju z brizgami ni znano, koliko morske vode je v vzorcih prisotne naravno v izviru in koliko morske vode smo zajeli ob vzorčenju. To bomo poskušali določiti z geokemičnim modeliranjem. Rezultati $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ nakazujejo, da voda izvira iz karbonatnih kamnin, ker so vrednosti značilne za

raztapljanje karbonatov, vendar ima morska voda podobne vrednosti in je zato mešanje z morsko vodo problematično. Izvor žvepla v izviri je verjetno povezan z redukcijo zaradi anaerobnih bakterij. Glede na to, da so v Izoli v preteklosti izkoriščali termalno vodo za terme, je v prihodnje smiselno opraviti nadaljnje raziskave, pri tem pa je potrebno uporabiti ustreznejšo tehniko za odvzem vzorcev vode v Žumrovih kotanjah in nadalje raziskati izvire tudi v času različnih hidroloških pogojev v napajalnem zaledju izvirov.

Zahvala

Raziskave so potekale v okviru projekta J1-1712 »Zapis okoljskih sprememb in človekovega vpliva v holocenskih sedimentih Tržaškega zaliva« ter raziskovalnih programov P1-0143 in P1-0195, ki jih financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Vzorčenje podmorskih izvirov nam je v letu 2020 omogočilo podjetje Sirio, d.o.o., ki je s pomočjo sonarja na plovilu Lyra zelo natančno določilo lokacije izvirov. V letu 2021 nam je pri vzorčenju pomagala Morska biološka postaja Piran Nacionalnega inštituta za biologijo. Zahvaljujemo se potapljačem podjetja Sirio, d. o.o., in Oceanik, d.o.o., za odvzem vzorcev.

Literatura

- Bakalowicz, M. (2018). Coastal Karst Groundwater in the Mediterranean: A Resource to Be Preferably Exploited Onshore, Not from Karst Submarine Springs, *Geosciences*, 8(7), 258.
- Benedik, A., Rožič, B., (2002). Hidrogeološko poročilo o rezultatih raziskav za zajem termalne vode v globokem vodonosniku na območju Izole z vrtino LIV-1. Poročilo geo-hidro d.o.o., Drenov grič, 16 str.
- Brenčič, M. (2009). Hydrogeochemistry of Coastal Carbonate Aquifer in Lucija–Portorož (Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea, Slovenia). *Acta Carsologica* 38(2–3), Article 2–3.
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press, London, New York, 438 str.
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science* 133(3465), 1702–1703.
- Faganeli, J., Ogrinc, N., Walter, L. N., & Žumer, J. (2005). Geochemical characterization of the submarine spring of Izola (Gulf of Trieste, N Adriatic Sea), *RMZ - Materials and Geoenvironment* 52, 35–39.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., & de Marsily, G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: A review, *Journal of Hydrology* 339(1–2), 79–92.
- Gams, I. (2004). *Kras v Sloveniji v prostoru in času*. Založba ZRC SAZU, Ljubljana, 515 str.
- Kramar, J. (2003). *Izola: Mesto ribičev in delavcev*. Zgodovinsko društvo za južno Primorsko, 629 str.
- Lapanje, A. (2006). Origin and chemical composition of thermal and thermomineral waters in Slovenia. *Geologija* 49(2), 347–370.
- Placer, L. (2005). Structural curiosity of the northern Istria, *Geologija* 48(2), 245–251.
- Placer, L., Vrabec, M., & Celarc, B. (2010). The bases for understanding of the NW Dinarides and Istria Peninsula tectonics. *Geologija* 53(1), 55–86.
- Pleničar, M., Polšak, A., & Šikić, D. (1973). Tolmač za list Trst: L 33-88: Socialistična federativna republika Jugoslavija, osnovna geološka karta, 1:100 000. Zvezni geološki zavod.
- Slavec, P. (2012). *Analiza morfologije morskega dna slovenskega morja (Slovenian seafloor morphology analysis)*. Univerza v Ljubljani, NTF.
- Šmuc, A., Rožič, B., & Vrabec, M. (2019). "Geološke razmere" v Slovenska Istra I - Neživi svet, rastlinstvo, živalstvo in naravovarstvo, Slovenska matica, 11–17.
- Vrabec, M. idr.(2013). Refleksijske seizmične raziskave v slovenskem morju. *Raziskave s področja geodezije in geofizike*, 97-101.

- Žumer, J. (2004). Odkritje podmorskih termalnih izvirov pred Izolo, *Geografski obzornik : časopis za geografsko vzgojo in izobraževanje*, 11–17.
- Žumer, J. (2008). Podmorski kraški izviri pred Izolo, *Naše jame* 47, 39-44 .
- Žvab Rožič, P., Verbovšek, T., Kanduč, T., Vreča, P., Žigon, S., Nagode, K., Zuliani, T., Čenčur Curk, B., & Rožič, B. (2021). Poročilo o rezultatih geokemičnega vzorčenja žvepljenih izvirov v okolici Izole v letu 2020: Zaključno poročilo: (Raziskave v okviru ARRS projekta J1-1712, 2019-2021: Zapis okoljskih sprememb in človekovega vpliva v holocenskih sedimentih Tržaškega zaliva, prvo fazno poročilo).

Izotopska sestava padavin in reke Save na območju Ljubljanskega polja med leti 2020 in 2021

Klara Nagode^{*, **}, Aljaž Pavšek^{***}, Urška Pavlič^{****}, Polona Vreča^{*}

Povzetek

Površinske vode so prostorski in časovni integrator izotopske sestave padavin na celotnem prispevnem območju vzorčne postaje. Stabilni izotopi kisika in vodika v vodi nam služijo kot parametri, ki pomagajo ugotoviti, po katerih poteh je prišla padavinska voda do površinske vode, kako se je infiltrirala v tla ter kako potuje znotraj vodonosnika. Naša raziskava prikazuje preliminarne rezultate analiz izotopske sestave padavin in reke Save med leti 2020 in 2021 na območju Ljubljanskega polja, pri čemer padavinske premice, ki predstavljajo korelacijo med stabilnim izotopom vodika in kisika vode ($\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$) iz obdobja 2020–2021 primerjamo s padavinskimi premicami iz obdobja 1981–2021 ter 2010–2011. Prispevek podaja tudi izračun zadrževalnih časov reke Save na dveh lokacijah (Brod in Šentjakob). Rezultati kažejo, da je padavinska premica za obdobje 2020–2021 nekoliko drugačna kot premice izračunane za pretekla obdobja. Prav tako se izračunani zadrževalni časi nekoliko drugačni kot pa so bili poročani v preteklosti.

Ključne besede: Reka Sava, Šentjakob, Brod, Ljubljana, stabilni izotopi, kisik, vodik, zadrževalni časi

Key words: the Sava River, Šentjakob, Brod, Ljubljana, stable isotope composition, oxygen, hydrogen, mean residence time

Uvod

Ugotovljene podnebne spremembe med drugim močno vplivajo na hidrološke spremenljivke tako na globalnem kot na lokalnem nivoju (Ciscar et al., 2018). Spremenljivost podnebja je bila ugotovljena tudi za območje Slovenije (Vertačnik in Bertalančič, 2017), kar je lahko zaskrbljujoče v smislu morebitnih sprememb v količini vodnih virov in njihovi dostopnosti. Že manjša odstopanja v temperaturi zraka in količini padavin namreč vplivajo na spremembe v količini površinskega in podzemnega odtoka padavin ter s tem na spremembe količin vodnih virov, kar je izredno pomembno z vidika zagotavljanja pitne vode, ohranjanja vodnih ekosistemov, namakanja kmetijskih površin in drugo.

V naravi voda kroži, kar med drugim lahko spremljamo preko nihanja razmerij stabilnih izotopov kisika in vodika v vodi (izraženo kot $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ v ‰). Izotopska sestava vode se znotraj različnih komponent vodnega kroga razlikuje zaradi izotopske frakcionacije. Le-ta poteka znotraj padavin, kar povzroči korelacijo med izotopsko sestavo kisika in vodika. Slednjo korelacijo je prvi definiral Craig (1961) kot globalno meteorno premico (Global Meteoric Water Line – GMWL; $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$). Zaradi regionalnih sprememb pride do razlik med izotopsko sestavo kisika in vodika, zaradi česar je pomembno definirati lokalno meteorno premico (Local Meteoric Water Line – LMWL). Interpretacija padavinskih premic je pomembna, saj lahko z njeno pomočjo ugotavljamo izvor padavin in vpliv sekundarnih procesov (npr. evaporacije). Izračuna se jih lahko z uporabo različnih

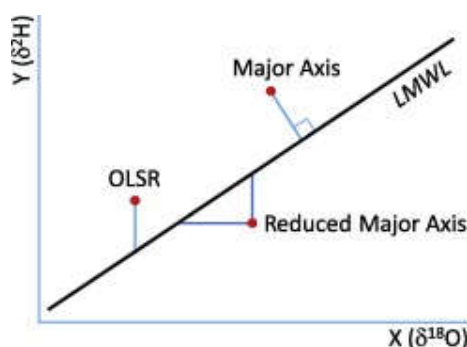
* Odsek za znanosti o okolju, Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana; klara.nagode@ijs.si

** Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

*** Institut Jožef Stefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

**** Agencija republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

regresijskih modelov, ki se uporabljajo v izotopski hidrologiji (Crawford et al., 2014). V literaturi se najpogosteje uporablja regresija z metodo najmanjših kvadratov (*ordinary least square regression method* – OLSR), ki predpostavi eno odvisno ($\delta^2\text{H}$) in eno neodvisno ($\delta^{18}\text{O}$) spremenljivko (Crawford et al., 2014; Slika 1). Bolj primerni metodi sta regresija velike osi (*major axis regression*; MA) ali regresija z uporabo reducirane velike osi (*reduced major axis regression*; RMA), saj upoštevata vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ kot enakovredni spremenljivki. RMA regresija uporablja vertikalno in horizontalno oddaljenost točke od premice, tako da je površina nastalega trikotnika med točko in premico najmanjša (Slika 1), zato naj bi bila ta metoda najbolj primerna (Crawford et al., 2014). Manjša količina padavin v posameznem mesecu lahko privede do odstopanj, zato izotopske podatke pogosto utežimo s količino padavin (*precipitation weighted reduced major axis regression*; PWRMA ali *precipitation weighted major axis regression*; PWMA) (Crawford et al., 2014). V literaturi uporabljena regresijska metoda za izračun premic pogosto ni natančno opisana in le redko zasledimo tudi podatek o napakah naklona in začetne vrednosti.



Slika 1 – Različni pristopi določitve točk glede na razdaljo do premice. Povzeto po Crawford et al. (2014).

Voda v vodotokih večinoma sestoji iz dveh glavnih komponent in sicer iz nedavno padlih padavin v napajalnem zaledju vodotoka in iz podzemne vode, v redkih primerih pa tudi preko zelo starih podzemnih voda (Kendall in Doctor, 2003).

Zadrževalni čas vode (Mean Residence Time – MRT) v vodonosniku nam nudi informacije o skladiščenju, toku podzemne vode in samem vodnem viru, nadalje pa lahko nakazuje procese, ki potekajo znotraj vodonosnika (McGuire in McDonnell, 2006). Za izračun zadrževalnih časov lahko uporabimo sezonsko spreminjanje izotopske sestave padavin ($\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$), ki se odraža v izotopski sestavi površinskih in podzemnih voda. V rekah pride zaradi mešanja različnih izvorov vode do dušenja signala padavin ter posledično do manjše amplitude nihanja izotopske sestave vode (Roger et al., 2005). Z raziskavami je bilo ugotovljeno, da na zadrževalne čase površinskih voda vpliva tako naklon in poraščenost površja, pedološka sestava prispevnega zaledja vodotoka (Stewart in McDonnell, 1991), pa tudi značilnosti vodonosnika (Kendall in Coplen, 2001), iz katerega se podzemna voda drenira v površinsko vodo in je lahko v razponu od nekaj dni do več let. Število raziskav se z namenom ugotavljanja zadrževalnih časov v zadnjem času povečuje (Rogers et al., 2005; Ogrinc et al., 2008; Diadin in Vystavna, 2020), kljub vsemu pa v literaturi primanjkuje navodil o predpostavkah in omejitvah različnih pristopov modeliranja ter pomanjkanje smernic kako opredeliti negotovost modela ocene zadrževalnih časov (McGuire in McDonnell, 2006; Zhou et al. 2021).

Glavni vir površinske vode na območju Slovenije predstavlja reka Sava (Jamnik et al., 2003), ki predstavlja glavni vir napajanja vodonosnika Ljubljanskega polja, glavnega vira pitne vode v mestni občini Ljubljana (Cerar in Urbanc, 2013). Pretok površinske vode se časovno in prostorsko spreminja v odvisnosti od zaledja merilnega mesta, klimatskih

pogojev ter človeške dejavnosti v prispevnem zaledju vodotoka. V okolici Ljubljane je bilo v kratkotrajne izotopske raziskave reke Save (Urbanc in Jamnik, 1998; Ogrinc et al., 2008; Vrzel et al., 2018) vključenih pet lokacij: Tacen, Brod, Črnuče, Šentjakob in Dolsko. Na teh lokacijah so bile v različnih obdobjih izvedene raziskave $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ (Nagode et al., 2020), pri čemer je bilo ugotovljeno sezonsko spreminjanje padavin, ki v reki, zaradi močnega dušenja signala, ni izrazito. Na lokaciji Tacen so v obdobju med 2004–2006 ocenili zadrževalni čas 1,54 leta in povprečno izotopsko sestavo reke Save $\delta^{18}\text{O}$ $-9,4\text{‰}$ (Ogrinc et al., 2008), medtem ko za lokacijo Šentjakob zadrževalni čas za obdobje od marca 2010 in decembra 2011 ni bil poročan, so pa na voljo podatki, ki jih lahko uporabimo za primerjavo z današnjim stanjem (Vrzel et al., 2018). Dolgo časovni, vsaj nekaj letni, zvezni niz opazovanj izotopske sestave rečne vode ni na voljo.

V prispevku predstavljamo preliminarne rezultate raziskav izotopske sestave ($\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$) padavin na območju Ljubljane in reke Save na dveh lokacijah: Sava Brod in Sava Šentjakob v obdobju januar 2020 in avgust 2021. Nadalje smo novo pridobljene podatke primerjali s padavinskimi podatki za dolgočasovno obdobje 1981–2021 ter 2010–2011 z namenom ugotavljanja prostorskih in časovnih sprememb ter zadrževalnih časov Save na omenjenih lokacijah.

Hidrološki, geološki in klimatski pogoji raziskovalnega območja

Reka Sava je največja reka v Sloveniji, z 11.734 km² velikim porečjem (ISRBC; 2016). Izvira kot Sava Dolinka v Zelencih ter kot Sava Bohinja v Savici. Oba rečna kraka se združita pri Radovljici ter izlivata v Donavo. Nahaja se širšem območju zmerne podnebja; v zgornjem delu prevladuje alpsko podnebje, medtem ko je večinski del podvržen zmernim temperaturami s toplimi poletji (ISRBC, 2016). Reka napaja tudi vodonosnik Ljubljanskega polja, ki predstavlja enega najpomembnejših virov podzemne vode v Ljubljani. Naravne značilnosti območja so hiter podzemni tok in močna povezanost med podzemno in površinsko vodo (Bračič Železnik in Jamnik, 2005). Ljubljansko polje je del Ljubljanske kotline, ki je kot tektonska depresija nastala v zgodnjem Pleistocenu. Sledili so nanosi glinastih skrilavcev s plastmi kremenovega peščenjaka permokarbonske starosti ter prodno peščene naplavine reke Save. V prodno-peščeni in konglomeratnih nanosih so skladiščene velike količine podzemne vode. Nihanje nivoja podzemne vode je odvisno od količine padavin ter vodostaja reke Save (Andjelov et al., 2005). Vodonosnik se napaja z direktnimi padavinami, s padavinami iz zaledja, ki meri okoli 10 km², in preko površinskih vod (Andjelov et al., 2005).

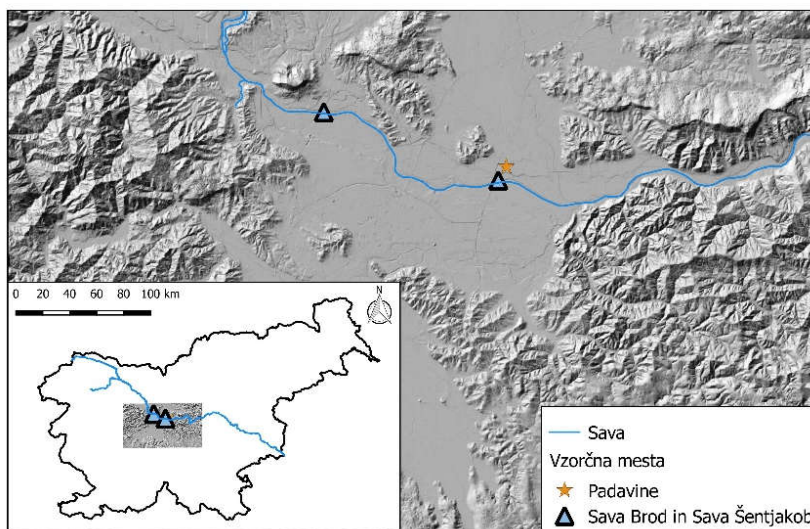
Na območju Ljubljanske kotline je značilen subkontinentalni padavinski režim, ki ima višek padavin v poletnih mesecih (Ogrin, 2004). Najhladnejši mesec je januar, s povprečno temperaturo 0,3 °C, medtem ko je mesec julij najtoplejši, s povprečno temperaturo 21,3 °C (obdobje 1981–2010; ARSO). Na podlagi rezultatov in zadnjega obdobja (1981–2010), so bile najnižje povprečne mesečne količine padavin zabeležene v hladnem delu leta; januar (69 mm) in februar (70 mm). Od junija do oktobra je bila povprečna količina padavin višja od 120 mm (ARSO).

Metodologija

Izotopska sestava kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in vodika ($\delta^2\text{H}$) v padavinah se v Ljubljani spremlja že od leta 1981 (Pezdič, 1999; Vreča et al., 2008; Vreča et al., 2014; Kern et al. 2020). Padavine so bile v preteklosti zbirane na sinoptični postaji Ljubljana-Bežigrad (46,065507 N; 14,512352 E; 299 m.n.v.), nato na Institutu Jožef Stefan, od septembra 2000 pa spremljamo izotopsko sestavo padavin na lokaciji IJS – Reaktor (46.094612 N; 14,597046 E; 282 m.n.v.)

(<https://slonip.ijs.si/>; Vreča et al., 2008). Do avgusta 2021 je bilo analiziranih že 457 vzorcev.

Sistematično mesečno vzorčenje reke Save v okolici mesta Ljubljane se je pričelo januarja 2020 na dveh lokacijah: Sava Brod (46,1162428 N; 14,4750583 E; 291 m.n.v.) in Sava Šentjakob (46,0847189 N, 14,5867045 E; 266 m.n.v.) (Slika 2). V mesecu marcu 2020 se vzorčenje ni izvedlo. Na lokaciji Šentjakob vzorčenje poteka dvakrat mesečno od marca 2021 dalje. Vzorce rečne vode odvezujemo za določitev izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in vodika ($\delta^2\text{H}$), na terenu pa izmerimo temperaturo, elektroprevodnost, pH, oksidacijsko redukcijski potencial in količino raztopljenih snovi. Na portalu ARSO iz samodejne hidrološke postaje za lokacijo Sava Šentjakob odčitamo tudi vodostja (cm), pretok (m^3/s) in temperaturo vode ($^{\circ}\text{C}$) (ARSO; <https://www.arso.gov.si/vode/podatki>). Skupno smo na lokaciji Brod do sedaj analizirali 19 vzorcev, na lokaciji Šentjakob pa 24 vzorcev.



Slika 2 – Shematski prikaz lokacij vzorčenja reke Save (Brod in Šentjakob) in padavin (IJS – Reaktor).

Izotopska sestava kisika in vodika v vodi je bila določena po postopku uravnoteženja $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ (Coplen et al, 1991) in $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (Epstein in Mayeda, 1953, Avak in Brand, 1995) na masnem spektrometru Finnigan MAT DELTA plus z dvojnimi uvajalnimi sistemom in avtomatskim $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ in $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ekvilibratorjem $\text{HDO}_{\text{eq}48}$ z vodno kopeljo s temperaturo 18°C . Past za vlago (etanol) smo ohladili na -55°C . Kot delovni standard za uravnoteženje vode smo uporabili pline CO_2 (Messer 4.5) in H_2 (IAEA). Vzorci so bili analizirani na Institutu "Jožef Stefan". Izotopska sestava vode je podana v obliki vrednosti δ (delta), izraženo v promilih (‰) z enačbo:

$$\delta X = \left(\frac{R_{VZ}}{R_{ST}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

kjer je X ^{18}O ali ^2H , R_{VZ} in R_{ST} pa izotopsko razmerje med težjimi in lažjimi izotopi kisika ali vodika ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ali $\text{H}/^1\text{H}$) v vzorcu oziroma standardu umerjenem na mednarodni standard V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

Meteorološki podatki o količini padavin in temperaturi zraka za dolgo časovno obdobje 1981–2021 za postajo Ljubljana Bežigrad (<https://meteo.arso.gov.si/met/sl/>) ter hidrološki podatki (pretok in temperatura vode reke Save v Šentjakobu pri Ljubljani;

<https://www.arso.gov.si/vode/podatki>) so bili pridobljeni iz arhiva Agencije RS za okolje (v nadaljevanju ARSO).

Obdelava podatkov

Podatke o izotopski sestavi padavin in reke Save smo prikazali na grafih glede na premico GMWL. S pomočjo razpoložljivih izotopskih podatkov padavin na območju Ljubljane smo določili lokalno meteorno premico (LMWL), ki smo jo izračunali z uporabo različnih regresijskih modelov (Crawford et al., 2014). Za obdelave smo uporabili metodi OLSR in RMA ter RMA na podatkih uteženih s količino padavin (PWRMA). Na enak način, z uporabo dveh različnih regresijskih metod (OLSR in RMA), smo določili tudi odvisnost med $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ podatki za reko Savo.

Za izračun zadrževalnih časov (MRT) vode je bila uporabljena periodična regresijska analiza s prilegajočo se sinusno krivuljo (Maloszewski et al. 1982). Za padavine so bile kot vhodni podatki uporabljene vrednosti izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ mesečnih padavin za obdobje 1981–2021 in 2020–2021. Zadrževalni časi so bili v reki izračunani z enačbo (Maloszewski et al. 1982):

$$MRT = \frac{\sqrt{\frac{1}{f^2} - 1}}{2\pi} \quad (2)$$

kjer je MRT srednji letni zadrževalni čas v letih, f je razmerje amplitud $\delta^{18}\text{O}$ v reki in padavinah. Priporočeno je, da se za izračune MRT uporabljajo daljši časovni nizi (npr. 5 let), kljub vsemu pa so bili v nekaterih študijah predstavljeni tudi krajši časovni nizi (Ogrinc et al., 2008; Diadin in Vystavna, 2020).

Določitev MRT je razmeroma pogost problem v hidrologiji. Najpogostejši pristop k ocenjevanju povprečnega zadrževalnega časa vode je preko konvolucijskega integrala, ki povezuje meritve stabilnih izotopov v padavinah in v reki (npr. Maloszewski et al. 1982). Najpomembnejši parameter v modelu je utežna funkcija, ki predstavlja verjetnostno distribucijo za zadrževalne čase. Več kot očitno je utežna funkcija element modela, ki v največji meri vpliva na končni rezultat, obenem pa je njeno izbiro zelo težko dobro zagovarjati s teoretičnimi argumenti, primerni eksperimenti pa so praktično neizvedljivi. Pri ocenjevanju zadrževalnih časov je bilo pri različnih študijah uporabljenih več različnih utežnih funkcij, najpogosteje eksponentna, disperzijska, linearna in delta funkcija, ali kombinacija naštetih (Maloszewski et al. 1982). Enačba (2) predstavlja relacijo med amplitudami nihanja izotopske sestave padavin in pripadajočih amplitud izmerjenih v podzemni ali površinski vodi. Uporabo eksponentne utežne funkcije lahko argumentiramo le s sklicevanjem na dejstvo, da je le v tem primeru mogoča primerjava z rezultati izmerjenimi na tem območju v preteklosti (npr. Ogrinc et al. 2008). Eksponentna distribucija (Enačba 3) zadrževalnih časov je najpogosteje uporabljena utežna funkcija v tovrstnih raziskavah, saj upošteva dve različni predpostavki o širjenju stabilnih kemijskih elementov v tekočini pod površino; predpostavke o eksponentnem vpadu prepustnosti vodonosnika z globino (Erikson et al. 1958) in predpostavke o modelu dobrega mešanja (Good-mixing model). Velikost $g(t)$ predstavlja verjetnost, da je bila voda v sistemu t časa (enačba 3). Prav tako je eksponentna utežna funkcija bolj primerna za vodonosnike, kjer velik del vode odteče preko površine (Rodgers et al. 2005).

$$g(t) = T^{-1} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \quad (3)$$

Amplitudi nihanj vrednosti izotopov v padavinah in površinski vodi (A), ki sta potrebni za izračun zadrževalnega časa T, smo ocenili s pomočjo prilagajanja sinusne krivulje (Enačba 4) (python, scipy.optimize.curve),

$$f(t) = A \times \sin(\omega t - \delta) + B \quad (4)$$

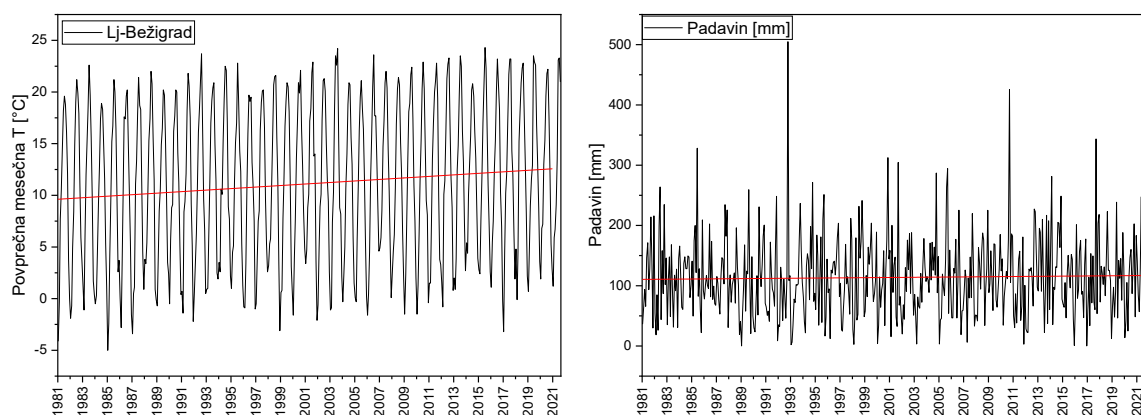
kjer je A amplituda nihanj, B je povprečna letna merjena vrednost $\delta^{18}\text{O}$ in t je čas v dnevih po začetku vzorčenja.

Rezultati

Podnebne in hidrološke značilnosti na območju Ljubljane

Na postaji Ljubljana-Bežigrad je bila v obdobju 1981 in 2020 povprečna letna temperatura zraka $11,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, mesečno pa se je povprečna temperatura spreminjala od $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $24,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. V istem obdobju je letno padlo povprečno $1363,9\text{ mm}$ padavin.

Iz meteoroloških podatkov, izmerjenih v obdobju 1981–2021, lahko opazimo signifikantno naraščanje povprečne mesečne temperature ($p < 0,01$) (Slika 3). Vidno je tudi naraščanje količine padavin, predvsem v hladnih mesecih, medtem ko se količina padavin rahlo zmanjšuje v toplih mesecih. Oba trenda sta manj izrazita kot pri temperaturah.



Slika 3 – Povprečna dnevna temperatura na postaji Ljubljana-Bežigrad izmerjeno v hladnem (Nov–Apr) in toplem (Maj–Okt) obdobju med 1981 in 2021.

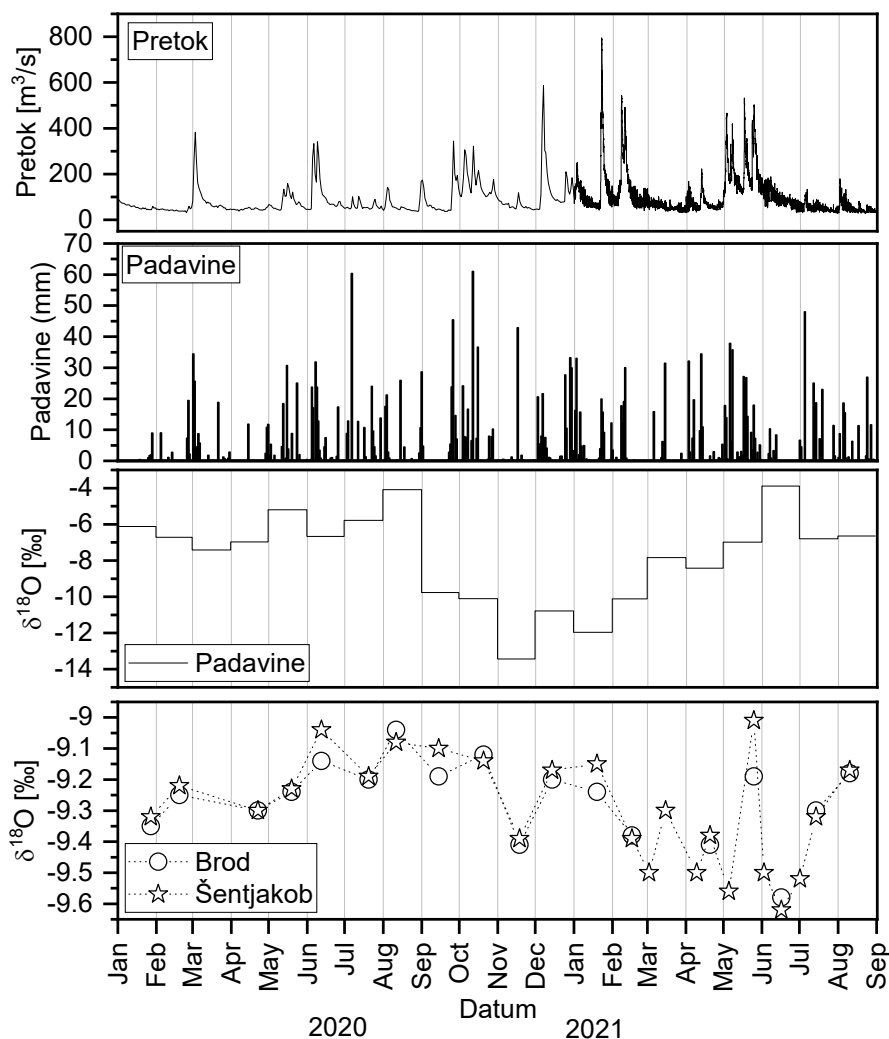
V obdobju naših raziskav (2020–2021) je bila povprečna mesečna temperatura na postaji Ljubljana-Bežigrad med $+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $+23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mesečna vsota količine padavin se je skozi opazovalno obdobje (2020–2021) močno spreminjala; največ so jih zabeležili maja 2021 ($247,5\text{ mm}$), najmanj pa januarja 2020 ($13,9\text{ mm}$).

Pretoki so se na reki Savi za lokacijo Šentjakob v obdobju 1981–2021 spreminjali od $19,1$ do $795\text{ m}^3/\text{s}$, medtem ko se je temperatura spreminjala od $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $21,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (meteo.si). V obdobju 2020–2021 se je pretok spreminjal od $26\text{ m}^3/\text{s}$ do $795\text{ m}^3/\text{s}$, medtem ko se je temperatura spreminjala od $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $18,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (meteo.si).

Izotopska sestava padavin na območju Ljubljane

Izotopska sestava v padavinah se je v obdobju 2020–2021 spreminjala od $-13,4\text{ ‰}$ do $-3,89\text{ ‰}$ za $\delta^{18}\text{O}$ ter od $-99,2\text{ ‰}$ do $-24,3\text{ ‰}$ za $\delta^2\text{H}$ (Slika 4). Na Sliki 4 in 5 lahko opazimo nižje vrednosti obeh parametrov, ki so značilne za hladnejše obdobje leta (september 2020 do februar 2021).

Odvisnost med $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ v padavinah je prikazana na sliki 5, skupaj z padavinskimi premicami (OLSR, RMA in PWRMA) za obdobje 2020–2021. Za primerjavo smo diagramu dodali tudi premice za obdobje 1981–2021 ter za obdobje 2010–2011, enačbe pa so predstavljene v Preglednici 1 (metode OLSR, RMA in PWRMA).



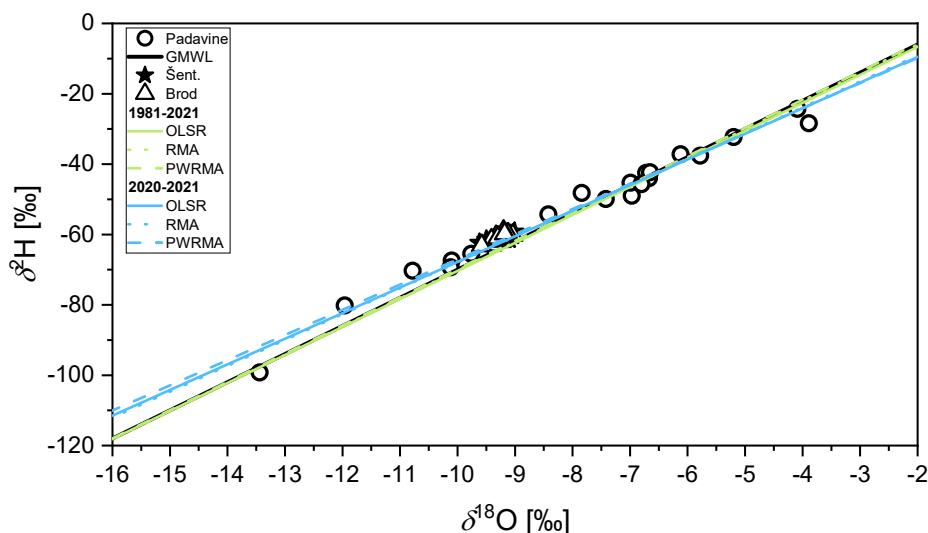
Slika 4 – Pretok reke Save v Šentjakobu (ARSO), količina dnevnih padavin merjenih ob 7:00 na meteorološki postaji Ljubljana Bežigrad (ARSO), $\delta^{18}\text{O}$ v padavinah na lokaciji IJS-Reaktor in v reki Savi na lokacijah Brod in Šentjakob od januarja 2020 do avgusta 2021.

Opazimo, da so skoraj vsi vzorci padavin (obdobje 2020–2021) v bližini premice GMWL, le nekaj padavin leži nad premico GMWL (Slika 5). Padavinske premice za obdobje 1981–2021 so bolj podobne premici GMWL, medtem ko imajo padavinske premice za obdobje 2020–2021 nižjo začetno vrednost in naklon ter višjo napako obeh parametrov (Preglednica 1). Prav tako opazimo, da so za daljše časovne nize razlike med različnimi modeli majhne, prav tako so majhne napake pri obeh parametrih. Pri krajšem nizu (2020–2021) so razlike večje, prav tako tudi napake, kljub vsemu pa bi izpostavili, da v tem nizu manjkajo še podatki za hladno obdobje 2021, saj raziskave še potekajo. Razlike v začetni vrednosti so lahko posledica spreminjanja zračnih mas (Gat in Dansgaard, 1972), kondenzacijske temperature (Dansgaard, 1964) in re-evaporacije padavin (Craig, 1961). V tabeli so podane tudi premice za obdobje marec 2010–marec 2011, ko so se v preteklosti izvajale raziskave na reki Savi (Vrzel et al., 2018). Ponovno je predstavljeno krajše obdobje, kjer se modela OLSR in RMA

močno razlikujeta, izračunane pa so tudi večje napake kot za obdobje 2020–2021. Opazimo pa lahko, da je začetna vrednost bolj podobna parametrom, ki opisujejo premico GMWL kot pa vrednosti za obdobje 2020–2021.

Preglednica 1 – Padavinske premice OLSR, RMA in PWRMA za Ljubljano za obdobje 2020–2021, 1981–2021 in 2010–2011 ter premice OLSR in RMA za reko Savo na lokacijah Brod (N=19) in Šentjakob (N=19; N=24) za obdobje 2020–2021 in za 2010–2011 (Vrzel et al., 2018); r = Pearsonov koeficient korelacije.

Metoda	Lokacija (obdobje)	N	r	Enačba
OLSR	Padavine 1981–2021	457	0,99	$\delta^2\text{H} = (7,95 \pm 0,05) \times \delta^{18}\text{O} + (9,41 \pm 0,46)$
RMA	Padavine 1981–2021	457	0,99	$\delta^2\text{H} = (8,02 \pm 0,05) \times \delta^{18}\text{O} + (10,05 \pm 0,46)$
PWRMA	Padavine 1981–2021	457	0,99	$\delta^2\text{H} = (8,02 \pm 0,05) \times \delta^{18}\text{O} + (10,37 \pm 0,49)$
OLSR	Padavine 2020–2021	20	0,99	$\delta^2\text{H} = (7,28 \pm 0,24) \times \delta^{18}\text{O} + (5,02 \pm 1,94)$
RMA	Padavine 2020–2021	20	0,99	$\delta^2\text{H} = (7,35 \pm 0,24) \times \delta^{18}\text{O} + (5,56 \pm 1,94)$
PWRMA	Padavine 2020–2021	20	0,99	$\delta^2\text{H} = (7,16 \pm 0,18) \times \delta^{18}\text{O} + (4,52 \pm 1,54)$
OLSR	Padavine 2010–2011	12	0,98	$\delta^2\text{H} = (7,86 \pm 0,62) \times \delta^{18}\text{O} + (8,99 \pm 5,58)$
RMA	Padavine 2010–2011	12	0,98	$\delta^2\text{H} = (8,1 \pm 0,62) \times \delta^{18}\text{O} + (11,08 \pm 5,62)$
PWRMA	Padavine 2010–2011	12	0,98	$\delta^2\text{H} = (8,18 \pm 0,72) \times \delta^{18}\text{O} + (16,32 \pm 6,48)$
OLSR	Sava Brod 2020–2021	19	0,80	$\delta^2\text{H} = (6,89 \pm 1,25) \times \delta^{18}\text{O} + (2,77 \pm 11,60)$
RMA	Sava Brod 2020–2021	19	0,80	$\delta^2\text{H} = (8,61 \pm 1,32) \times \delta^{18}\text{O} + (18,71 \pm 12,23)$
OLSR	Sava Šentjakob 2020–2021	24	0,86	$\delta^2\text{H} = (5,07 \pm 0,64) \times \delta^{18}\text{O} - (13,99 \pm 5,94)$
RMA	Sava Šentjakob 2020–2021	24	0,86	$\delta^2\text{H} = (5,89 \pm 0,66) \times \delta^{18}\text{O} - (6,36 \pm 6,18)$
OLSR	Sava Šentjakob 2020–2010	19	0,78	$\delta^2\text{H} = (4,47 \pm 0,86) \times \delta^{18}\text{O} - (19,47 \pm 7,93)$
RMA	Sava Šentjakob 2020–2010	19	0,78	$\delta^2\text{H} = (5,70 \pm 0,91) \times \delta^{18}\text{O} - (8,09 \pm 8,4)$
OLSR	Sava Šentjakob 2010–2011	12	0,80	$\delta^2\text{H} = (3,48 \pm 2,09) \times \delta^{18}\text{O} - (30,15 \pm 19,18)$
RMA	Sava Šentjakob 2010–2011	12	0,80	$\delta^2\text{H} = (7,47 \pm 2,44) \times \delta^{18}\text{O} + (6,44 \pm 22,41)$

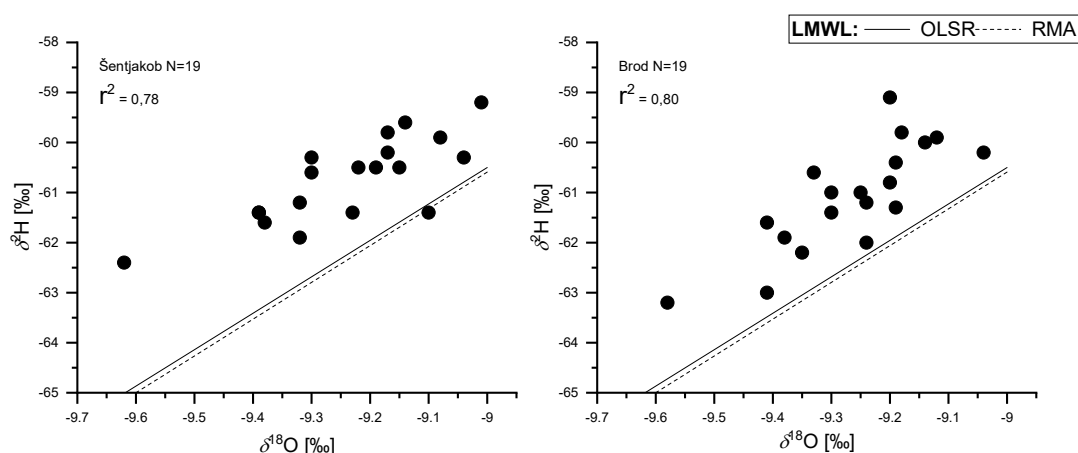


Slika 5 – Izotopska sestava padavin (Ljubljana) in reke Save (lokaciji Šentjakob in Brod) ter premice: GMWL (Craig; 1961), ter LMWL (OLSR, RMA in PWRMA) za obdobji 1981–2021 in 2020–2021.

Izotopska sestava reke Save

Pretok na lokaciji Sava Šentjakob in izotopska sestava površinske vode na lokaciji Sava Šentjakob in Sava Brod v obdobju 2020–2021 so prikazane na sliki 4. Izotopska sestava v reki Savi se je v opazovalnem obdobju spreminjala od $-9,62$ do $-9,01$ ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ ter od $-63,2$ do $-59,1$ ‰ za $\delta^2\text{H}$ (Slika 4). Letno spreminjanje $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ je majhno in znaša $0,54$ ‰ in $4,1$ ‰ za Sava Brod ter $0,61$ ‰ in $3,7$ ‰ za Sava Šentjakob. Nizko sezonsko variabilnost so za $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ poročali že v raziskavi reke Save v obdobju 2004–2006 ($1,20$ ‰ za $\delta^{18}\text{O}$ ter $9,9$ ‰ za $\delta^2\text{H}$) (Ogrinc et al. 2008), ki pa je vseeno višja kot v našem primeru. Izrazito višjo vrednost opazimo v maju 2021 (Slika 4), ko je bil izmerjen tudi najvišji povprečni mesečni pretok in je bila zabeležena največja količina padavin (ARSO). Izračunali smo tudi odvisnost med $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ po metodi OLSR in RMA za Brod in Šentjakob (Preglednica 1). Razpršenost točk na sliki 6 in izračuni v preglednici 1 kažejo na to, da je prisotna zelo velika napaka, zato ne moremo govoriti o linearni odvisnosti (Slika 6).

Za Šentjakob so premice izračunane za vzorce vode vzete enkrat mesečno ($N=19$) in za vzorce vode, ki so bilo vzete dvakrat mesečno ($N=24$). Iz preglednice 1 lahko vidimo, da je naklon za večino premic reke nižji kot pa naklon LMWL premic, prav tako pa so razlike glede na uporabljeno metodo (OLSR in RMA). Nižji naklon nakazuje evaporacijo, kar bi lahko bila posledica evaporacije vode, ki napaja reko preko površinskega odtoka in podzemne vode v zaledju. Za premico lokacije Brod (RMA) lahko opazimo, da je naklon višji, ter bolj podoben GMWL oz. LMWL premicam. Prav tako je opazna bolj pozitivna začetna vrednost. Pri izračunu OLSR in RMA premic za Šentjakob lahko opazimo, da se napaka zmanjša, ko uporabimo večje število podatkov ($N=24$).



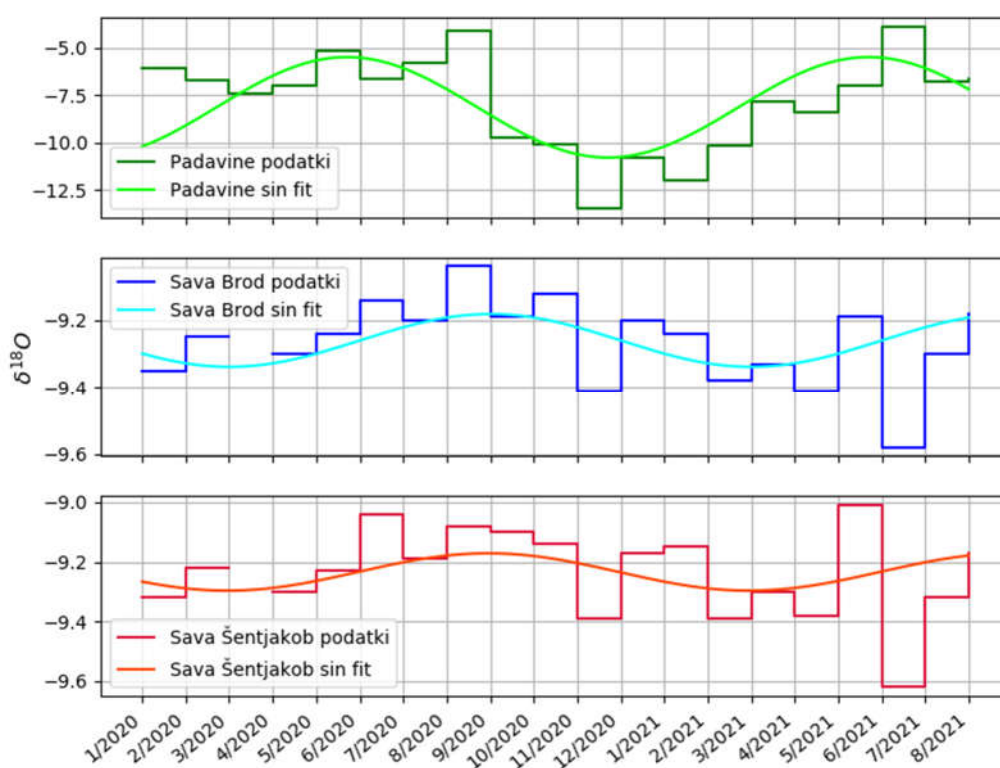
Slika 6 – RWL (OLSR in RMA) za lokaciji Sava Šentjakob ($N=19$) in Sava Brod ($N=19$).

Glede na predhodne podatke (Vrzel et al., 2018) smo izračunali tudi OLSR in RMA premice za lokacijo Sava Šentjakob za obdobje 2010–2011 (Preglednica 2). Opazimo, da se OLSR in RMA premici med seboj zelo razlikujeta, prav tako so prisotne velike napake začetne vrednosti in naklona. Zelo velike pa so tudi razlike v primerjavi z izračuni za lokacijo Šentjakob za obdobje 2020–2021. V vseh primerih lahko sklepamo, da so bili za izračune uporabljni premajhni nizi podatkov.

Ocena zadrževalnih časov

Iz nihanja izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) lahko opazimo, da le-to v padavinah odraža izrazito sezonsko spremenljivost, ki se v zelo dušeni obliki izkazuje tudi v reki Savi (Slika 4). Sezonsko spreminjanje lahko interpretiramo z uporabo regresijske analize z uporabo

enačbe 5. Izračunana amplituda spreminjanja $\delta^{18}\text{O}$ za padavine za obdobje 2020–2021 znaša 2,89 ‰, kar je podobno izmerjeni amplitudi za obdobje 1981–2010 za lokacijo Ljubljana (Ogrinc et al., 2008), amplitudi za obdobje 1981–2021 (preglednica 2), ter za ostale predhodne raziskave (npr. Rodgers et al., 2005; Ogrinc et al., 2018). Na sliki 7 je predstavljena prilegajoča se sinusna krivulja izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) za padavine za obdobje 2020–2021 ter za Sava Brod in Sava Šentjakob za enako obdobje. Padavinski podatki so relativno dobro opisani z uporabljenno sezonsko sinusno krivuljo ($r^2 = 0,73$), medtem ko je prileganje sezonski sinusni krivulji za lokacijo Sava Brod 0,44 in Sava Šentjakob je 0,39 znatno slabše (Preglednica 2). Za površinsko vodo smo izmerili izrazito nižje amplitude sezonskega nihanja kot za padavine; Brod 0,11 ‰ in Šentjakob 0,15 ‰. Z uporabo enačbe 2 smo izračunali zadrževalne čase za lokaciji Brod in Šentjakob: 4,2 leta in 3,1 leta (Preglednica 2). Izračunani zadrževalni časi se razlikujejo od srednjih zadrževalnih časov v preteklih raziskavah Save, ki so bili za lokacijo Sava Tacen ocenjeni na 1,54 leta, za Sava Dolsko pa na 1,2 leti (Ogrinc et al., 2008; Ogrinc et al., 2018).



Slika 7 – Periodična regresijska analiza s prilegajočo se sinusno krivuljo za izotopsko sestavo kisika ($\delta^{18}\text{O}$) v padavinah (Ljubljana-Reaktor), Savi Brod in Savi Šentjakob.

Preglednica 2 – Zadrževalni časi (leto) izračunani s pomočjo regresijske analize (enačbe 2-4) za $\delta^{18}\text{O}$ v padavinah in reki Savi. N je število vzorcev.

Lokacija	MRT/leto	Amplituda	N	r^2
Padavine 1981–2021		2,86	460	0,70
Padavine 2020–2021		2,89	20	0,73
Sava Brod	4,2	0,11	19	0,44
Sava Šentjakob	3,1	0,15	19	0,39

Zaključek

Podatki državnega meteorološkega monitornga (ARSO) kažejo, da se temperatura zraka na območju Ljubljane tako v hladnih kot tudi toplih mesecih signifikantno zvišuje. V hladnih mesecih narašča tudi količina padavin, medtem ko se v toplih mesecih količina padavin znižuje, vendar je trend statistično neznačilen.

Ugotovljene podnebne značilnosti se odražajo tudi v izotopski sestavi padavin na območju Ljubljane, ki se spremlja že vse od leta 1981. V padavinah se odraža sezonsko nihanje izotopske sestave vode, v zelo dušeni obliki pa tudi v površinski vodi Save na območju Broda in Šentjakoba. Padavinske premice za daljše časovno obdobje (1981–2021) kažejo dobro ujemanje z globalno meteorološko premico (GMWL), medtem ko se premice za krajše obdobje razlikujejo glede na naklon in začetno vrednost, vendar tudi vzorci padavin za obdobje 2020–2021 ležijo v bližini premice GMWL. Za dololočitev LMWL premic se potrebuje daljši časovni niz, saj je napaka pri krajših nizih (npr. 2010–2011 in 2020–2021) večja. Prav tako lahko spremembe v naklonih in začetnih vrednosti opazimo pri rečnih premicah, kar nakazuje na dodatne procese znotraj sistema. Močno pa se med seboj razlikujejo tudi koeficienti naklona korelacijskih premic izotopske sestave reke Save na Brodu in Šentjakobu.

Izračun zadrževalnih časov vode Save na lokacijah Brod oziroma Šentjakob med leti 2020 in 2021 znaša 4,2 leta oziroma 3,1 leta. Daljši zadrževalni časi nakazujejo na počasnejši odziv reke na padavine, kljub vsemu pa bi verjetno daljši časovni niz podatkov podal drugačne rezultate. V predhodnih raziskavah so namreč poročali o krajših zadrževalnih časih (Ogrinc et al., 2008; Ogrinc et al., 2018), vendar je šlo tudi v teh primerih za kratkotrajna, nekaj letna opazovanja. Razlog za različne ocene zadrževalnih časov bi lahko bile torej manjše razlike med spremembami v izotopski sestavi v obdobju 2020–2021 ter krajši niz naših opazovanj.

Na spremembe v zadrževalnem času reke Save na širšem območju vzorčenja predvidoma vpliva tudi zadrževalni čas podzemne vode, ki se drenira v vodotok. Mnogi dostopni literaturni viri so si enotni v ugotovitvah, da Sava na severnem robu Ljubljanskega polja na območju Broda in od Male vasi pod Ježico do Sneberskega proda napaja vodonosnik, dolvodno od Šentjakoba pa se podzemna voda drenira v vodotok (Vižintin et al, 2011; Petauer in Hiti, 2017; Petauer in Hiti, 2018; Savić, 2009). Zato ni pričakovati, da bi se podzemna voda iz vodonosnika Ljubljanskega polja na odseku med Brodom in Šentjakobom drenirala v reko Savo in tako vplivala na zadrževalni čas reke na tem odseku.

V prihodnje bomo nadaljevali z zbiranjem padavin ter vzorčenjem reke Save. S pridobljenimi rezultati bomo nadgradili razumevanje hidroloških procesov ter izvora in dinamike padavin, površinskih in podzemnih voda na širšem območju prispevnega zaledja Save in na območju Ljubljane ter izboljšali oceno zadrževalnih časov. Za bolj natančne rezultate bi potrebovali daljši časovni niz vzorčenj izotopov, prav tako pa bi morali v analize vključiti tudi podatke o izotopski sestavi komponent vodnega kroga v zgornjem toku reke.

Zahvala

Raziskave potekajo v okviru IAEA koordiniranega projekta F33024 »Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas«, F31006 »Trends in Isotopic Composition of Precipitation in Slovenia under Climate Change« in RER 7013 »Influence of climate change on groundwater resources and groundwater-surface water interaction in the Sava River basin«, nacionalnega raziskovalnega programa (P1-0143) in programa mladi raziskovalec (PR-09780) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

- Andjelov, M., Rejec Brancelj, I., Smrekar, A., Kladnik, D., Perko, D. (2005). Podtalnica Ljubljanskega polja. Geografija Slovenije 10, Založba ZRC, Ljubljana, 251 p.
- Araguás-Araguás, L., Froehlich, K., Rozanski, K. (2000). Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. Hydrol. Process., 14, 1341–1355.
- ARSO. (2021). Arhiv meritev (meteo.si). Dostopna na: <http://www.meteo.si/met/sl/archive/>. (Pridobljeno 15. 11. 2021)
- Avak, H., Brand, W.A. (1995). The Finning MAT HDO-Equilibration - A fully automated H₂O/gas phase equilibration system for hydrogen and oxygen isotope analyses. Thermo Electronic Corporation. Application News, 1–13.
- Bračič Železnik, B., Jamnik, B. (2005). Javna oskrba s pitno vodo. Podtalnica Ljubljanskega polja (in Slovene) 101–120.
- Brenčič, M., Vreča, P. (2016). Hydrogeological and isotope mapping of the karstic River Savica in NW Slovenia. Environ Earth Sci 75, 651.
- Ciscar, J.C., Feyen, L., Soria, A., ... Feyen, L. (2018). European Commission. Joint Research Centre. 2018. Climate Impacts in Europe: Final Report of the JRC PESETA III Project. LU: Publications Office. 95 p.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1702–1703.
- Cerar, S., Urbanc, J. (2013). Carbonate chemistry and isotope characteristics of groundwater of Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje aquifers in Slovenia, The scientific world journal 2013, 11 p.
- Clark, I.D., Fritz P. (1997). Environmental Isotopes in Hydrogeology. Boca Raton, Florida, Lewis Publishers, 328 pp.
- Coplen, T.B., Wildman, J.D.; Chen, J. (1991). Improvements in the gaseous hydrogen-water equilibration technique for hydrogen isotope-ratio analysis. Anal. Chem., 63, 910–912, doi:10.1021/ac00009a014.
- Crawford, J., Hughes, C. E., Lykoudis, S. (2014). Alternative least squares methods for determining the meteoric water line, demonstrated using GNIP data, Journal of Hydrology, 519, 2331–2340.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436–468.
- Diadin, D., Vystavna V. (2020). Long-term meteorological data and isotopic composition in precipitation, surface water and groundwater revealed hydrologic sensitivity to climate change in East Ukraine. Isotopes in environmental and health studies 56 (2), 136–148.
- Epstein, S.; Mayeda, T. (1953). Variation of O18 content of waters from natural sources. Geochimica et Cosmochimica Acta, 4, 213–224.
- Eriksson, E. The possible use of tritium for estimating groundwater storage. Tellus, 10, 472–478.
- Gat, J.R., Carmi, H. (1970). Evolution of the isotropic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. J Geophys Res 75, 3039–3048.
- ISRBC (2016). 2nd Sava River Basin Analysis, Report, approved by ISRBC on 15th June 2017: <http://savacommission.org/publication>.
- Jamnik, B., Železnik, B.B., and Urbanc, J. (2003). Diffuse pollution of water protection zones in Ljubljana, Slovenia. 5.
- Kanduč, T., Ogrinc, N., Mrak, T. (2007). Characteristics of suspended matter in the River Sava watershed, Slovenia. Isotopes in Environmental and Health Studies 43, 369–386.
- Kern, Z., Hatvani, I. G., Czuppon, G., Fórizs, I., Erdélyi, D., Kanduč, T., Palcsu, L., Vreča, P. (2020). Isotopic 'altitude' and 'continental' effects in modern precipitation across the Adriatic-Pannonian region. Water, 12, 1797.
- Kendall, C., Coplen, T. B. (2001). Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States, Hydrol. Process. 15, 1363–1393.
- Kendall, C., Doctor, D. H. (2003). Stable Isotope Applications in Hydrologic Studies. Treatise on Geochemistry, Volume 5. Editor: James I. Drever. Executive Editors: Heinrich D. Holland and Karl K. Turekian. pp. 605. ISBN 0-08-043751-6. p.319–364.
- Maloszewski, P., Zuber, A. (1982). Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability. Journal of Hydrology, 57, 207–231.

- McGuire, K. J., McDonnell, J. J. (2006). A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology* 330, 543–563.
- Nagode, K., Kanduč, T., Lojen, S., Bračič Železnik, B., Jamnik, B., Vreča, P. (2020). Synthesis of past isotope hydrology investigations in the area of Ljubljana, Slovenia. *Geologija* 63, 251–270.
- Ogrinc, N., Kanduč, T., Stichler, W., Vreča, P. (2008). Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in the river Sava in Slovenia, *Journal of Hydrology* 359, 303–312.
- Ogrinc, N., Kocman, D., Miljević, N., Vreča, P., Vrzel, J., Povinec, P. (2018). Distribution of H and O stable isotopes in the surface waters of the Sava River, the major tributary of the Danube River, *Journal of Hydrology*, 565, 365–373.
- Pezdič, J. (1999). Izotopi in geokemijski procesi. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 269 pp.
- Petauer, D., Hiti, T. (2018). Numerični model vodonosnika Ljubljanskega polja umerjen na ekstremno nizke hidrološke razmere, Agencija RS za okolje, 34 pp.
- Petauer, D., Hiti, T. (2017). Matematični model vodonosnika Ljubljanskega polja umerjen na visoke in srednje hidrogeološke razmere, Agencija RS za okolje, 42 pp.
- Rodgers, P., Soulsby, C., Waldron, S., and Tetzlaff, D. (2005). Using stable isotope tracers to assess hydrological flow paths, residence times and landscape influences in a nested mesoscale catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 139–155
- SLONIP.SI (2020). SLOvenian Network of Isotopes in Precipitation., Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija. <https://slonip.ijs.si>. (Pridobljeno 15. 11. 2021)
- Stewart, M. K., McDonnell, J. J. (1991). Modeling Base Flow Soil Water Residence Times From Deuterium Concentrations. *Water Resources Research* 27, 2681–2693.
- Savič, V. (2009). Analiza podatkov opazovanj in optimizacija opazovalne mreže glede na različne potrebe izkoriščanja voda - Diplomsko naloga, Univerza v Ljubljani, Visokošolski strokovni študij gradbeništva – hidrotehnična smer, Ljubljana: 115 pp.
- Urbanc, J., Jamnik, B. (1998). Izotopske raziskave podzemne vode Ljubljanskega polja, *Geologija* 41, 355–364.
- Urbanc, J., Jamnik, B. (2007). Porazdelitev in izvor nitratov v podzemni vodi Ljubljanskega polja, *Geologija* 50, 467–475.
- Vertačnik, G., Bertalančič, R. (2017). Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011: Značilnosti podnebja v Sloveniji. Agencija Republike Slovenije za Okolje, Ljubljana, 198 p.
- Vižintin, G., Petauer, D., Hiti, T. 2011: Mejniki 2 - Konceptualni model za Ljubljansko polje (3. sklop: Ekspertno numerični sistem za podporo odločanju na aluvijalnih telesih podzemnih voda Slovenije No. P1B), BOBER - Boljša Opazovanja za Boljše Ekološke Rešitve. HGEM d.o.o.: Hidrogeologija, Geotehnologija, Ekologija, Monitoring, Ljubljana: 38 p.
- Vreča, P., Krajcar Bronič, I., Leis, A., Brenčič, M., (2008). Isotopic composition of precipitation in Ljubljana (Slovenia). *Geologija* 51/2, 169–180.
- Vreča, P., Krajcar Bronič, I., Leis, A., Demšar, M. (2014). Isotopic composition of precipitation at the station Ljubljana (Reaktor), Slovenia – period 2007–2010. *Geologija*, 57/2, 217–230.
- Vrzel, J., Solomon, D. K., Blažeka, Ž., Ogrinc, N. (2018). The study of the interactions between groundwater and Sava River water in the Ljubljansko polje aquifer system (Slovenia), *Journal of Hydrology* 556, 384–396.
- Ogrin, D. (2004). Modern climate change in Slovenia. In: Orožen Adamič, M (ed). Slovenia: a geographical overview. ZRC SAZU, Ljubljana, pp. 45–50. http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Slo_Geo_Over/9.pdf
- Zhou, J., Liu, G., Meng, Y., Xia, C., Chen, K., Chen, Y. (2021). Using stable isotopes as tracer to investigate hydrological condition and estimate water residence time in a plain region, Chengdu, China. *Sci Rep* 11, 2812.

The application of new technologies for karst surface and cave geological mapping

Uroš Novak *

Abstract

The aim of the study is to evaluate the relationships between karstified surface and subsurface geological structures. The study focuses on Planina Cave and the overlying surface where the geological structures are strongly affected by karstification. In order to achieve the objectives of the study, a detailed structural geological map of the cave and the surface was prepared. Modern surveying methods were used to obtain more information about the karst geostructural features and not only those obtained through conventional geological mapping techniques.

Povzetek

Namen raziskave je ovrednotenje odnosov med zakraselimi strukturno geološkimi elementi v jami in na površju. Raziskava se osredotoča na Planinsko jami in površje nad njo, kjer izdanjajo močno zakrasele geološke strukture. Rezultati raziskav so natančne strukturno geološke karte Planinske jame in površja. Z uporabo sodobnih geodetskih tehnik smo pridobili več informacij o strukturnih elementih, kot bi jih pridobili samo s klasičnimi metodami geološkega kartiranja.

Ključne besede: Slovenija, Planinska jama, geološko kartiranje, 3D terestrični laserski skener, dron.

Keywords: Slovenia, Planina Cave, karst, geological mapping, 3D terrestrial laser scanner, drone.

Introduction

The Planina Cave is located on the south-western edge of Planina polje, on the western edge of the Idrija fault zone in Slovenia. The cave is part of the Postojna-Planina cave system. It was formed in lower to middle Cretaceous dolomitized limestones. The 6,6 km long cave consists mainly of hydrologically active cave passages. The cave represents an important spring and an important underground confluence of two regional groundwater streams. In recent years, the cave has once again become the target of hydrological research in order to find a new suitable source of water for the inhabitants of the Notranjska and Primorska regions. While the cave has been the subject of many hydrological studies, it has not been the subject of many geological studies, especially tectonic and structural geological investigations..

After World War II the first modern geological mapping of the surface around the cave was carried out as part of the Basic geological map of Yugoslavia (1:100.000) project, Postojna sheet (Buser et al., 1967). The first comprehensive study of Planina Cave was made by Rado Gospodarič as part of his doctoral thesis. Gospodarič studied the cave development between the Pivka Basin and Planina polje during the Quaternary and made the first structural geological map of Planina Cave for his doctoral thesis (Gospodarič, 1973, 1976; Gospodarič and Pavlovec, 1974). Kogovšek and Habič studied infiltration and percolation through the ceiling of Planina Cave and identified and characterized the main

* ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasi, Titov trg 2, 6230 Postojna

conduits (fault zones) using tracer tests in the unsaturated zone of the cave. The surface above the cave was thoroughly mapped by Čar and Gospodarič (1984). They prepared two thematic geological maps, a tectonic map and a stratigraphic-lithological map, for the area between Postojna, Cerknica and Planina.

Methods

To achieve the objectives of the study, a detailed structural geological map of the entire Planina Cave is being prepared. So far, the entrance areas of the cave up to the confluence of the Pivka and Rak rivers and the corresponding surface above the cave have been mapped. The mapping is done according to the proven method of geostructural mapping of karstified carbonate rocks by Čar (1981, 1984, 2018). This method requires a more extensive and systematic collection of field data than ordinary geological mapping. The collection of extended structural, lithological and morphological data due to the complexity and karstification of tectonic deformation in carbonate rocks (Čar 1981, 1984, 2018).

In order to obtain additional geostructural information about the karst, which was not only obtained through conventional geological mapping techniques, modern surveying methods were used, such as a digital elevation model of the surface from airborne LiDAR data provided by the Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia; a detailed drone orthophoto map of the cave surface and a photogrammetric drone model of the rock face of the cave entrance; detailed dense point cloud data of the cave and parts of the surface acquired with a terrestrial 3D laser scanner.

Results and discussion

In the mapped area, at the surface and in the cave, Mesozoic marine carbonates outcrop, palaeogeographically belonging to the Dinaric Carbonate Platform and Quaternary continental sediments are present. The Mesozoic marine carbonates are represented by dolomitised micritic and laminated limestone and dolomitised limestone breccias. Their age ranges from the Aptian to the Cenomanian. The Quaternary sediments consist of alluvium from the Unica River, located in the cave or as valley fill, and colluvium on the slopes of the steephead valley leading to the cave entrance.

In 2014, the area around the Planina Cave was heavily affected by sleet, especially the forested areas. Due to the aforementioned geohazard, it is still possible to take detailed drone images of the surface. A drone campaign of the surface area above the cave entrance areas showed that the fissure zones can be mapped in detail using drone orthophotographs. In particular, the strike directions of larger fissure zones can be recorded, which is an important component of classical karst geostructural mapping (Čar, 1981, 1984, 2018). Therefore, more structural data can be included in the geological maps and the overall geological structure and interpretation.

On the surface above the Planina main passage, the bedding dips towards SW with 15° to 45°. There are some asymmetrical folds with axes running towards NW-SE, with gentle to open inter-limbs angles. between the legs. Normally they dip with 20° to 45° towards SE and NW. The most prominent and common geological structure on the surface above the main passages of the cave are the fissure zones, which are heavily karstified and dip steeply towards SW or NE. Most of the faults present have a Dinaric strike and a vertical

or sub-vertical dip. Some of the faults were identified by surface morphology and fissure zones, with data obtained from drone imagery.

The Planina cave has been the subject of numerous mappings. The first cave map was drawn up by Ivan Rudolf in 1853. The cave map in use today consists mainly of Italian cave surveys from before the Second World War and partly of cave surveys from the 1980s and early 1990s. Comprehensive method of geostructural mapping of karstified carbonate rocks (Čar 1981, 1984, 2018) requires detailed topographic maps, including cave maps. As the lack of an accurate map of Planina Cave hinders the application of the above mentioned method, a detailed terrestrial scanning campaign of the cave is currently underway. Currently, all parts of the cave that can be reached without a boat have been scanned, which is about 15% of the cave. Compared to traditional cave surveying, from measurement to field data processing, the use of terrestrial laser scanning shortens the time from data collection to dense point cloud model and can reveal more structural information in large caves, especially where visibility is limited. The dense point cloud data enables the rapid export of detailed ground plans and cross-sections needed in classical geostructural karst research. In addition, the detailed 3D model of the cave enables improved modelling of the geological structure and hydrogeological modelling.

In the case of Planina Cave, the use of a terrestrial laser scanner supported classical geostructural field mapping by obtaining additional and unseen structural information. Especially in areas with limited visibility in large and high cave chambers that are normally full of aerosols, e.g. Visoka Dvorana, Golgota. Cave beds also generally dip towards SW, although dip angles are more moderate, ranging from 15° to 35°. Most of the mapped folds in the cave have an open shape with a larger wavelength, accompanied by smaller, narrow, parasitic folds with their axes running in the direction of SW-NE. The most common structural elements in Planina Cave, which are morphologically and numerically characteristic, are NW-SE trending faults with the characteristic fissure zones. Dinaric trending faults are vertical or steeply dipping to SW. NE-SW trending faults are less numerous and morphologically not as distinctive as Dinaric trending faults, they generally dip steeply to SE.

Conclusions

The proximity of the study area to two major regional tectonic structures, the Hrušica Thrust Fault, and the seismically active, NW-SE trending dextral strike-slip Idrija fault in combination with the voluminous cave passages and chambers, makes Planina Cave an ideal location for the application of classical geostructural and tectonic studies in combination with modern land surveying methods.

Detailed geostructural mapping (Čar 1981, 1984, 2018) has proved invaluable in identifying geological structures present in karstic rocks. Geostructural maps form the basis for understanding hydrogeological and tectonic processes in karstic areas. The use of modern surveying methods in combination with classical field research methods, such as geostructural mapping of karst areas, greatly improves our data collection in the field and can thus increase our knowledge of processes that make karst a unique geological phenomenon.

The study is carried out within the framework of the Karst Research Programme (P6-0119), a PhD thesis (2020-2024), the project ForKarst - Infiltration processes in forested karst aquifers under changing environment (J6-8266), all financially supported by the Slovenian Research Agency and the project operation "Development of research

infrastructure for the international competitiveness of the Slovenian RRI space - RI-SI-EPOS" and Horizon 2020 project EPOS SP.

Literature

- Buser, S., Grad, K., Pleničar, M. (1967). Osnovna geološka karta SFRJ, list Postojna, 1: 100 000. Zvezni geološki zavod Beograd, Beograd.
- Čar, J. (1981). Geološka zgradba požiralnega obrobja Planinskega polja. *Acta carsologica*, 10, 75–105.
- Čar, J. (1986). Geološke osnove oblikovanja kraškega površja. *Acta carsologica* 14/15, 31–38.
- Čar, J. (2018). Geostructural mapping of karstified limestones. *Geologija*, 61 (2), 133–162.
- Gospodarič, R. (1976). Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem v kvartarju. *Acta carsologica*, 7, 5–139.
- Gospodarič, R. (1973): Razvoj jam med Pivško kotlino in Planinskim poljem v kvartarju. Doktorska disertacija, Postojna, 171 p.
- Gospodarič, R., Pavlovec, R. (1974). Izvor apnenčevega proda v Planinski jami. *Acta carsologica*, 6, 167–182.
- Kogovšek, J. (1982). Vertikalno prenikanje v Planinski jami v obdobju 1980/81. *Acta carsologica*, 10, 110–125.
- Kogovšek, J., Habič, P. (1981). The study of vertical percolation of water in the case of Postojnska jama and Planinska jama. *Acta carsologica*, 9, 129–148.

Geodetski monitoring pomika potencialno nestabilne skalne gmote na vhodu v Križno jamo

Mitja Prelovšek*

Povzetek

Pri vhodu v Križno jamo se nahaja potencialno nestabilna skalna gmota, za katero je bila zaradi zaledne razpoke izpostavljena potencialna porušitev. Med 2016 in 2021 smo poleg nulte izmere opravili dve terminski tahimetrični meritvi sprememb položaja skalne gmote (2017 in 2021) na 4 potencialno nestabilnih točkah. Položaj skalne gmote smo primerjali s 4 okoliškimi, predvidoma stabilnimi točkami. Največje horizontalne spremembe položajev (1,2-2,3 mm) smo ugotovili v zgornjem delu skalne gmote, navzdol izmerjene spremembe položajev pa so statistično nepomembne. To kaže na nagibanje bloka v smeri stran od zaledne razpoke. Ker so vertikalne spremembe položajev niso ugotovljene, pričakujemo ob nadaljnjih spremembah položaja v isti smeri rotacijsko prevrnitev bloka. Tovrstne meritve so uporabne tudi za spremljanje drugih pobočnih geomorfni procesov, pri čemer je pri manjših pomikih ključnega pomena, da se ne zanašamo na absolutno spremembo koordinat potencialno nestabilnih delov, ampak da statistično vrednotimo relativno spremembo položajev glede na bližnje predvidoma stabilne točke geodetsko izmerjene iz istega stojišča.

Ključne besede: skalni odlom, rotacijska prevrnitev, tahimetrična izmera, turistična jama

Key words: rock fall, rotational block toppling, tachymetric measurements, show cave

Uvod

Skalni odlomi so naraven geomorfni pojav na pobočjih. Pojavljajo se na območjih z večjimi nakloni površja s heterogeno strukturo kamninske podlage. Medtem ko se bolj drobno preperel material po pobočju pomika postopoma bolj konstantno in v manjših korakih, manj razpokani ali debeloskladoviti skladi zaradi slabše preperelosti ostajajo na pobočjih še naprej kvazistabilni in ustvarjajo (sub)vertikalne stopnje. Intenzivno odstranjevanje materiala pod stopnjami kljub temu zmanjšuje njihovo stabilnost in povzroča občasno silovito podiranje ali odlamljanje. Gre za negativno povratno zanko, kjer podiranju oz. odlamljanju sledi obdobje umiritve, v kolikor se podorni material pod stopnjo akumulira in sproti ne odstranjuje.

Jamski vhod predstavlja stik podzemnega rova s površjem. Na teh stikih se praktično vedno pojavljajo vertikalne stopnje; sprva zaradi odpiranja rova na površje, kasneje tudi zaradi polzenja porušenega materiala v jamski prostor ali po pobočju pod jamskim vhodom (Mihevc & Urbančič, 2019). Zaradi intenzivnih in časovno variabilnih pobočnih procesov v okolici jamskih se jamski rovi izmenično zapirajo in odpirajo proti površju. V smeri odpiranja pa jih spreminja tudi človek, sploh z vidika lajšanja dostopa v jame uporabljene za turistični namen.

Leta 2016 smo bili s strani upravljavca Križne jame (Društvo ljubiteljev Križne jame) obveščeni o potencialno nestabilni več m³ veliki skalni gmoti na Z boku vhoda v Križno jamo. Pregled je potrdil potencialno nestabilnost zaradi odprte zaledne razpoke,

* Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna; mitja.prelovsek@zrc-sazu.si

najverjetneje reaktivirane z antropogeno odstranitvijo gruščnatega materiala pod njo, kar je povečalo nestabilnost skalne gmote nad njim. Glede na pričakovano hitrost premika, vsebnost vode, material in količino le-tega pojav potencialne porušitve opredeljujemo kot manjši odlom (Komac & Zorn, 2007). Ker bi odstranjevanje kamnite gmote lahko vodilo v nadaljnjo destabilizacijo pobočja (pozitivna povratna zanka), se je upravljalec za podporo odločanju pred odstranitvijo z gradbeno mehanizacijo odločil za predhodne geodetske meritve pomika, kar je pogosto uporabljena metoda geodetskega monitoringa plazišč (Maček et al., 2014; Peternel et al., 2016). V kolikor do pomikov ne prihaja, odstranitev zaenkrat ni potrebna. Sekundarni namen monitoringa je tudi preizkus primernosti metodologije za meritve šibkih pobočnih procesov v drugih kraških okoljih.

Študijsko območje

Raziskave so potekale okoli 20 m pred vhodom v Križno jamo na bloku apnenca z zaledno razpoko (Slika 1). Na mestu jamskega vhoda pobočje Križne jame navzdol prehaja v vertikalne stene. Pod njimi leži melišče z gruščnatim pobočnim materialom, ki se je pred antropogeno modifikacijo vhoda pred 2. svetovno vojno stikalo z obeh strani vhoda v jamo. V osrednjem delu je bilo nekaj sto m³ pobočnega materiala odstranjenega, s čemer se je vertikalni odsek bolj izpostavil, podpora v obliki melišča pa zmanjšala. Naravno stanje pred odstranitvijo sedimenta na mestu potencialno nestabilne skalne gmote ni povsem znano; vklesane inicialke »M.L. 1825« tik pred kovinskimi vrati kažejo, da je bilo naravno nasutje okoli 3 m višje od sedanje poti v jamo. Med vhodom v jamo in potencialno nestabilno skalno gmoto leži z gruščem zasut jamski rov, ki še dodatno zmanjšuje stabilnost tega dela pobočja; na potencialno nestabilni gmoti so zato vidni sledovi preteklega odlamljanja (Slika 1B). Prostornina potencialno nestabilne skalne gmote je ocenjena na 5-10 m³. V spodnji polovici je rahlo previsna.



Slika 1 – Obseg potencialno nestabilne skalne gmote iz smeri proti (A) in od vhoda v Križno jamo (B). Obseg potencialno nestabilnega dela zahodne stene je označen z rdečo prekinjeno črto.

Skladi svetlo sivega jurskega apnenca so debeli od nekaj decimetrov do več kot meter. Plastovitost je večinoma dobro izražena, z izjemo izrazite tektonske strukture neposredno

nad vhodom (Slika 1A) je apnenec na vhodu zgolj razpokan. Zaledna razpoka je v zgornjem delu široka nekaj centimetrov, delno jo zapolnjuje pobočni material. Vpad plasti je bil določen z metodo določanja matematičnih ravnin 21 odlomnih ploskev po lezikah in izrazitih lezik samih v vhodnem delu Križne jame (vsi rovi do vključno 1. jezera) in znaša v povprečju 131/14. Variabilnost sprememb smeri in naklona skladov je majhna, saj znaša standardni odklon vpadnega kota $\pm 10^\circ/\pm 2^\circ$. Koordinate treh točk na posameznih lezikah za potrebe izračuna vpada smo določili iz terestričnega laserskega 3D skenograma jame z inštrumentom Riegl VZ-2000i (Šebela, 2021) v programu RiSCAN Pro. Vpad skladov na območju potencialno nestabilne skalne gmote ustreza vhodnemu delu Križne jame.

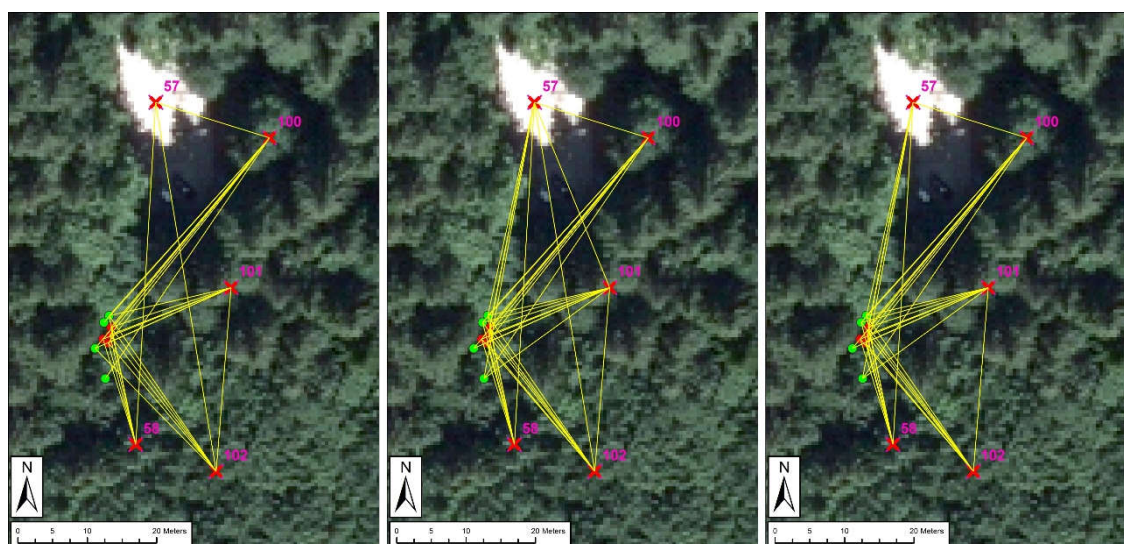
Metodologija

Klasične geodetske terestrične meritve smo opravili z elektronskim tahimetrom Nikon DTM-A10 LG deklarirane natančnosti $\sigma_{\text{DIN 18723}}=3''$ in $\sigma_{\text{ISO 17123-4}}=3,1 \text{ mm}$ pri pogojih opravljanja meritev. Meritve so potekale 1. decembra 2016 (0. izmera), 6. aprila 2017 (1. izmera) in 31. marca 2021 (2. izmera). Za stojiščne točke, ki predstavljajo lokalno geodetsko mrežo in s katerih so bile opravljene tahimetrične meritve, smo uporabili bodisi že vzpostavljene stabilizirane medeninaste poligonske točke z oznako »IZRK Postojna - Izmera jame« kot del geodetskega poligona Križne jame in Križne jame 2 (Drole, 1997; točki 57 in 58; Slika 2H) bodisi smo na novo namestili koničaste nerjavne vijake brez glave M6 dolžine 3 cm na mesta, kjer je bil pogled na potencialno nestabilno skalno gmoto najmanj oviran (točke 100, 101 in 102; Slike 2A, B, C in G). S taistimi nerjavnimi vijaki smo z gradbenim kemičnim dvokomponentnim lepilom Pattex CF 900 stabilizirali tudi točke na stabilnem (1S-4S) in potencialno nestabilnem delu stene (1L-4L; Slike 2Č, D, E in G), na katere smo v času meritev namestili odbojno Nikon mini prizmo vpeto v nosilec z metričnim navojem M6 (Slika 2H). Oštevilčevanje točk sledi višinskemu zaporedju od najnižje (1L oz. 1S) do najvišje (4L oz. 4S).

S tahimetrom so bili na terenu določeni horizontalni kot, vertikalni kot in poševna dolžina od stojiščnih stabiliziranih točk do stabiliziranih točk na stabilnem in potencialno nestabilnem delu stene (Slika 3). Kota in dolžina so bili izmerjeni tudi med samimi stojiščnimi točkami s prizmo na trinožnem stojalu, vendar zgolj za potrebe grobe orientacije horizontalnega kota ter s tem določanja koordinat stojiščnih točk na centimeter natančno. Iz teh podatkov smo s klasičnimi trigonometričnimi enačbami izračunali X, Y in Z koordinate stabilnih in potencialno nestabilnih točk v lokalnem koordinatnem sistemu vezanem na posamezno stojiščno točko. Zaradi petih stojišč smo za posamezne točke na steni imeli običajno več meritev; meritve smo izravnali s translacijo vseh točk posnetih z istega stojišča na srednje vrednosti koordinat stabilnih točk posnetih s posameznega stojišča. Ker smo na ta način dobili vrednosti potencialnih premikov v okviru deklarirane natančnosti inštrumenta, smo poskušali natančnost statistično izboljšati s povprečenjem koordinat potencialno nestabilnih točk glede na stabilne – pri tem smo končno spremembo položajev izračunali kot aritmetično povprečje relativnih sprememb položajev uteženo glede na numerus izračunanih razdaj med stabilnimi in potencialno nestabilnimi točkami posnetih z istega stojišča (Preglednica 1).



Slika 2 – Stabilizirane stojiščne točke nad parkiriščem pred vhodom v Križno jamo, iz katerih je bil opravljen del meritev, in sicer (A) stabilizirana točka 100, (B) 101 in (C) 102. Slike Č-E prikazujejo postopek fiksacij točk na (1L-4L) in v neposredni okolici (1S-4S) potencialno nestabilne skalne gmote. Slika F prikazuje detajl načina stabilizacije stojiščnih točk 57 in 58, slika G detajl načina fiksiranja točk 1L-4L, 1S-4S, 100, 101 in 102, slika H pa točko 1S v času meritev z mini prizmo.



Slika 3 – Razporeditev z vizurami (rumene črte) iz stojiščnih točk (57, 58, 100, 101, 102) na stabilne (1S-4S; zelene točke) in potencialno nestabilne točke na steni (1L-4L) leta (A) 2016, (B) 2017 in (C) 2021. Vhod v Križno jamo je neposredno pri točki 58, bela lisa okoli točke 57 je parkirišče pred jamo.

Osnovna absolutna točnost geodetskih meritev je izračunana iz odstopanj koordinat med stabilnimi točkami na steni (1S-4S) pri meritvah iz različnih stojiščnih točk zaporednih terminskih izmer in znaša v horizontalni smeri v povprečju $2,5 \text{ mm} \pm 1,4 \text{ mm}$ (primerjava 2016 in 2017) oz. $1,2 \text{ mm} \pm 0,7 \text{ mm}$ (primerjava 2017 in 2021). Gre za pričakovani natančnosti izhajajoči iz upoštevanja natančnosti uporabljenega inštrumenta, pogreška centriranja inštrumenta nad stojiščno točko (vsaj 1 mm) ter pogreška signaliziranja prizme (vsaj 1 mm) na sosednji stojiščni točki. Časovne pomike potencialno nestabilnih točk smo imeli sprva namen izračunati iz sprememb njihovih absolutnih lokalnih koordinat, vendar smo uporabno natančnost meritev zaradi majhnih sprememb položajev glede na opisana odstopanja terminskega nameščanja tahimetra nad stojiščno točko dobili šele po izračunu relativnih sprememb položajev potencialno nestabilnih točk (1L-4L) glede na stabilne (1S-4S). Pet stojiščnih točk deluje tako povsem neodvisno, saj so izračunane spremembe položajev povprečne relativne spremembe položajev potencialno nestabilnih točk glede na stabilne iz posameznega stojišča. Če upoštevamo razlike v relativnih razdaljah med stabilnimi in potencialno nestabilnimi točkami znotraj terminskih meritev, znaša natančnost meritev $0,8 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ (2016 in 2017) oz. $0,8 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm}$ (2021). Statistično najbolj relevantne rezultate smo dobili s primerjavo meritev 2017 in 2021, saj so bile najbolj številčne in so se v vizurah povsem ujemale (Preglednica 1), s tem pa je primerjava med stabilnimi in potencialno nestabilnimi točkami na steni boljša. Relativna lega potencialno nestabilnih točk 2L in 3L glede na točke 1S-4S je bila določena iz 14 primerjav razdalj, točk 1L in 4L pa iz 12 primerjav razdalj. Relativno najslabše je bila določena lega točke 1L leta 2016, saj je bila določena iz razdalj do 7 koordinat točk 1S-4S.

Preglednica 1 – Numerus primerjav razdalj med sočasnimi meritvami s stojiščnih točk na stabilne (1S-4S) in potencialno nestabilne točke na steni (1L-4L) v letu 2016 (prvo število), 2017 (drugo število) in 2021 (tretje število).

<i>N</i>	1L	2L	3L	4L
1S	1, 4, 4	1, 4, 4	1, 4, 4	1, 4, 4
2S	1, 2, 2	1, 3, 3	1, 3, 3	1, 2, 2
3S	3, 4, 4	4, 5, 5	4, 5, 5	3, 4, 4
4S	2, 2, 2	3, 2, 2	3, 2, 2	3, 2, 2
SUM	7, 12, 12	9, 14, 14	9, 14, 14	8, 12, 12

Rezultati in diskusija

Relativne horizontalne in vertikalne spremembe položajev potencialno nestabilnih točk (1L-4L) glede na stabilne točke (1S-4S) so prikazane v Preglednici 2. Izračunani spremembe položajev v horizontalni in vertikalni smeri se znotraj merilnih obdobj nahajajo v območju do 5,3 mm. Slabih 90 % sprememb položajev je v velikostnem razredu 0-2,0 mm, torej blizu velikostnega reda natančnosti povprečja meritev, če upoštevamo vrednost 1σ . Zaradi tega se relativne spremembe položajev posameznih potencialno nestabilnih točk deloma tudi izključujejo glede na to, na katero stabilno točko se referirajo. Nobena od stabilnih točk ne kaže bistvenega trenda pri relativnih sprememb položajev – premerjava sprememb koordinat stabilnih točk med obdobji kaže za obdobje 2016-2017 vrednosti 0,6-3,0 mm, za obdobje

2017-2021 pa 0,5-1,1 mm, a v obeh primerih z večinoma nasprotnimi smermi sprememb položajev istih točk med izmerami. To potrjuje zaupanje v stabilnost točk 1S-4S.

Preglednica 2 – Relativne spremembe položajev po posamičnih oseh, horizontalne spremembe položajev in njihove smeri za potencialno nestabilne (1L-4L) glede na stabilne točke na steni (1S-4S). Izračunano povprečje na dnu je uteženo glede na število izmerjenih razdalj med potencialno nestabilnimi in stabilnimi točkami.

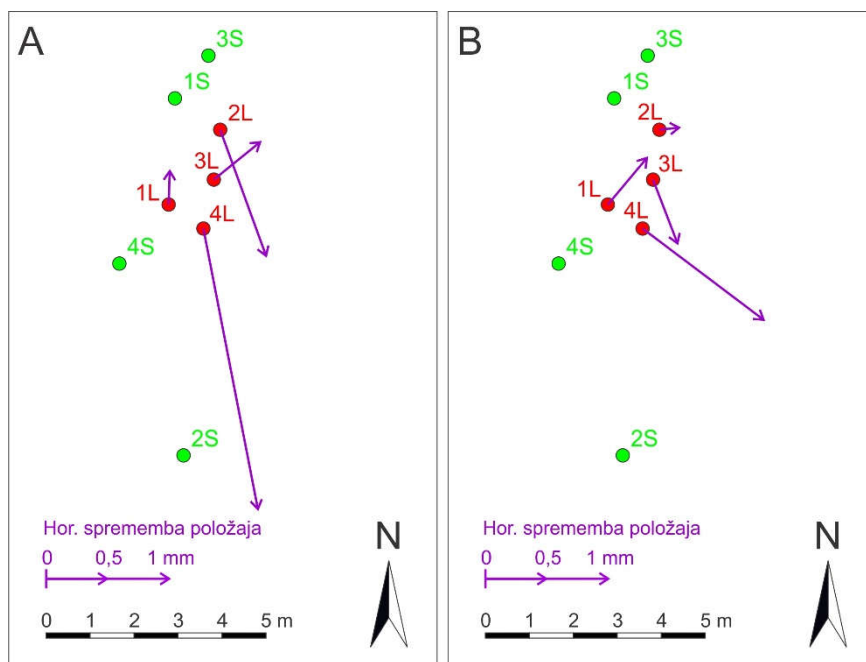
		sprememba položaja 2016-2017				sprememba položaja 2017-2021			
		1L	2L	3L	4L	1L	2L	3L	4L
1S	ΔX (mm)	1,0	1,9	2,1	1,6	-0,1	0,4	0,4	0,9
	ΔY (mm)	-0,8	-2,1	-2,6	-5,0	0,2	0,3	-0,2	-0,3
	ΔZ (mm)	1,0	0,2	1,0	2,5	-0,5	-0,5	-0,8	-1,5
	Δhor (mm)	1,3	2,8	3,3	5,3	0,2	0,5	0,4	0,9
	smer hor. sprememb (°)	127	137	140	162	144	124	111	109
2S	ΔX (mm)	-0,9	0,1	0,6	-0,6	-0,1	-0,7	-0,6	1,9
	ΔY (mm)	3,3	0,4	0,9	-1,3	-1,4	0,0	-0,7	-1,6
	ΔZ (mm)	0,5	-0,7	0,7	1,5	0,5	0,7	0,3	-1,0
	Δhor (mm)	3,4	0,4	1,1	1,5	1,4	0,7	1,0	2,4
	smer hor. sprememb (°)	195	18	33	205	183	89	43	230
3S	ΔX (mm)	-0,5	0,3	0,0	0,3	-0,4	0,3	0,5	0,6
	ΔY (mm)	-0,3	-1,0	0,1	-1,5	0,0	0,1	-0,5	-0,4
	ΔZ (mm)	1,8	-0,2	0,5	1,0	0,0	0,2	-0,4	-1,0
	Δhor (mm)	0,6	1,0	0,1	1,6	0,4	0,3	0,7	0,8
	smer hor. sprememb (°)	234	164	7	168	266	114	48	126
4S	ΔX (mm)	0,7	-0,1	0,2	0,6	-0,9	0,7	0,2	1,1
	ΔY (mm)	0,3	-1,3	-0,7	-2,4	-1,3	-0,7	-1,2	-1,4
	ΔZ (mm)	0,5	-1,5	-0,5	0,3	0,0	0,0	0,5	-1,5
	Δhor (mm)	0,7	1,3	0,7	2,5	1,6	1,0	1,2	1,8
	smer hor. sprememb (°)	68	185	167	166	35	225	169	143
AVG	ΔX (mm)	0,1	0,4	0,4	0,5	-0,3	0,2	0,2	1,0
	ΔY (mm)	0,3	-1,0	-0,3	-2,3	-0,4	0,0	-0,5	-0,7
	ΔZ (mm)	1,1	-0,5	0,4	1,1	-0,1	0,1	-0,2	-1,3
	Δhor (mm)	0,3	1,1	0,5	2,3	0,5	0,2	0,6	1,2
	smer hor. sprememb (°)	2	160	51	169	40	84	159	127

Relativne vertikalne spremembe položajev so v povprečju od 3- do 12-krat manjše od horizontalnih in na nobenem mestu ne presegajo natančnosti merjenja. Nekoliko višje posamične vrednosti relativnih vertikalnih sprememb položajev prvega obdobja merjenja se največkrat kompenzirajo z obratno vrednostjo v drugem obdobju merjenja. Če upoštevamo

potencialno nestabilno skalno gmoto kot enotno pomikajoč se blok, je bila pri skupini točk 1L-4L v prvem terminu zaznana sprememba položaja navzgor (0,5 mm), v naslednjem obdobju pa se je sprememba položaja navzgor kompenzirala s spustom (-0,4 mm). Glede na natančnost spremembi vertikalnega položaja ne moremo pripisati lastnosti pomika.

Povprečna relativna horizontalna sprememba položaja skupine potencialno nestabilnih točk znaša 1,0 mm (prvo obdobje) oz. 0,6 mm (drugo obdobje). V obeh obdobjih relativne horizontalne spremembe položajev od L1 proti L4 naraščajo, to je od spodaj navzgor. Pearsonov koeficient povezanosti je sicer visok (0,77 za prvo obdobje in 0,71 za drugo obdobje meritev), a statistično neznačilen pri $p < 0,05$. Seštevek sprememb položajev v obeh obdobjih da, ob sicer še vedno statistični neznačilnosti ($p = 0,135$), še boljšo povezanost (0,87) kar kaže, da lahko monitoring v prihodnjih letih naraščanje sprememb položajev navzgor tudi statistično potrdi. Bistveno večja sprememba položaja na najvišji potencialno nestabilni točki (4L) glede na spodnje tri (1L-3L) kaže, da se skalna gmota morebiti le ne obnaša kot enoten blok, ampak da je pomik znotraj bloka diferencialen, česar pa zaradi omejene natančnosti meritev zaenkrat še ne moremo potrditi.

Povprečne horizontalne spremembe položajev so s smernimi vektorji ponazorjene na Sliki 4. Kot že ugotovljeno so največje spremembe položajev značilne za višje ležeče točke potencialno nestabilnega bloka. Noben od vektorjev smeri ni usmerjen v pobočje, ampak pretežno stran od njega, torej stran od zaledne razpoke, kar je s konceptualnega vidika pričakovano. Vsota smernih vektorjev sprememb položaja je pri obeh obdobjih podobna (156° v prvem in 117° pri drugem). Generalno so stran od zaledne razpoke obrnjeni vsi smerni vektorji z izjemo točke 1L v prvem obdobju merjenja, kjer so povprečne relativne spremembe položajev najmanjše ter v okviru natančnosti.



Slika 4 – Velikost in smer horizontalnih sprememb položajev (vijolične puščice) nestabilnih točk (1L-4L; rdeče pike) glede na lego stabilnih (1S-4S; zelene pike).

Z obdelavo merjenih vrednosti smo ugotovili spremembe položajev točk na potencialno nestabilni skalni gmoti do največ nekaj milimetrov. Smeri sprememb položajev so smiselne in potrjujejo pričakovano gibanje spremljanega objekta. Glede na spremembe položajev posameznih točk in natančnosti določitev sprememb položajev iz izračunanih sredin

pomikov je zaenkrat nemogoče sklepati o statistični značilnosti pomikov – nobena sprememba položaja namreč ne presega vrednosti trikratnika natančnosti določitve, kar je običajna statistična mera za ugotavljanje pomikov. Dobljeni rezultati nedvomno potrjujejo konstantno smer spremembe položaja najvišje nestabilne točke (4L) stran od zaledne razpoke. Večanje sprememb položaja po potencialno nestabilni skalni gmoti navzgor kaže zaenkrat na rotacijski pomik odluščenega bloka.

Zaključek

Meritve statistično kažejo na spremembo položaja potencialno nestabilne skalne gmote, ki pa zaenkrat v splošnem ni signifikantna za opredelitev kot premik. Glede na natančnost meritev zagotovo lahko govorimo o pomiku najvišje točke na potencialno nestabilni skalni gmoti (4L), kjer znašajo povprečni relativni pomiki 2,3 mm (obdobje 2016-2017) oz. 1,2 mm (obdobje 2017-2021). To potrjuje ločenost potencialno nestabilne skalne gmote od pobočja z zaledno razpoko, vsaj v zgornjem delu. Statistično se proti dnu potencialno nestabilne skalne gmote spremembe položajev zmanjšujejo in prehajajo v območje natančnosti meritev. Vertikalno komponento sprememb položajev lahko zaradi majhnosti in prostorsko neznailne smeri spremembe položajev zanemarimo in pripišemo napaki merjenja, kar kaže na trenutno stabilnost podlage pod potencialno nestabilno skalno gmoto. Meritve nakazujejo na rotacijski tip pomikanja potencialno nestabilne skalne gmote, kar dolgoročno vodi v rotacijsko prevrnitev. O trendu pomikanja s časovnega vidika ni mogoče govoriti.

Majhne, a statistično zaznavne, spremembe položajev kažejo na kvazistabilno stanje potencialno nestabilne skalne gmote. Čas in način porušitve je praktično nemogoče napovedati. Čeprav se pomiki gmote trenutno kažejo kot rotacijski, to hkrati povečuje pritisk na zunanji rob podporne ploskve, kar lahko vodi v hipno izgubo talne podpore in porušitev po zdrsni ploskvi; slednja zaradi drugačnega vpada ne bo lezična, ampak grobo nadaljevanje zaledne razpoke. Zaradi majhnosti sprememb položajev se trenutno odstranitev potencialno nestabilne skalne gmote ne zdi smiselna.

Zahvala

Raziskave so potekale v okviru programa Raziskovanje krasi (P6-0119), ki je financiran s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS. Terestrično lasersko skeniranje je bilo omogočeno z opremo projekta RI-SI-EPOS. Za terensko izvedbo geodetskih meritev gre zahvala Franju Droletu, za kritično presojo, ki je močno izboljšala kvaliteto prispevka, pa recenzentu Tilnu Urbančiču.

Literatura

- Drole, F. (1997). Križna jama 2. Naše jame 39, 76–86.
- Komac, B., Zorn, M. (2007). Pobočni procesi in človek. Geografija Slovenije 15. Ljubljana, Založba ZRC, 217 p.
- Maček, M., Petkovšek, A., Majes, B., Mikoš, M. (2014). Landslide Monitoring Techniques Database. World Landslide Forum 3: Beijing, China. Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Vol. 1. Springer Verlag, 193–197.
- 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. Ljubljana, Univerza v Ljubljani (Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo), 121–130.
- Peternel, T., Kumelj, Š., Oštir, K., Komac, M. (2017). Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements. *Landslides* 14, 395–406.
- Šebela, S. (2021). Raziskovalna infrastruktura RI-SI-EPOS na področju krasoslovja. V: Kuhar, M. in sod. (ur.). *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2020: zbornik del. 26. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko*, Ljubljana, 28. januar 2021. Ljubljana, Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, 13–19.

Sortirana tla v jamah – pokazatelj podobnosti med jamami in periglacialnim okoljem

Matej Blatnik^{1,4}, Jaroslav Obu^{2,4}, Jure Košutnik^{3,4}, Alojzij Blatnik⁴, Simon Filhol², Luc Girod², Simon Zwieback⁵, Paul Overduin⁶, Julia Boike^{7,6}

Povzetek

Sortirana tla so geomorfološki pojav, ki se običajno pojavlja v periglacialnih okoljih zaradi ponavljajočih se ciklov zmrzovanja in tajanja, pri čemer se različno veliki delci tal stalno premeščajo in tvorijo različne geometrijske vzorce. Ustrezne pogoje za nastanek takšnih tal je moče najti tudi v nekaterih kraških jamah. V pričujoči študiji smo se osredotočili na dve jami – Ledenica pod Hrušico in Barka, ki sta relativno plitvi, prostorni in odprti proti površju, kar ustvarja mikroklimo z nizkimi temperaturami v zimskem obdobju. V obeh jamah se nahaja tako grobozrnat grušč kot fin sediment, ki se ob stalnem zmrzovanju in tajanju premešča v menjajoče se pasove na nagnjenih pobočjih oziroma sortirane kroge na ravnih površinah. V obeh jamah smo neprekinjeno merili temperature zraka in sedimenta več kot pet let (obdobje=?). Več samodejnih merilnikov je bilo postavljenih na različnih globinah v tleh in ob jamskih stenah, da bi ugotovili dinamiko prenašanje toplote in širjenje temperaturnega signala z globino. Jamo Barka smo dodatno opremili s tremi fotoaparati za samodejen zajem fotografij, iz katerih bomo lahko izdelali 3D modele z urno ločljivostjo in tako analizirali dinamiko spreminjanja sortiranih tal in spremembo njihovega volumna ter spremljali premikanje posameznih delcev. Prvi niz meritev je pokazal, da se v hladni polovici leta ponovi več ciklov zmrzovanja in tajanja, zmrzal pa lahko prodre do okoli 40 cm globine. Detajlne analize premikov delcev nam bodo omogočile boljše razumevanje nastanka in dinamike sortiranih tal ter tudi procesa krioturbacije, ki je ključen proces v Arktičnem ogljikovem ciklu.

Ključne besede: sortirana tla, cikli zmrzovanja in tajanja, past hladnega zraka, jamska klima

Key words: sorted patterned ground, freeze-thaw cycles, cold air trap, cave climate

Uvod

Kraške jame in sortirana tla sta dva geomorfološka pojava, ki običajno nista povezana med seboj. Sortirana tla so namreč najbolj značilna za periglacialna okolja, kjer se vlažen fin sediment in grobi delci v tleh tekom številnih ciklov zmrzovanja in tajanja reorganizirajo v sortirana tla (Matsuoka et al., 2003; Hallet, 2013). Pojavljajo se v različnih oblikah, kot na primer sortirani krogi na ravnih tleh ali kot sortirani pasovi na nagnjenem terenu (Kessler & Werner, 2003). Sortirana tla se lahko razvijejo tudi v kraških jamah na

¹ ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasi, Titov trg 2, 6230 Postojna

² Univerza v Oslu, Problemveien 7, 0315 Oslo, Norveška

³ Univerza v Novi Gorici, Vipavska cesta, 5000 Nova Gorica

⁴ Društvo za raziskovanje jam Ljubljana, Luize Pesjakove 11, 1000 Ljubljana

⁵ Univerza na Aljaski, Fairbanks, 505 S Chandalar, Fairbanks, AK 99775, ZDA

⁶ Alfred Wegener Institut, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Nemčija

⁷ Humboldt Universität, Unter den Linden 6, 10117 Berlin, Nemčija

območjih z zmernim podnebjem, in sicer v primeru, ko se v jamah vzpostavi posebna mikroklima (Obu et al., 2018).

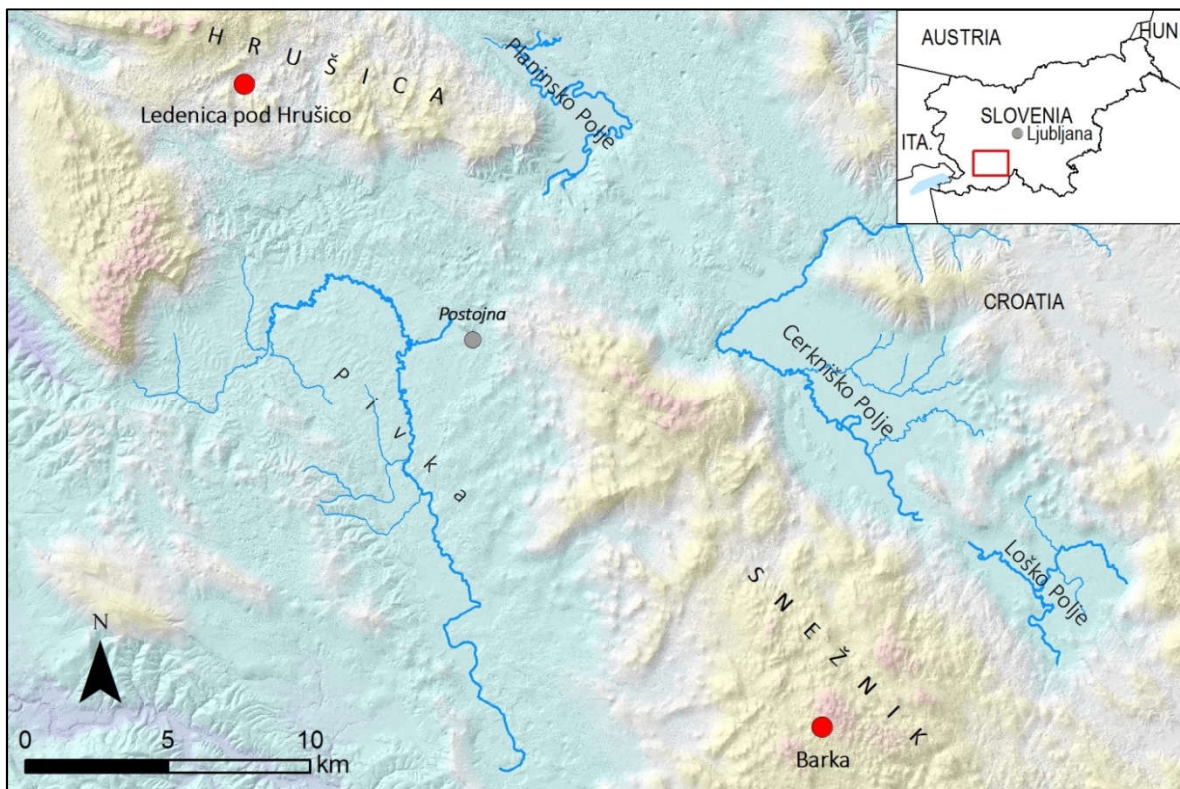
Jame imajo običajno visoko vlažnost in stabilno temperaturo, ki odraža povprečno letno temperaturo okolice. Vendar se pa številni dejavniki, kot so število jamskih vhodov, oblikovanost jame in prisotnost vode, odražajo v bolj kompleksni temperaturni dinamiki, v aktivnem kroženju zraka, spremenljivi vlažnosti in drugih s tem povezanih procesih (Badino, 1995; Luetscher & Jeannin, 2004; Covington & Perne, 2015).

Pričujoč članek je posvečen jamam Barka in Ledenica pod Hrušico, v katerih spremljamo dinamiko sortiranih tal. Obe jami imata precej preprosto obliko - velik vhod in prostorno dvorano neposredno pod vhodom. Takšna oblikovanost omogoča, da v zimskem obdobju težji hladen zrak enostavno vstopa v jamo in povzroča zmrzovanje tal. Ugodna struktura jamskega sedimenta in prisotnost ciklov zmrzovanja in tajanja omogočajo nastanek sortiranih tal.

Do sedaj je bilo objavljenih že veliko študij o sortiranih tleh, ki opisujejo njihovo razprostranjenost, obliko in sestavo, kako se razvijajo in druge dejavnike, ki vplivajo na njihov nastanek. Manj je raziskav, ki so posvečene sortiranim tlam v jamah. Študije opisujejo takšne jame z območja Alp, Karpatov in Dinarskega gorstva (Pulinowa & Pulina, 1972; Mitter, 1983; Luetscher et al., 2005; Zupan Hajna, 1997; Žák et al., 2013). Oblikovanost tal, temperaturno dinamiko in strukturo sedimentov so analizirali Urbančič & Mihevc (2019) v Skedneni jami ter Obu s sodelavci (2018) v Ledenici pod Hrušico v Sloveniji. Pričujoč članek opisuje nadaljnje delo v jami Ledenica pod Hrušico in razširitev meritev temperature zraka in sedimenta ter samodejni zajem fotografij za podrobnejše spremljanje sortiranih tal v jami Barka.

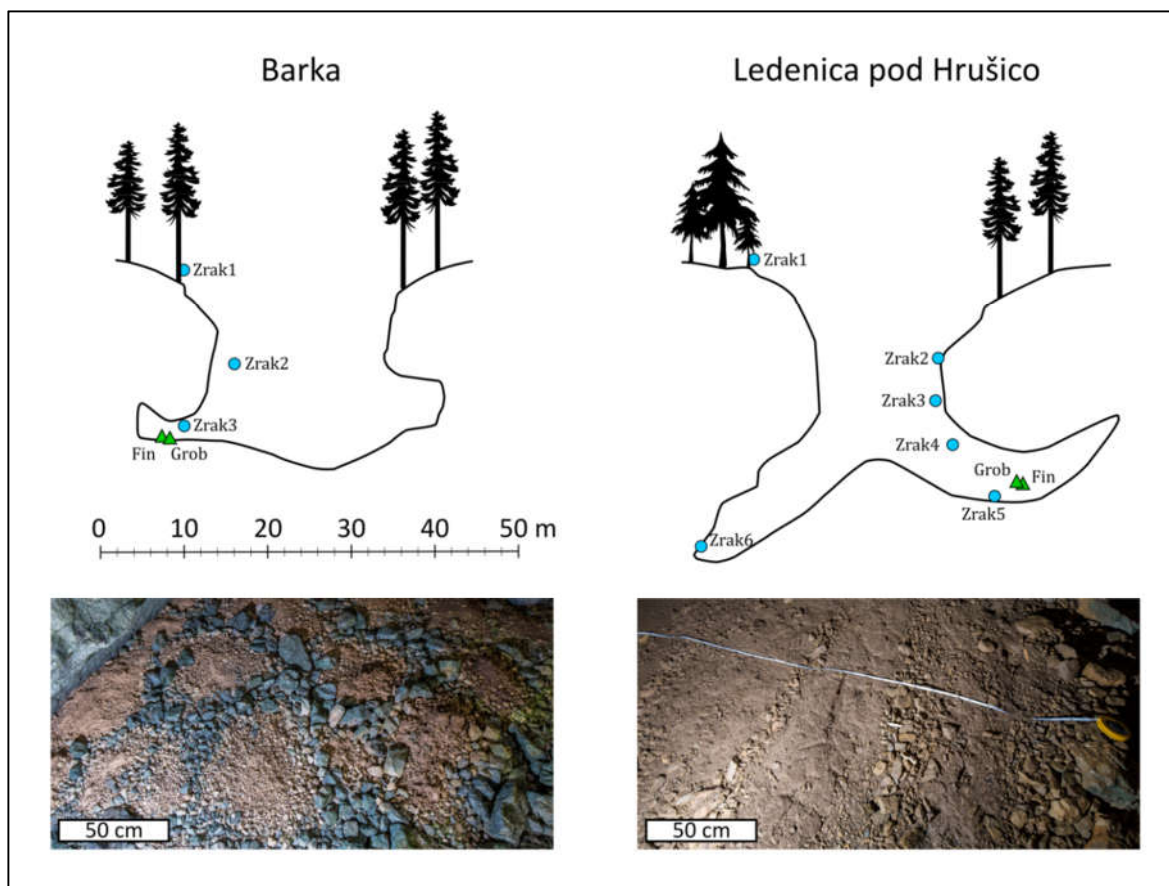
Območje proučevanja

V raziskavi sta zajeti dve območji s sortiranimi tlemi, in sicer kraški jami Barka in Ledenica pod Hrušico. Ledenica pod Hrušico leži na planoti Hrušica (Slika 1) na nadmorski višini 764 m. Vhod z 20 m premera se nadaljuje s prostorno dvorano z dnom na globini 28 m (Slika 2). Na dnu sta dva kratka stranska rova; na S najnižji del jame s podornimi bloki in občasnim ledom, na JV strani pa pobočje z naklonom 10–20° in s približno 10 m dolgimi in 70 cm širokimi sortiranimi pasovi (Obu et al., 2018). Jama Barka leži na planoti Snežnik (Slika 1) z vhodom na 1147 m nadmorske višine. Gre za 30 m široko, 50 m dolgo in 20 m globoko podolgovato kotanjo s previsnimi stenami (Zupan Hajna, 1997). Na JZ strani je majhen spodmol, kjer so se na približno 20 m² veliki ravni površini oblikovali do 60 cm veliki sortirani krogi (Slika 2). V Ledenici pod Hrušico fin sediment izvira iz časov, ko se je skozi jame aktivno pretakala voda, medtem ko je grob material rezultat počasnega razpadanja jamskih sten. V Barki je verjetno tako fin kot tudi grob sediment posledica mehaničnega preperevanja jamskih sten.



Slika 1: Lega proučevanih jam.

Za obe območji je značilno celinsko podnebje s povprečno letno temperaturo zraka med 6 in 8 ° C in okoli 1800 mm padavin letno (Obu et al., 2018). Posebna oblikovanost jam z velikim vhodom in prostorno dvorano omogoča učinkovito izmenjavo toplote med površjem in jamo. V hladni polovici leta se relativno težji hladen zrak s površja steka v nižja območja, v našem primeru v jame. Hladen zrak se na dnu jam akumulira in z nadaljnjim ohlajanjem povzroča zmrzal. V toplejši polovici leta kroženje zraka ni mogoče, saj je toplejši zrak relativno lažji od hladnega, kar pomeni, da ga ne more izpodrinit. Jame se tako obnašajo kot pasti hladnega zraka in ne omogočajo kroženja zraka (Covington & Perne, 2015).



Slika 2: Prečni prerezi jam Barka in Ledenica pod Hrušico s položaji merilnikov temperature zraka (modri krogi) in sedimenta (zeleni trikotniki). Spodaj fotografije sortiranih tal v obeh jamah (Foto: M. Blatnik).

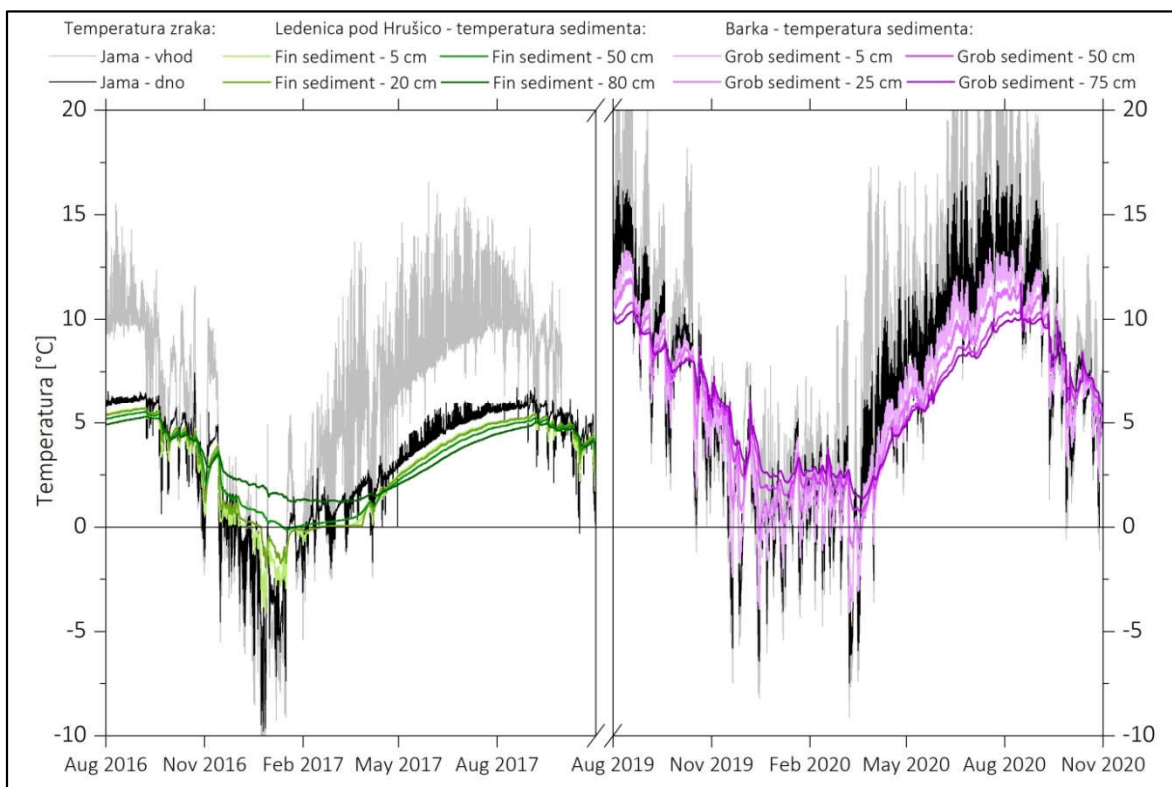
Metode

Za spremljanje temperaturne dinamike smo v obeh jamah vzpostavili samodejne meritve temperatur zraka in sedimenta na različnih globinah. V Ledenici pod Hrušico so bile vse meritve opravljene z merilniki HOBO U12, ki so povezani s tipali TMCx-HD (Onsetcomp, 2021a). Temperature zraka smo merili na 6 različnih globinah med vhom v jamo in dnom. Meritve temperature sedimenta smo vzpostavili v dveh profilih z grobim in finim sedimentom, in sicer na 4 različna mesta med 5 in 80 cm globine. V jami Barka smo za merjenje temperature sedimenta uporabili isti tip merilnikov. Temperaturne značilnosti finega in grobega sedimenta smo spremljali na 4 mestih med 5 in 75 cm globine. Temperaturo zraka smo merili s samodejnimi merilniki TidbiT MX Temperature 400' (Onsetcomp, 2021b), in sicer na treh globinah med vhom v jamo in njenim dnom. Vse meritve temperature zraka in sedimenta so bile v 1 urnem intervalu, meritve pa so potekale od 22. avgusta 2015 naprej v jami Ledenica pod Hrušico oziroma od 22. decembra 2017 naprej v jami Barka. 30. septembra 2018 smo v jami Barka namestili sistem s 3 fotoaparati SONY ILCE QX-1 (Sony.co, 2021) za samodejni zajem fotografij v intervalu 1 ure v zimskem obdobju oziroma intervalu 1 dneva v poletnem obdobju. Kamere smo namestili na jamske stene tako, da so usmerjene proti tlorisu s sortiranimi tlemi z različnih kotov. To omogoča fotogrametrično obdelavo fotografij, s čimer bi lahko podrobno analizirali spremembe v obliki in volumnu tal (Filhol et al., 2019), pa tudi gibanje posamičnih delcev na površini.

Rezultati in razprava

Meritve temperature zraka in sedimenta so pokazale določene razlike med preučevanima jamama. V hladni polovici leta se pri obeh jamah temperaturna nihanja zraka iz površja v notranjost prenašajo z nekoliko zmanjšano amplitudo. V topli polovici leta je ta dinamika nekoliko različna. V primeru Ledenice pod Hrušico toplejši in lažji zunanji zrak ne more vstopiti v jamo. Notranjost jame je glede na okolico podhlajena, temperatura pa skozi celotno poletje in jesen zelo počasi narašča. Jama se torej obnaša kot past hladnega zraka (Slika 3). V jami Barka je tudi v topli polovici leta prisotna izmenjava toplote med površjem in notranjostjo jame, tako da so spremembe na površju z nekoliko zmanjšano amplitudo zaznane tudi na dnu jame (Slika 3). Možen vzrok bi bil prevetrenost ali pa lokalno vzpostavljeno kroženje zraka, saj se sortirana tla nahajajo pod manjšim kaminom, ki je morda povezan s površjem.

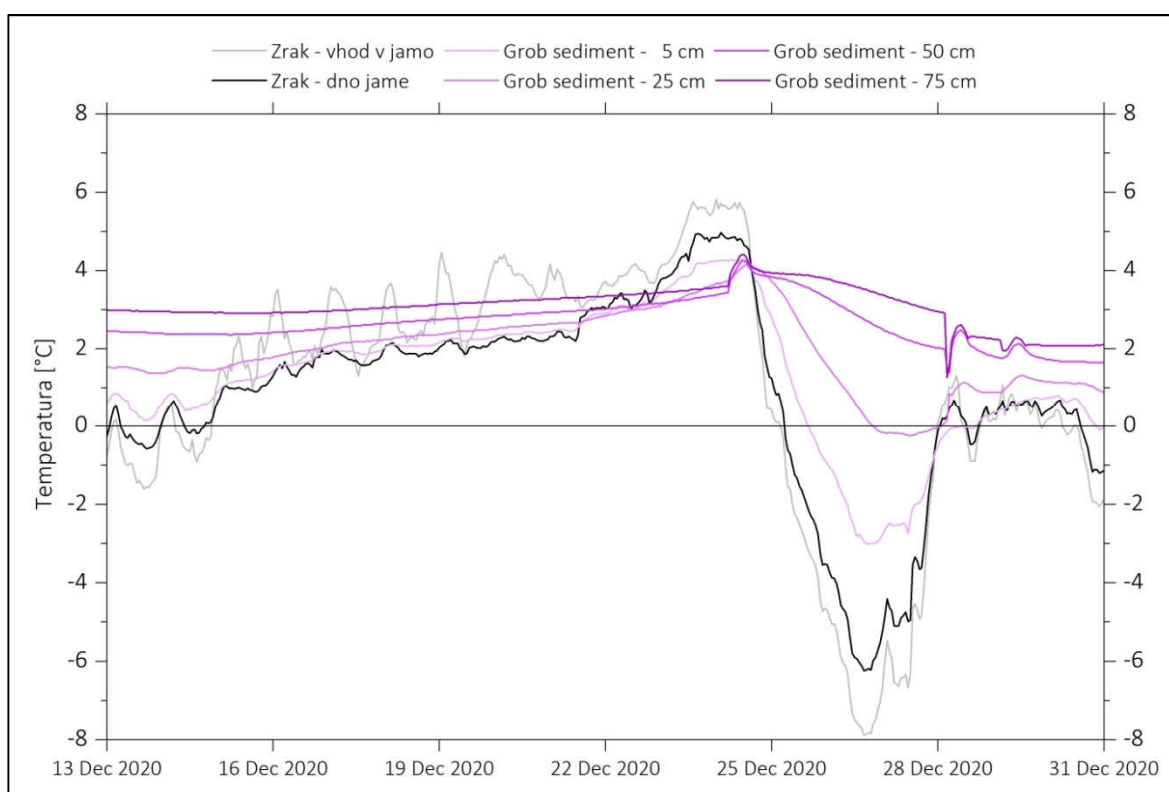
Temperatura sedimenta v obeh jamah sledi dinamiki temperature zraka v najnižjem predelu jame, vendar z zmanjšano amplitudo in z nekoliko časovnega zamika (Slika 4). S povečanjem globine v sedimentu se časovni zamik v temperaturnih spremembah še dodatno povečuje, amplituda nihanj pa zmanjšuje ali občasno izgine, kar pomeni, da so razlike med letnimi ali dnevnimi temperaturnimi viški in nižki manjše (Slika 4). V Ledenici pod Hrušico je letna amplituda temperature zraka na dnu jame približno 15 °C, medtem ko je na 80 cm globine sedimenta le 6 °C. Časovni zamik temperaturnih sprememb je na tej globini med 2 in 5 dni. Na dnu jame Barka je sezonsko nihanje temperature zraka približno 35 °C, pri 75 cm globine sedimenta pa 10 °C. Časovni zamik pri temperaturnih spremembah je 0–2 dni, kar potrjuje učinkovitejšo izmenjavo toplote med jamskim in zunanjim okoljem (Sliki 3 in 4).



Slika 3: Dinamika temperature zraka in sedimenta v Ledenici pod Hrušico (levo) in Barki (desno).

Pri proučevanju sortiranih tal so glavni cilji ugotoviti: 1) globino, pri kateri temperatura sedimenta pade pod ledišče, kar omogoča cikle zmrzovanja in tavanja, in 2) število ciklov zmrzovanja in tavanja v sezoni. V Ledenici pod Hrušico smo zaznali 1–2 cikla zmrzovanja in tavanja na sezono, zmrzovanje pa je prisotno do 40 cm globine. V jami Barka smo zaznali približno 5–10 ciklov zmrzovanja in tavanja na sezono, zmrzovanje pa se prav tako pojavlja do 40 cm globine (Slika 3). Meritve torej nakazujejo, da je v jami Barka precej bolj aktivna dinamika zmrzovanja in tavanja, s tem pa hitrejša premeščanje delcev in s tem nastanek sortiranih tal.

Prvi posnetki s fotoaparatom in fotogrametrična analiza so pokazali, da navpičen premik tal notranjosti krogov z vlažnim finim sedimentom znaša do 5 cm. Spremembe v grobem gradivu na obrobju krogov so manjše. Spremljali smo tudi bočne premike delcev, pri čemer so se že po prvega pol leta spremljanja trije označeni kamni premaknili za več centimetrov iz notranjosti proti obrobju krogov. Nadaljnje analize posnetkov bodo posvečene podrobni analizi sprememb v volumnu in podrobnejšem spremljanju posamičnih delcev za daljše obdobje meritev.



Slika 4: Blaženje in zamik temperaturnih signalov v zraku in sedimentu z naraščanjem globine – primer dogodka iz decembra 2020 v jami Barka.

Sklep

Začetna analiza temperatur zraka in sedimenta je izpostavila določene razlike v klimatskih značilnosti obeh proučevanih jam. Ledenica pod Hrušico se bolj izrazito obnaša kot past hladnega zraka, in omogoča kroženje zraka le pozimi. V sedimentu so odzivi na spremembe temperature zraka počasni, zato je število ciklov zmrzovanja in tavanja majhno, kar se odraža v počasnejšem razvoju sortiranih tal. V Barki je izmenjava toplote med površjem in jamo učinkovitejša. Zaznali smo večja temperaturna nihanja tako pri zraku kot

v sedimentu, prav tako je bilo zabeleženo večje število ciklov zmrzovanja in tavanja. Posledično je v jami Barka razvoj sortiranih tal verjetno hitrejši. Samodejno fotografiranje tal z različnih zornih kotov se je prav tako izkazalo kot uporabna metoda za natančnejše spremljanje ciklov zmrzovanja in tavanja, za spremljanje premikanja posameznih delcev v horizontalni in tudi vertikalni smeri ter za ugotavljanje sprememb v volumnu. Uporabljene metode in tudi ugotovitve bi bilo zanimivo primerjati s tistimi s polarnih območij, kjer permafrost za razliko od kraških območij predstavlja tudi oviro za pretakanje vode navzdol.

Literatura

- Badino, G. (1995). *Fisica del Clima Sotterraneo-Memorie IIS*. Volume 7. Istituto Italiano di Speleologia, Bologna, 136 pp.
- Covington, M. D., Perne, M. (2015). Consider a cylindrical cave: A physicist's view of cave and karst science, *Acta Carsologica*, 44, 3, 363–380.
- Filhol, S., Perret, A., Girod, L., Sutter, G., Schuler, T.V., Burkhart, J.V. (2019). Time-Lapse Photogrammetry of Distributed Snow Depth During Snowmelt, *Water Resources Research*, 55, 9, 7916–7926.
- Hallet, B. (2013). Stone circles: form and soil kinematics, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371, 2004.
- Kessler, M.A., Werner, B.T. (2003). Self-Organization of Sorted Patterned Ground, *Science*, 299, 5605, 380–383.
- Luetscher, M., Jeannin, P-Y. (2004). The role of winter air circulation for the presence of subsurface ice accumulations: an example from Monlési ice cave (Switzerland), *Theoretical and Applied Karstology*, 17, 19–25.
- Luetscher, M., Jeannin, P-Y., Haeberli, W. (2005). Ice caves as an indicator of winter climate evolution: a case study from the Jura Mountains, *Holocene*, 15, 7, 982–993.
- Matsuoka, N., Abe, M., Ijiri, M. (2003). Differential frost heave and sorted patterned ground: field measurements and a laboratory experiment, *Geomorphology*, 52, 1, 73–85.
- Mitter, P. (1983). Frost features in the karst regions of the West Carpathian Mountains. *Proceedings of Fourth International Conference »Permafrost«*, Fairbanks, Alaska, Washington, D.C., National Academy Press, 86–865.
- Obu, J., Košutnik, J., Overduin, P. P., Boike, J., Blatnik, M., Zwieback, S., Gostinčar, P., Mihevc, A. (2018). Sorted patterned ground in a karst cave, Ledenica pod Hrušico, Slovenia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 29, 2, 121–130.
- Onsetcomp. (2021a). HOBO 4-Channel External Data Logger. URL: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-008>
- Onsetcomp. (2021b). HOBO TidbiT MX Temperature 400' Data Logger. URL: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx2203>
- Pulinowa, M.Z., Pulina, M. (1972). Phénomènes cryogènes dans les grottes et gouffres des Tatras, *Biuletyn Peryglacjalny*, 21, 201–235.
- Sony.co. (2021). Sony ILCE-QX1 Lens-Style Camera with 20.1MP Sensor, Full Specifications & Features. URL: <https://www.sony.co.uk/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-qx1-body-kit/specifications>
- Urbančič, T., Mihevc, A. (2019). Movements and polygonal ground formation monitoring with terrestrial laser scanning in the cave Skednena jama, *Proceedings of European Geosciences Union, General Assembly 2019, Vienna, Austria, Geophysical research abstracts*, Vol. 21.
- Zupan Hajna, N. (1997). Karst depressions with precipitous walls on the southern slope of Snežnik Mountain, Slovenia, *Acta Carsologica*, 26, 2, 397–407.
- Žák, K., Orvosova, M., Filippi, M., Vlček, L. (2013). Cryogenic cave pearls in the periglacial zones of ice caves, *Journal of Sediment Research*, 83, 2, 207–220.

Nov model potresne nevarnosti Slovenije (2021)

Barbara Šket Motnikar¹, Polona Zupančič¹, Mladen Živčić¹, Jure Atanackov², Petra Jamšek Rupnik², Martina Čarman¹, Vanja Kastelic³, Andrej Gosar¹

Povzetek

Na Agenciji za okolje (ARSO) in Geološkem zavodu Slovenije (GeoZS) smo razvili nov model potresne nevarnosti Slovenije. Najpomembnejši rezultat je karta vršnega pospeška tal (PGA), ki je v postopku za zamenjavo uradne karte projektnega pospeška tal. Ta karta je priloga Nacionalnega dodatka standarda za potresno odporno projektiranje Evrokod 8 (EC8). Največja vrednost PGA na novi karti (0,325 g) je zahodno od Bovca na meji z Italijo, kar je povezano z veliko potresno aktivnostjo bližnje Furlanije. Velika potresna nevarnost (0,3 g) je ocenjena tudi na območju Dinarskega prelomnega sistema v zahodni Sloveniji, v okolici Idrije pa je bilo najbolj verjetno tudi nadžarišče najmočnejšega zgodovinskega potresa iz leta 1511. Enako vrednost pospeška dosega območje Brežic, kjer se zmerni potresi, ki lahko povzročijo manjše poškodbe, pojavljajo najbolj pogosto. Med nevarna območja (0,275 g) spada tudi Ljubljana z okolico, ki ga izpostavlja zaradi velike gostote naseljenosti. Prvič doslej smo sistematsko in celovito opredelili in parametrizirali aktivne prelome ter na podlagi teh razvili model prelomnih potresnih izvorov. Drugi model potresnih izvorov smo ocenili na podlagi pretekle seizmičnosti, geometrijsko pa ga predstavljajo središča celic mreže. Tretji model, sestavljen iz ploskovnih potresnih izvorov, smo opredelili na podlagi združenih geoloških in seizmoloških podatkov. Za ocenjevanje potresne nevarnosti smo uporabili referenčni (backbone) model pojemanja pospeška, ki je bil razvit za izračun evropske karte potresne nevarnosti, pri čemer pa so parametri prilagojeni regionalnim tektonskim razmeram. Epistemično negotovost najvplivnejših parametrov smo modelirali v logičnem drevesu s 1377 vejami. V nekaj letih pričakujemo spremembe evropskega standarda EC8 za potresno odporno gradnjo, med drugim namesto vršnega pospeška tal predlagajo kot temeljna parametra dva spektralna pospeška. V novo oceno potresne nevarnosti smo zato poleg karte vršnega pospeška tal vključili še karte spektralnega pospeška za 10 nihajnih časov (od 0 s do 2 s) ter spektre in krivulje potresne nevarnosti za izbrane lokacije. S tem smo gradbeni stroki za nadaljnje raziskave zagotovili najnovejše strokovne podlage, izračunane s sodobnimi pristopi in trenutnim geološkim in seizmološkim znanjem.

Ključne besede: potresna nevarnost, pospešek tal, Slovenija, standard Evrokod 8

Keywords: seismic hazard, ground acceleration, Slovenia, standard Eurocode 8

Uvod

Karta potresne nevarnosti Slovenije - projektni pospešek tal (Lapajne in drugi, 2001, 2003) je priloga Nacionalnega dodatka standarda Evrokod 8 (EC8) (SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005), ki opredeljuje slovensko zakonodajo o potresno odporni gradnji. EC8 kot osnovni parameter potresne nevarnosti določa projektni pospešek tal za povratno dobo 475 let za trdna tla (tip tal A po EC8). Za druge tipe tal pa je treba pospešek tal pomnožiti z ustreznim koeficientom tal S. Projektni pospešek tal, (angl. *design ground acceleration*) je po EC8 enak vršnemu (ali največjemu) pospešku tal (angl. *peak ground acceleration PGA*).

¹ Agencija RS za okolje (ARSO), Vojkova 1b, Ljubljana

² Geološki zavod Slovenije (GeoZS), Dimičeva 14, Ljubljana

³ National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV), Section of Seismology and Tectonophysics, L'Aquila, Italija

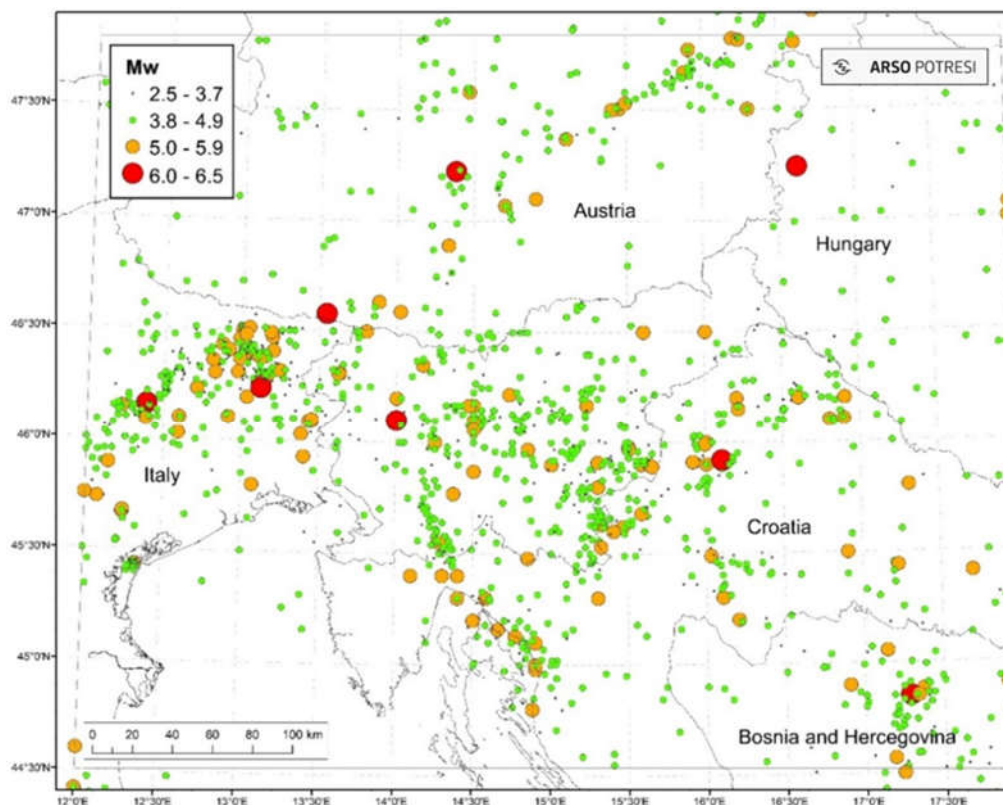
To je največja absolutna vrednost pospeška na prostem površju. Povratna doba je povprečen čas med prekoračitvami vrednosti pospeška tal na dani lokaciji, priporočena doba 475 let pa ustreza 90 % verjetnosti, da vrednosti na karti ne bodo presežene v 50 letih, kar je predvidena življenjska doba navadnih objektov. V pripravi so večje spremembe standarda EC8 (CEN, 2021), po katerem temeljni parameter potresne nevarnosti ne bo več vršni pospešek tal oz. PGA, ampak spektralni pospešek pri nihajnem času, ki predstavlja vrh elastičnega spektra odziva, ter spektralni pospešek pri nihajnem času 1 s.

Od izdelave sedanje uradne karte potresne nevarnosti Slovenije (Lapajne in drugi, 2001, 2003) je minilo že 20 let in v tem času smo pridobili številne nove podatke, modele in relacije, posodobljene so metode ocenjevanja parametrov, razviti so novi računalniški programi. Ocenjevanje potresne nevarnosti je doslej temeljilo skoraj izključno le na potresni zgodovini (katalogu potresov), brez upoštevanja možnosti nastanka močnejših potresov na opredeljenih aktivnih prelomih. Pomemben vpliv na oceno potresne nevarnosti ima model pojemanja pospeška tal z oddaljenostjo od (nad)žarišča potresa. V sedanji uradni karti uporabljen model pojemanja (Sabetta-Pugliese, 1996) je podcenil razpršenost pospeška tal, saj je bilo takrat na voljo še premalo meritev. Številne nove potresne opazovalnice in potresi v zadnjih 25 letih so omogočile razvoj natančnejših modelov pojemanja pospeška tal. Sodobni postopek ocenjevanja potresne nevarnosti zahteva modeliranje negotovosti vplivnih parametrov z logičnim drevesom, medtem ko smo doslej obravnavo negotovosti omejili le na različice kataloga potresov. Vse naštetost nas je spodbudilo v razvoj novega modela potresne nevarnosti Slovenije in izračun nove karte vršnega pospeška tal, s katero bi lahko nadomestili 20 let staro uradno karto potresne nevarnosti Slovenije.

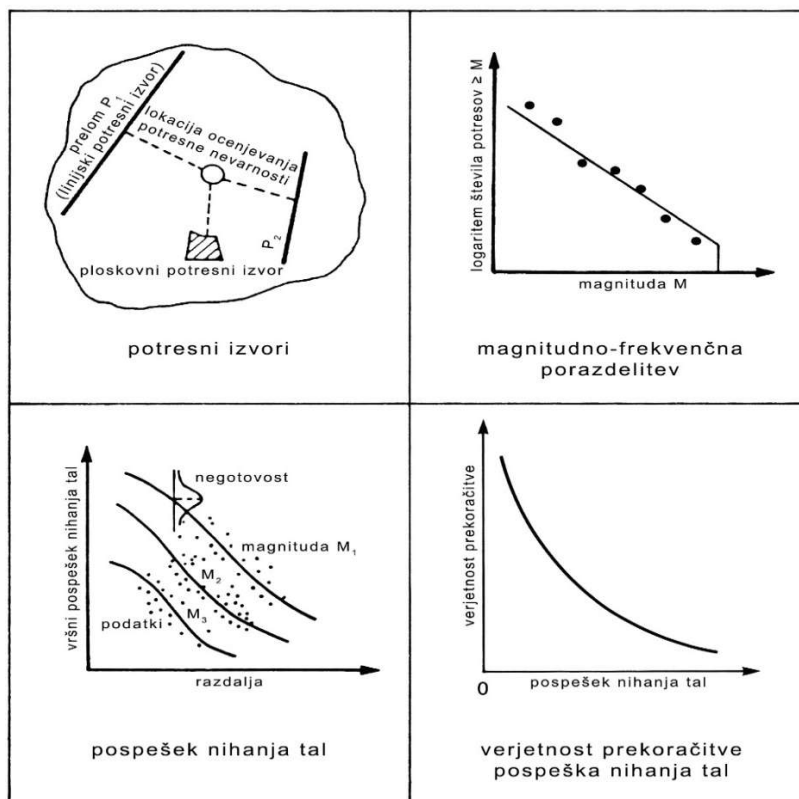
Predpogoj za ocenjevanje potresne nevarnosti je priprava geološko-tektonskih in seizmoloških podatkov ter modelov. Geološko-tektonske podatke smo zbrali v podatkovni zbirki aktivnih prelomov (Atanackov in drugi, 2021a), nastali z obširnim pregledom in nadaljnjo obdelavo vseh objavljenih ali drugače dostopnih podatkov. Na območju Slovenije in okolice je kot posledica kolizijskega stika Jadranske in Evropske tektonske plošče aktivnih več prelomnih sistemov. Reverzni prelomi prevladujejo na stiku med Dinaridi in nedeformiranim delom Jadranske plošče ter v italijanskem delu Južnih Alp, medtem ko regionalni zmični prelomi prevladujejo v Dinaridih in v jugovzhodnih Alpah v Sloveniji.

Temeljni vir seizmoloških podatkov je poenoten katalog potresov Slovenije in sosednjih dežel, ki zajema obdobje od leta 456 do leta 2018 in površino okoli 170.000 km². Katalog potresov smo posodobili z novimi spoznanji zgodovinske seizmičnosti in razširili s potresi zadnjih 20 let (Živčić in drugi, 2018). Zaradi zahtevane predpostavke o med seboj neodvisni porazdelitvi potresov smo iz kataloga izločili pred- in popotrese (slika 1). Za oceno povprečne letne aktivnosti potresnih izvorov moramo upoštevati le komplet del kataloga, torej obdobje, v katerem smo zabeležili vse potrese nad izbrano spodnjo mejo magnitude. Za spodnjo mejo magnitude smo izbrali navorno magnitudo 3,8, ki približno ustreza intenziteti V EMS-98, pri kateri že lahko nastanejo manjše poškodbe na stavbah. Ocenili smo, da je katalog potresov z navorno magnitudo vsaj 3,8 kompletan od leta 1875 dalje.

Za izračun potresne nevarnosti smo uporabili Cornellov postopek (Cornell, 1968) verjetnostnega ocenjevanja potresne nevarnosti (slika 2), ki vsebuje štiri glavne korake: opredelitev potresnih izvorov, ocena aktivnosti potresnih izvorov in največje magnitude, opredelitev modela pojemanja pospeška ter izračun letne verjetnosti prekoračitve referenčnih pospeškov.



Slika 1: Katalog potresov za območje Slovenije in okolice brez pred- in popotresov (obdobje 456 – 2018). Največji potres v katalogu se je zgodil leta 1976 v Furlaniji z navorno magnitudo 6,5.



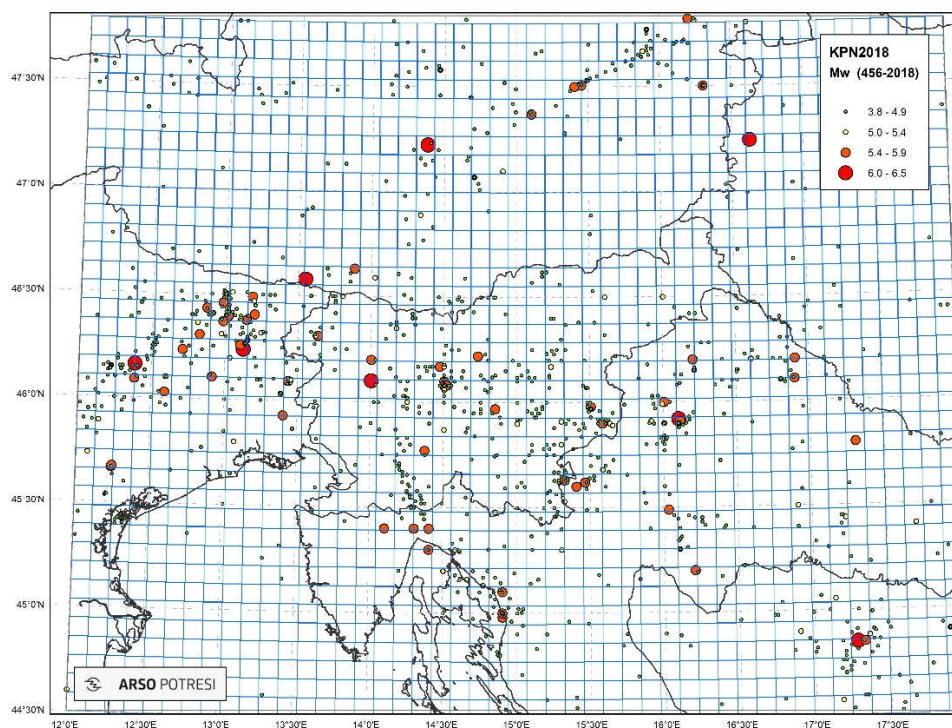
Slika 2: Glavni koraki verjetnostnega ocenjevanja potresne nevarnosti (Reiter, 1990)

Potresni izvori

Potresni izvor je geografsko območje, v katerem predpostavljamo enake strukturno-geološke in kinematske značilnosti ter homogeno seizmičnost. To pomeni, da ima vsaka točka potresnega izvora enako verjetnost za nastanek potresa dane magnitude. V novem modelu potresne nevarnosti Slovenije smo razvili tri modele potresnih izvorov: točkovni (P), ploskovni (A) ter prelomni model z ozadjem (F+B). Za vsak potresni izvor je poleg geometrijske opredelitve potrebno oceniti številne parametre, npr. povprečna letna aktivnost, največja možna magnituda, seizmogeni in žariščni globina, prelomni mehanizem). Geometrija ploskovnih in prelomnih potresnih izvorov ter vrednosti njihovih parametrov so podane v spletni podatkovni zbirki Pangaea*.

Točkovni model potresnih izvorov (P)

Najpreprostejši je točkovni model oziroma model glajene pretekle seizmičnosti (slika 3). Točkovni potresni izvori so središča celic mreže 10 x 10 km. Model večinoma temelji na seizmoloških podatkih in je postopkovno primerljiv z uradno karto potresne nevarnosti iz leta 2001. Lokacije nadžarišč potresov so zaradi negotovosti porazdeljene po celicah okrog nadžarišča. Uporabili smo krožno Gaussovo ter eliptično glajenje (Lapajne in drugi, 2001, 2003), pri čemer so osi elipse obrnjene v smeri prevladujočih prelomov. Potresna aktivnost točkovnega izvora je ocenjena s številom zglatjenih potresov kompletnega kataloga v pripadajoči celici, ali pa je izračunana iz sproščene energije na podlagi magnitude močnih potresov (Lapajne in drugi, 2003).

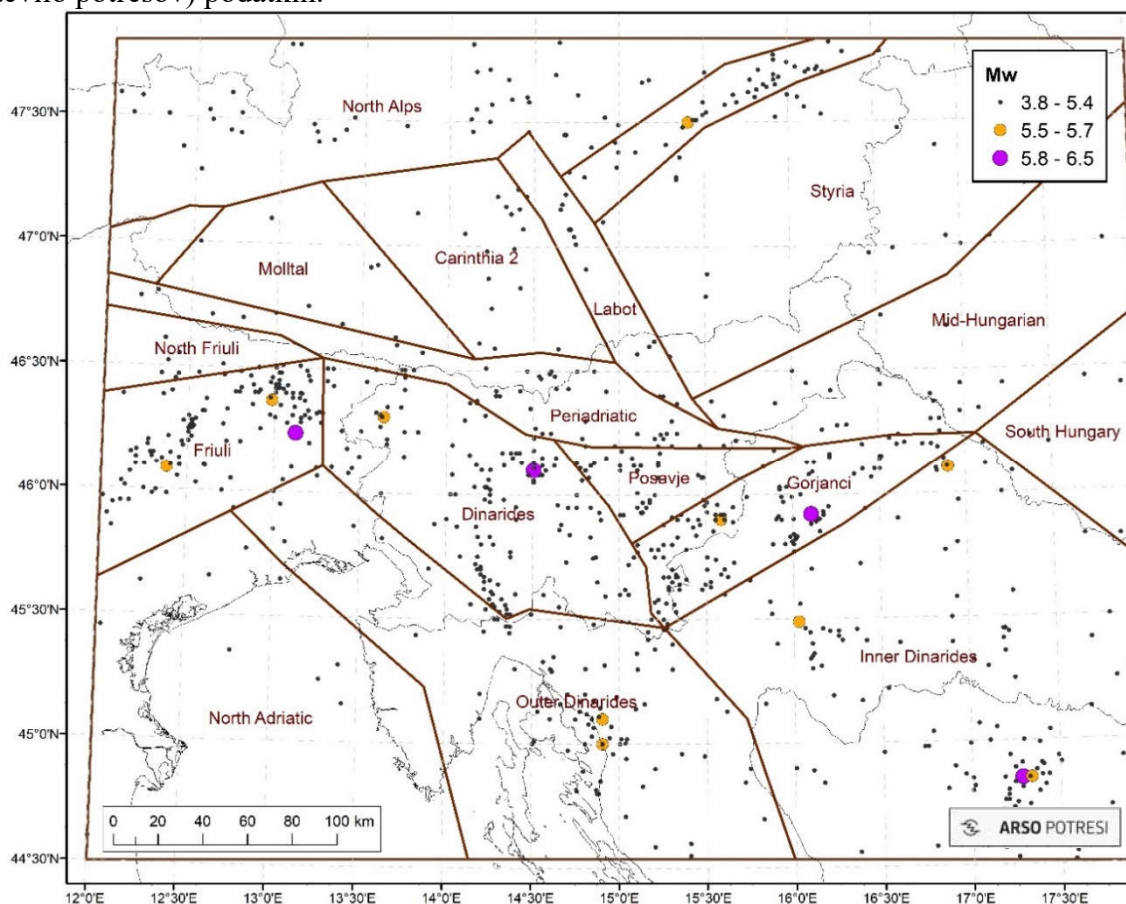


Slika 3: Model glajene pretekle seizmičnosti v točkovnih izvorih – središčih celic mreže 10 x 10 km. S krogi so označene lokacije nadžarišč potresov celotnega kataloga.

* Spletno objavo pričakujemo v kratkem, doi bomo sporočili naknadno.

Ploskovni model potresnih izvorov (A)

Model ploskovnih izvorov (slika 4) predstavlja najbolj standarden tip potresnih izvorov. Opredelili smo 18 ploskovnih izvorov, ki popolnoma pokrivajo vplivno območje ($12\text{--}18^\circ \text{ V}$ in $44,5\text{--}47,8^\circ \text{ S}$). Ocenjevanje parametrov temelji na geoloških (geometrija in kinematske značilnosti) in seizmoloških (seizmogena globina, največja magnituda, povprečno letno število potresov) podatkih.

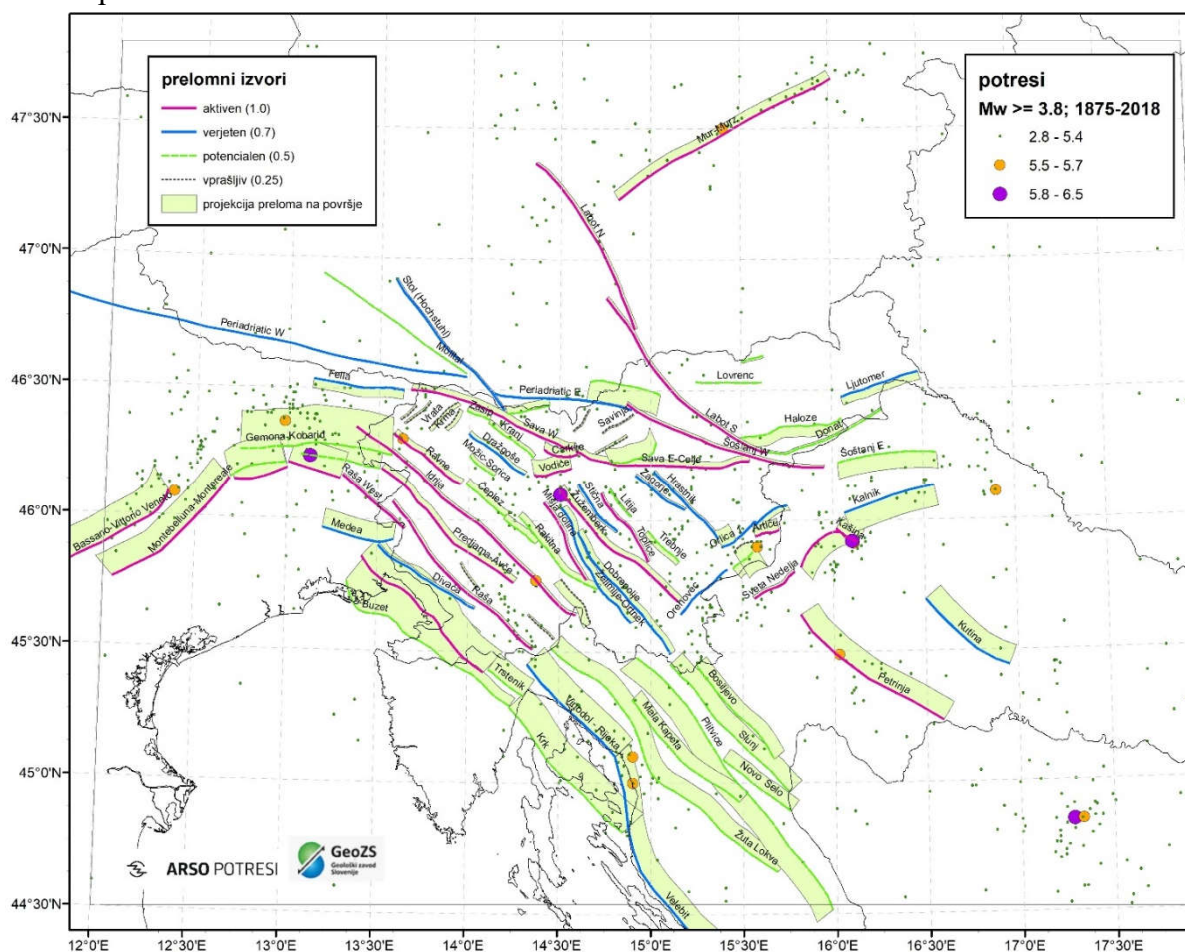


Slika 4: Model ploskovnih potresnih izvorov in potresi iz kompletnega kataloga (navorna magnituda vsaj 3,8 od leta 1875 naprej).

Prelomni model potresnih izvorov z ozadjem (F+A, F+P)

Najbolj kompleksen je geološko-seizmotektonski model 89 prelomnih potresnih izvorov (slika 5), ki je bil izpeljan iz podatkovne baze aktivnih prelomov (Atanackov in drugi, 2021a). Nekatere prelomne izvore izven Slovenije smo privzeli iz podatkovne zbirke DISS (DISS 2018) in SHARE (Basili in drugi, 2013). Prelomni potresni izvor je 3D struktura, ki jo opišemo s traso preloma, naklonskim kotom, smerjo premika ob prelomu in seizmogeno globino. Glede na verjetnost, da je prelomni izvor aktiven, smo opredelili štiri kategorije (v oklepajih so verjetnosti): aktivni (1.0), verjetno aktivni (0.7), potencialno aktivni (0.5) in vprašljivi (0.25) prelomni izvor (Atanackov in drugi, 2021b). Geometrijo in vse parametre prelomnih izvorov smo večinoma ocenili na podlagi geoloških in tektonskih značilnosti. Opredelili smo prelomne potresne izvore, ki so zmožni generirati potrese z magnitudo vsaj 5,8. Manjši potresi (pod magnitudo 5,8) so modelirani v ozadju kot ploskovni ali točkovni potresni izvori. S prelomnim modelom potresnih izvorov predvidimo možnost potresov

vzdolž celotne površine prelomnega izvora in ne le na območjih, kjer smo že zabeležili močne potrese.



Slika 5: Model prelomnih potresnih izvorov, aktivnost prelomnih izvorov (Atanackov in drugi, 2021a in 2021b) in potresi iz kompletnega kataloga (navorna magnituda vsaj 3,8 od leta 1875 naprej).

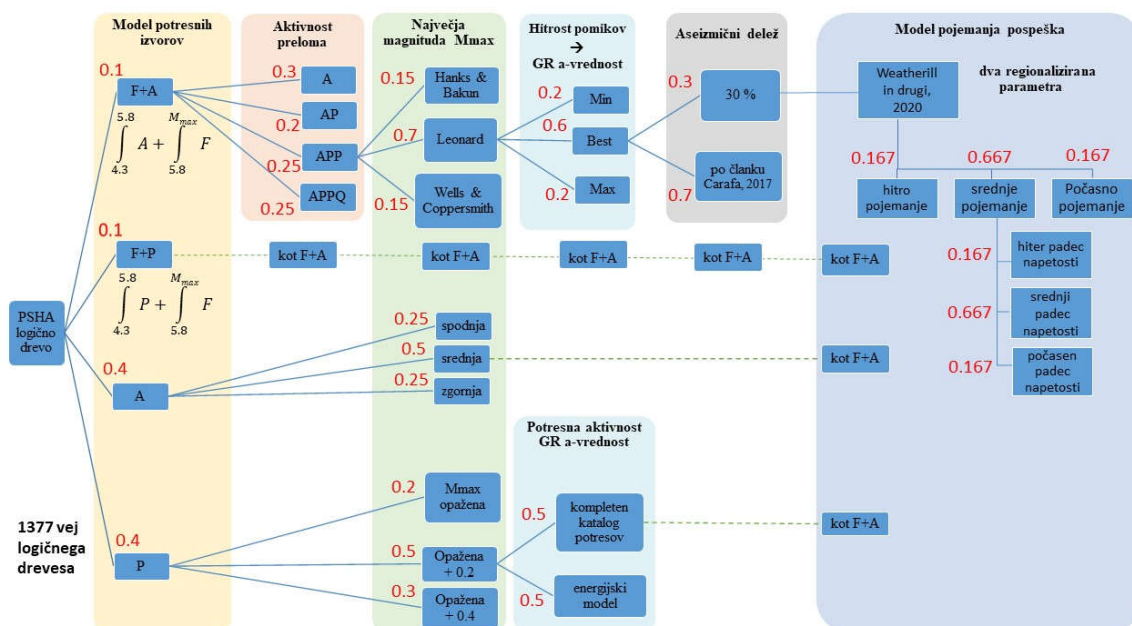
Model pojemanja pospeška tal

Eden od najvplivnejših dejavnikov v izračunu potresne nevarnosti je model, ki opisuje pojemanje pospeška tal z oddaljenostjo od (nad)žarišča potresa. V zadnjem desetletju so meritve pospeškov na novih potresnih opazovalnicah omogočile razvoj številnih novih modelov po vsem svetu (Douglas 2021). Hkrati se namesto tradicionalne uporabe nabora alternativnih modelov uveljavlja t.i. 'backbone' princip (Douglas 2018), s katerim privzamemo le en, referenčni model pojemanja, parametre kalibriramo na podlagi regionalnih značilnosti, njihovo porazdelitev pa modeliramo v logičnem drevesu.

Za model pojemanja pospeška tal smo uporabili model (Weatherill in drugi, 2020; Kotha in drugi, 2020), ki je bil razvit za izračun nove evropske karte potresne nevarnosti. Poleg razdalje so upoštevani še številni drugi parametri (npr. magnituda, žariščni mehanizem, vrsta tal). Dva parametra (hitrost pojemanja ter lokalni napetostni režim) sta bila na evropskem nivoju ocenjena regionalno. Velika večina ozemlja Slovenije in bližnje okolice spada v območje (označeno kot prva regija), kjer je pojemanje pospeška počasno do zmerno. Po priporočilu avtorjev modela smo oba parametra ocenili s tremi vejami logičnega drevesa.

Izračun potresne nevarnosti

V izračunu potresne nevarnosti nastopajo številni parametri. Vrednosti parametrov so nepoznane in jih lahko le ocenimo na podlagi vseh razpoložljivih podatkov in interpretacij. Ker so ocene negotove, smo za najvplivnejše parametre ocenili več vrednosti. Epistemično negotovost parametra (ki ima nepoznano, a samo eno možno vrednost) modeliramo v logičnem drevesu. Struktura logičnega drevesa za slovenski model potresne nevarnosti ima 1377 vej (slika 6), ki predstavljajo alternativne vrednosti najvplivnejših parametrov v modelu potresnih izvorov in modelu pojemanja pospeška.



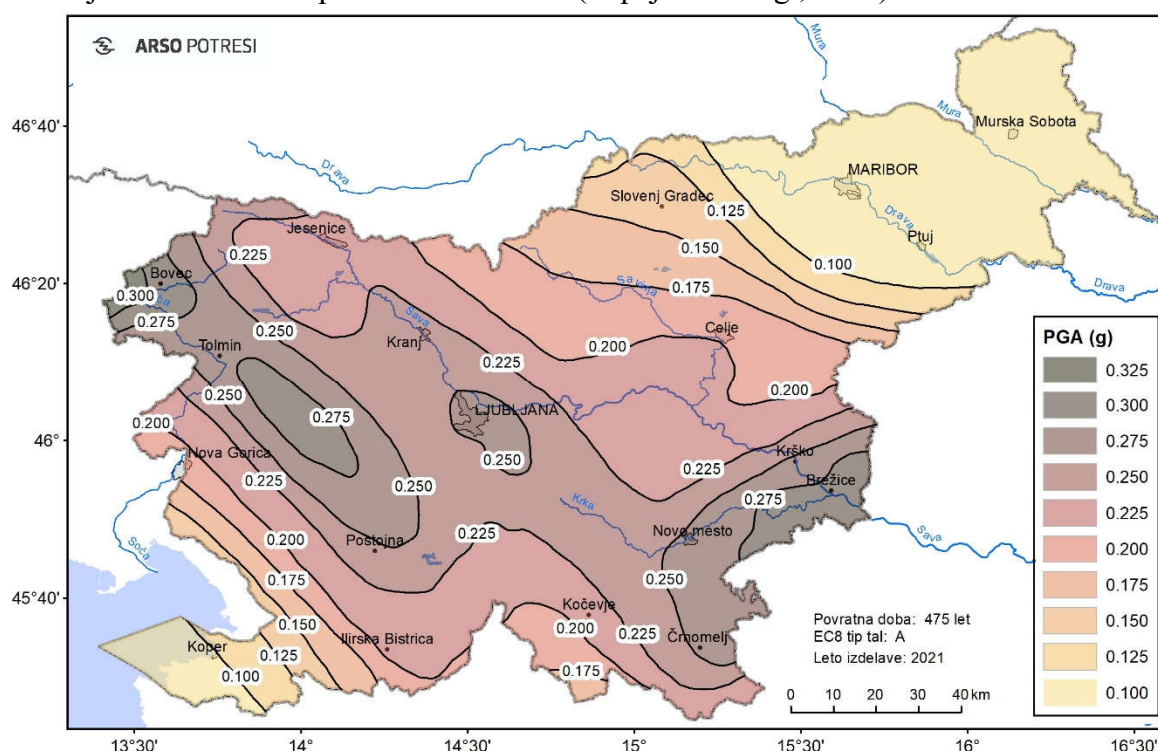
Slika 6: Logično drevo za slovenski model potresne nevarnosti ima 1377 vej; njihove uteži so podane z rdečimi vrednostmi.

Potresno nevarnost smo ocenili po standardnem Cornellovem (1968) postopku, kjer upoštevamo vse potresne izvore in integriramo po vseh možnih magnitudah in vplivnih razdaljah med potresnim izvorom in točko izračuna. Najprej izračunamo letno verjetnost prekoračitve vnaprej izbranih referenčnih vrednosti pospeška, nato pa dobljene vrednosti interpoliramo glede na izbrano povratno dobo (475 let). Za izračun verjetnosti in pospeškov smo uporabili računalniški program OpenQuake (Pagani in drugi, 2014), za glajenje pretekle seizmičnosti v točkovnem modelu potresnih izvorov pa program OHAZ (Zabukovec, 2000).

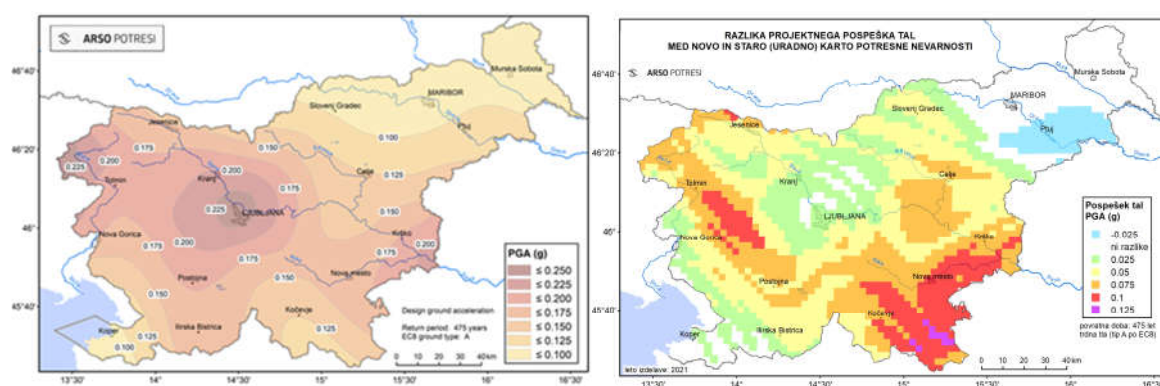
Potresno nevarnost Slovenije smo predstavili s karto vršnega pospeška tal (PGA) in z desetimi kartami spektralnih pospeškov za trdna tla (tla vrste A po EC8) in za povratno dobo 475 let. Za izbrane lokacije smo izračunali tudi krivulje potresne nevarnosti in spektre enotne potresne nevarnosti. Izračunane so povprečne (mean) in srednje (mediana) vrednosti glede na logično drevo, negotovost rezultatov pa podajamo kot (5., 16., 84. in 95.) percentilne vrednosti. V okviru tega prispevka prikazujemo le karto vršnega pospeška tal.

Nova karta potresne nevarnosti Slovenije

Najpomembnejši rezultat novega modela potresne nevarnosti Slovenije je karta vršnega pospeška tal za trdna tla (tla vrste A po EC8) za povratno dobo 475 let, ki je usklajena z zahtevami EC8 za potresno odporno projektiranje (slika 7). Izračunane povprečne vrednosti pospeška (glede na logično drevo) smo razdelili na deset razredov širine 0,025 g (od 0,1 do 0,325 g) in jih zaokrožili na zgornjo mejo razreda. Sprožili smo postopek za spremembo Nacionalnega dodatka EC8 (SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005), v katerem predlagamo zamenjavo uradne karte potresne nevarnosti (Lapajne in drugi, 2001).



Slika 7: Nova karta potresne nevarnosti Slovenije (2021): vršni pospešek tal na trdnih tleh za povratno dobo 475 let



Slika 8: Uradna karta potresne nevarnosti Slovenije (levo) in karta razlik (desno) med vrednostmi novega in sedaj veljavnega vršnega pospeška tal.

Vršni pospešek tal (slika 7) doseže največjo vrednost (0,325 g) na meji z Italijo zahodno od Bovca, kar je posledica velike potresne aktivnosti v Furlaniji. Pospešek 0,3 g zajema območje okrog Idrije, ki sovпада z najpomembnejšimi dinarskimi prelomi in z najbolj verjetno lokacijo najmočnejšega zgodovinskega potresa v Sloveniji ter SV dela Slovenije okrog Brežic, kjer se v Sloveniji zgodi največ zmernih potresov. Tako kot na stari karti potresne nevarnosti, ki je v barvah nove karte prikazana na sliki 8 (levo), je tudi na novi karti potresna nevarnost znatna v osrednjem delu Slovenije, ter v pasu od SZ do JV. Najpomembnejše razlike v postopku izračuna nove in stare karte potresne nevarnosti Slovenije so podane v preglednici 1, na sliki 8 (desno) pa je prikazana karta razlik med novimi in starimi vrednostmi. Nove vrednosti so v večini Slovenije večje, predvsem na območju Dinarskega prelomnega sistema in v JV Sloveniji, z največjim prirastkom 0,125 g v Beli Krajini. V severnem delu osrednje Slovenije (Ljubljana, Kranj, Kamnik) ter na jugozahodu Slovenije so vrednosti na obeh kartah primerljive. Le v okolici Ptuja se je vršni pospešek tal nekoliko zmanjšal.

Preglednica 1: Metodološke razlike pri izdelavi nove in stare (uradne) karte potresne nevarnosti Slovenije

	stara (uradna) karta (2001)	nova karta (2021)
Modeli potresnih izvorov	Pet različic glajenja pretekle seizmičnosti	Glajenje pretekle seizmičnosti, ploskovni izvori in prelomni izvori z ozadjem
Model pojemanja pospeškov z razdaljo	Sabetta & Pugliese (1996); podcenjen razpon pospeškov	Weatherill in drugi (2020); nov evropski model pojemanja, regionalizacija, logično drevo
Obravnava negotovosti in variabilnosti	Enolična vrednost parametrov	Modeliranje negotovosti in variabilnosti vplivnih parametrov
Tip magnitude in spodnja meja magnitude	Lokalna magnitude Ml = 3,7	Navorna magnitude Mw = 4,3 za ploskovne in točkovne izvore Mw = 5,8 za prelomne izvore
Katalog potresov	Kompletnost: 1880 za Ml 3,7 in 1690 za Ml 5,0	Kompletnost: 1875 za Mw 3,8 Razširjen in posodobljen katalog
Računalniški program	OHAZ	OpenQuake in OHAZ

Sklep

Z novim modelom potresne nevarnosti Slovenije smo omogočili izračun nove karte vršnega pospeška tal, ki je v skladu z zahtevami evropskega standarda EC8 za potresno odporno gradnjo. Z novim modelom in oceno potresne nevarnosti Slovenije omogočamo nadaljnje raziskave v procesu spreminjanja zakonodaje o potresno odporni gradnji in za pričakovano posodobitev EC8.

Prvič doslej smo v izračunu slovenske karte upoštevali aktivne prelome in prelomne potresne izvore. Ocenjevanje potresne nevarnosti z uporabo teh podatkov ne temelji več le na potresni zgodovini, temveč se v izračunu upošteva tudi možnost, da na opredeljenih prelomih, izven znanih območij pretekle seizmičnosti, nastane močnejši potres. Model potresnih izvorov tako vsebuje prelomne, ploskovne in točkovne izvore. Z logičnim drevesom smo modelirali epistemično negotovost najvplivnejših parametrov.

Katalog potresov Slovenije in bližnje okolice smo posodobili z novimi spoznanji raziskav zgodovinske seizmičnosti in razširili s potresi zadnjih 20 let.

Uporabili smo model pojemanja pospeška, ki temelji na najnovejših spoznanjih in je bil razvit za izračun nove evropske karte potresne nevarnosti, parametri pa so prilagojeni razmeram v Sloveniji.

Razvoj slovenske karte potresne nevarnosti je potekal vzporedno s projektom posodobitve evropske karte (Danciu in drugi, 2019). Skupaj s strokovnjaki evropskega projekta smo usklajevali metodologijo in vhodne podatke za ozemlje Slovenije. Zaradi različnega merila karte so vhodni parametri za model potresne nevarnosti Slovenije bolj podrobni.

Zahvala

Razvoj slovenskega modela potresne nevarnosti in izračun novih kart sta potekala sočasno s projektom nadgradnje evropskega modela potresne nevarnosti, kar je omogočilo izmenjavo in usklajevanje vhodnih podatkov ter razpravo o podrobnostih postopka z evropskimi strokovnjaki. Najlepše se zahvaljujemo Laurentiu Danciu za dolgoletno podporo pri razvoju slovenskega modela in uporabi računalniškega programa OpenQuake. Michele Carafa nam je svetoval o določitvi seizmičnega deleža premikov ob prelomih, Graeme Weatherill pa je prijazno posredoval podrobnosti o modelu pojemanja. Hvala tudi Gregorju Rajhu za izdelavo uporabnih python programov, ki so olajšali pretvorbo podatkov v standardizirano obliko.

Literatura

- Atanackov J., Jamšek Rupnik P., Jež J., Celarc B., Novak M., Milanič B., Markelj A., Bavec M., Kastelic V. (2021a). Database of Active Faults in Slovenia: Compiling a New Active Fault Database at the Junction Between the Alps, the Dinarides and the Pannonian Basin Tectonic Domains. *Front. Earth Sci.* 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.604388>
- Atanackov J., Jamšek Rupnik P., Celarc B., Jež J., Novak M., Milanič B., Markelj A. (2021b). Tolmač potresnih virov in ocenjevanje geološko določenih parametrov za karto potresne nevarnosti Slovenije. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, 139 str.
- Basili R., Kastelic V., Demircioglu MB, Garcia Moreno D, Nemser ES, Petricca P, Sboras SP, Besana-Ostman GM, Cabral J, Camelbeeck T, Caputo R, Danciu L, Domac H, Fonseca J, García-Mayordomo J, Giardini D, Glavatovic B, Gulen L, Ince Y, Pavlides S, Sesetyan K, Tarabusi G, Tiberti MM, Utkucu M, Valensise G, Vanneste K, Vilanova S, Wössner J (2013). The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>. <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF>
- CEN (2021). Eurocode 8: Earthquake resistance design of structures, EN1998-1-1_version_01-10-2021, Working draft
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583-1606.
- Danciu L., Hiemer S.; Nandan S., Weatherill G., Lammers S., Rovida A., Antonucci A., Basili R., Carafa M.M.C., Kastelic V., Maesano F., Tiberti M., Sesetyan K., Vilanova S., Beauval C., Bard P.-Y., Cotton F., Wiemer S., Giardini D. (2019). Status, Milestones and Next Activities on the

- Development of the 2020 European Seismic Hazard Model (ESHM20), (2019), Geophys Res Abstr, Vol. 21, p1-1. 1p.
- DISS Working Group (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; <http://diss.rm.ingv.it/diss/> (30. 11. 2021). <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1>
- Douglas J. (2018.) Calibrating the backbone approach for the development of earthquake ground motion models. Paper presented at Best Practice in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations: Issues and Challenges Towards Full Seismic Risk Analysis, Cadarache, France
- Douglas J. (2021). Ground motion prediction equations 1964-2020, Department of Civil and Environmental Engineering University of Strathclyde, <http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.html>. (30. 11. 2021)
- Kotha, S.R., Weatherill, G., Bindi, D. (2020). A regionally-adaptable ground-motion model for shallow crustal earthquakes in Europe. *Bull Earthquake Eng.* <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00869-1>
- Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. (2001). Nova karta potresne nevarnosti – projektni pospešek tal namesto intenzitete. *Gradbeni vestnik* 50, 140-149.
- Lapajne, J.K., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. (2003). PSHA methodology for distributed seismicity, BSSA, Vol. 93, No. 6, str. 2502-2515.
- Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, Henshaw P, Butler L, Nastasi M, Panzeri L, Simionato M, Vigano D (2014) OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismol Res Lett* 85:692-702. <https://doi.org/10.1785/0220130087>
- Reiter, L. (1990). Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights. Columbia University Press.
- Sabetta, F., Pugliese, A. (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 337-352.
- SIST EN 1998-1:2005 - Evrokod 8 - Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, slovenski standard, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, angl. standard, I.
- SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005 - Evrokod 8 - Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe - Nacionalni dodatek, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005.
- Weatherill, G., Kotha, S.R., Cotton, F. (2020). A regionally-adaptable “scaled backbone” ground motion logic tree for shallow seismicity in Europe: application to the 2020 European seismic hazard model. *Bull Earthquake Eng* 18, 5087–5117, <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00899-9>
- Zabukovec B. (2000). OHAZ – A computer program for spatially smoothed seismicity approach. V (J. K. Lapajne, ur.): Seismicity modeling in seismic hazard mapping, Workshop proceedings, Ministry of the Environment and Spatial Planning, Geophysical Survey of Slovenia, Ljubljana, Slovenia, 135-140.
- Živčič, M., Cecić, I., Čarman, M., Jesenko, T., Ložar Stopar, M., Pahor, J. (2018). Earthquake catalogue KPN2018 of Slovenia and surrounding, rev. 3, Slovenian Environment Agency (ARSO), Seismology and geology office, Ljubljana

Ohranjenost državnih trigonometričnih mrež na območjih Menišije in Žužemberka

Mihaela Triglav Čekada^{***}, Rok Maver^{***}, Dušan Kogoj^{**}

Povzetek

Predstavljamo raziskavo ohranjenosti geodetskih znamenj v državnih trigonometričnih mrežah. Preučili smo stanje na gozdnatem območju Menišije in na območju Žužemberka, ki smo ga razdelili na gozdni in ruralni del. Na območju Menišije smo preverili 27 lokacij trigonometričnih točk, na območju Žužemberka pa 92. Preverili smo delež ohranjenosti trigonometričnih točk II., III. in IV. reda ter fotogrametrične oslonilne točke (VIII. red). Ugotovili smo, da je delež ohranjenosti trigonometričnih znamenj 78 % za območje Menišije in 71 % na gozdnatem delu območja Žužemberk, na ruralnem delu območja Žužemberka pa je delež nižji, t.j. 46 %.

Ključne besede: trigonometrične mreže, trigonometrične točke, trigonometrična znamenja, Menišija, Žužemberk

Key words: national trigonometric networks, trigonometric point, trigonometric mark, Menišija, Žužemberk

Uvod

Geodetske mreže predstavljajo osnovo za izvedbo geodetskih izmer. Omogočile so materializacijo koordinatnih sistemov, kot osnovo za izmero namenjeno različnim grafičnim prikazom prostora, osnovo zemljiškokatastrskim izmeram ali pa različnim posegom v prostor (zakoličbe) (Triglav, 2014, 2015a, 2015b; Delčev in sod., 2014; Jenko, 1996). Danes koordinatni sistemi, ki so bili vzpostavljeni na osnovi položajnih in višinskih državnih mrež, omogočajo razrast različnih novih geoinformacijskih izdelkov v vse pore našega življenja.

Če se omejimo le na državne trigonometrične in poligonske mreže iz klasičnega obdobja geodetske izmere, so bile točke teh mrež največkrat stabilizirane z betonskimi stebri, granitnimi ali kamnitimi geodetskimi znamenji vrhnje dimenzije največ 20 cm × 20 cm ter cerkvenimi zvoniki (podrobneje v Triglav Čekada in Jenko, 2020; Triglav Čekada in sod., 2021). Z geodetskimi znamenji materializirane trigonometrične in poligonske točke so pri nas pričele izgubljati svoj praktični pomen za vklop izmer v državni koordinatni sistem z uradno uveljavitvijo GNSS-izmere v prakso leta 2006 ter hkratno uveljavitvijo novega koordinatnega sistema D96/TM (ZEN, 2006; Berk in sod. 2004). Kasneje so na območnih Geodetskih upravah Republike Slovenije prenehali z rednim nadzorom stanja trigonometričnih in poligonskih točk na terenu ter s sanacijo uničenih točk. Ohranili so le skrb za vzdrževanje trigonometrične mreže I. reda.

Zdi se, da je bila odločitev za taka ravnanja preuranjena. Poleg tega, da nam točke tudi ob uporabi tehnologije GNSS koristno služijo za državno izmero, geodetska znamenja trigonometričnih mrež II. do IV. reda lahko uporabimo tudi za druge geodetske namene, kot je na primer spremljanje geodinamike. Vedenje o tem, koliko geodetskih znamenj je trenutno na terenu še ohranjenih in zato na razpologo je zato še kako aktualno. Nenazadnje so nekatera geodetska znamenja označena z zelo starimi tipi stabilizacij, najstarejša sodijo še v čas

* Geodetski inštitut Slovenije, Jamova c. 2, 1000 Ljubljana

** Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, 1000 Ljubljana

*** Velike Rebrce 1, 1303 Zagradec

Avstro-Ogrskega cesarstva, ta pa hkrati predstavljajo tudi pomembno kulturno dediščino, ki jo lahko uporabimo za promocijo geodezije (Lisec in sod., 2020; Triglav Čekada in sod., 2021; Triglav, 2018; Mlakar, 1993a, 1993b).

Vrste trigonometričnih geodetskih znamenj skozi čas

Trigonometrične mreže delimo na redove, ki so opredeljeni glede na medsebojno oddaljenost in zahtevano položajno natančnost (Peterca in Čolović, 1987). Osnovo predstavlja mreža I. reda. Oddaljenost med točkami je 20 do 40 km, relativna natančnost koordinat je najvišja, zato so v tej mreži pogosto menjali geodetska znamenja, da so zadostili novejšim potrebam po natančnosti. Zadnja zamenjava znamenj mreže I. reda se je v Sloveniji izvedla okoli leta 1963 (Delčev in sod., 2014; Triglav Čekada in Jenko, 2020). Na trigonometričnih mrežah II. do IV. reda so se znamenja ponekod ohranila še iz preteklosti. Oddaljenosti med točkami so v mreži II. reda od 25 do 15 km, v mreži III. reda 13 do 5 km in v mreži IV. reda 4 do 1 km (Peterca in Čolović, 1987). V digitalni bazi geodetskih točk horizontalnih državnih mrež Geodetske uprave Republike Slovenije najdemo še točke nižjih redov, od poligonskih in navezovalnih točk (t.i. V. in VI. red), ki so na določenih delih še zgostila trigonometrično mrežo ter oslonilnih točk za potrebe prvih fotogrametričnih izmer (t.i. VIII. red).

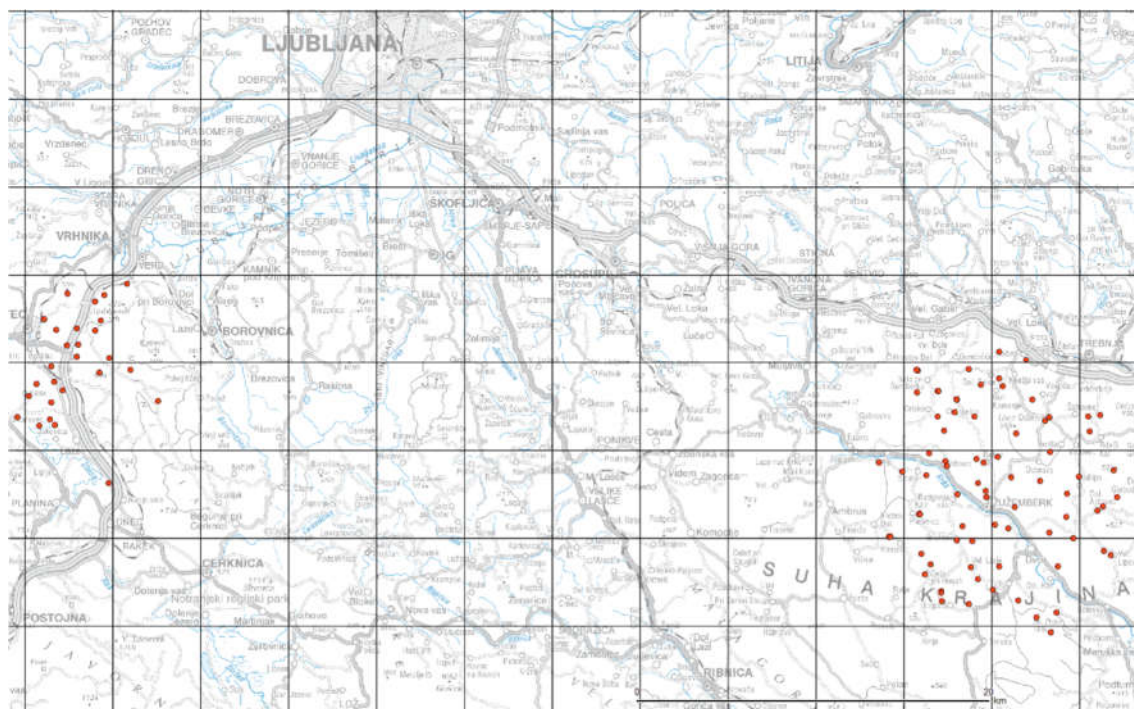


Slika 1: Tipični primeri geodetskih znamenj: a) Hrib pri Malem Lipovcu, trig. točka 357. IV. red, trig. okraj 15, najverjetneje še avtro-ogrska stabilizacija (foto: R. Maver, 2021), b) Smrečni rob, 463. IV. red, trig. okraj 16, stabilizacija GIJNA iz obdobja po II. svetovni vojni (foto: M. Triglav Čekada, 2021), c) Čelo, 48. IV. red, trig. okraj 16, stabilizacija GZS iz obdobja po II. svetovni vojni (foto: M. Triglav Čekada, 2021), d) Jarčev hrib 356. IV. red, trig. okraj 15, iz novejšega obdobja (foto: R. Maver, 2021).

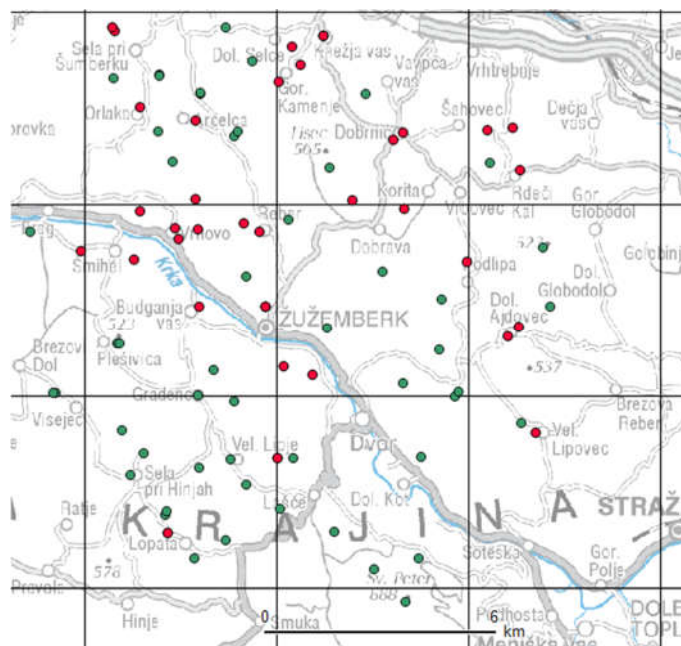
Večino postavitev novih geodetskih znamenj ob vzpostavitvi trigonometričnih mrež II. do IV. reda po drugi svetovni vojni so v Sloveniji izvedle različne institucije do konca leta 1967, II. red že do leta 1952 ([Črnivec in Golorej, 1974](#)). Kasneje pa so mreže zgostili s poligonskimi in navezovalnimi točkami, ter obnavljali oz. na novo postavljali uničena znamenja. Geodetska znamenja so po drugi svetovni vojni večinoma postavljali geodeti Geodetskega zavoda Slovenije (GZS) in Geografskega inštituta Jugoslovanske narodne armade iz Beograda (GIJNA) v sorazmerno enakih deležih, v veliko manjših pa še druge ustanove iz Zagreba in Beograda. Trigonometrična znamenja so izdelana iz različnih granitov. Na gornji ploskvi imajo različno dolge diagonalne križe. Po križih lahko razberemo, kdo jih je postavil ([Triglav Čekada in Jenko, 2020](#)). Novejša znamenja prepoznamo po tem, da so izdelana iz bolj drobnozrnatega granita. Znamenja iz medvojnega obdobja in starejša pa so večinoma izdelana iz klesanih naravnih kamnov, ki imajo občasno na vrhu vklesan pravokoten križ (slika 1a).

Testni območji in metoda dela

Na terenu smo pregledali vse trigonometrične točke na cca. 50 km² (2×5² km²) velikem območju, ki pokriva del gozdov imenovanih Menišija ter cca. 175 km² (7×5² km²) velikem območju okoli mesta Žužemberk (slika 2). Pregledali smo točke mrež II. do IV. reda in VIII. reda. Menišijo lahko obravnavamo kot strogo neposeljeno gozdnato območje, na območju Žužemberka pa smo preverjene trigonometrične točke razdelili na dva dela: gozdnata in ruralna območja (okolica pozidanih območij, travniki in njive) (slika 3). Skupno smo na območju Menišije na terenu preverili 27 točk, na območju Žužemberka pa 92 točk. Območje Menišije sodi v trig. okraja 10 – Ljubljana in 16 – Postojna, območje Žužemberka pa večinoma v trig. okraj 15 – Novo Mesto.



Slika 2: Testni območji Menišije (levo) in Žužemberka (desno) z na terenu pregledanimi trigonometričnimi točkami (vir podatkov: GURS).



Slika 3: Delitev pregledanih trigonometričnih točk iz testnega območja Žužemberk na točke, ki se nahajajo na gozdnatih (zelene pike) in ruralnih območjih (rdeče pike).

Na območju Menišije smo večinoma trigonometrične točke, ki jih nismo našli ob prvem pregledu na terenu, naknadno poskusili poiskati še z izmero GNSS z uporabo metode RTK. Na območju Žužemberka pa smo si z izmero GNSS pomagali že ob prvem terenskem pregledu.

Rezultati

Na območju Menišije so vse pregledane točke označene z različnimi granitnimi znamenji, ki so bila postavljena po drugi svetovni vojni. Ena je označena z žebličkom (slika 4b) in ena z betonskim ostankom na naravni skali. Na tem območju ni cerkva ali spomenikov. Delež najdenih točk je za to območje kar 78 %. Razlog je v tem, da je območje varno pred človekovim vplivom. Omeniti moramo še, da sta med 5 lokacijami, kjer nismo našli geodetskega znamenja, dve taki, ki sta popolnoma preraščeni z grmovjem in se morebiti znamenji tam še vedno nahajata. Štiri najdene točke brez uporabe GNSS ne bi našli. To pomeni, da smo brez uporabe GNSS na tem gozdnatem območju našli kar 80 % najdenih geodetskih znamenj. Glavni razlog je, da ima večina granitnih kamnov tu, v gozdu, gornjo ploskev od 10 cm do 20 cm nad nivojem tal, na Raskovcu pa najdemo tudi znamenje, pri katerem je kar 44 cm znamenja nad nivojem tal (slika 4a).

Preglednica 1: Vrste pregledanih trigonometrične točke.

Območje	Različna granitna znamenja	Označba v skali	Cerkve in spomeniki	Ni več označbe	Skupaj
Menišija	19	2	0	5	27
Žužemberk	46	1	13	32	92



Slika 4: Dva zanimiva primera geodetskih znamenj iz območja Menišije: a) Raskovec, 241. III. red, trig. okraj 10, b) Lom, 54. IV. red, trig. okraj 16 – na sredini skale kjer smo jo očistili mahu se nahaja železni žebliček (foto: M. Triglav Čekada, 2021).

Na območju Žužemberka smo našli skupno 65 % točk, če seštejemo različna granitna znamenja, označbe v skalah ter tudi cerkve in spomenike. Razdelimo jih na točke v gozdu in točke na ruralnih območjih (slika 3). Pri tej delitvi cerkev in spomenikov ne bomo upoštevali. Tako smo na gozdnatem območju Žužemberka našli 71 % geodetskih znamenj, v ruralnem pa le 46 %. Skupno je bilo med najdenimi geodetskimi znamenji na celotnem območju Žužemberka 62 % takih, ki jih lahko hitro opazimo na terenu, predvsem takih, ker je gornja ploskev vsaj 10 cm nad nivojem tal. Večina takih se nahaja na gozdnatih območjih. Na ruralnih območjih, t.j. tudi na njivah in travnikih, pa so geodetska znamenja povečini stabilizirali tako, da je gornja ploskev poravnana s terenom. Take točke smo našli povečini s pomočjo izmere GNSS.

Preglednica 2: Status najdenih geodetskih znamenj, brez cerkev in spomenikov, glede na delitev terena na gozdnega ali ruralnega.

Območje	Najdeno	Ni več označbe	Skupaj
Menišija - gozdno	21	5	27
Žužemberk - gozdno	30	12	42
Žužemberk - ruralno	17	20	37

Preglednica 3: Razmerje najdenih znamenj glede na vse točke iz določenega reda. Nomenklatura zapisa: najdene (vse v tem redu).

Območje	II.	III.	IV.	VIII.
Menišija	/ (/)	1 (2)	20 (24)	0 (1)
Žužemberk	2 (3)	12 (14)	43 (61)	3 (14)

V preglednici 3 delimo obravnavane trigonometrične točke po redovih ločeno glede na Menišijo in Žužemberk. V Menišiji zaradi premajhnega vzorca točk v posameznem redu med sabo ne moremo primerjati po redovih. V Žužemberku lahko primerjamo med sabo le III. in IV. red, kjer vidimo, da je delež najdenih v III. redu 85 %, v IV. pa 70 %. Za točke v

mreži IV. reda je delež najdenih točk za obe območji podobno primerljiv, v Žužemberku je to 70 % in Menišiji pa 83 %.

Zanimiv je VIII. red oz. oslonilne točke za fotogrametrično izmero, kjer smo na območju Žužemberka našli le 20 % geodetskih znamenj. Ta znamenja so bila stabilizirana z manjšimi betonskimi kvadri z dimenzijo gornje ploskve 10×10 cm in z luknjico na sredini (slika 5d). Glede na bazo trigonometričnih točk GURS so bila ta znamenja stabilizirana med leti 1977 in 1981. Večina se jih je nahajala na bolj ruralnih delih, to pa je glavni razlog, da smo našli sorazmerno malo ohranjenih.

Med najdenimi trigonometričnimi znamenji, brez cerkev in spomenikov, lahko ocenimo še koliko lokacij bi bilo primernih za izmero GNSS (preglednica 4). Optimalne lokacije za tako izmero so območja brez ovir – brez iglastega drevja in drugih motečih grajenih struktur. Dodali smo še skupino točk, pri katerih je izmera GNSS potencialno možna. Na lokacijah teh točk se nahaja samo redko listnato drevje, kjer je izmera vsaj pozimi mogoča, tudi brez tega, da predhodno opravijo gozdarji posek drevja. Na območju Menišije je takih potencialno možnih lokacij kar 38 %. To območje je bilo močno poškodovano v žledolomu leta 2014 in si do danes še ni opomoglo. Na območju Žužemberka je takih možnih lokacij 13 %. Ker gre na območju Žužemberka za preplet gozdnih in ruralnih območji je tudi delež lokacij, kjer bi bila izmera GNSS mogoča višji, t.j. 36 %, medtem ko je v Menišiji takih le slabih 10 %. Če se seštejemo na obeh območjih lokacije, kjer bi bila izmera GNSS mogoča in potencialno mogoča, dobimo enak delež 48 %.

Preglednica 4: Status najdenih najdenih geodetskih znamenj, brez cerkev in spomenikov, glede na možnost ponovne izmere z GNSS.

Območje	Možna GNSS-izmera	Potencialno možna GNSS-izmera	Ni možna GNSS-izmera	Skupaj
Menišija	2	8	11	21
Žužemberk	17	6	24	47

Na koncu pa lahko izpostavimo še nekaj zanimivih trigonometričnih znamenj, ki smo jih našli pri svojem terenskem delu na območju Žužemberka. Najstarejši najdeni znamenji, ki izvirata verjetno še iz avstro-ogrske, sta na Hribu pri Malem Lipovcu (357. IV. red, trig. okraj 15) ter na Sveti Katarini (384. II. red) (sliki 1a in 5c). Obe sta iz klesanega kamna in imata na vrhu pravokotno postavljen križ. Zanimivi novejši znamenji iz povojnega obdobja, kjer je hkrati zabeležena še letnica njihove stabilizacij (zapisana v beton), sta na Liscu (50. III. red, trig. okraj 15) in Ostrem vrhu (56. III., trig. okraj 15) (sliki 5a in 5b). Na Liscu je zabeleženo še katera inštitucija je znamenje postavila: Geodetski zavod Slovenije (GZS).



Slika 5: Nekaj zanimivih primerov geodetskih znamenj iz območja Žužemberka: a) Lisec, 50. III. red, trig. okraj 15, b) Ostri vrh, 56. III., trig. okraj 15, c) Sveta Katarina, 384, II. red – klesan kamen s pravokotnim križem (20 cm × 25 cm) in d) Kamniti dol, 207. VIII., trig. okraj 15 – betonsko znamenje z luknjico na vrhu (10 cm × 10 cm) (foto: R. Maver, 2021).

Sklep

Po 15 letih odkar je izmera GNSS postala uveljavljena metoda geodetske izmere, smo na dveh izbranih območjih preverili, koliko trigonometričnih znamenj iz obdobja klasične geodetske izmere je na terenu še vedno ohranjenih. Na gozdnatih območjih, kjer ne pričakujemo večjih sprememb v prostoru, smo našli še več kot 70 % originalnih trigonometričnih znamenj, ki so bila večinoma vsa stabilizirana pod drugi svetovni vojni in vse do leta 1967 (78 % za Menišijo in 71 % za gozdnati del okolice Žužemberka). Na ruralnem območju Žužemberka, kjer so spremembe v prostoru stalnica, pa smo jih našli le 46 %.

Ker smo v analizi obravnavali območji, ki sta dokaj hriboviti, bo za celostno oceno, koliko trigonometričnih znamenj se je v Sloveniji še ohranilo, potrebno podobne analize narediti še drugod po Sloveniji. Taki pregledi pa poleg geodetskega namena, da ugotovimo, katere trigonometrične točke so še uporabne za izmero, postrežejo še z identifikacijo starejših tipov

geodetskih znamenj, t.j. takih še iz obdobja avstro-ogrske, ki nenazadnje predstavljajo pomembno dediščino rodov geodetov, ki so na našem območju delali v preteklosti.

Zahvala

Delo je delno nastalo v okviru ciljnega raziskovalnega projekta V2-1924, ki sta ga sofinancirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Geodetska uprava Republike Slovenija ter delno v okviru raziskovalnega programa P2-0227, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

- Delčev, S., Timar, G., Kuhar, M. 2014. O nastanku koordinatnega sistema D48. *Geodetski vestnik*, 58 (4), 681 – 694.
- Črnivec, M., Golorej, I. 1974. Temeljne geodetske mreže v SR Sloveniji – stanje in ukrepi za izboljšavo.
- Jenko, M. 1987. Razvojna pot in aktualni problemi naših temeljnih geodetskih mrež. *Geodetski vestnik*, 31 (4), 315 – 319.
- Jenko, M. 1996. Razvoj triangulacije skozi stoletja – s posebnim poudarkom na Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 40 (1), 43 – 46.
- Lisec, A., Dajnko, J., Flogie Dolinar, E., Čeh, M. (2020). Mreža meja in mejnikov: nominacija za Unescovo svetovno dediščino. *Geodetski vestnik*, 64:3, 403–415.
- Maver, R. (2021). Pregled točk državnih trigonometričnih mrež na območju Žužemberka. Diplomsko naloga. UL FGG.
- Mlakar, G. (1993a). Geodezija in planinstvo – 1, *Planinski vestnik*, XCIII (10), 437–440.
- Mlakar, G. (1993b). Geodezija in planinstvo – 2, *Planinski vestnik*, XCIII (11), 486–489.
- Peterca, M., Čolović, G. 1987. *Geodetska služba JNA*. Beograd. Vojnoizdavački i novinarski center.
- Triglav Čekada, M., Jenko, M. (2020). Načini stabilizacije trigonometričnih točk skozi čas v Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 64:4, 469–488.
- Triglav Čekada, M., Oven, K., Radovan, D., Stopar, B., Koler, B., Kogoj, D., Kuhar, M., Lisec, A., Sterle, O., Režek, J. (2021). Stalna geodetska znamenja kot temelj za delovanje geodetske stroke. *Geodetski vestnik*, 65:2, 299–310.
- Triglav, J. (2014). Zgodovina topografskih izmer Habsburške monarhije (1. del). *Življenje in tehnika*, 65:12, 48–57.
- Triglav, J. (2015a). Zgodovina topografskih izmer Habsburške monarhije (2. del). *Življenje in tehnika*, 66:1, 42–50.
- Triglav, J. (2015b). Zgodovina topografskih izmer Habsburške monarhije (1. del). *Življenje in tehnika*, 66:2, 62–72.
- Triglav, J. (2018). 5. julij 1822 – Prva geodetska ekipa na vrhu Triglava. *Geodetski vestnik*, 62 (1), 120–126.
- Zakon o evidentiranju nepremičnin (ZEN). Uradni list RS, št. 47/2006.

Magnetna polja in kresnice

Rudi Čop¹

Povzetek

V članku sta obravnavana dva naravna vira magnetnega polja in pojav rojev kresnic. Naravna vira magnetnega polja sta magnetit kot naravni permanentni magnet in planet Zemlja, ki ustvarja svoje geomagnetno polje. Prvi je kot kamen s posebnimi lastnostmi poznan že zelo dolgo, po pisnih virih od antike dalje. Odkritje geomagnetnega polja pa je vezano na iznajdbo kompasa, ki se v Evropi uporablja kot navigacijski instrument od 13. stoletja dalje. V Slovenski Istri posamezniki vedo kdaj se pojavijo roji kresnic. Ni pa znano, da bi to vedenje obstajalo tudi v bližnji ali daljni okolici, zato je prav Slovenska Istra kraj, kjer so domačini zaznali, da se roji kresnic pojavljajo v poletnih nočeh okoli solsticija in to v času geomagnetnih neviht.

Ključne besede: naravna magnetna, geomagnetne nevihte, kresnice

Keywords: natural magnets, geomagnetic storms, fireflies

Naravna magnetna

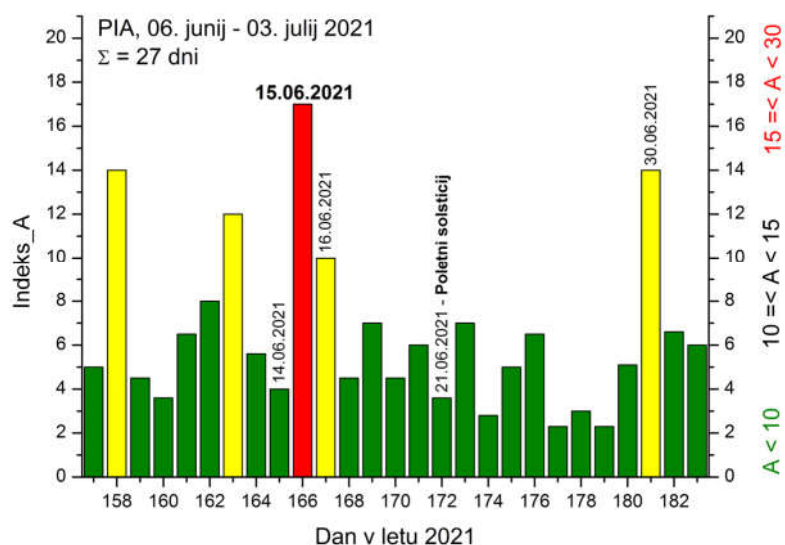
Mineralni magnetit (angl. magnetite) se nahaja v različnih geoloških formacijah: od predornin, sedimentnih kamenin pa vse do metamorfnih kamenin. Magnetit (Fe_3O_4) kot rudnina spada med najbogatejše železove rude. Je tudi najpogostejša feromagnetna snov naravnega izvora, pomembna za paleomagnetne raziskave s katerimi se sledi razvoju tektonskih plošč skozi zgodovino Zemlje (Butler, 1992; Lanza & Meloni, 2006). Nanodelci magnetita v obliki čistih kristalov se v številnih živih organizmih, ki jim med drugim omogočajo tudi orientacijo in navigacijo v prostoru (Fuller & Dobson, 2007; Kirschvink et al. 2001). Poznane so bakterije, ki se v prostoru orientirajo s pomočjo lokalnega magnetnega polja. Te bakterije so bile odkrite šele v drugi polovici prejšnjega stoletja (Bellini, 1963; Blakemore, 1982). V njihovih celicah so nanokristali feromagnetnih spojin, najpogosteje iz magnetita (biogeni magnetiti), ki so oviti z lipidno dvoslojno membrano (Alphandéry, 2014). Delujejo kot miniaturni kompasi in omogočajo bakterijam, da v vodnem stolpcu plavajo zelo točno usmerjeno.

Magnetit je lahko tudi naravni permanentni magnet (angl. lodestone), ki so ga poznali že v Antični Grčiji in v Rimskem imperiju (Emerson, 2014). Magnetno polje, ki ga tak naravni magnet ustvarja je sicer relativno šibko, vendar se težje demagnetizira. Zemljino magnetno polje mineralni magnetit ne more trajno namagnetiti. Namagnetijo ga močna magnetna polja, ki se ustvarijo ob udarih strel (Wasilewski & Kletetschka, 1999; Salminen et al, 2013). Eden izmed argumentov za tako razlago je tudi, da so naravni magneti večinoma najdeni na površju ali blizu površja nahajališč te bogate železove rude.

Magnetni kompas spada med največje iznajdbe stare Kitajske. V 2. stoletju pred našim štetjem, v začetku dinastije Han, so ga izdelali iz naravnega magnetna (Thirty, 2020). Najstarejši zapisi o uporabi kompasa v navigaciji v islamskem svetu so iz konca 12. stoletja (Schmidl, 1997–98) in v Evropi iz začetka 13. Stoletja (The letter, 1904). Kot instrument za določevanje smeri v prostoru je bil njihov bistveni sestavni del jeklena igla, ki se je prosto gibala v vodoravni ravnini. Usmerja jo magnetno polje Zemlje, remanenčni

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovelje; Email: rudi@artal.si

ali preostali magnetizem kompasne igle pa so navigatorji osveževali s pomočjo koščka naravnega magneta. Dosežena merilna občutljivost takega kompasa je bila slabša od $1 \mu\text{T} = 1000 \text{ nT} = 10^{-6} \text{ T}$.



Slika 1 – Geomagnetni indeks A izračunan na osnovi meritev spremembe lokalnega magnetnega polja na geomagnetnem observatoriju PIA od 16. junija do 3. julija 2021 v enem efektivnem obratu Sonca v začetku 25. solarnega cikla.

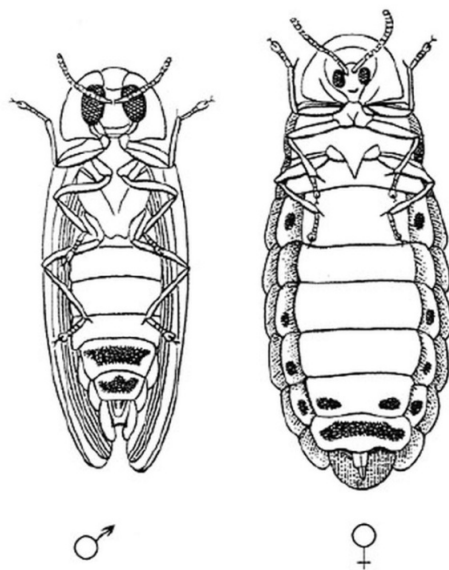
Preko 99% geomagnetnega polja ustvari sam planet Zemlja (Campbell, 2012). Prvi pomembnejši raziskovalec zemeljskega magnetizma iz začetka revolucije znanosti v 17. stoletju je bil William Gilbert (1514-1603). Na osnovi meritev na modelu je zaključil, da je Zemlja sama za sebe en velik magnet in da se zaradi tega spreminja njena magnetna deklinacija in inklinacija (Malin & Barraclough, 2011). Leta 1806 je Alexander von Humboldt (1769–1859) odkril pojav geomagnetnih neviht (Lakhina & Tsurutani, 2016). Da se njihova pogostnost spreminja v skladu s cikli sončnih peg (Maunder, 1904) je 1851 objavil Edvard Sabine (1788-1883) (Sabine, 1852). Proučevanje geomagnetnega polja se je tako razširilo na prostor med središčem Sonca in središčem Zemlje.

Spremembe lokalnega magnetnega polja

Nekatera živa bitja magnetno polje Zemlje uporabljajo za orientacijo v prostoru. Raziskano je predvsem obnašanje lososov, postrvi, čebel, taščic in domačih golobov ob spremembi lokalnega magnetnega polja (Fuller & Dobson, 2007). Najbolj je raziskano obnašanje ptičev, pri čemer pa so zelo slabo poznani nevrološki in psihološki procesi pri zaznavanju signalov iz ustreznih čutil. Domači golobi in ptice selivke uporabljajo dvojne vrste čutil za zaznavanje spremembe lokalnega magnetnega polja. Ta čutila izkoriščajo magnetne nano delce, ki se nahajajo v zgornji polovici kljuna. V njihovih očeh pa se odvija mehanizem para prostih radikalov, ki v mrežnici, pod vplivom lokalnega magnetnega polja, ustvarja značilen vidni vzorec. Magnetno polje ptice selivke uporabljajo tako za orientacijo v prostoru kot tudi za ugotavljanje pozicije na osnovi zaznavanja kota magnetne inklinacije (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

V času geomagnetne nevihte živalski svet obmiruje. To se dobro opazi poleti, ko ni mogoče zaznati običajnega utripa poletnih noči. V nekaterih predelih Slovenije takim

nočem pravijo tihe ali tudi gluhe noči. Ta zaznaven vpliv na biosfero je sicer vezan na pojav geomagnetne nevihte, vendar pa ne na stopnjo njene jakosti. Živa bitja namreč zaznajo spremembo v lokalnem magnetnem polju preko resonančne absorpcije in so zato za njih odločujoči impulzi v geomagnetnem polju. V času trajanja geomagnetne nevihte tudi ne vzletavajo netopirji iz svojih dnevnih skrivališč. Netopirji so plenilci nočnih letečih žuželk, ki svoj plen odkrivajo s pomočjo ultrazvoka. Njihovi možgani vsebujejo nanodelce magnetita, ki bi jim lahko služili kot senzorji za orientacijo v prostoru po lokalnem magnetnem polju. Dokazan je njihov odziv na spremembo smeri in inklinacije magnetnega polja ter da povečan šum v njem pomembno vpliva na njihovo obnašanje (Wang et al, 2007; Tian et al, 2010).



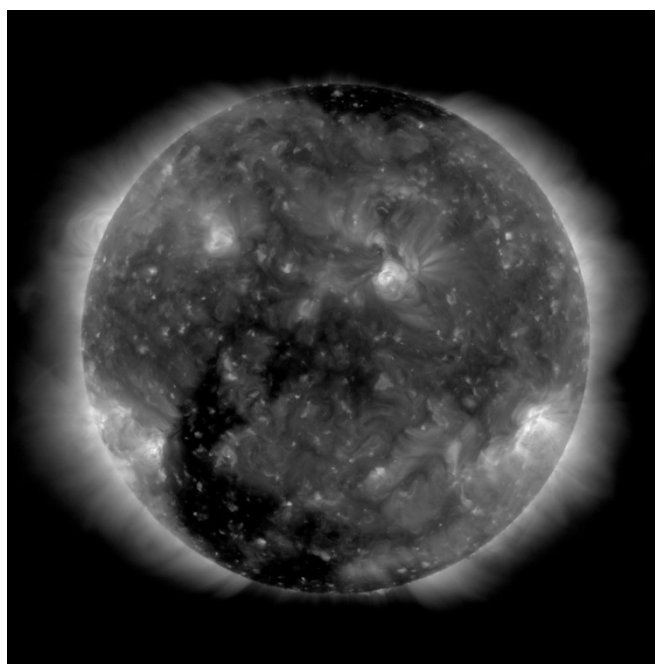
Slika 2 – Svetilni organ male kresnice (*Lamprohiza splendidula*) so v risbi poudarjeni kot temna področja na spodnji strani zadka. Krilati samček je velik 8–10 mm, večja samica brez kril pa 9–11 mm (De Cock, 2009).

Med domačini v Slovenski Istri obstaja ljudsko izročilo, da se kresnice (kresničke, kresničice; kresance, posvečkari, buskalce, božji črveki) pojavijo tisto poletno noč, ko ptiči ne pojejo. Čez dan pa se ptiči ne oglašajo v času geomagnetnih neviht. V dveh zaporednih nočeh 15. in 16. junija 2021 (Slika 1) je geomagnetna nevihta na planetarni ravni dosegla stopnjo G1 (minor). Tudi neodvisni očividci so potrdili, da so se prav v teh dveh nočeh pojavili roji kresnic. V nočeh pred kot tudi pozneje pa kresnice niso rojile. V Istri ponoči v rojih letajo in svetijo samčki male kresnice (*Lamprohiza splendidula*) (Slika 2). Belkaste samice so brez kril, imajo tudi svetilne organe in so podobne ličinkam (angl. larva). Hladno svetlobo hrošči iz družine kresnic (*Lampyridae*) (angl. fireflies, lightning bugs, glowworms) proizvajajo na osnovi bioluminiscence, ki ima 90% svetlobni izkoristek. S svojo svetlobo in načinom utripanja privabljajo hrošče iste vrste v času parjenja. Še isti dan poginejo samci, naslednji dan, po odložitvi jajčec v gozdna tla, pa tudi samice (De Cock, 2009). Kjer so vlažna in apnenčasta tla pa v Slovenski Istri živi tudi italijanska kresnica (*Luciola italica*). Tudi samčki te vrste, ki so malo bolj drobni kot pa samčki male kresnice, ob paritvi letajo in svetijo s svojimi svetilnimi organi na spodnji strani zadka. Kot vse kresnice tudi njih iztreblja intenzivni način kmetovanja in ulične svetilke, ki ob paritvi preprečujejo zблиžanje hroščev obeh spolov. Odrasle kresnice, ki živijo v Sloveniji, se hranijo z nektarjem in pelodom, njihove ličinke pa s črvi in polži (Bissanti, 2019).

V prvem desetletju tega stoletja so na Japonskem izpeljali vrsto poizkusov o vplivu močnih magnetnih polj na način svetjenja kresnic (Iwasaka & Ueno, 1998; Barua et al, 2012). Ugotovili so, da se pod vplivom magnetnega polja gostote $B = 14 \text{ T}$ bioluminiscenčni spekter svetlobe pri živih kresnicah premakne proti rdeči svetlobi za okoli 10 nm in da upade njihova svetlost (angl. luminous intensity). Dodatne meritve na biološkem sevalcu hladne svetlobe (oxyluciferin) in vitro z dodatkom ustreznega encima (luciferase) tudi pri magnetnih impulzih gostote $\sim 53 \text{ T}$ in času trajanja $\sim 40 \text{ ms}$ ne spremeni valovne dolžine njegovega sevanja kot tudi ne njegove svetlosti (Zhou et al, 2015). Razlog za spremembo načina sevanja bioluminiscenčne svetlobe pri živih kresnicah je potrebno iskati v reakciji kresnic na spremembo v velikosti prostora in magnetnega polja v njihovi neposredni okolici. To lastnost živih bitij, da eden na drugega vplivajo, se prilagajajo na spremembe in težijo k ravnovesju je potrebno upoštevati pri načrtovanju nadaljnjih raziskav in pri razlagi dobljenih rezultatov.

Poletni solsticij

Za predstavitev sprememb v lokalnem magnetnem polju okoli poletnega solsticija so bili izbrani že predhodno obravnavani trije zaporedni dnevi od 14. do 16. junija 2021 (Slika 1). Spremembe so bile izmerjene na geomagnetnem observatoriju z mednarodno kodo PIA (Piran, Slovenia). Obdobje se je začelo z geomagnetno mirnim dnem (angl. solar quiet) in se nadaljevalo z dvema geomagnetno nestabilnima dnevoma (angl. unsettled).



Slika 3 – Posnetek Sonca iz satelita SDO (Solar Dynamics Observatory) v ultravijolični svetlobi valovne dolžine 193 Angstromov ($1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$) posneto dne 6. junija 2021 ob 02:16 z instrumentom AIA (Atmospheric, 2021).

Za opis spremembe magnetnega polja Zemlje v posameznem dnevu služi linearni geomagnetni indeks A (angl. daily equivalent), ki lahko doseže največ vrednost $A_{\max} = 400$. Geomagnetni indeks A se izračuna iz osmih geomagnetnih indeksov K izračunanih iz

merilnih podatkov posameznega dne. Geomagnetni indeks K je logaritmčne oblike in izhaja iz skalarne matrike, s katero se popisuje velikost odstopanja posameznega dne od srednjih vrednosti geomagnetno mirnih dni (Čop et al, 2015; Matzka et al, 2021). V izbranem obdobju od 14. do 16. junija 2021 (Slika 1) je bila na observatoriju PIA izmerjena največja sprememba absolutne vrednosti vektorja magnetnega polja $dF = 47974,07 \text{ nT} - 47922,64 \text{ nT} = 51,43 \text{ nT}$ ali vsega 0,11 % od srednje vrednosti $F = 47955,87 \text{ nT}$.

Na planetarni ravni je bila 15. junija 2021 geomagnetna nevihta, ki jo je povzročil povečan tok elementarnih delcev iz korone Sonca CIR (co-rotating interaction region) s hitrostjo 579,6 km/s in gostoto 9,5 protonov/cm³. Ta je izhajal iz obsežne luknje v koroni Sonca na njegovi južni polobli zaradi česar je bila ta geomagnetna nevihta že v naprej napovedana (Slika 3).

V letu 2021 se je začel 25-ti solarni cikel in so zato geomagnetne nevihte redkejša in šibkejša kot pa bodo v njegovem višku, ki ga bo dosegel okoli leta 2025 (Owens et al, 2021; Bhowmik & Nandy, 2018). Manjša aktivnost Sonca se opazi tudi na grafu geomagnetnih indeksov A za obdobje njegovega enega efektivnega obrata od 6. junija do 3. julija 2021 (Slika 1). Vse večje spremembe lokalnega magnetnega polja so nastale zaradi neposrednega vpliva Sonca in so bile zato že v naprej napovedane. 30. junija 2021 pa je Zemljo dosegel udarni val relativno majhnih amplitud, ki se je širil v medplanetarnem magnetnem polju. Ker njegovega pravega izvora ne poznamo, je bil zato nenapovedan.

Zaključek

Okoliščine v katerih le posamezne poletne noči razsvetljujejo kresnice, poznajo posamezniki v Slovenski Istri. Po etnoloških zapisih ter ohranjenih spomenikih, simbolih in ledinskih imenih pa vemo, da je poleg katoliške vere na tem področju vzporedno obstajala tudi stara vera in način življenja, ki je bil neposredno povezan v naravo.

Na osnovi analize okoliščin, ki se pojavljajo skupaj z roji kresnic, sem ugotovil, da se ti hrošči, vsaj v zadnjem delu svojega življenjskega cikla, ravna po naravnih spremembah lokalnega magnetnega polja Zemlje.

Literatura

- Alphandéry, E. (2014). Applications of Magnetosomes Synthesized by Magnetotactic Bacteria in Medicine. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2 (5), 1–6.
- Atmospheric Imaging Assembly. JPEG2000 Images (SDO_AIA_193). (2021). Stanford (US, CA): Stanford University; Joint Science Operations Center (JSOC).
<http://jsoc.stanford.edu/data/aia/images/2021/06/11/193/> (11.11. 2021).
- Barua, G. A. Iwasaka, M. Miyashita, Y. Kurita, S. Owada, N. (2012). Firefly flashing under strong static magnetic field. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 11, 345.
- Bellini, S. (1963). Ulteriori studi sui "Batteri Magnetosensibili". Pavia (Italy): Istituto di microbiologia dell'Università di Pavia, 1963.
- Bhowmik, P. Nandy, D. (2018). Prediction of the strength and timing of sunspot cycle 25 reveal decadal-scale space environmental conditions. *Nature Communications*, 9, 5209.
- Bissanti, G. (2019). *Luciola italica*. Un Mondo Ecosostenibile/An Ecosustainable World. <https://antropocene.it/en/2019/08/14/luciola-italica/> (9.12.2021)
- Blakemore, P. R. (1982). Magnetotactic bacteria. *Annual Reviews of Microbiology*, 1982, 36, 217–238.
- Butler, F. R. (1992). *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Oxford (UK): Blackwell Scientific.

- Campbell, H. W. (2012). Introduction to geomagnetic field. Second edition. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University.
- Čop, R. Deželjin, D. De Reggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K. Determination of local geomagnetic K-index. In Slovenian. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697–708.
- De Cock, R. (2009). 10. Biology and behaviour of European lampyrids. *Bioluminescence in Focus - A Collection of Illuminating Essays*. Editor: Victor Benno Meyer-Rochow. Kerala (India): Research Signpost, 2009, 161–200. ISBN: 978-81-308-0357-9
- Emerson, D. W. (2014). The Lodestone, from Plato to Kircher. *Preview*, 173, 52-62; DOI: 10.1071/PVv2014n173p52.
- Fuller, M. Dobson, J. (2007). Biomagnetism. *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*. Encyclopedia of Earth sciences series. Edited by David Gubbins and Emilio Herrerobervera. Dordrecht (The Netherlands): Springer, 48–52. ISBN-13: 978-1-4020-3992-8.
- Iwasaka, M. Ueno, S. (1998). Bioluminescence under static magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 83 (11), 6456.
- Kirschvink, L. J. Walker, M. M. Diebel, E. C. (2001). Magnetite-based magnetoreception. *Current Opinion in Neurobiology*, 11, 462–467.
- Lakhina, S. G. Tsurutani, T. B. (2016). Geomagnetic storms: historical perspective to modern view. *Geoscience Letters*, 3 (5).
- Lanza, R. Meloni, A. (2006). The Earth's Magnetisem. An introduction for geologists. Berlin (Germany): Springer – Verlag.
- Malin, S. Barraclough, D. (2011). Gilbert's De Magnete: An Early Study of Magnetism and Electricity. *Eos, Transactions American Geophysical*, 81 (21).
- Matzka, J. Stolle, C. Yamazaki, Y. Bronkalla, O. Morschhauser, A. (2021). The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity. *Space Weather*, 19 (5), e2020SW002641.
- 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.
- Owens, J. M. Lockwood, M. Barnard, A. L. Scott, J. C. Haines, C. Macneil, A. (2021). Extreme Space-Weather Events and the Solar Cycle. *Solar Physics*, 296, 82.
- 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.
- Salminen, J. Pesonen, J. L. Lahti, K. Kannus, K. (2013). Lightning-induced remanent magnetization—the Vredefort impact structure, South Africa. *Geophysical Journal International*, 195, 117–129.
- Schmidl, G. P. (1997–98). Two early Arabic sources on the magnetic compass. *Journal of Arabic and Islamic Studies*, 1, 81–132.
- The letter of Petrus Peregrinus on the magnet, A.D. 1269. (1904). Translated by brother Arnold. New York (US): Mc Graw.
- Thirty Great Inventions of China. From Millet Agriculture to Artemisinin. (2020). Editors Jueming Hua and Lisheng Feng. Springer.
- Tian, L. Lin, W. Zhang, S. Pan, Y. (2010). Bat Head Contains Soft Magnetic Particles: Evidence From Magnetism. *Bioelectromagnetics*, 31, 499–503.
- Wang, Y. Pan, Y. Parsons, S. Walker, M. Zhang, S. (2007). Bats respond to polarity of a magnetic field. *Proceedings of the Royal Society – B*, 274, 2901–2905.
- Wasilewski, P. Kletetschka, G. (1999). Lodestone: Natures Only Permanent Magnet-What it is and how it gets charged. *Geophysical research letters*, 26 (15), 2275-2278.
- Wiltschko, W. Wiltschko, R. (2005). Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *Journal of Comparative Physiology B*, 191, 675–693.
- Zhou, W. Nakamura, D. Wang, Y. Mochizuki, T. Akiyama, H. Takeyama, S. (2015). Effect of very high magnetic field on the optical properties of firefly light emitter oxyluciferin. *Journal of Luminescence*, 165, 15–18.

Nove karte gravimetričnih anomalij na območju Republike Slovenije

Klemen Medved¹, Oleg Odalović², Božo Koler³

Povzetek

Obstoječa karta Bouguerovih anomalij, ki pokriva ozemlje Republike Slovenije, je stara nekaj desetletij. Od takrat je na voljo kar nekaj novih podatkov o merjenem težnostnem pospešku na območju Slovenije, ter kakovostnih digitalnih modelov terena, ki so potrebni za izdelavo takšnih kart. Poleg tega so se spremenili tudi metodologija in standardi za izdelavo kart gravimetričnih anomalij. V nizu starih gravimetričnih podatkov, ki izhajajo iz obdobja Jugoslavije, je bilo odkritih in odstranjenih nekaj grobih pogreškov. Na podlagi vseh novih gravimetričnih podatkov so bile izdelane karte gravimetričnih anomalij Republike Slovenije.

Ključne besede: karte gravimetričnih anomalij, Bouguerova anomalija, gravimetrični podatki, Slovenija

Key words: gravity anomalies maps, Bouguer anomaly, gravimetric data, Slovenia

Uvod

Karte gravimetričnih anomalij se uporabljajo v geoloških in geofizikalnih raziskavah. V Sloveniji je za območje celotne države trenutno aktualna karta Bouguerovih anomalij, ki je bila izdelana v drugi polovici prejšnjega stoletja. Nastala je na podlagi gravimetričnih meritev na območju bivše Jugoslavije. Gravimetrične izmere so se na območju Slovenije izvajale v različnih izmerah od leta 1956 do 1965 v Potsdamskem gravimetričnem sistemu. V Sloveniji se je po letu 1996 začela vzpostavljati nova osnovna gravimetrična mreža (Bilibajkić, 1979), ki temelji na gravimetričnem sistemu IGSN71 in predstavlja temelj za vsa sodobna gravimetrična opazovanja. Z Uredbo (Uredba, 2014) so bili v Sloveniji tudi določeni parametri gravimetričnega dela državnega prostorskega koordinatnega sistema. Oznaka slovenskega gravimetričnega datuma je GD06, v katerem se dandanes izvajajo vse gravimetrične meritve v Sloveniji. Tako je bilo na ozemlju Slovenije v zadnjem obdobju izvedenih veliko kvalitetnih gravimetričnih meritev, predvsem z namenom vzpostavitve novega državnega višinskega sistema in izračuna nove višinske referenčne ploskve (model geoida oz. kvazi-geoida). Za ta namen so bili pridobljeni tudi gravimetrični podatki iz sosednjih držav. Poleg tega so bili izdelani različni izboljšani topografski modeli - digitalni modeli reliefa (DMR) v različnih resolucijah. Vse te novo pridobljene podatke smo uporabili pri izdelavi novih kart gravimetričnih anomalij za območje Slovenije.

Pregled stanja in namen

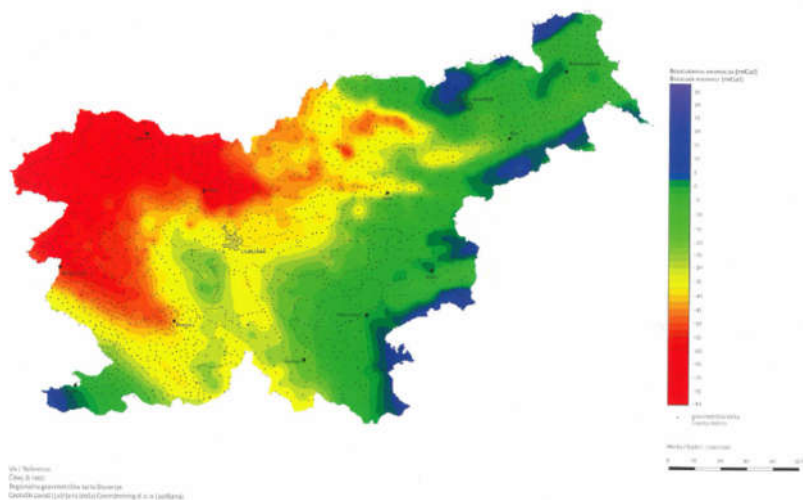
Pred osamosvojitvijo Slovenije so bile izdelane karte Bouguerovih anomalij, ki so pokrivale celotno območje takratne Jugoslavije. Zvezni geološki zavod iz Beograda je leta

¹ Geodetska uprava RS, Zemljemerska 12, 1000 Ljubljana

² Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade, Srbija

³ UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

1972 v sodelovanju z drugimi institucijami izdal 'Gravimetrijsko karto SFR Jugoslavije: Bouguerove anomalije' v merilu 1:500.000. Temelji na regionalni in detajlni gravimetrični izmeri območja Slovenije in štirih sosednjih dežel iz pet-desetih in šest-desetih let, ki je bila namenjena izdelavi te karte (Bilibajkić, 1979). V Sloveniji je bila karta Bouguerovih anomalij na osnovi starih jugoslovanskih gravimetričnih podatkov, pridobljenih med leti 1956 in 1965, izdelana leta 1967 (Čibej, 1967) ter dodatno interpolirana in digitalizirana med 1996 in 2000 (Stopar, 2018). Meritve je na območju Slovenije izvajal takratni Geološki zavod Ljubljana (danes Geološki zavod Slovenije). Za izdelavo karte v merilu 1:100.000 so uporabili približno 2500 točk z izmerjenimi relativnimi vrednostmi težnega pospeška v Potsdamskem gravimetričnem sistem. Izdelana karta je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Obstoječa karta Bouguerovih anomalij za Slovenijo (vir: Stopar, 2018).

Številni avtorji se ukvarjajo z izdelavo posodobljenih državnih kart Bouguerovih anomalij, saj je poleg izboljšanih topografskih modelov na razpolago vedno več kvalitetnih gravimetričnih podatkov. Pri tem se uporabljajo različne metodologije (De Marchi et al., 2014), ki so bile uporabljene v zadnjem obdobju v sosednjih državah: Avstrija – Meurers in Ruess (2009); Madžarska – Kiss (2006); Italija – Tiberti (2005); Hrvaška – Varga in Stipčević, (2021); Jadransko morje – Tassis et al. (2013); območje Alp (Zahorec et al., 2021). Pred kratkim izdelana regionalna karta gravimetričnih anomalij, ki zajema območje Alp (Zahorec et al., 2021) žal ni vključila novejših slovenskih gravimetričnih podatkov, ampak so uporabljeni le stari. Zato je smiselno posodobiti državno karto Bouguerjevih anomalij, saj so se posodobile metodologije oz. standardi za izdelavo kart anomalij težnosti (Hinze et al., 2005).

Obstoječi vhodni podatki

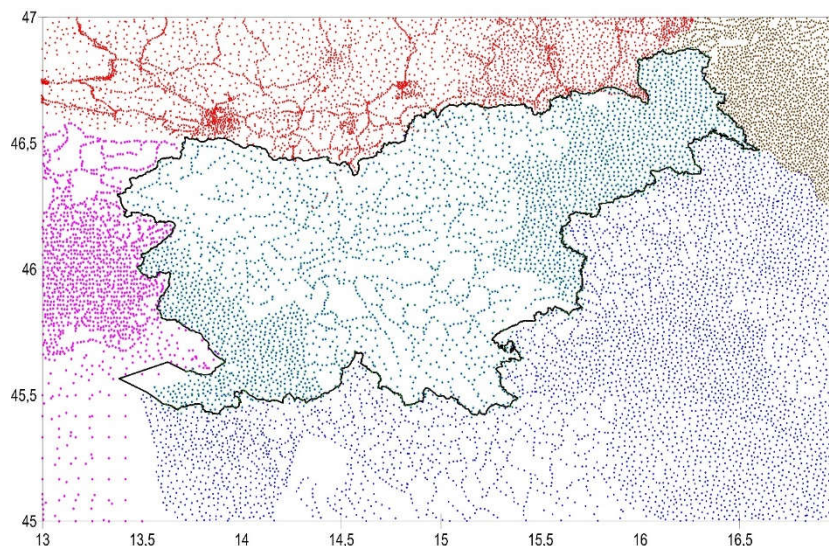
Digitalni model reliefa (DMR)

Za območje Slovenije imamo na razpolago več digitalnih modelov reliefa z oznakami in resolucijami DMR1 (1×1 m), DMR 25 (25×25 m), DMR100 (100×100 m) in DMR1000 (1000×1000 m), ki smo jih uporabili v tej raziskavi. DMR1 je bil pridobljen v projektu *Lasersko skeniranje Slovenije (LSS)*, ki se je izvajalo v letih 2011, 2014 in 2015. Iz podatkov LSS je bil izdelan digitalni model reliefa (DMR1) s prostorsko ločljivostjo 1 m in pokriva celotno območje države Slovenije. Podobno tudi DMR25 pokriva širše območje Slovenije s prostorsko ločljivostjo 25 m. DMR100 in DMR1000 sta bila pripravljena za potrebe izračuna

modela novega kvazi-geoida oziroma višinske referenčne ploskve z oznako SLO_VRP2016/Koper (Omang, 2016). Izdelana sta iz izvornih podatkov DMR 12,5 (za državno ozemlje) in za čezmejni pas do oddaljenosti vsaj 167 km združena s podatki SRTM-3 v2.1⁴ (Farr et al., 2007). Iz združenih podatkov sta z bi-linearno interpolacijo izdelana fini (100×100 m) in grobi (1000×1000 m) digitalni model višin (Žagar in Berk, 2009). DMR100 obsega območje med $45^\circ - 47^\circ$ N, $15^\circ - 17^\circ$ E, DMR1000 pa od $43^\circ - 49^\circ$ N, $11^\circ - 19^\circ$ E.

Gravimetrični podatki

V Sloveniji razpolagamo z več nizi gravimetričnih podatkov in sicer: stari gravimetrični podatki bivše SFRJ za območje Slovenije in dela Hrvaške, gravimetrični podatki obmejnega območja sosednjih držav, t.j. Italije, Avstrije in Madžarske, ki so bili pridobljeni s formalnimi dogovori in uporabljeni za potrebe izračuna novega kvazi-geoida Slovenije, podatki osnovne gravimetrične mreže, gravimetrični podatki reperjev nivelmanske mreže 1. reda in podatki nove regionalne gravimetrične izmere za območje Slovenije (slika 2). Vsi ali vsaj večina teh podatkov se je uporabila tudi pri izračunu nove višinske referenčne ploskve, t.j. modela kvazi-geoida Slovenije



Slika 2: Gravimetrični podatki bivše SFRJ za območje Slovenije (zelena) in dela Hrvaške (modro) in gravimetrični podatki Italije (vijolična), Avstrije (rdeča) in Madžarske (rjava).

a) Gravimetrični podatki, bivše SFRJ za območje Slovenije in dela Hrvaške

Podatki stare gravimetrične izmere SFRJ segajo v drugo polovico prejšnjega stoletja. Že za potrebe izračuna novega kvazi-geoida je bil niz teh podatkov analiziran in transformiran (iz koordinatnega sistema (D48/GK), Bessel elipsoid v ETRS89 (D96/TM), GRS80 elipsoid) z državno trikotniško transformacijo, različico 3.0 (Berk in Komadina, 2013). Na sliki 2 so prikazani stari gravimetrični podatki bivše SFRJ za območje Slovenije in dela Hrvaške, ki jih imamo na razpolago. Celotni niz vsebuje 6362 točk, od tega jih je na ozemlju Slovenije 3365, ostalih 2997 je na območju Hrvaške.

⁴ Angl. Shuttle Radar Topography Mission

b) Podatki obmejnega območja sosednjih držav (Italija, Avstrija in Madžarska)

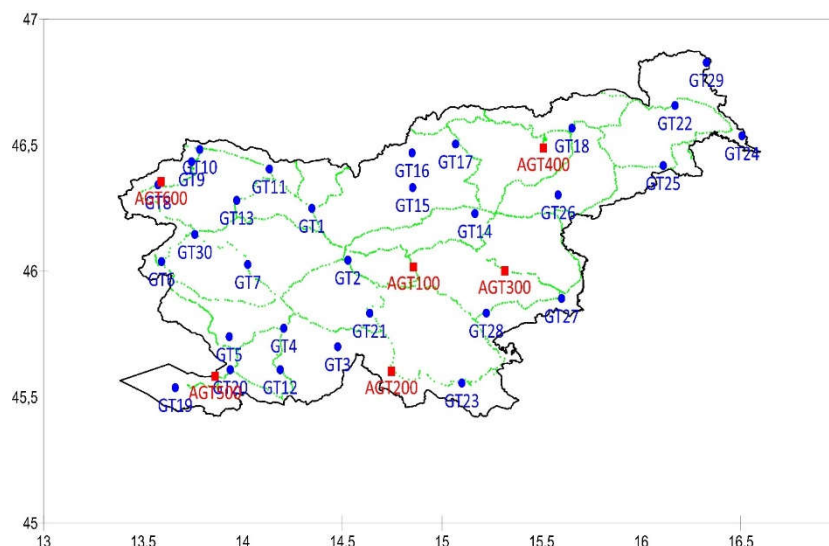
Gravimetrični podatki obmejnega območja pokrivajo območja izven teritorija Slovenije v koordinatnem okvirju $45^{\circ} - 47^{\circ}$ N in $13^{\circ} - 17^{\circ}$ E. Gravimetrični podatki obmejnega območja z Italijo vsebujejo niz 1402 točk. Obdobje meritev ni poznano. Izvirne višine se nanašajo na italijanski višinski sistem z datumom Genova 1942, zato so bile transformirane v višinski datum Trst 1875 (CRSEU, 2016). Avstrijski gravimetrični podatki pokrivajo mejno območje južno od 47° vzporednika. Gre za skupno 3984 točk. Višine se nanašajo na višinski datum Trst 1875. Gravimetrične meritve izhajajo iz obdobja 1952 – 2009. Gravimetrični podatki obmejnega območja z Madžarsko vsebujejo niz 1801 točk. Izvirne višine se nanašajo na višinski datum Kronstadt, zato so pretvorjene v višinski datum Trst 1875 (CRSEU 2016). Za vse navedene podatke so koordinate podane v ETRS89 (elipsoid GRS80), gravimetrične vrednosti se nanašajo na IGSN71. Na sliki 2 so prikazani vsi podatki navedenih sosednjih držav.

c) Podatki osnovne gravimetrične mreže

Osnovno gravimetrično mrežo Slovenije tvori 36 točk, 6 absolutnih gravimetričnih točk mreže 0. reda in 30 relativnih gravimetričnih točk 1. reda (Slika 3). Absolutne gravimetrične točke so bile stabilizirane leta 1995 in od takrat se je na njih izvedlo nekaj kampanjskih meritev, nazadnje leta 2014 (Ullrich in Medved, 2015). Določitev vrednosti težnega pospeška na točkah 1. reda je bila opravljena z gravimetričnimi meritvami leta 2006 z dvema relativnima gravimetroma tipa Scintrex CG-3M. Obdelava gravimetričnih meritev je opravljena z izračunom ustreznih popravkov in redukcij merjenih vrednosti težnega pospeška z izravnavo gravimetrične mreže v dveh korakih. Ocenjene natančnosti določitve posameznih točk znašajo od $3,0 \mu\text{Gal}$ do $6,2 \mu\text{Gal}$ (Koler et al., 2012). Na osnovi novo izračunane osnovne gravimetrične mreže je bila narejena tudi primerjava s starim Potsdamskim datumom, v katerem so bile opravljene vse predhodne gravimetrične meritve v Sloveniji, in določena transformacija med sistemoma Potsdam in IGSN71 (Medved et al., 2009). Nova osnovna gravimetrična mreža Republike Slovenije predstavlja kakovostno osnovo za vse nadaljnje gravimetrične meritve na območju Slovenije in definira državni gravimetrični datum z oznako GD06.

d) Gravimetrični podatki reperjev nivelmanske mreže 1. reda

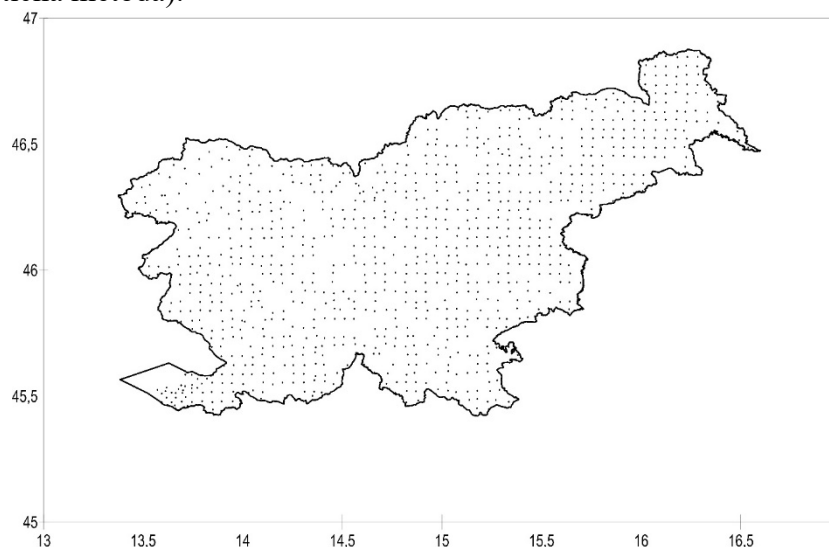
Za potrebe uvedbe novega višinskega sistema (SVS2010), kar v praksi pomeni izračun geopotencialnih višin reperjev, je bila na $\sim 85\%$ reperjev nivelmanske mreže 1. reda Slovenije izvedena gravimetrična izmera (Koler et al., 2019). Ta se je izvajala sočasno z nivelmansko izmero, to je od leta 2006 do 2016, in sicer z dvema relativnima gravimetroma Scintrex (model CG-3M in CG5). Ocenjena natančnosti izvedenih meritev je $50 \mu\text{Gal}$. Niz vsebuje 2054 točk. Vse meritve težnega pospeška se nanašajo na osnovno gravimetrično mrežo Slovenije (IGSN71). Na sliki 3 so z zeleno barvo prikazani vsi reperji na katerih je bila izvedena gravimetrična izmera.



Slika 3: Osnovna gravimetrična mreža Slovenije (6 absolutnih z rdečo barvo in 29 relativnih točk 1. reda z modro barvo) in izvedene gravimetrične meritve na reperjih nivelmanske mreže Sloveniji (z zeleno barvo).

e) Podatki nove regionalne gravimetrične izmere Slovenije

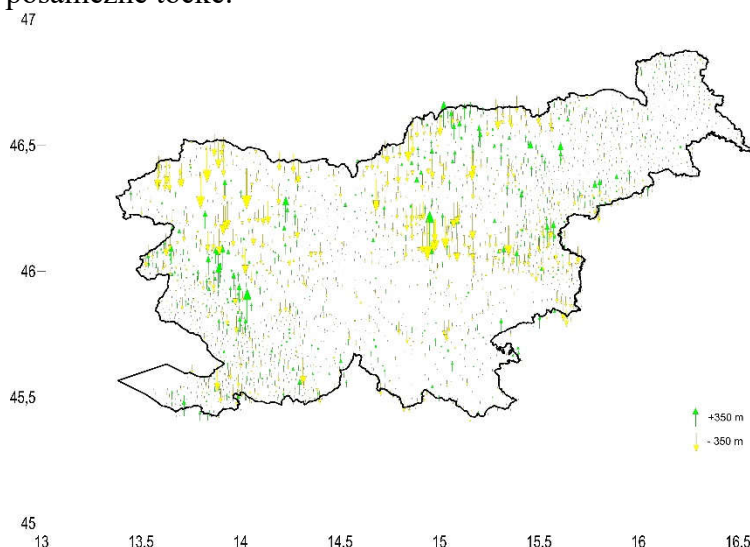
Za potrebe izračuna nove referenčne višinske ploskve (geoid oz. kvazi-geoid) se je v Sloveniji izvedla regionalna gravimetrična izmera. Predhodno je bila narejena analiza gostote obstoječih gravimetričnih točk izmerjenih po letu 2006 za potrebe določitve geopotencialnih višin reperjev. Na podlagi tega se je izdelal predlog zgostitve točk na območju, kjer njihova gostota ne zadošča (Medved et al., 2019). S tem je celotno območje države pokrito s kvalitetnimi gravimetričnimi točkami v rastru vsaj 4×4 km, na območju slovenske obale je bila celična mreža zgoščena na velikost celice 2×2 km in sicer za potrebe izračuna geoida na morju (Slika 4). Izmera je potekala med leti 2014 – 2019, pri čemer se vse meritve nanašajo na državni gravimetrični datum GD06 (IGSN71), skupno je bilo izmerjenih 1006 gravimetričnih točk. Ocenjena natančnost je $30 \mu\text{Galov}$. Koordinate vseh izmerjenih detajlnih točk regionalne gravimetrične izmere so bile določene z izmero GNSS (RTK ali statična metoda).



Slika 4: Regionalna gravimetrična izmera Slovenije med leti 2014 – 2019.

Analiza kakovosti »starih« jugoslovanskih gravimetričnih podatkov

Z vidika kakovosti gravimetričnih podatkov je potrebno posebno pozornost nameniti podatkom stare gravimetrične izmere SFRJ na območju Slovenije in dela Hrvaške. Podatki stare gravimetrične izmere SFRJ namreč segajo v šestdeseta in sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, nekatere gravimetrične izmere višjih redov pa še dlje v preteklost. Skladno z arhivsko dokumentacijo (Bilibajkić et al., 1979), ki opisuje način izvedbe gravimetričnih meritev v SFRJ sklepamo, da so bili za določitev položaja točk izbrani večinoma značilni objekti, ki so bili prikazani na topografskih kartah merila 1 : 50 000 ali 1 : 25 000. Kjer to ni bilo možno, so položaj točk določali glede na referenčni objekt in izmerili oddaljenost od objekta. Za določanje smeri so v nekaterih primerih uporabljali tudi busolo. Pri regionalnih raziskavah so za gravimetrične točke skladno z možnostmi uporabljali reperje in trigonometre državne mreže. Pri detajlnih gravimetričnih meritvah je položaj določen na osnovi poligonov (tudi busolnih) ali pa z merjenjem razdalje od gravimetrične točke do izbranega objekta, katerega položaj so določili na karti. Poligone so povezali bodisi s trigonometrično mrežo, bodisi s točkami, ki so že imele znane položaje. Merjeni podatki so bili izravnani z uporabo približnih metod. Izvorni podatki meritev nam niso na razpolago, zato težko ocenimo kvaliteto gravimetričnih meritev, lahko pa preverimo njihovo položajno/višinsko natančnost. Zato smo vse podatke stare gravimetrične izmere SFRJ na območju Slovenije in dela Hrvaške primerjali z digitalnim modelom reliefa DMR1 in sicer višine izvornih koordinat gravimetričnih točk s pripadajočimi višinami iz DMR1. Na ta način dobimo odstopanja (razlike) med obema višinama za vsako posamezno gravimetrično točko. Pri tem ne vemo ali je odstopanje posledica pogrešene višine ali pogrešene horizontalne koordinate posamezne točke. Na sliki 5 so prikazana odstopanja po celotnem ozemlju Slovenije za posamezne točke.

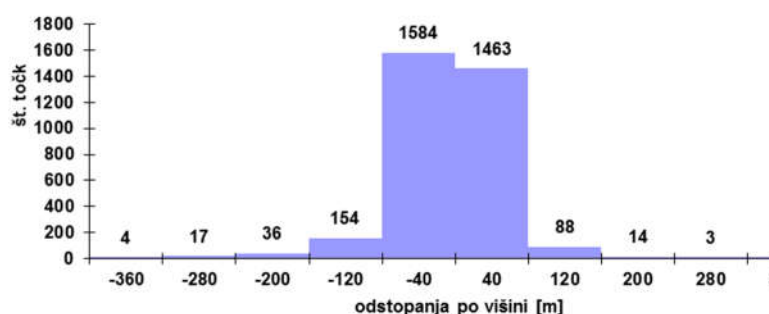


Slika 5: Odstopanja po višini na podlagi analize z DMR1.

Odstopanja so prikazana kot razlika med 'izvorno višino' minus 'DMR višino'. Na prvi pogled se zdi, da so odstopanja največja na območju S in SZ Slovenije, predvsem v goratih predelih. Na območjih SV in J Slovenije so odstopanja v povprečju manjša. Verjetno so bile izmere izvedene v posameznih sklopih in je metoda določitve koordinat vezana tudi na to, vendar o tem trenutno nimamo podatkov. Statistični kazalci te analize so zbrani v preglednici 1.

Preglednica 1: (levo) - Statistični kazalci analize višin na nizu jugoslovanskih gravimetričnih podatkov; (desno) Histogram odstopanj po višini v 10 - ih velikostnih razredih.

Število točk	3364
Min [m]	-390,94
Max [m]	333,14
Povprečje [m]	-7,10
Mediana [m]	-0,42
Std. dev. [m]	51,25



Statistični kazalci analize kažejo, da je izvorna višina nekaterih točk oz. posledično njihov položaj zelo vprašljiv. Odstopanja so od min. – 391 m do max. 333 m. Posledično to pomeni, da je uporaba teh podatkov v nekaterih primerih neprimerna za nadaljnje izračune. Gre pa za normalno porazdelitev odstopanj, kar kaže da ni nekega sistematičnega zamika oz. napake, kar bi povzročilo takšna odstopanja. Zato smo se odločili, da te podatke ustrezno filtriramo in v nadaljnjih postopkih uporabimo samo podatke, za katere predvidevamo, da niso grobo pogrešeni. Za določitev kriterija za izločitev oz. filtriranje podatkov izvedemo podobno analizo na nizu kvalitetnih gravimetričnih podatkov na reperjih (glej poglavje 3.2-d), ki imajo višino določeno z geometričnim nivelmanom. Njihov horizontalni položaj je določen na različne načine, v nekaterih primerih tudi odčitano iz karte oz. DOF⁵ - a, zato tudi tukaj pričakujemo odstopanja. Statistični rezultati te analize (primerjava višin reperjev na DMR1) so prikazani v Preglednici 2.

Preglednica 2: Statistični kazalci analize višin na nizu izmerjenih reperjev.

Število točk	2054
Min [m]	-22,72
Max [m]	14,45
Povprečje [m]	0,58
Mediana [m]	0,73
Std. dev. [m]	2,38

Rezultati analize tega niza podatkov, ki vsebuje 2054 točk, so pričakovano boljši. Minimalno odstopanje po višini znaša – 23 m in maksimalno znaša 14 m. Ob predvidevanju, da so koordinate teh točk določene kvalitetno vzamemo kot kriterij za izločanje (filtriranje) 3 -kratno vrednost maksimalnega odstopanja. S tem izločimo grobo pogrešene položaje točk. Kriterij tako znaša 3×22 m, kar zaokrožimo na ± 70 m in je postavljen zelo ohlapno. Če bi namreč kot kriterij vzeli 3 - kratno vrednost standardne deviacije ($3 \times 2,4$ m), bi izločili preveč podatkov in ne bi mogli izvesti nadaljnjih analiz.

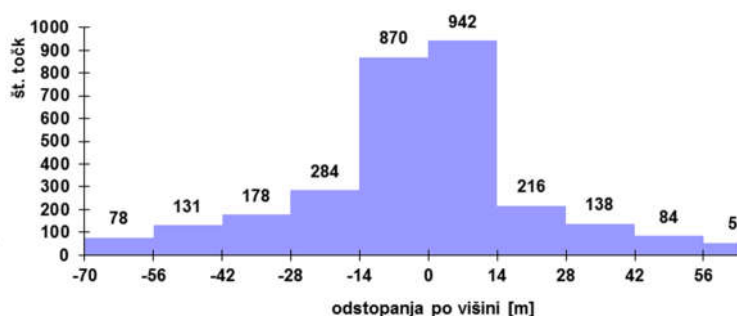
Tako iz niza starih jugoslovanskih gravimetričnih podatkov, ki na območju Slovenije vsebuje 3365 točk izločimo vse, ki po višini odstopajo za več kot ± 70 m. Izločenih je 390 predvidoma grobo pogrešenih točk, tako v filtriranem nizu ostane 2975 točk. Statistični

⁵ Digitalni orto foto

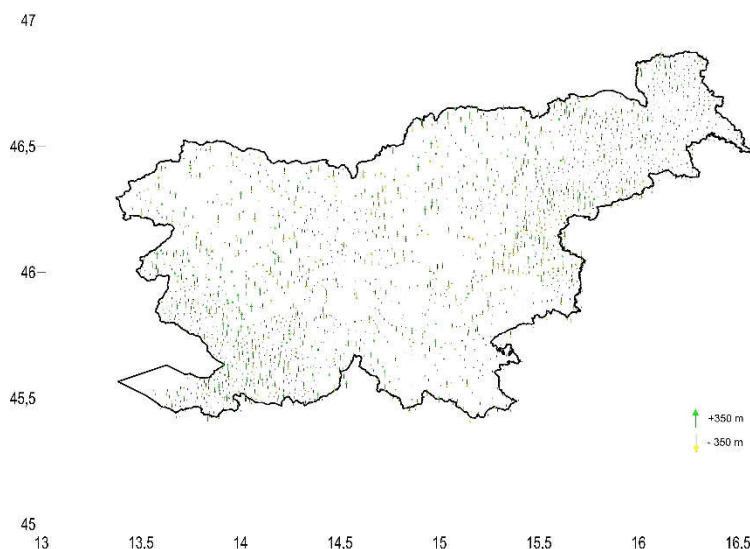
kazalci po izvedenem filtriranju niza jugoslovanskih gravimetričnih podatkov na območju Slovenije so zbrani v preglednici 3. Na sliki 6 so grafično prikazana odstopanja na posameznih gravimetričnih točkah po izvedenem filtriranju.

Preglednica 3: Statistični kazalci analize višin na nizu filtriranih jugoslovanskih podatkov.

Število točk	2975
Min [m]	-68,65
Max [m]	68,92
Povprečje [m]	-2,29
Mediana [m]	-0,18
Std. dev. [m]	23,51



Za širša območja sosednjih držav nimamo na razpolago podatkov DMR1, vendar vseeno izvedemo analizo odstopanj z DMR100. Zaradi slabše natančnosti in zanesljivosti tega modela (v primerjavi z DMR1) kot kriterij za izločitev grobih podatkov vzamemo odstopanja po višini ± 100 m. S tem kriterijem so podatki filtrirani in dodatno so izločene 4 točke z območja Italije in 28 točk z območja Hrvaške. Za podatke z območja Avstrije in Madžarske ni zaznati grobih napak v njihovi geolokaciji.



Slika 6: Odstopanja po višini po izvedenem filtriranju.

Uporabljene enačbe za izračun anomalij težnosti

Merjene vrednosti težnosti je potrebno reducirati za različne popravke z namenom izračuna anomalij težnosti. V splošnem so postopki za reduciranje merjenih težnosti neregulirani in se v raznih geofizikalnih tekstih, dostopnih (komercialnih) programskih paketih in znanstvenih člankih med seboj razlikujejo (Holom and Oldow, 2007). Z namenom

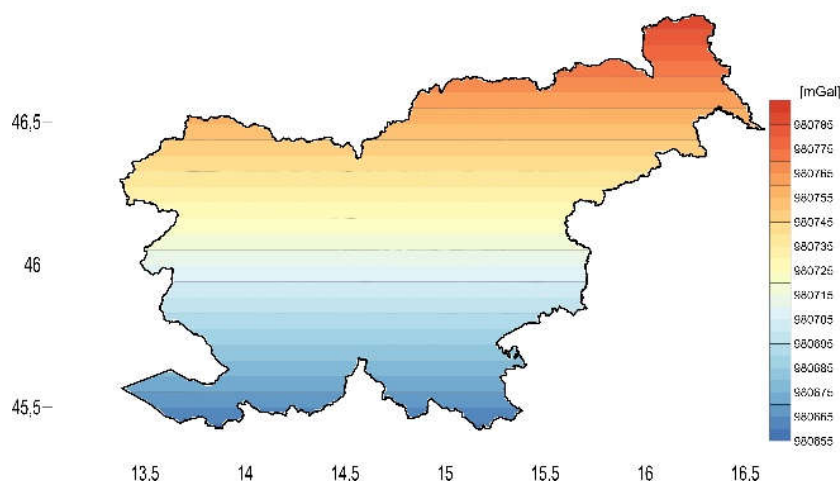
poenotenja in standardiziranja postopkov je Geološki zavod ZDA in Odbor za gravimetrično podatkovno bazo Severne Amerike⁶ predpisal enotne standardne postopke izračuna anomalij težnosti (NGIA, 2008). Bistvena sprememba je uvedba elipsoidne višine v postopke izračuna anomalij težnosti (Hinze et al., 2005, Meurers in Ruess, 2009). To je omogočila uporaba globalnih navigacijskih satelitskih tehnologij, katerih meritve višin se nanašajo na elipsoid.

V naših izračunih smo uporabili spodaj navedene enačbe za posamezne popravke. Gre za znane metode, enačbe in konstante pri čemer redukcije temeljijo na nadmorskih višinah, podanih v slovenskem državnem višinskem sistemu SVS2000 z datumom Trst. Izračuni so opravljeni v tem višinskem sistemu, ker imamo pač v njem na razpolago vse DMR-je.

Teoretična oz. **normalna težnost** na elipsoidu (oznaka γ), je izračunana z izrazom Somigliana (1929), ki se nanaša na elipsoid GRS80:

$$\gamma_0 = \frac{a \gamma_a \cos^2 \phi + b \gamma_b \sin^2 \phi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}} \quad (1)$$

Za območje Slovenije se izračunane vrednosti normalnih težnosti so v razponu od 980658,36 mGal do 980789,22 mGal, to je v razponu 130,86 mGal na geografski širini od 45,35016° do 46,97134°. Grafični prikaz je podan na sliki 7, statistični podatki pa so podani v preglednici 4.



Slika 7: Model normalnih (γ) težnosti Slovenije (oznaka SLO_NG).

Atmosferski popravek⁷ (Hinze et al., 2005):

$$\delta g_{ATM} = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5} h + 3,56 \times 10^{-9} h^2 \quad (2)$$

Popravek je v [mGal], h - višina v metrih.

Za **popravek višine oz. popravek prostega zraka**⁸ uporabimo enačbo (Hinze et al., 2005), ki velja za elipsoid GRS80:

⁶ Angl. U.S. Geological Survey and the North American Gravity Database Committee

⁷ Angl. atmospheric effect

⁸ Angl. Height correction oz. Free-air correction

$$\delta g_{FA} = -(0,3087691 + 0,0004398 \sin^2 \varphi)h + 7,2125 \times 10^{-8} h^2 \quad (3)$$

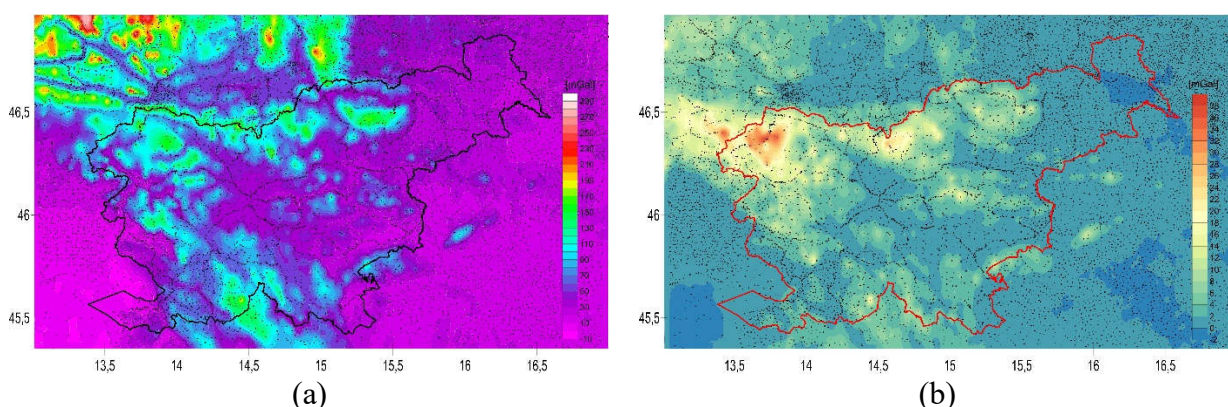
kjer je višina h v metrih, popravek v [mGal].

Topografski popravek razdelimo na dva dela in sicer popravek Bouguerove plošče in terenski popravek. **Popravek Bouguerove plošče** za točke na terenu (LaFehr, 1991, NGIA, 2008):

$$\delta g_B = 2\pi G\rho(\mu h - \lambda R) \quad (4)$$

kjer so: μ in λ brez-dimenzionalna koeficienta vzeta iz (Holom in Oldow, 2007). Upošteva se radij 166.7 km (LaFehr, 1991), ki temelji na sferni Zemlji z polmerom 6371 km; G (gravitacijska konstanta) = $6.673 \pm 0.01 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. Ta konstanta je nedavno sprejeta vrednost in se razlikuje od vrednosti podane v elipsoidu GRS80. h predstavlja referenčno višino točke. V enačbi so popravki podani v enoti m/s^2 , ki se pretvori v [mGal] z množenjem 10^5 , ρ - povprečna gostota Zemlje je 2670 kg/m^3 (Hinze et al., 2005). Prikaz izračunanih popravkov za Slovenijo je na sliki 8a, statistični kazalci pa v preglednici 4.

Za izračune **terenskih popravkov** smo uporabili programsko orodje TopoSK (Zahorec et al., 2017). Program TopoSK omogoča izračun različnih terenskih (topografskih) vplivov oz. popravkov gravimetričnih količin. Izračuni temeljijo na Pohankini formuli, ki izračuna gravitacijski učinek poliedričnega telesa (Pohanka, 1988) do podane razdalje. Uporabijo se različne ločljivosti DMR, pri čemer ločljivost narašča proti točki izračuna. V našem primeru je bil DMR25 (velikost celice $25 \times 25 \text{ m}$) uporabljen do razdalje 250 m, DTM100 (velikost celice $100 \times 100 \text{ m}$) od 250 m do 5240 m in DTM1000 (velikost celice $1000 \times 1000 \text{ m}$ oz. $3,0^\circ \times 4,5^\circ$) od 5240 m naprej. Za zunanji radij izračuna smo vzeli standardno razdaljo 166,7km (npr. Hinze et al., 2005), saj se s tem eliminira vpliv sfernega pokrova (Nowell, 1999). Za gostoto topografije je vzeta konstanta 2670 kg/m^3 , kar predstavlja povprečno gostoto kamenin na obravnavanem območju. Popravki so bili izračunani za 16455 točk v koordinatnem okvirju $45^\circ - 47^\circ$ severne geografske širine in $15^\circ - 17^\circ$ vzhodne geografske dolžine. Povprečna vrednost terenskega popravka je 3,03 mGal, standardna deviacija je 4,90 mGal, minimalni je 0,0 in maksimalni 56,70 mGal (v Avstriji). Razporeditev in velikost terenskih popravkov na območju Slovenije je prikazana na sliki 8b.



Slika 8: (a) Popravki Bouguerove plošče na širšem območju Slovenije (oznaka SLO_BP).
(b) Terenski popravki na širšem območju Slovenije (oznaka SLO_TP); oba prikaza z uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

V preglednici 4 so zbrani statistični podatki za karto (model) normalnih težnosti γ Slovenije (oznaka SLO_NG), model Bouguerovih popravkov na območju Slovenije (oznaka SLO_BP) in model terenskih popravkov na območju Slovenije (oznaka SLO_TP).

Preglednica 4: Statistični podatki modelov SLO_NG, SLO_BP in SLO_TP.

	SLO_NG [mgal]	SLO_BC [mgal]	SLO_TC [mgal]
Min	980658,360	-1,680	-0,030
Max	980789,220	196,040	37,230
Razpon	130,860	197,720	37,260
Povp.	980720,731	55,684	4,185
Mediana	980722,330	48,545	2,300
Std. dev.	30,591	31,303	5,173

Pri tem se je potrebno zavedati, da je kvaliteta terenskih popravkov odvisna predvsem od kvalitete uporabljenih digitalnih modelov reliefa. V postopku izračuna terenskih popravkov imamo kot referenčno višino možnost upoštevati višino posamezne dane točke, za katero se anomalija računa, ali pa pripadajočo višino te točke vzeto iz digitalnega modela reliefa. Glede na raznolikost kvalitete vhodnih podatkov gravimetričnih točk, pri čemer so vprašljive predvsem geološke in posledično višine jugoslovanskih gravimetričnih podatkov lahko upravičeno sklepamo tudi na vprašljivo kvaliteto izračunanih terenskih popravkov.

Izdelane karte gravimetričnih anomalij težnosti Slovenije

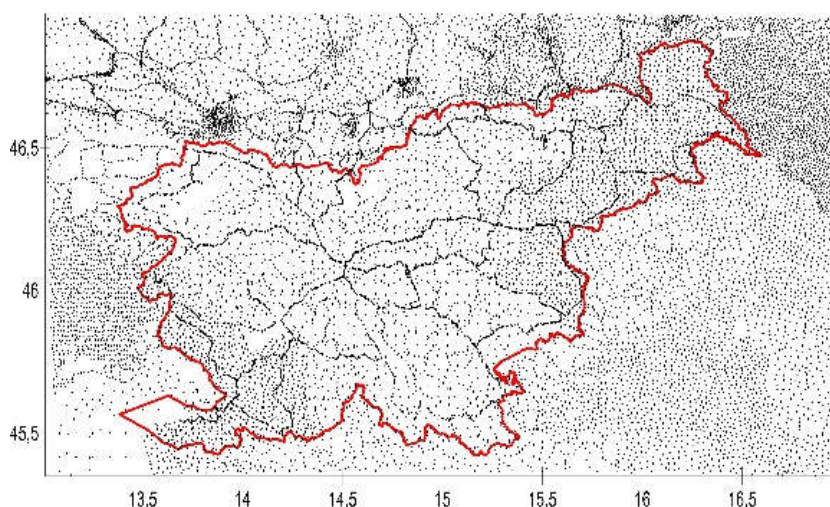
Z uporabo zgoraj navedenih popravkov lahko izračunamo različne anomalije težnosti. Izračuni se nanašajo na posamezne točke, na katerih imamo opravljene gravimetrične meritve in ki niso enakomerno (homogeno) razporejene. Za potrebe izrisa novih kart anomalij jih je zato potrebno prikazati v pravilni celični mreži, za kar uporabimo metodo interpolacije 'Krigging'. Npr. Kamguia et al. (2007) so na več testnih območjih izvedli primerjalno študijo interpolacije gravimetričnih anomalij, pri čemer so testirali in analizirali naslednje metode interpolacije: 'Minimum Curvature Spline in Tension', 'Least Square Polynomial Fitting' (dve varianti), 'Krigging' in 'Inverse distance to a power' (dve varianti). Kot optimalna se je izkazala metoda 'Krigging' zato jo uporabimo tudi v našem primeru, saj gre za podobna izhodišča.

Območje danih podatkov in izračuna je $45^{\circ} - 47^{\circ}$ N in $15^{\circ} - 17^{\circ}$ E. Za ciljno ločljivost izberemo korak po geografski širini $30''$ in po geogr. dolžini $45''$, kar v naravi predstavlja celico velikosti približno 1000×1000 m. Ta korak je izbran na podlagi dejstva, da je z enako ločljivostjo izdelan novi slovenski model kvazi-geoida SLO_VRP2016/Koper (Omang, 2016).

Pri izdelavi kart (modelov) gravimetričnih anomalij smo uporabili naslednje razpoložljive nize gravimetričnih podatkov:

- Podatki osnovne gravimetrične mreže,
- gravimetrični podatki reperjev nivelmanske mreže 1. reda,
- podatki nove regionalne gravimetrične izmere Slovenije,
- filtrirani gravimetrični podatki, bivše SFRJ za območje Slovenije,
- gravimetrični podatki obmejnega območja sosednjih držav (Italija, Avstrija, Madžarska in Hrvaška).

Skupaj je bilo tako izračunanih 15.930 točkovnih anomalij, od tega 6457 na območju Slovenije in preostalih 9473 na območju sosednjih držav. Na sliki 9 so prikazani vsi uporabljeni gravimetrični podatki.



Slika 9: Vsi razpoložljivi gravimetrični podatki Slovenije z okolico.

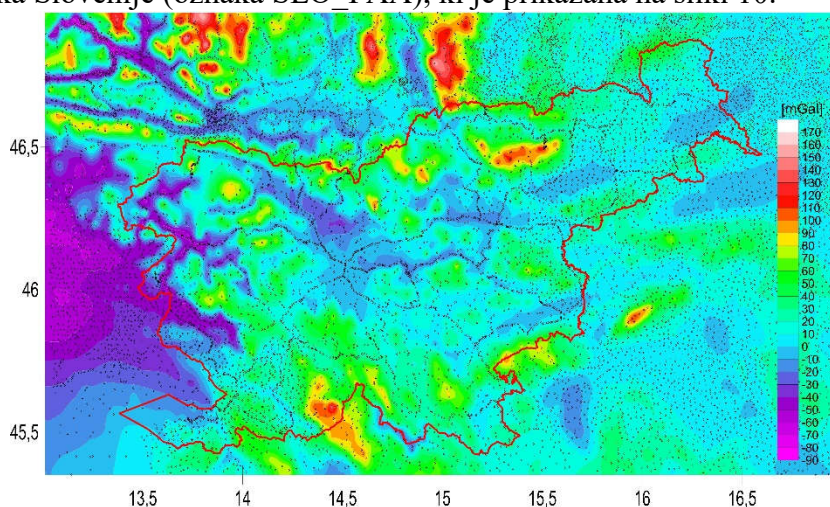
Razpolagamo torej z relativno velikim številom gravimetričnih točk, kar nam omogoči da izvedemo tudi analizo vpliva vhodnih podatkov na izračunane anomalije težnosti. Analiza je podrobneje predstavljena v Medved et al. (2021) in jo v tem prispevku ne podajamo.

Za izračun različnih prikazov gravimetričnih anomalij so bile uporabljene naslednje enačbe:

Anomaliya prostega zraka⁹:

$$\Delta g_{FA} = g_{OPZ} - \gamma + \delta g_{ATM} + \delta g_{FA} \quad (5)$$

Anomalije izračunamo za vse dane gravimetrične točke. Iz njih izdelamo karto anomalij prostega zraka Slovenije (oznaka SLO_FAA), ki je prikazana na sliki 10.



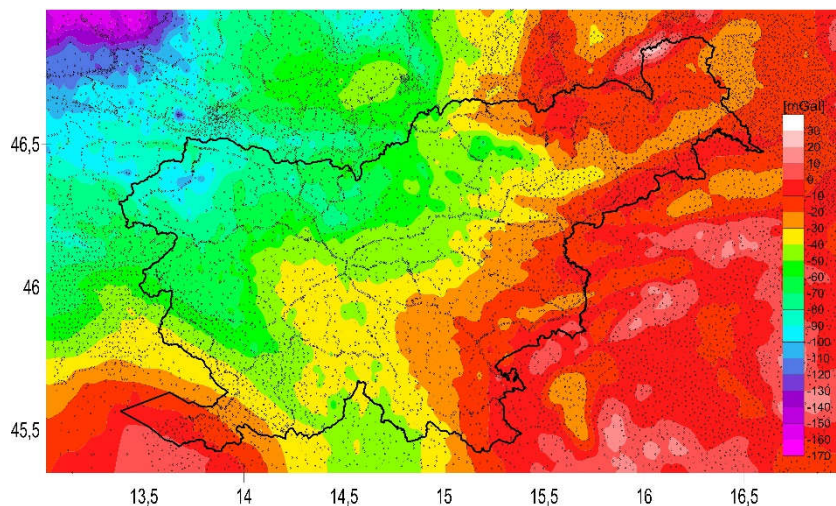
Slika 10: Karta anomalij prostega zraka Slovenije (SLO_FAA) z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

⁹ Angl. Free-air gravity anomaly

Bouguerova anomalija težnosti¹⁰:

$$\Delta g_B = g_{OPZ} - \gamma + \delta g_{ATM} + \delta g_{FA} - \delta g_B \quad (6)$$

kjer so g_{OPZ} – opazovana vrednost dejanske težnosti, γ – normalna težnost na elipsoidu GRS80, δg_{ATM} – atmosferski popravek, δg_{FA} – popravek prostega zraka, δg_B – Bouguerov popravek. Anomalije izračunamo za vse dane gravimetrične točke. Iz njih izdelamo Bouguerovo karto anomalij (oznaka SLO_BA), ki je prikazana na sliki 11.



Slika 11: Karta Bouguerovih anomalij Slovenije (SLO_BA) z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

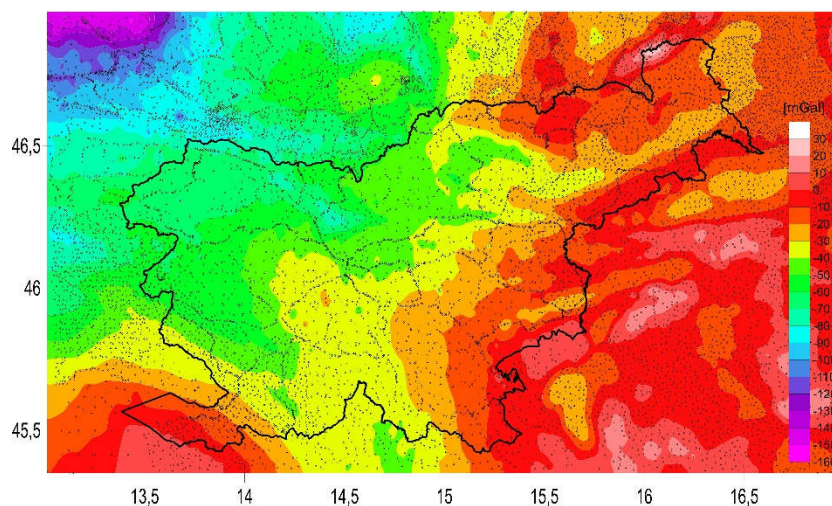
Popolna Bouguerova anomalija težnosti¹¹:

$$\Delta g_{CB} = g_{OPZ} - \gamma + \delta g_{ATM} + \delta g_{FA} - \delta g_B + TC \quad (7)$$

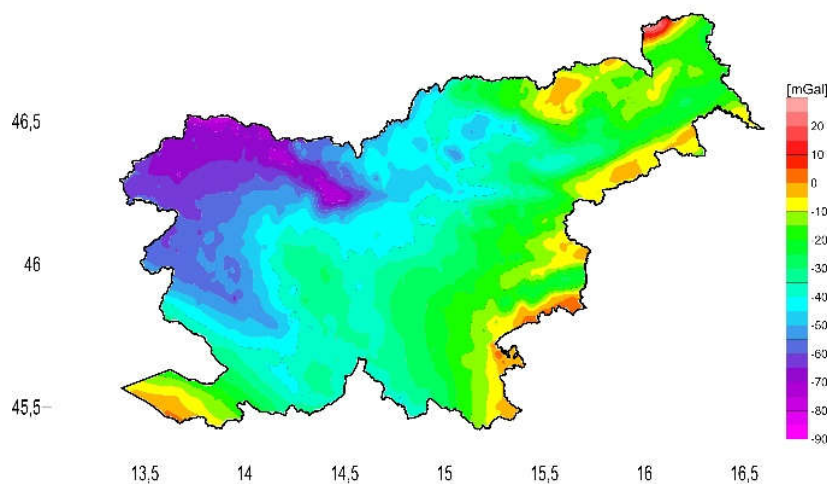
kjer je TC – terenski popravek. Popolne Bouguerova anomalije težnosti dobimo tako, da Bouguerovim anomalijam težnosti prištejemo še terenski popravek. Anomalije izračunamo za vse dane gravimetrične točke. Iz njih izdelamo karto popolnih Bouguerovih anomalij (oznaka SLO_CBA), ki je prikazana na sliki 12. Karta izrezana samo za območje Republike Slovenije je prikazana na sliki 13.

¹⁰ Angl. Bouguer gravity anomaly

¹¹ Angl. Complete Bouguer gravity anomaly



Slika 12: Karta popolnih Bouguerovih anomalij Slovenije (SLO_CBA) z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.



Slika 13: Karta popolnih Bouguerovih anomalij Slovenije (SLO_CBA).

Statistični podatki za zgoraj navedene in prikazane karte (modele) gravimetričnih anomalij so zbrani v preglednici 5. Nanašajo se na izrezano območje znotraj Slovenije, torej ne na celotni koordinatni okvir obdelave.

Preglednica 5: Statistični podatki modelov gravimetričnih anomalij Slovenije.

	SLO_FAA [mgal]	SLO_BA [mgal]	SLO_CBA [mgal]
Min	-58,620	-106,030	-86,620
Max	135,120	22,680	23,150
Razpon	193,740	128,710	109,770
Povp.	17,878	-37,806	-33,621
Mediana	15,090	-36,900	-34,270
Std. dev.	26,017	21,254	17,753

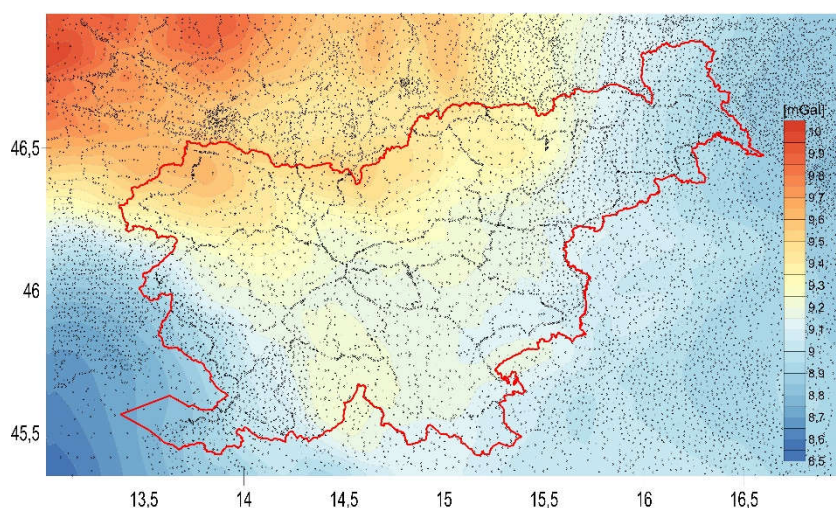
Indirektni učinek

Potrebno je poudariti še terminološko razliko pri uporabi različnih višin (Hackney in Featherstone, 2003). Pri uporabi nadmorskih oz. ortometričnih višin (oznaka H) govorimo o »anomalijah težnosti«¹², pri uporabi elipsoidnih višin (oznaka h) pa o »moteči težnosti«¹³. Razliko med njima predstavlja geoidna višina. Če bi bila le ta konstantna, bi bilo dejansko irelevantno, katere višine uporabljamo v izračunih, ker pa se spreminja (na območju Slovenije znaša od 44,16 m do 48,81 m) je to potrebno upoštevati. V fizikalnem smislu to razliko predstavlja t.i. *indirektni učinek (efekt)*..

Indirektni učinek se torej pojavi zaradi uporabe različnih višinskih datumov pri določitvi višin gravimetričnih točk in teoretičnega polja težnosti. Predstavlja vpliv težnosti mas med tema dvema višinskima datumoma, ki so zajete v popravke Bouguerove plošče. Če predpostavimo konstantno gostoto plošče med njima lahko popravek indirektnega efekta izračunamo kot (Hackney in Featherstone, 2003):

$$\delta g_{IE} = (0,3086 - 2\pi G\rho) \times N = 0,1976 \times N \quad (8)$$

kjer je N – geoidna višina v m , ρ – povprečna gostota Zemlje (2670 kg/m^3). Popravek nam poda vrednost v $[mGal]$. Na sliki 14 je prikazana karta indirektnih efektov za območje Slovenije z izolinijami $0,05 \text{ mGal}$.



Slika14: Karta geofizikalnega indirektnega efekta Slovenije z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

Poudariti je potrebno, da se pri vseh izdelanih kartah nismo posvečali pozornosti morski obali oz. morju (batimetričnih popravkov). Za morske površine namreč nimamo na razpolago gravimetričnih podatkov, prav tako nismo upoštevali ustreznih enačb pri računanju terenskih popravkov na morju. Pri vodnih površinah bi bilo namreč potrebno upoštevati ustrezno gostoto vode. Tako je npr. za opazovanja izvedena na morju gostota morske vode 1027 kg/m^3 , za opazovanja na sladki vodi znaša gostota vode 1000 kg/m^3 , in za opazovanja na ledenikih znaša gostota ledu 917 kg/m^3 . Več o tem podaja Nowell (1999).

¹² Angl. gravity anomaly

¹³ Angl. gravity disturbance

Zaključek

Prikazana karta Bouguerovih anomalij Slovenije je ponovno izračunana po več desetletjih. V tem času se je delno posodobila oz. revidirala sama metodologija izračuna anomalij težnosti. Poleg tega pa so se bistveno izboljšali »vhodni« podatki, ki jih potrebujemo za določitev karte anomalij težnosti. Predvsem imamo na razpolago kvalitetnejše digitalne modele reliefa in kvalitetnejše gravimetrične podatke. Ti podatki pa se ne nanašajo samo na ozemlje Slovenije ampak zajemajo tudi območja sosednjih držav. Predvidevamo namreč, da v prejšnjem izračunu anomalij težnosti podatkov sosednjih držav (razen Hrvaške) ni bilo na voljo. Razpolagamo tudi z učinkovito programsko opremo, ki omogoča relativno hitro obdelavo vseh zahtevanih podatkov.

Za izdelavo opisanih kart smo uporabili vse razpoložljive gravimetrične podatke na območju Slovenije in okolice. Skupaj je bilo tako izračunanih 15.930 točkovnih anomalij, od tega 6.457 na območju Slovenije in 9.473 na območju sosednjih držav. Kot je opisano smo iz obstoječega niza jugoslovanskih gravimetričnih podatkov izločili le tiste, ki smo jih ocenili kot grobo pogrešene in sicer le na podlagi geolokacije (presek z DMR). Pri tem se pojavi vprašanje, če niso v tem nizu podatkov grobe napake prisotne tudi v samih vrednostih težnih pospeškov in bi jih bilo morda smiselno v prihodnosti iz obdelave izločiti.

Nezanemarljiv vpliv pri končnem izdelku ima tudi uporabljena izbrana metoda interpolacije. Pri kreiranju končne pravilne celične mreže (iz nehomogeno razporejenih točk) imamo možnost uporabe različnih metod interpolacij. Razlike med njimi v tem članku sicer niso predstavljene, vendar pa so prisotne in bi bilo potrebno izvesti nadaljnje analize na to temo.

Iz izvedene primerjave različnih kart in analize vpliva vhodnih gravimetričnih podatkov lahko zaključimo, da imajo novejši gravimetrični podatki Slovenije velik vpliv na izdelavo kart gravimetričnih anomalij Slovenije. Prav tako je pomembno, da so vhodni podatki iz katerih se v nadaljnjih postopkih modelirajo karte zanesljivi, torej brez prisotnih grobih napak. Zato je pri izdelavi kart gravimetričnih anomalij bistveno, da se v postopkih obdelave gravimetričnih podatkov uporabi samo kvalitetne podatke. Priprava, čiščenje in analiza podatkov so bistveni del postopka, saj nam le to omogoča izdelavo kvalitetnih končnih modelov.

Na območju Slovenije smo tako po nekaj desetletjih dobili posodobljeno karto gravimetričnih anomalij, ki temelji na posodobljenih postopkih izračuna in predvsem na kvalitetnejših vhodnih podatkih, tako gravimetričnih kot DMR. Predvidevamo, da je zato izdelana nova karta Bouguerovih anomalij za območje Slovenije boljše kakovosti in bolje odraža dejansko stanje na področju težnostnega polja. Kot taka omogoča kvalitetnejše interpretacije pojavov.

Literatura

- Berk, S., Komadina, Ž. 2013. Local to ETRS89 Datum Transformation for Slovenia: Triangle-Based Transformation Using Virtual Tie Points. Survey Review, 45(328), 25–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1752270611Y.0000000020>
- Bilibajkić, P., Mladenović, M., Mujagić, S. in Rimac, I. 1979. Tolmač za gravimetrično karto SFR Jugoslavije – Bouguerove anomalije. Geofizika Zagreb, Zavod za geološka in geofizična raziskovanja Beograd.
- Čibej B. 1967. Regionalna gravimetrična karta Slovenije 1966-1967. Geološki zavod Ljubljana.

- De Marchi, P. A., Ghidella M.E., Tocho C.N. 2014. Analysis of Different Methodologies to Calculate Bouguer Gravity Anomalies in the Argentine Continental Margin. *Geosciences*. 4 (2):33-41. DOI: 10.5923/j.geo.20140402.02.
- Farr T.G., P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, D. Alsdorf, 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, DOI: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183)
- Forsberg, R., Tscherning C.C. 2008. An overview manual for the GRAVSOFIT geodetic gravity field modelling programs. Contract report for JUPEM. 2nd edition.
- Hackney, I.R., Featherstone, W. 2003. Geodetic Versus Geophysical Perspectives of the 'Gravity Anomaly'. *Geophysical Journal International*. 154, 35-43. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2003.01941.x.
- Hinze, W.J., Aiken, C., Brozena, J.M., Coakley, B.J., Dater, D., Flanagan, G.P., Forsberg, R., Hildenbrand, T.G., Keller, G.R., Kellogg, J.W., Kucks, R., Li, X., Mainville, A., Morin, R.J., Pilkington, M.I., Plouff, D., Ravat, D., Román, D.A., Urrutia-Fucugauchi, J., Véronneau, M., Webring, M.W., & Winester, D. 2005. New standards for reducing gravity data : The North American gravity database. *Geophysics*, 70,4: 25-32. DOI: 10.1190/1.1988183
- Holom D.I., Oldow J.S. 2007. Gravity reduction spreadsheet to calculate the Bouguer anomaly using standardized methods and constants. *Geosphere*, vol. 3, No. 2. doi: 10.1130/GES00060.1. p. 86-90.
- Kamguia, J., Tabod, C. T., Tadjou, J. M., Manguelle-Dicoum, E., Nouayou, R., & Kande, L. H. (2007). Accurate gravity anomaly interpolation: A case study in Cameroun, Central Africa. *Earth Sciences Research Journal*, 11(2), 115-123.
- Kiss J. 2006. Bouguer anomaly map of Hungary. *Geophysical transactions*, 45, 2: 99 – 104 http://real.mtak.hu/11103/1/GFT_JKiss_english.pdf
- Koler, B., Medved K., Kuhar M. 2006. Projekt nove gravimetrične mreže 1. reda republike Slovenije. *Geodetski vestnik*, 50 (3), 451–460. http://www.geodetski-vestnik.com/50/3/gv50-3_451-460.pdf
- Koler, B., Medved K., Kuhar M. 2012a. The New Fundamental Gravimetric Network of Slovenia. *Acta geodaetica et geophysica Hungarica*, 47(3): 271–286. <http://akademai.com/doi/abs/10.1556/AGeod.47.2012.3.1>.
- Koler, B., Stopar, B., Sterle, O., Urbančič, T., in Medved, K. 2019. Nov slovenski višinski sistem. *Geodetski vestnik*, 63 (1), 27–40. http://www.geodetski-vestnik.com/63/1/gv63-1_koler.pdf
- LaFehr, T.R. 1991. An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction. *Geophysics*, vol 56, 1179-1184. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443138>
- Medved, K., Kuhar, M., Stopar, B., Koler, B. 2009. Izravnava opazovanj v osnovni gravimetrični mreži Republike Slovenije, *Geodetski vestnik* 53, 2: 223-238. http://www.geodetski-vestnik.com/53/2/gv53-2_223-238.pdf
- Medved, K., Kuhar, M., Koler, B. 2019. Regional gravimetric survey of central Slovenia, *Measurement*, 136, 395-404. DOI: [10.1016/j.measurement.2018.12.065](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.065).
- Medved K, Odalović O, Koler B. 2021. New Bouguer Anomaly Map for the Territory of the Slovenia. *Remote Sensing*. 13(22):4510. <https://doi.org/10.3390/rs13224510>
- Meurers, B., Ruess, D. 2009. A new Bouguer gravity map of Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*. 102, 62-70. https://www.univie.ac.at/ajes/archive/volume_102_1/meurers_ruess_ajes_v102_1.pdf
- NGIA 2008. Gravity stations data format and anomaly computations. National Geospatial-Intelligence Agency, Office of Geoint Sciences. <http://bgi.obs-mip.fr/fr/content/download/725/4975/file/computations.pdf>
- Nowell, D. 1999. Gravity terrain corrections - an overview. *Journal of Applied Geophysics*. 42. 117-134. DOI: [10.1016/S0926-9851\(99\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00028-2)
- Omang O.C.D. 2016. Geoid of Slovenia 2016, Interno poročilo, Honefoss, Norwegian Mapping Authority

- Pohánka, V. 1988. Optimum expression for computation of the gravity field of a homogeneous polyhedral body. *Geophys. Prospect.* 36, 733–751. DOI: [10.1111/j.1365-2478.1988.tb02190.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1988.tb02190.x)
- Somigliana, C. 1929. Teoria generale del campo gravitazionale dell'ellissoide di rotazione. *Memorie della Societ' a Astronomica Italiana* 4, 425. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/1929MmSAI...4..425S>
- Stopar, R. 2018. Bouguerove anomalije. v *Geološki atlas Slovenije - Kartografsko gradivo*, 2. popravljena in dopolnjena izd., In: Novak M., Rman N. (Ur.), Ljubljana, Geološki zavod Slovenije. 24-25.
- Tassis, G.A., Grigoriadis, V., Tziavos, I., Tsokas, G.N., Papazachos, C., Vasiljević, I. 2013. A new Bouguer gravity anomaly field for the Adriatic Sea and its application for the study of the crustal and upper mantle structure. *Journal of Geodynamics*, 66: 38–52. DOI: [10.1016/j.jog.2012.12.006](https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.12.006).
- Tiberti, M., Orlando, L., Di Bucci, D., Bernabini, M., Parotto, M. 2005. Gravity anomaly map and crustal model of the Central-Southern Apennines (Italy). *Journal of Geodynamics*, 40: 73-91. DOI: [10.1016/j.jog.2005.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.07.014).
- Ullrich, C., in Medved, K. 2015. A Highly Accurate Absolute Gravimetric Network for Slovenia. 26th IUGG General Assembly 2015, Praga.
- Uredba (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 Republike Slovenije*, št. 57/2014.
- Varga, M.; Stipčević, J. 2021. Gravity anomaly models with geophysical interpretation of the Republic of Croatia, including Adriatic and Dinarides regions. *Geophys. J. Int.*, 226, 2189–2199. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab180>
- Zahorec, P.; Marušiak, I.; Mikuška, J.; Pašteka, R.; Papčco, J. 2017. Understanding the Bouguer Anomaly, Numerical Calculation of Terrain Correction within the Bouguer Anomaly Evaluation (Program Toposk); Roman Pašteka, R., Mikuška, J., Meurers, B., Eds.; Understanding the Bouguer Anomaly: A Gravimetry Puzzle; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 79–92. ISBN 978-0-12-812913-5.
- https://books.google.si/books?hl=en&lr=&id=ue9_DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA79&ots=3l5ABZ7TPw&sig=nQY5RuBxpY_kaoMsKKiTnKd3ZTY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Zahorec, P., Papco, J., Pasteka, R., Bielik, M., Sylvain, B., Braitenberg, C., Ebbing, J., Gabriel, G., Gosar, A., Grand, A., Götze, H. J., Hetényi, G., Holzrichter, N., Kissling, E., Marti, U., Meurers, B., Mrlina, J., Nogová, E., Pastorutti, A., Varga, M. 2021. The first pan-Alpine surface-gravity database, a modern compilation that crosses frontiers. *Earth System Science Data*. 13. DOI: 10.5194/essd-13-2165-2021.
- Žagar T. in Berk S. 2009. Primerjava podatkov SRTM z DMV Slovenije. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008, 14. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 22. januar 2009. Zbornik predavanj. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, str. 77–86.
- Spletna stran CRS-EU, 2016: IT_ROMA40. http://www.crs-geo.eu/nn_124226/crseu/EN/CRS_Description/crs-national_node.html?_nnn=true Pridobljeno 15.2.2020

Analiza geometrijskih lastnosti nedokončanega železniškega predora v Godoviču

Tilen Urbančič*, Božo Koler**, Anže Kovačič***

Povzetek

Na območjih, kjer so potekali različni zgodovinski dogodki, pogosto najdemo številne zanimive objekte. Na področju železniške infrastrukture med zanimivejše objekte uvrščamo tudi nedokončani železniški predor v okolici Godoviča. Graditi so ga začeli med prvo svetovno vojno za potrebe oskrbe fronte. Omenjeni predor je eden izmed podzemnih objektov enotirne železniške proge, ki naj bi povezovala Logatec in Črni Vrh. Gradnja predora se je predčasno ustavila zaradi hitrega premika frontne linije proti zahodu. Danes je predor zapuščen in predstavlja odlično možnost za turistične dejavnosti. Predor smo skenirali s terestričnim laserskim skenerjem in iz dobljenih prostorskih podatkov določili številne geometrijske lastnosti predora. Rezultate smo primerjali z že znanimi geometrijskimi količinami, ki so jih določili jamarji, in s projektiranimi vrednostmi.

Ključne besede: železnica, predor, geometrija, terestrično lasersko skeniranje

Key words: railway, tunnel, geometry, terrestrial laser scanning

Uvod

Številne grajene in naravne objekte kulturne in tehnične dediščine najdemo širom Slovenije. Skrb za ohranjanje in obnove tovrstnih objektov v veliki meri ostaja financirana s strani države. Glede na število objektov kulturne dediščine je skoraj nemogoče, da bi prav vsi bili deležni primerne obravnave. V članku obravnavamo primer zapuščenega in nedokončanega železniškega predora v okolici Godoviča, ki predstavlja ostanek iz prve svetovne vojne. K zbiranju podatkov o samem objektu smo pripomogli na način, da smo s terestričnim laserskim skeniranjem predora zagotovili informacijsko zelo popoln niz prostorskih podatkov, ki predstavlja pomembno arhivsko vrednost ter omogoča podrobno analizo geometrije objekta.

Pedor pri Godoviču je predstavljal enega od podzemnih objektov enotirne železniške proge, s katero so v času prve svetovne vojne želeli izboljšati oskrbo fronte. Ta krak železniške proge je povezoval Logatec in Črni Vrh. Približno pol leta po začetku gradnje, se je oktobra 1917 frontna linija premaknila proti zahodu in železniška povezava za oskrbo fronte ni bila več potrebna. S popolno ustavitvijo del so številni objekti ostali nedokončani. Med njimi je tudi zapuščen predor v okolici Godoviča (Mihevc et al., 2013).

Konec prve svetovne vojne in razdelitev ozemlja sta botrovala, da železniška proga ni bila nikoli dokončana. Kasneje, po letu 1931, so severni del predora predelali in na tem območju zgradili bunker. Bil je del Alpskega zidu, ki je kot del sistema utrdb ščitil italijansko

* Geotočka d.o.o, Tehnološki park 24, 1000 Ljubljana in UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana

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

*** Apolonij 21 d.o.o., Medvedova ulica 25, 1241 Kamnik

mejo. Ker je bila lega bunkerja daleč stran od nove meje po koncu druge svetovne vojne, sta tako predor kot bunker ostala neuporabna in vse bolj zaraščena v gozdu (Mihevc et al., 2013).

Geometrija predora in bunkerja je bila v preteklosti že določena z jamarskim pristopom izmere (Mihevc et al., 2013). Kot del analiz diplomske naloge Kovačič (2021), ki jo povzemamo tudi v tem članku, je bila opravljena primerjava izmerjenih količin. Del primerjav je bil narejen tudi s projektiranimi merami, ki izhajajo iz projektne dokumentacije predora, ki jo hranijo v Mestni knjižnici Idrija.

Geometrijo predora smo določili iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja (TLS). Uporaba TLS se je v zadnjih letih zelo povečala, saj so sodobni skenerji vse manjših dimenzij, omogočajo pa določitev podrobnih in zanesljivih rezultatov v kratkem času (Črček, 2021). K vse pogostejši uporabi TLS pri evidentiranju in drugih analizah v jamah botruje tudi tehnološki razvoj programske opreme, ki omogoča učinkovito obdelavo velike količine podatkov TLS.

Najbolj običajni rezultati obdelave oblakov točk TLS so prepoznane/modelirane ploskve in druge geometrijske oblike, ki so matematično opisljive. Druga možnost je tudi prikaz površin skeniranega objekta z mrežo nepravilnih trikotnikov. Oblaki točk ali izdelani modeli so lahko tudi osnova za izvedbo podrobnejših analiz. Pri grajenih objektih je npr. primer dobre prakse izračun in analiza ravnin iz katerih lahko izvedemo analizo geometričnih lastnosti prelivne stene hidroelektrarne (Kregar et al., 2017). Podoben primer je analiza geometrije objekta oz. vertikalnosti in ravnosti samostojnega zvonika ob cerkvi na Črnem Kalu (Gabršček, 2015) ali npr. zidov same cerkve v Kančevcih (Urbančič, Koler, 2021). Nekaj primerov uporabe tehnologije TLS na področju skeniranja podzemnih prostorov, kjer se je TLS s svojimi prednostmi izkazal kot zelo uporabna metoda, so kraške jame (Črček, 2021; Walters, Hajna, 2020; Blaznik, 2019; Mihevc, Urbančič, 2019; Oludare Idrees, Pradhan, 2016) in rudniki (Ahmad, Ojha, 2015). Kot glavni prednosti tehnologije TLS za uporabo pri skeniranju v predorih sta velika informacijska vrednost in nesporna geometrična korektnost 3D prostorskih podatkov (Wang et al., 2014; Kotsis et al., 2005).

Za nedokončani enotirni železniški predor v bližini Godoviča smo iz oblaka točk TLS določili njegovo geometrijo v 3D in lego v prostoru glede na površje. Poleg umestitve predora v prostor smo želeli z obdelavo podatkov določiti numerične vrednosti razsežnosti predora, kot npr. širine in višine na posameznih mestih predora ter naklon izkopanega predora. Iz podatkov smo izdelali dvodimenzionalne načrte in prikaze. Eden od ciljev raziskave je tudi primerjava in analiza dobljenih rezultatov s projektiranimi vrednostmi in z vrednostmi različnih dimenzij iz članka Mihevc et al. (2013).

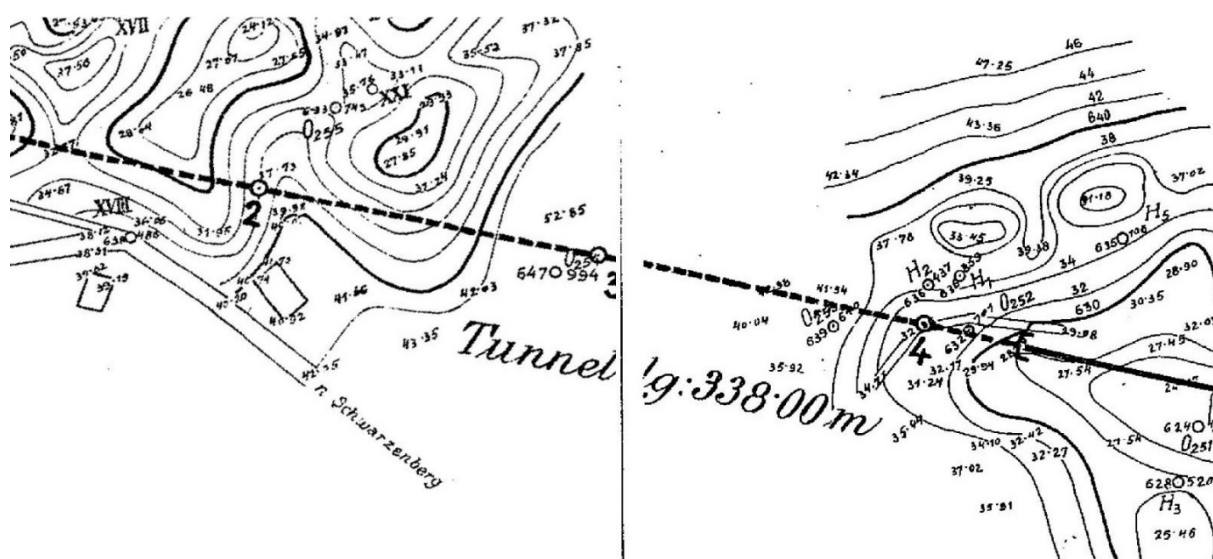
Opis delovišča

Obravnavan predor se nahaja 2 km jugozahodno od naselja Godovič. Orientacija predora je skoraj popolnoma poravnana s koordinatno osjo v smeri sever-jug. Dostop do obeh vhodov je mogoč iz bližnje ceste. Južni vhod je za dostop popolnoma odprt, na severnem vhodu pa je vhod v bunker zaprt s prislonjenimi vrati (slika 1).



Slika 1: Prikaz lokacije predora glede na naselje Godovič: A – bunker in severni vhod, B – predor, C – južni vhod predora (Kovačič, 2021).

Iz projektne dokumentacije lahko dobimo podatke, da je projektirana dolžina predora 388 m, da je severni vhod na nadmorski višini 613 m in južni na višini 618 m. Vzdolžni padec je med obema vhodoma konstanten in znaša 13 ‰. Iz vertikalnega profila projektirane trase vidimo, da naj bi bila višina nadkritja med 10 m in 26 m (Kolmann, 1917).



Slika 2: Skica trase predora iz projekta Normalspurbahn Unter Loitsch Schwarzenberg (Kolmann, 1917).

Izkopavanje predora je potekalo iz obeh strani in sicer po stari avstrijski metodi. Izkopna dela in podpiranje so najprej izvedli v kaloti. Kaloto so z rovom na nivoju stopnice in talnega oboka povezali z vertikalnimi jaški, ki so služili odvozu materiala. V rovu za odvoz materiala lahko še vedno vidimo ostanke ozkotirne železnice za transport izkopanega materiala. Dela so potekala po odsekih oz. kampadah. Južni del predora je ostal v začetnih fazah gradnje. V srednjem delu predora lahko najdemo ostanke lesenih nosilcev in lesene nakladalne konstrukcije. Najbolj dokončan je bil krajši odsek severnega dela predora (slika 3). Predor je kljub nedokončanim delom ostal vse do danes ohranjen v skoraj enakem stanju kot ob prenehanju del, ker se nahaja na območju dobre geološke sestave tal.



Slika 3: Severni del predora, kjer je obok predora v celoti betoniran, s pogledom proti južnemu vhodu, kjer vidimo izkopano kaloto.

Severni portal je bil po letu 1931 s stani italijanske vojske predelan v bunker. Osrednji prostor bunkerja je v obliki kvadra, ki je s površjem povezav z vertikalnim jaškom s kupolo in dodatnim stopniščem. V predor je torej možno dostopati z obeh vhodov. Posledica enostavne dostopnosti je vidna v poškodovanosti posameznih delov bunkerja, kjer so izropani različni jekleni nosilci ipd.

Uporabljene metode

Geodetski datum izmere

Zaradi želje po povezljivosti prostorskih podatkov skeniranja predora z ostalimi prostorskimi podatki, smo predhodno na območju obeh vhodov vzpostavili geodetski mreži. Na južnem portalu geodetsko mrežo sestavlja 6 točk, na severni 5. Za določitev koordinat točk v državnem koordinatnem sistemu D96/TM in višinskem datumu SVS2010/Koper, smo na vseh točkah opravili hitro statično GNSS izmero. Koordinate GNSS izmere so bile uporabljene kot dane za izvedbo transformacije izravnanih koordinat geodetske mreže, ki je bila izmerjena klasično s tahimetrom. Izmera horizontalnih kotov, zenitnih razdalj in poševnih dolžin je bila opravljena v petih ponovitvah v obeh krožnih legah. Z izravnavo geodetke mreže smo zagotovili koordinate točk, ki v relativnem smislu zagotavljajo milimetrsko natančnost.

Geodetski mreži sta predstavljali koordinatno osnovo za določitev koordinat oslonilnih točk terestričnega laserskega skeniranja, s katerimi smo georeferencirali registriran oblak točk predora in bunkerja.

Terestrično lasersko skeniranje in predobdelava oblakov točk

Osnovni vir za izvedbo raziskovalnega dela je predstavljal oblak točk TLS. Glede na dobre lastne izkušnje in izkušnje drugih avtorjev smo se odločili za uporabo slikovnega terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 (slika 4), ki omogoča dovolj dobro prostorsko ločljivost in natančnost skeniranih točk. Tehnične lastnosti skenerja so zbrane v preglednici 1.



Slika 4: Slikovni terestrični laserski skener Leica BLK360 pri delu.

Preglednica 1: Tehnične lastnosti skenerja Leica BLK360.

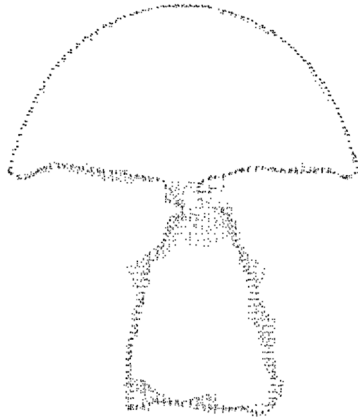
SKENIRANJE	
Varnost	Laser razred 1
Vidno polje	360°(horizontalno) × 300°(vertikalno)
Merilni doseg	0,6 m – 60 m
Hitrost	360000 točk/sekundo
Ločljivost	5 mm, 10 mm ali 20 mm na 10 m
Natančnost merjenja dolžine	4 mm na 10 m, 7 mm na 20 m
Natančnost 3D	6 mm na 10 m, 8 mm na 20 m
ZAJEM SLIKOVNEGA GRADIVA	
Fotografija	15,1 MP sistem 3 kamer, HDR, LED bliskavice Zajem kalibrirane sferične fotografije (150 MP) Vidno območje 360° × 300°
Termografija	Najsodobnejša tehnologija FLIR Zajem dolgovalovne IR (LWI) panoramske slike Vidno območje 360° × 70°

Za osnovno obdelavo oblakov točk smo uporabili program Leica Cyclone REGISTER 360. V tem primeru kot osnovno obdelavo obravnavamo koraka registracije in georeferenciranja. Pri registraciji oblakov točk zunaj predora smo zaradi posebnosti registracije z metodo ICP (angl. Iterative Closest Points), ki registracijo izvede z minimiziranjem 3D razdalje med dvema oblakoma točk, oblake z vegetacijo primerno obrezali. Na ta način smo v postopku registracije upoštevali le površine, kjer je odbojna površina dobra, posledično je boljša tudi natančnost skeniranih točk. Registracija za večino parov oblakov običajno poteka samodejno, za sete z manj preklopi pa moramo predhodno približno registracijo izvesti ročno.

Oslonilne točke smo na terenu označili s črno belimi tarčami, oblike znaka BMW. Za georeferenciranje registriranega oblaka točk uvozimo seznam oslonilnih točk, ki morajo imeti enako poimenovanje kot točke, ki smo jih določili v oblakih točk posameznih stojišč v programu. V kolikor algoritem sam ne zazna oslonilnih točk, jih lahko določimo tudi ročno. Predobdelavo oblakov točk smo v programu Leica Cyclone REGISTER 360 končali z izvozom georeferenciranih podatkov v formatu *.pts.

Določitev geometrijskih lastnosti iz oblaka točk

Osnovni rezultat obdelave oblakov točk so bili izrisani prečni profili. Nekaj rezultatov smo pridobili tudi z neposrednim merjenjem med različnimi točkami v oblaku točk. Obdelavo podatkov smo poskusili čim bolj avtomatizirati, zato smo za obdelavo uporabili različne programe. Najprej smo uporabili programe LAStools. Odločili smo se, da za izreze prečnih profilov, oblak točk glede na os predora najprej zarotiramo v smeri ene od koordinatnih osi (program *las2las* in uporaba funkcije *rotate_xy*). Iz rotiranega oblaka točk smo za izbrane položaje vzdolž osi predora izrezali rezine izbrane 1 m (program *las2las* in uporaba funkcije *keep_y*). Ker smo izrezane profile uporabili za izrise prečnih profilov v programu Civil 3D, smo izrezan oblak točk rotirali v 2D ravnino tako, da smo zamenjali koordinati y in z (program *las2las* in uporaba funkcije *switch_y_z*). Z izvozom podatkov v *.txt formatu smo imeli pripravljeno datoteko za uporabo v CAD programih. Primer rotiranega izreza enega od prečnih profilov prikazujemo na sliki 5.



Slika 5: Primer izreza prečnega profila iz oblaka točk.

Rezino oblaka točk smo uporabili za vektorizacijo oz. izris profila v programu Civil 3D. Uporabili smo funkcijo spline. Izrisane profile smo kotirali za želene količine in jih uporabili kot glavni grafični rezultat. Glede na terenski ogled in stanje predora ter bunkerja smo se odločili, da izdelamo 19 prečnih profilov. Na zelo podoben način smo s spremembo nekaterih parametrov in ukazov v programih LAStools izdelali vzdolžni profil predora ter različne prereze obeh stopnic bunkerja ter tloris predora in bunkerja. Tako izdelane grafične prikaze smo uporabili za primerjavo dimenzij s projektiranimi vrednostmi in vrednostmi, ki so bile z jamomerskimi metodami izmere določene v Mihevc et al., (2013).

Terenska izmera

Vso terensko delo smo opravili 12. junija 2020. Najprej smo signalizirali oslonilne točke. Položaje petih oslonilnih točk smo določili z izmero iz geodetskih mrež na območjih obeh vhodov. Uporabili smo tahimeter Leica Flexline TS06, ki ima deklarirano natančnost merjenja kotov 2" in natančnost merjenja dolžin $2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$. Koordinate smo določili neposredno na terenu na osnovi vnaprej znanih koordinat. Izmero smo nadaljevali s skeniranjem predora in bunkerja (slika 6).



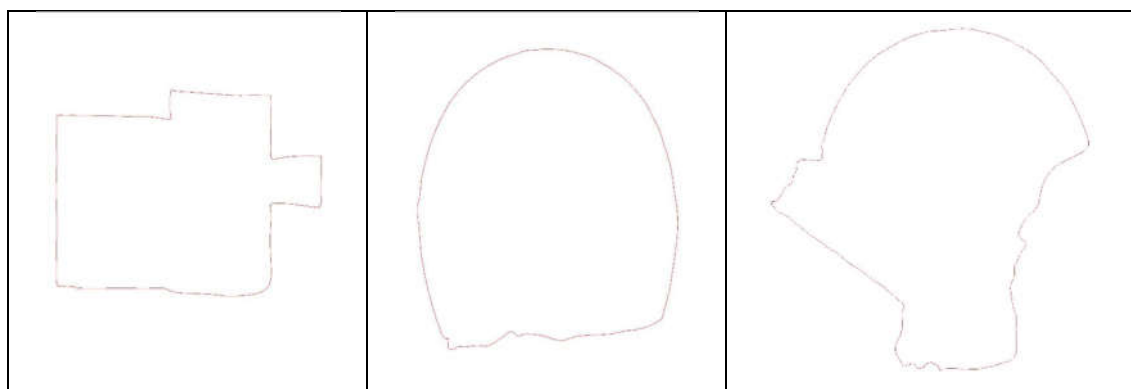
Slika 6: Jašek, ki se na vrhu zaključí s pokrito kupolo.

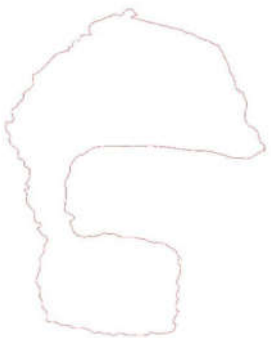
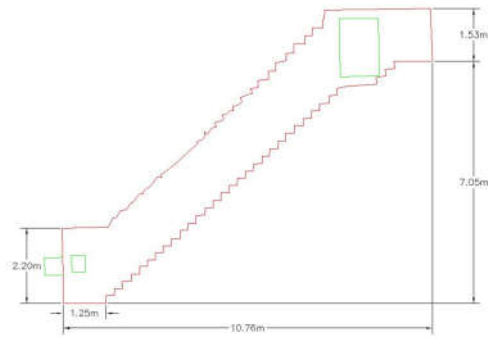
Pot skeniranja nas je vodila od južnega vhoda po rovu na spodnjem nivoju predora do bunkerja. Nadaljevali smo s skeniranjem bunkerja z obema stopniščema ter vertikalnega jaška s kupolo. Zadnji del skeniranja je vključeval vse predele na nivoju kalote v smeri proti južnemu izhodu. Registriran oblak točk sestavlja 81 oblakov točk. Povprečna razdalja med stojišči je v predelu predora znašala okoli 10 m.

Rezultati iz obdelav oblakov točk laserskega skeniranja

Po registraciji smo ugotovili, da znaša srednje prekrivanje med oblaki točk 41 % in da srednje odstopanje registracije znaša 7 mm. Kakovost georeferenciranja smo ocenili s srednjim odstopanjem na oslonilnih točkah in znaša 3,2 mm. Dobljena točnost in natančnost oblaka točk več kot zadostuje za analize, ki smo jih opravili.

Ker je izvorni oblak točk vključeval kar 230 milijonov točk, smo ga v programu RiSCAN PRO razredčili z Octree filtrom na 10 cm. Oblak točk, ki smo ga uporabili za analize, je vključeval 2,5 milijona točk. Sledila je obdelava oblakov točk, ki smo jo predstavili med uporabljenimi metodami. Rotacijo in izrezovanje profilov smo naredili s programi LAStools, izrise pa s programom Civil 3D. Nekaj karakterističnih prereзов prikazujemo na sliki 7.



Del hodnika v bunkerju.	Severni del predora, kjer je obok predora v celoti betoniran.	Zgornji del (kalota) je betoniran. Spodnji del izkopa dokončan na levi strani.
		
Prerez na območju vertikalnega jaška med nivojem kalote in stopnice.	Stopnišče do južni stopnic pri severnem vhodu.	

Slika 7: Predstavitev nekaterih karakterističnih prereзов.

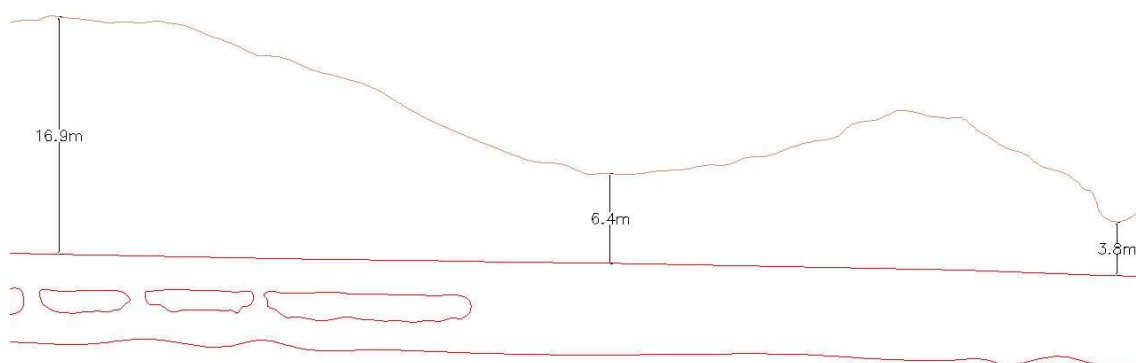
Popolnost in visoka informativna vrednost oblaka točk TLS predstavljata odlično izhodišče za popolno geometrijsko analizo predora in bunkerja. Teoretično lahko določimo katerokoli dimenzijo skeniranega objekta, ki je vključen v oblak točk.

Projektirana dolžina predora znaša 388 m. Ohranjen del predora brez bunkerja je dolg nekaj manj kot 356 m. Skupaj z bunkerjem dolžina predora znaša 391 m. Sklepamo lahko, da je bunker skoraj v celoti zgrajen na območju severnega portala predora in njegovi notranjosti.

V članku Mihevc et al. (2013) so določili približno višino južnega vhoda predora na nadmorski višini 618 m. Iz naše izmere sledi, da je vhod na višini 620,1 m. Nekoliko manjšo razliko smo ugotovili na severnem vhodu, kjer naj bi imel vhod višino 613 m, mi pa smo izmerili 614,5 m.

Iz projektne dokumentacije lahko razberemo, da naj bi bil naklon železnice 13 %. Na osnovi izračunov iz oblaka točk za območja na nivoju tal smo izračunali, da je naklon izkopanih tal pod naklonom 14 %.

Dimenzije prečnih profilov (višine in širine) se skladajo s številkami, ki so jih določili Mihevc et al. (2013), saj so odstopanja reda velikosti nekaj centimetrov. Rov za odvoz materiala ima povprečno višino in širino okoli 2 m. Za del predora, ki je dokončan znaša višina predora 6,5 m in širina 4,6 m. Največjo razliko med vsemi dimenzijami smo ugotovili pri navajanju višine nadkritja. Pri analizi smo dodatno uporabili oblak točk reliefa aerolaserskega skeniranja, ki je dostopen na portalu eVode na spletni strani Agencije RS za okolje. Mihevc et al. (2013) navajajo, da naj bi bila minimalna debelina nadkritja le 10 m. Ob uporabi modela reliefa in skeniranega predora smo ugotovili, da je nadkritja na enem delu veliko manj, in sicer le 3,8 m (slika 8). Največje nadkritje znaša 26,7 m in se povsem sklada s predhodnimi izmerami in podatki.



Slika 8: Izris vzdolžnega profila predora in terena nad predorom.

Zaključek

Iz oblaka točk pridobljenega s TLS smo analizirali geometrijo nedokončanega železniškega predora v okolici Godoviča, ki so ga začeli graditi v času prve svetovne vojne. Zaradi hitrih premikov fronte ni bilo potrebe, da bi ga dokončali. V času druge svetovne vojne so severni del predora predelali v bunker.

Izhajali smo iz georeferenciranega oblaka točk TLS. Umestili smo ga v državni koordinatni sistem. Na ta način lahko poleg relativnih količin analiziramo tudi njegovo lego v prostoru in npr. oddaljenosti od drugih objektov. Večino dimenzij predora in bunkerja smo določili z izmero iz 3D oblaka točk oz. izrisanih 2D prerezov. Vse količine smo uporabili za primerjavo s projektiranimi vrednostmi oz. z vrednostmi jamomerskih meritev (Mihevc et al., 2013). Pri izdelavi številnih prečnih, vzdolžnih in tlorskih prerezov smo se osredotočili na posamezne karakteristične oblike v predoru, ki so povezane z različnimi fazami izkopnih in podpornih del. Del analiz smo opravili tudi na bunkerju ter stopniščih.

S primerjavo naših in predhodnih meritev smo ugotovili, da se podatki v veliki meri ujemajo. Očitno razliko smo opazili le pri nadmorskih višinah vhodov v predor: razlika je znašala na južnem vhodu 2,1 m in na severnem vhodu 1,5 m. Največjo razliko smo opazili pri določitvi minimalnega nadkritja, kjer se podatki razlikujejo za 6,2 m.

Dobljeni rezultati in opravljene analize so nas vodile do pridobitve iskanih informacij. Bolj pomembno kot same izvrednotene količine je sam oblak točk, ki predstavlja popoln arhivski prostorski podatek predora ter osnovo za morebitne nadaljnje prostorske razvojne aktivnosti na tem območju. Gre namreč za zanimiv in pomemben objekt slovenske tehnične dediščine, ki še čaka na obravnavo v smislu ohranjanja, saj je trenutno obsojen na propadanje.

Literatura in viri

- Ahamad, N., Ojha, S. K. (2015). The practical application of laser scanning in a mining environment. V: Conference: 2nd National Conference on Mining Equipment: New Technologies, Challenges and Applications (MENTCA 2015). Dhanbad: Indian School of Mines, pp. 9-10.
- Blaznik, A. (2019). Geodetski monitoring v kraški jami Ulica pečina. Magistrsko delo, UL FGG.
- Črček, J. (2021). Primerjava BLK360 in Riegl VZ-400 za skeniranje jam. Magistrsko delo, UL FGG.
- Gabršček, T. (2015). Analiza geometrije objekta kulturne dediščine iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja. Diplomsko naloga, UL FGG.
- Kolmann, J. (1917). Normalspurbahn Unter Loitsch Schwarzenberg. Langenprofil Trassenführung uber Godovič won Km.+200 bis Bhf. Podjesenom.
- Kotsis, I., Spyros, K., Gikas, V. (2005). 3D Terrestrial Scanner for Tunnel Surveying: Hints and Tips and Comparison with Conventional Methods. V: International Symposium on Modern

- Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields. Sofia, Bulgaria. pp. 3-5.
- Kovačič, A. (2021). Določitev geometričnih lastnosti nedokončanega železniškega predora v Godoviču. Diplomsko naloga, UL FGG.
- Kregar, K., Štebe, G., Marjetič, A. (2017). Preverjanje stabilnosti ploskovnega objekta s terestričnim laserskim skeniranjem. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del, Ljubljana, 26. januar 2017, 81-92.
- Mihevc, A., Lajovic, A., Ferk, M., Tičar, J. (2013). Unfinished railway tunnel and bunker at Godovič. V: Filippi, M. (ur.), Bosák, P. (ur.). Conference: 16th International Congress of Speleology. Brno: Czech Speleological Society: pp. 221–223.
- 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.
- Oludare Idrees, M., Pradhan, B. (2016). A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: a review of sensors, method and application development. International Journal of peleoology 45, 1: 71–88.
- Urbančič, T., Koler, B. (2021). Geodetski monitoring cerkve sv. Benedikta v Kančevcih. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2020: zbornik del, Ljubljana, 30. januar 2021, 34-49.
- Walters, R., Zupan Hajna N. (2020). 3D laser scanning of the natural caves: example of Škocjanske jame. Geodetski vestnik, 64, 1: 89-103.

Avtomatski sistem za analizo SEVESO dogodka, primer Cinkarne Celje

Boštjan Grašič*, Marija Zlata Božnar*, Primož Mlakar*,
Bernarda Podgoršek**, Barbara Kolar**, Nikolaja Podgoršek Selič**

Povzetek

Direktiva 2012/18/EU Evropskega parlamenta in Sveta z dne 4. julija 2012 o obvladovanju nevarnosti večjih nesreč, v katere so vključene nevarne snovi (tako imenovana Seveso-III direktiva) določa ukrepe za preprečevanje večjih nesreč in zmanjševanje njihovih posledic za ljudi in okolje in s tem kontrolo nad obrati v industriji kjer so v uporabi potencialno nevarne snovi, ki bi lahko bile ob nesreči izpuščene v okolje. »Ta direktiva določa pravila za preprečevanje večjih nesreč, v katere so vključene nevarne snovi, ter omejevanje njihovih posledic za človekovo zdravje in okolje, da se v vsej Uniji na skladen in učinkovit način zagotovi visoka raven varstva« (SEVESO-III). V slovensko zakonodajo je prenešena v Uredbi o preprečevanju večjih nesreč in zmanjševanju njihovih posledic (Uradni list RS, št. 22/16).

Cinkarna Celje d.d. (Cinkarna) je kemijsko predelovalno podjetje in se uvrsti med obrate majšega tveganja za okolje skladno z merili Uredbe za katerega ima okoljevarstveno dovoljenje. Izdelane imajo analize večjih nesreč z nevarnimi snovmi v okviru katerih so predvideli potencialno možne scenarije. V takih primerih lahko v obratu pride do izpustov nevarnih snovi v ozračje, ki jih lahko štejemo med vplive na okolje kot jih obravnava SEVESO direktiva. Cinkarna si prizadeva, da bi bila na ukrepanje po takih nezgodnih dogodkih kar najbolje pripravljena. Ključna informacija za ukrepanje ob nezgodnem izpustu v ozračje je, kam se bo oblak potencialno nevarnih snovi razširil in kakšne bodo koncentracije v ozračju v talnem sloju kjer so ljudje.

Zato smo v MEIS d.o.o. v sodelovanju s Cinkarno razvili avtomatski sprotno delujoči sistem za napovedovanje razširjanja nevarnih snovi ob nezgodnem izpustu iz Cinkarne. Sistem vnaprej računa hipotetične dogodke zato, da so ob morebitni nezgodi ali nesreči rezultati takoj na voljo. Metodologija je opisana v Mlakar, 2019.

Sistem deluje v realnem času in vsake pol ure preračuna nov začetek dogodka – morebitnega izpusta v ozračje. Sistem razvoj dogodka preračuna za tekoči čas in za naslednje 3 ure v prihodnosti. Preračun izvedemo z uporabo merjenih in prognoziranih meteoroloških podatkov. Razširjanje onesnaževal v ozračju izračunamo z uporabo Lagrangeevega modela delcev, ki smo ga poprej uspešno validirali na podobnem področju v Sloveniji.

V Cinkarni imajo rezultate vseskozi na voljo za deset potencialnih izpustov v ozračje. Če pride do izpusta, lahko na osnovi rezultatov takoj presodijo o vrsti ukrepov in obveščanju javnosti z namenom varovanja zdravja ljudi in okolja.

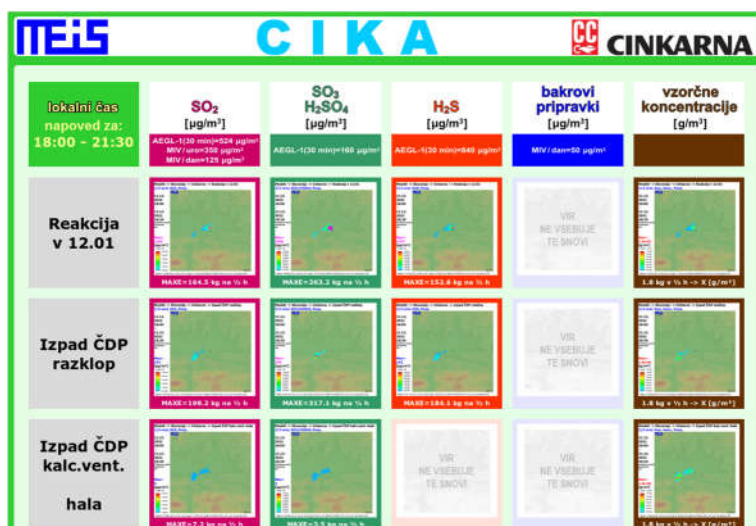
Na slikah, ki sledijo, prikazujemo nekaj primerov iz prikaza rezultatov, ki so na voljo pooblaščenim osebam v Cinkarni.

Ključne besede: SEVESO, ukrepanje ob nezgodnem izpustu, razširjanje onesnaženja v ozračju, Lagrangev disperzijski model delcev, varovanje prebivalstva

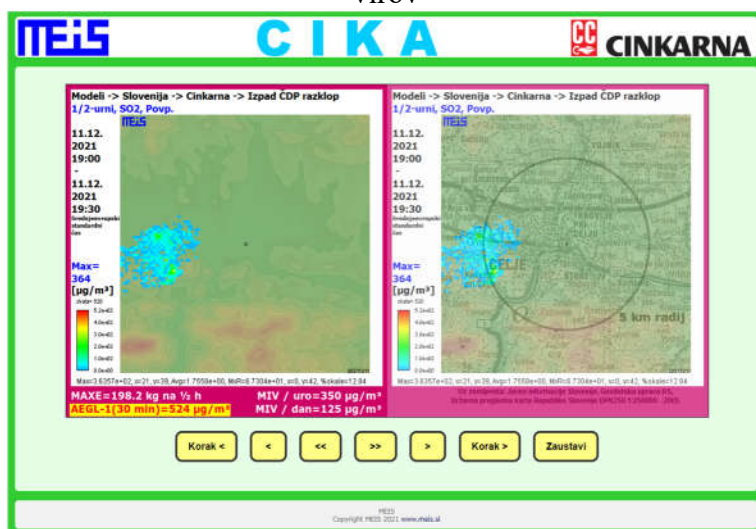
Key words: SEVESO, accidental release action, air pollution dispersion, Lagrangian particle dispersion model, protection of population

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

** Cinkarna Celje d.d., Kidričeva ulica 26, 3000 Celje, Slovenija



Slika 1 - Del glavnega prikaza za pooblašene osebe v Cinkarni – prikaz za tri od desetih virov



Slika 2 - Primer podrobnega prikaza za izbrani vir in izbrano snov ter izbrani čas

Literatura

Evropska unija, DIREKTIVA 2012/18/EU EVROPSKEGA PARLAMENTA IN SVETA z dne 4. julija 2012 o obvladovanju nevarnosti večjih nesreč, v katere so vključene nevarne snovi, ki spreminja in nato razveljavlja Direktivo Sveta 96/82/ES, Uradni list Evropske unije, 24.7.2012

Mlakar, P., Božnar, M.Z., Grašič, B., Breznik, B. (2019). "Integrated system for population dose calculation and decision making on protection measures in case of an accident with air emissions in a nuclear power plant", Science of the total environment, vol. 666, str. 786-800, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.309>

Napoved dnevnih ekstremov temperatur iz radisondažnih meritev z uporabo nevronske mreže

Gregor Skok*, Doruntina Hoxha*, Žiga Zaplotnik*

Povzetek

Različni modeli, ki bazirajo na nevronske mreže, so se uporabili za napoved dnevnih ekstremov temperatur na 2 m v Ljubljani. Za vhodne podatke se je uporabil set 3800 radisondažnih meritev (meritve z meteoroloških balonom) izmerjenih v Ljubljani v obdobju 2004-2019. Modeli so se uporabili za izdelavo napovedi, ki segajo od 0 do 500 dni v prihodnost. Namen analize ni bil razvoj modela, ki bi bili boljši od operativnih numeričnih modelov za napovedovanje vremena, ampak predvsem raziskati zmogljivosti nevronske mreže za tovrstne napovedi. Natančneje, naš cilj je bil razumeti, kako modeli, ki temeljijo na nevronske mreže, uporabljajo različne vrste vhodnih podatkov in kako zasnova omrežja in njegova kompleksnost vpliva na njihovo vedenje. Analiza je pokazala, da se pri kratko in srednjeročnih napovedih modeli zanašajo predvsem na radisondažne podatke iz najnižjih plasti - večinoma na temperaturo v spodnjem kilometru. Pri dolgoročnih napovedi (npr. ~100 dni) modeli upoštevajo podatke iz celotne troposfere. Z dolžino napovedi se napaka najprej povečuje, pri zelo dolgoročnih napovedih pa pride do periodičnega obnašanja napake. Pri kratkoročnih napovedih je modelska napoved boljša od persistence in klimatološke napovedi, vendar postane slabša od klimatološke napovedi že drugi ali tretji dan. Napoved se nekoliko izboljša, če kot vhodni parameter dodamo še meritve temperaturnih ekstremov iz predhodnega dne. Najboljša napoved se doseže, ko se kot prediktor doda tudi klimatološka vrednost ekstrema, pri čemer se najboljše izboljšanje doseže pri dolgoročnih napovedih, kjer se napaka modela omeji na napako klimatološke napovedi. Analiza je objavljena v članku: Skok, G.; Hoxha, D.; Zaplotnik, Ž., 2021, Forecasting the Daily Maximal and Minimal Temperatures from Radiosonde Measurements Using Neural Networks. Appl. Sci., 11, 10852. <https://doi.org/10.3390/app112210852>

Ključne besede: temperatura na 2 m, nevronske mreže, radiosonda

Keywords: 2 m temperature, neural networks, radiosonde

* Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Univerza v Ljubljani.