



Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

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

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2025

zbornik del

31. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 5. februar 2026

UREDNIŠKI ODBOR

Miran Kuhar, Matjaž Ličer, Ina Cecić, Mojca Šraj, Gregor Skok, Klemen Medved, Mihaela Triglav Čekada, Rudi Čop, Nina Zupančič, Tamara Jesenko, Polona Vreča

RECENZIJA

Janez Turk
Mira Kobold
Miran Kuhar
Miha Pavšek
Stanka Šebela
Gregor Rajh
Maja Koprivšek
Katja Oven
Klemen Ritlop
Simona Savšek
Danijela Birko

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/2026/SZGG_Zbornik_2026_e-publikacija.pdf

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

[COBISS.SI-ID=267141379](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:si:coiis-267141379)

ISBN 978-961-95299-8-0 (PDF)

Vsebina

Predgovor	5
Prvi del: recenzirani prispevki	
Tanja Cegnar - EMS2025: Transformacija atmosferskih znanosti z vse večjo uporabo algoritmov umetne inteligence in strojnega učenja	7
Andrej Gosar - Pomen globoke raziskovalne vrtine v Bovški kotlini za seizmologijo in ocenjevanje potresne nevarnosti – projekt DOVE	17
Stanka Šebela - Mikro-klimatski monitoring v izbranih turističnih jamah v Sloveniji v obdobju pred, med in po COVID-19	27
Rudi Čop - Vpliv telurskih tokov na meritve lokalnega magnetnega polja	33
Mark Bryan Alivio, Mojca Šraj, Nejc Bezak - Improved modeling of tree rainfall interception in urban hydrology: Quantifying the stormwater reduction by birch (<i>Betula pendula</i> Roth.) and pine (<i>Pinus nigra</i> Arnold) trees	43
Lana Radulović, Mojca Šraj, Borbala Szeles, Juraj Parajka, Günter Blöschl, Dušan Marjanović, Urša Vilhar, Janez Pavčič, Peter Strauss, Mark Bryan Alivio, Tamara Kuzmanić, Klaudija Lebar, Nejc Bezak, Katarina Zabret - Primerjalna analiza prepuščenih padavin pod borom, pod drevesi v mešanem gozdu in pod koruzo	55
Uroš Novak, Roger Bilham, Blaž Vičič, Abdelkrim Aoudia - Anomalous shallow fault creeping event on the Idrija Fault in summer 2025	67
Adna Vukalić, Nina Bončina, Tanja Skumavc, Mihaela Triglav Čekada - Snežišča pod Prisojnikom in v Martuljski skupini iz fotografij in spletnih kamer	73
Astrid Švara, Andrej Gosar - Uporaba geofizikalnih metod pri odkrivanju jamskih rogov in sedimentnih zapolnitev (Jamski sistem Loza, Z Slovenija)	87
Polona Pavlovčič Prešeren, Miran Kuhar, Klemen Ritlop, Oskar Sterle, Maja Filač, Bojan Stopar, Franc Dimc, Matej Bažec, Mihaela Triglav Čekada, Natalija Novak, Niko Fabiani, Aljaž Blatnik, Andrej Lavrič, Luka Zmrzlak, Staš Dolinšek, Boštjan Batagelj - Motnje signalov GNSS: vloga omrežij SIGNAL in 0. red pri zanesljivem pozicioniranju in sinhronizaciji časa na območju Slovenije.....	103
Izidor Tasič, Jurij Pahor, Tamara Jesenko - Seizmični odtis (nadzorovane) razstrelitve bombe iz druge svetovne vojne v Tržaškem zalivu na slovenskih potresnih opazovalnicah.....	117
Bojan Stopar, Klemen Ritlop, Polona Pavlovčič Prešeren, Oskar Sterle - Geokinematski model Slovenije.....	125
Mihaela Triglav Čekada, Bojan Stopar, Katja Hrobat Virloget - Trigonometri, mejniki in zgodbe	139

Drugi del: razširjeni povzetki

Gregor Skok, Sabin Roman, Ljupčo Todorovski, Sašo Džeroski - Approximating the universal thermal climate index using sparse regression with orthogonal polynomials	147
Matic Pikovnik - Severna Hadleyjeva celica je v radiosondažah močnejša kot v reanalizah, z dolgoročnim trendom slabljenja	149
Grega Zrim, Boris Orel, Jože Rakovec - Ocenitev jasnega neba iz pirgeometričnih meritev na Krvavcu	151
Polona Vreča - In memoriam Charles Fierz	155

Predgovor

Pred vami je zbornik srečanja Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko z aktivnostmi v lanskem letu 2025. Večkrat poudarjam, da osrednji problemi danes niso povezani z znanstvenim razumevanjem planetarnih procesov, temveč predvsem z nemočjo prelivanja tega znanja v politične odločitve, ki bi nas hitreje preusmerile k bolj vzdržnim scenarijem planetarnega in družbenega razvoja. Če danes spremljamo dogajanje v ZDA, od koder prihajajo v Evropo novice o ukinjanju njihove ključne atmosferske institucije National Center for Atmospheric Research (NCAR) v Koloradu, pa o rezih financiranja geofizikalnih raziskav, ki so v sodobni zgodovini brez precedensa, ali pa lažšanju okoljskih regulacij na Aljaski, je težko obdržati optimizem glede trajektorije, na katero stopamo. To resignacijo lahko razumem, in edini komentar, ki ga premorem, bi bil ta, da se pri optimizmu ne gre zanašati le na ta vidik. Morda je vsaj nekoliko pomirjujoče videti tudi njegovo hrbtno plat: vedno večji del prebivalstva geoznanstvenikom verjame in podnebne in druge spremembe razume kot enega ključnih problemov, ki ga moramo rešiti kot človeštvo. Pred 15 leti to ni bilo tako in to je sprememba na boljše. Tudi vlaganja v zeleno energijo rastejo in Kitajska je morda lani ali letos dosegla vrh svojih ogljičnih emisij, tako da lahko upamo, da se bo ta trend nadaljeval.

Seveda geoznanosti niso le podnebje. Vsako leto sem navdušen, koliko različnih področij se dotikajo prispevki članov SZGG. In če se v teh dezorientiranih časih kdo sprašuje, kaj lahko sam naredi, bi odgovoril, da lahko največ naredimo tako, da še naprej dobro delamo to, kar znamo dobro delati. Vsem skupaj želim, da najdemo svoj fokus v šumu vsakdana, da se bomo lahko tudi prihodnje leto veselili podobno raznolikih in zanimivih prispevkov kot letos.

predsednik SZGG

dr. Matjaž Ličer

EMS2025: Transformacija atmosferskih znanosti z vse večjo uporabo algoritmov umetne inteligence in strojnega učenja

Tanja Cegnar¹

Ključne besede: razvoj meteorologije, strojno učenje, umetna inteligenca, storitve za družbo, Učinkovito komuniciranje

Keywords: advances in meteorology, machine learning, artificial intelligence, services to society, effective communication

Uvod

Letos smo letno srečanje Evropske meteorološke zveze (EMS) gostili v Cankarjevem domu v Ljubljani. S sprejemom za dobrodošlico udeležencem, se je srečanje začelo v nedeljo, 7. septembra, zaključilo pa v petek, 12. septembra 2025. V lokalnem odboru za izvedbo konference smo moči združili Slovensko meteorološko društvo, Agencija RS za okolje in Univerza v Ljubljani. Konferenca je potekala v hibridnem formatu, od 704 udeležencev jih je bilo 615 prisotnih v Cankarjevem domu, 89 pa prek povezave. Zastopanih je bilo 49 držav, od tega se je letnega srečanja 300 udeležencev udeležilo prvič. Najštevilčnejši so bili udeleženci iz Nemčije (109), sledili so Italijani (77), Slovenija pa je bila tretja s 67 udeleženci.

Letna srečanja EMS so namenjena spodbujanju pretoka idej in znanja med strokovnjaki iz meteorološke, klimatološke in sorodnih skupnosti. Cilj je povezovanje znanosti, aplikacij in deležnikov v javnem, zasebnem, akademskem in nevladnem sektorju – v korist družbe v Evropi in širše.

Evropska meteorološka zveza

Pred začetkom konference je potekala letna skupščina Evropske meteorološke zveze. Članice EMS so državna in regionalna meteorološka društva iz Evrope, pri čemer se za Evropo šteje območje Šestega regionalnega združenja Svetovne meteorološke organizacije. EMS ima 37 društev članic in 31 pridruženih članov. Pridruženi člani so organizacije, ki jih zanimajo cilji društva in ga aktivno podpirajo. Med njimi so neevropska meteorološka društva, državne meteorološke in hidrološke službe, raziskovalni ter izobraževalni inštituti, univerzitetni oddelki in podjetja, ki jih zanimajo meteorologija, sorodne znanosti ter njihova uporaba. Sem sodijo tudi vseevropske organizacije kot so EUMETSAT, ECMWF, EUMETNET in VAISALA ter številne državne meteorološke službe, raziskovalni inštituti ter privatna podjetja.

Vodilna tema konference

Vodilno temo konference izbere Lokalni organizacijski odbor, ki s tem vdihne konferenci lokalni pečat. Odločili smo se za naslov "Naraščajoča uporaba umetne inteligence/strojnega učenja v atmosferskih vedah in meteoroloških aplikacijah s poudarkom na poplavah in opozorilih". S tem izborom smo želeli poudariti transformativno vlogo umetne inteligence

¹ Slovensko meteorološko društvo, Vojkova cesta 1 b, Ljubljana

(UI) in strojnega učenja (SU) pri obdelavi atmosferskih podatkov, napovedovanju vremena, zgodnjem opozarjanju na ekstremne dogodke in razumevanju podnebnih sprememb.

Umetna inteligenca in strojno učenje znanstvenikom omogočata obdelavo ogromnih količin atmosferskih podatkov z izjemno hitrostjo in natančnostjo. To omogoča prepoznavanje zapletenih vzorcev znotraj atmosferskih sistemov, kar vodi do natančnejših kratkoročnih in dolgoročnih napovedi.

Modeli, ki jih poganja umetna inteligenca/strojno učenje, revolucionarno spreminjajo način napovedovanja nevarnih vremenskih pojavov in odzivanja nanje. Z analizo podatkov v realnem času iz različnih virov, vključno s sateliti, radarji in senzorji na zemeljskem površju, lahko algoritmi umetne inteligence/strojnega učenja pomagajo pri ustvarjanju pravočasnih in natančnih opozoril, kar omogoča sprejemanje proaktivnih ukrepov za zaščito življenj in premoženja. Nujnost nadaljnjega izboljšanja sistemov za zgodnje opozarjanje potrjujejo nedavni vremenski dogodki z velikim vplivom v Evropi in zunaj nje, kar je prepoznano v pobudi EW4ALL (ang. "Early Warnings for All", Zgodnja opozorila za vse), ki so jo sprožili Svetovna meteorološka organizacija (WMO) in partnerji.

Poleg tega umetna inteligenca/strojno učenje odkriva dragocene vpoglede v gonilne sile in posledice podnebnih sprememb. Z analizo zgodovinskih podnebnih podatkov in modeliranjem prihodnjih scenarijev lahko znanstveniki bolje razumejo vplive človeških dejavnosti na okolje in razvijejo strategije za ublažitev podnebnih tveganj.

Na vodilno temo konference je bila uglasena tudi ponedeljkova slovesna plenarna seja.

Slovesna plenarna otvoritvena seja

Predstavitve so se začele v ponedeljek zjutraj, slovesno plenarno zasedanje pa je bilo v ponedeljek popoldne. Začelo se je s panelno razpravo "Uporaba umetne inteligence: preoblikovanje sistemov zgodnjega opozarjanja in napovedovanja poplav", ki jo je povezovala predsednica EMS, prof. Liz Bentley. O naraščajoči uporabi umetne inteligence/strojnega učenja v atmosferskih znanostih in možnosti, ki jih nova orodja ponujajo, so razpravljali:

dr. Stefan Uhlenbrook, direktor oddelka za hidrologijo, vodo in kriosfero pri Svetovni meteorološki organizaciji;

dr. Florence Rabier, generalna direktorica ECMWF;

dr. Kristine Dale, vodja skupine za umetno inteligenco v meteorološkem uradu;

dr. Gabriela Aznar, skupina za razvoj umetne inteligence za operativne aplikacije pri MeteoSwiss;

dr. Alan Hally, znanstveni vodja ekipe za umetno inteligenco pri Met Ireann in

dr. Monique Kuglitsch, vodja inovacij pri Fraunhofer HHI in predsednica globalne pobude ITU/WMO/UNEP/UNFCCC/UPU o odpornosti na naravne nesreče z rešitvami umetne inteligence.



Slika 1 - Panelna razprava, ki jo je vodila predsednica EMS, se je osredotočila na uporabo umetne inteligence in strojnega učenja v meteorologiji (levo). Več mladih znanstvenikov je prejelo nagrado za svoj prispevek na konferenci (desno). (foto: Katja Kodba)



Slika 2 - Dr. David M. Burridge (levo) je predstavil prejemnico najvišje nagrade EMS, dr. Florence Rabier (desno) (foto: Katja Kodba)



Slika 3 - Ddr. Matjaž Ličer med strateškim predavanjem (foto: Tanja Cegnar)

Vrhunec slovesne otvoritvene seje je bilo strateško predavanje na temo vodilne usmeritve konference, ki ga je imel ddr. Matjaž Ličer, sodelavec Agencije RS za okolje. Teoretični del predavanja je nazorno nadgradil s praktičnimi primeri uporabe in prikazom izboljšav, ki jih prinašajo nova orodja in tako navdušil publiko v Linhartovi dvorani.

Sestavni del otvoritvene seje je bila tudi podelitev nagrad in priznanj. Med nagrajenci izpostavljam:

- **Dr. Heinke Schlünzen** – nagrada za večleten izjemen prispevek k delovanju EMS.
- **Dr. Florence Rabier** – najvišje priznanje EMS (srebrna medalja) za znanstveno, akademsko in vodstveno kariero, zaznamovano s pionirskimi prispevki k variacijski asimilaciji podatkov satelitskih opazovanj v numerični napovedi vremena ter proaktivno vlogo pri postavitvi ECMWF v ospredje revolucije strojnega učenja.
- **ANEMOI** – nagrada za tehnološke dosežke kot primer evropskega sodelovanja za izboljšanje natančnosti napovedi z uporabo naprednih metodologij strojnega učenja. Prilagodljiv pristop odprte kode omogoča različnim evropskim deležnikom nadaljnjo integracijo umetne inteligence v operativno napovedovanje.
- **Dr. Georgios Nikolaou** – nagrada Fundacije Solco W. Tromp (1500 € in potni stroški) za članek "Zasnova sistema TETHYS: pametni sistem za zbiranje vode in čiščenje zraka v rastlinjakih".
- **Dr. Assaf Shumuel** – nagrada Fundacije Harry Otten (25.000 €) za najbolj izvirno idejo: akustični sistem zgodnjega opozarjanja na požare.
- **Dr. Andrew Eccleston** – posebna nagrada Fundacije Harry Otten (10.000 €) za dolgoletni prispevek k razvoju meteorologije, predvsem v zasebnem sektorju.

Podeljenih je bilo tudi več nagrad mladim znanstvenikom za izstopajoče povzetke. V nagrado je vključeno plačilo kotizacije in denarna vsota, ki mladim znanstvenikom omogoča udeležbo na konferenci. Fundacija Solco W. Tromp poleg nagrade za najboljši znanstveni članek s področja biometeorologije, podeljuje tudi šest nagrad mladim znanstvenikom in jim tako olajša udeležbo na konferenci.

Izpostavljam nagrado Fundacije Harryja Ottena za inovacije v meteorologiji, ki je bila tokrat podeljena že sedmič. Assaf Shmuel z Weizmannovega inštituta za znanost je osvojil prvo nagrado, v višini 25.000 evrov. Njegova ideja, "Poslušanje gozda: meteoakustični sistem zgodnjega opozarjanja za odkrivanje požarov v naravi", ki temelji na uporabi zvočnih senzorjev in umetne inteligence, predvideva, da požar oddaja edinstvene zvoke, kot sta prasketanje žerjavice ali pokačenje suhega lesa. Sistem predstavlja nov razred meteoroloških senzorjev, ki z umetno inteligenco združujejo podatke o atmosferskih razmerah in zvoku, in sicer, za zaznavanje dogodkov vžiga in dinamično ocenjevanje tveganja požara. Z uporabo omrežja cenovno ugodnih zvočnih senzorjev na območjih, ki so nagnjena k požarom v naravi, lahko ta sistem znatno izboljša zmogljivosti zgodnjega odkrivanja.



Slika 4 - Fundacija Solco W. Tromp je podelila pet nagrad mladim biometeorologom in eno nagrado za najboljši znanstveni članek (foto: Katja Kodba)



Slika 5 - Najradodarnейša je z nagradami Fundacija Harry Otten za najbolj izvirno idejo (levo) in nagrada za življenjsko delo (desno) (foto: Katja Kodba)

Svečano sejo je poživil nastop Tanje Zajc Zupan skupaj s pevko Tejo Saksida, ki sta udeležencem zaigrali in zapeli tri tradicionalne slovenske pesmi in tako prispevali k lokalnemu pridihi konference.

Strokovna predavanja

Med konferenco so imeli udeleženci priložnost prisostvovati številnim predavanjem in poster sejam v treh glavnih programskih sklopih. Razen v času plenarnih sej, so predavanja potekala sočasno v petih dvoranah. Vrhunec vsakega izmed treh tematskih sklopov je bilo navdihujoče plenarno predavanje:

- Sklop Sodelovanje z družbo: Dr. Karl Gutbrod in dr. Andrew Eccleston – "Vremenske storitve v družbi: razvoj uporabe in angažiranosti v zadnjih petdesetih letih"
- Sklop Operacijski sistemi in aplikacije: Dr. Mariane Clare – "Vremenski modeli, ki temeljijo na podatkih: nova doba v meteorologiji".
- Sklop Razumevanje vremenskih in podnebnih procesov: Dr. Frederika Kratzert – "Opozorila pred poplavami povsod – modeliranje padavin in odtoka na podlagi podatkov v svetovnem merilu".

Večina sej se odvija vsako leto in so tako rekoč že kar tradicionalne, na tokratni konferenci pa je dr. Polona Vreča skupaj s sodelavci vpeljala novo sejo "Izotopi in podnebne spremembe". Seja je obsegala šest predstavitev in tri posterje.

Strokovni izleti

Agencija RS za okolje je organizirala več strokovnih izletov, med drugim:

- obisk sedeža Agencije,
- ogled fenološkega parka,
- sprehod po popotresni Ljubljani,
- izlet na radarski center Pasja ravan.



Slika 6 - Sodelavca ARSO, Anton Zgonc in Andrej Iskra, sta vodila zanimiv ogled radarskega centra na Pasji ravni (foto: Andrej Iskra)

Čeprav so sredino tedna zaznamovali močni nalivi, smo v četrtek uspešno izpeljali napovedano ekskurzijo na radarski center Agencije RS za okolje.

Strokovna predavanja

Večina sej se odvija vsako leto, na tokratni konferenci pa je dr. Polona Vreča skupaj s sodelavci vpeljala novo sejo "Izotopi in podnebne spremembe". Seja je obsegala šest predstavitev in tri posterje.

Karl Gutbrod je skupaj z Andrewom Ecclestonom v predavanju povzel štiti trende, ki bodo v prihodnje pomembno vplivali na meteorološko skupnost:

1. Naraščajoča uporaba: ob eksplozivni rasti uporabe spletnih mest in aplikacij o vremenu od začetka tega tisočletja je število uporabnikov močno naraslo. Nedavni podatki kažejo, da več kot dve milijardi ljudi redno dostopa do vremenskih aplikacij. Ta široka uporaba ponazarja poglobljanje sodelovanja med javnostjo in meteorološkimi podatki ter povečano odvisnost od vremenskih informacij v vsakdanjem življenju.
2. Komercialni razvoj: trg komercialnih vremenskih storitev se je znatno razširil. Z uporabo podatkov iz virov, kot sta PRIMET in druge analize svetovnega trga, sledimo naraščajoči finančni vrednosti, ki se pripisuje vremenskim storitvam. Ta rast odraža ustrezno povečanje z vremenom povezanega deleža družbenega dohodka, namenjenega

informacijam in orodjem, kar kaže na vse večjo vlogo vremena pri odločanju v vseh gospodarskih sektorjih. Takšni trendi poudarjajo ekonomsko vključenost družbe v meteorološke storitve.

3. Poklic meteorologa: opazamo porast števila poklicnih meteorologov v mnogih državah, ki se odzivajo tako na povpraševanje na trgu kot na naraščajočo kompleksnost ponujenih storitev, na podlagi podatkov organizacij, kot so Evropska meteorološka zveza (EMS), državne hidrometeorološke službe (NHMS) in druge.
4. Družbena pričakovanja: prevladujejo zahteve po natančni napovedi, predstavitvi podatkov, zabavni vrednosti, merljivi gospodarski vrednosti in obvladovanju podnebnih tveganj.

Te zahteve ne odražajo le potrebe po zanesljivih napovedih, temveč tudi željo po vsebinah, ki so privlačne, uporabne in relevantne v kontekstu spreminjajočega se podnebja. Presečišče teh trendov ponazarja kompleksen, dinamičen odnos med meteorološkimi službami in družbo, ki jim služijo – odnos, ki se še naprej razvija z napredkom tehnologije in podnebnih izzivov.

Dogodek za hitro mreženje znanstvenikov na začetku kariere (ECS)

Dogodek mreženja za mlade znanstvenike je bil prvič organiziran leta 2019. Na letošnji konferenci smo ga s pomočjo sponzorja PRIMET ponovno izvedli. Potekal je v elegantni stranski sejni sobi, kjer je osemnajst mladih znanstvenikov z različnih raziskovalnih področij in kariernih stopenj oblikovalo šest skupin. Vsaka skupina se je srečala z enim od šestih izkušenih mentorjev, ki so predstavljali različne sektorje in karierne poti.

Pogovori med mentorji in mladimi znanstveniki so zajemali širok spekter tem – od sprejemanja ključnih kariernih odločitev in doseganja ravnovesja med poklicnim in zasebnim življenjem do raziskovanja zaposlitvenih možnosti zunaj akademskega sveta in še mnogo več. Dogodek se je zaključil s sprejemom, na katerem so se mladim znanstvenikom pridružili sklicatelji sej. Sprejem je udeležencem zagotovil neformalno okolje za pogovore s kolegi in mentorji.

Medijske nagrade

Znanstvene dosežke je potrebno predstaviti javnosti in deležnikom, ki na osnovi znanstvenih spoznanj družbi zagotavljajo varnost in blaginjo. Uspešne komunikacijske dosežke vsako leto izpostavimo z medijskimi nagradami. Že nekaj let nagrade razdelimo v tri kategorije: novinarski dosežki, projekti in večletno delovanje meteorologov v medijih.

Novinarsko nagrado je prejel Conor Pucell, znanstveni novinar z doktoratom iz naravoslovnih znanosti. Redno prispeva k publikacijam, kot so Nature, Science, Scientific American, New Scientist, MIT-ov Undark in The Irish Times.

Piše zlasti o oceanografiji in podnebjem – pa tudi o fiziki, matematiki, vesolju in zdravju. Leta 2019 je delal kot novinar na Inštitutu Maxa Plancka za gravitacijsko fiziko v Potsdamu v Nemčiji. Leta 2021 je prejel novinarsko nagrado EMS za članek v reviji Nature. Od leta 2022 je dopisnik za Irsko pri Research Professional.

Conor je tudi sodirektor organizacije, ki izvaja znanstvene raziskave za skupnost nevladnih organizacij po vsej Evropi. Je ustanovitelj xyMaths.ie, vira za dijake matematike

v srednjih šolah na Irskem. Pred tem je ustvaril Wide Orbits, spletno platformo, ki raziskuje ideje, vprašanja in kulturo.

Je član Irskega združenja novinarjev, ki se ukvarjajo z znanostjo in tehnologijo (ISTJA). Izbor njegovih objavljenih prispevkov najdete na cypurcell.tumblr.com.

Nagrado je prejel za članek, ki obravnava enega glavnih izzivov našega časa: podnebne spremembe in odgovornost znanstvenih ustanov v zvezi z njimi. Z jasno in pravočasno raziskavo za Research Professional članek preučuje napetost med akademsko neodvisnostjo in finančnimi vezmi z industrijo fosilnih goriv – industrijo, ki ostaja vodilni dejavnik kopičenja toplogrednih plinov v ozračju.

Nagrado za večletno posredovanje informacij o vremenu in podnebjju je prejel Jeremy Wilks, znanstveni poročevalec pri Euronews od oktobra 2006. Za Euronews vodi serijo Climate Now. Išče in ustvarja zgodbe, snema filme na lokaciji in predstavlja vsako epizodo. Pokriva podnebne spremembe, znanost, energijo in trajnost. Jeremy moderira dogodke v živo v Evropski komisiji in Evropskem parlamentu ter povezuje dogajanje na večjih mednarodnih dogodkih, kot so COP29, WebSummit, vesoljska konferenca EU in VivaTech.

Vodi serijo podkastov Ocean Calls, da bi poslušalce povezal s težavami, s katerimi se danes soočajo naši oceani. Redno vodi dogodke v živo na YouTubeu, kjer poglobljeno razpravlja o podnebnih vprašanjih. Poroča tudi o podnebnih in okoljskih zgodbah za dnevne novice Euronews.

Jeremy je v zadnjih petih letih eksperimentiral z različnimi formati programa. Najnovejša različica formata temelji na terenskih podatkih, mesečni podnebni podatki pa se pripravljajo naknadno. Ta format mu je všeč, ker lahko lokacijo poudari že od samega začetka.

Med produkcijo vsake epizode si po svojih najboljših močeh prizadeva zagotoviti znanstveno verodostojnost vsebine in enostavno razumevanje za občinstvo. Je voditelj televizijskega programa, njegov cilj je dejstva predstaviti najširšemu možnemu občinstvu. Zahvaljujoč edinstvenemu večjezičnemu pristopu Euronews se ta program predvaja na televiziji v 12 jezikih za več kot 400 milijonov gospodinjstev v 160 državah po vsem svetu.

Medijsko nagrado za projekt smo podelili reviji "Segnali dal clima", ki je informativna publikacija, namenjena širši javnosti in ponuja regionalni ter lokalni pogled na podnebne spremembe v regiji Furlanija-Juljska krajina (severovzhodna Italija). Revija raziskuje to kompleksno temo s treh zornih kotov: spremembe, vplivi, akcije.

Revija je rezultat skupne zaveze za spodbujanje podnebne pismenosti, ki jo je leta 2022 ustanovila delovna skupina Clima FVG, ki združuje vodilne znanstvene in raziskovalne ustanove v regiji.

Da bi javnosti približali temo, ki se še vedno pogosto dojema kot oddaljena, revija predstavlja različne vidike podnebnih sprememb, začenši s poročilom o dogodkih in razmerah, ki so nedavno prizadeli regijo Furlanijo-Juljska krajina, hkrati pa poudarja, kako je lokalna razsežnost povezana z globalno.

Osnovna ideja je črpati iz znanja, ki ga raziskovalne ustanove, ki pripadajo delovni skupini Clima FVG, nenehno razvijajo, in ga pretvarjati v dostopne in privlačne vsebine za širšo javnost. "Segnali dal clima in FVG" je letna poljudnoznanstvena revija. Članke prostovoljno zbirajo strokovnjaki iz ustanov delovne skupine Clima FVG. Vsako leto izpostavljajo različne teme, povezane s podnebjem, ki zagotavljajo lokalno relevantno znanje o vremenu in podnebjju, kriosferi, sladki vodi, morju, lagunah, ekosistemih, kmetijstvu, gozdovih, požarih v naravi, stavbah, urbanih območjih, socialnih in psiholoških vprašanjih, zdravju živali in ljudi itd.



Slika 7 - Nagrado za novinarsko delo je prejel Jeremy Wilks (levo), za najboljši komunikacijski projekt pa skupina avtorjev strokovne revije (desno)
(foto: Katja Kodba)

Struktura revije pomaga laičnim bralcem razumeti, kako so spremembe, vplivi in dejanja povezani, saj prikazuje, kako podnebne spremembe vplivajo na okolje in človeške dejavnosti ter katere ukrepe za blaženje in prilagajanje lahko uvedemo, tako na kolektivni kot na individualni ravni. To naj bi pomagalo ublažiti in obvladovati morebiten učinek dela informacij, ki povzroča tesnobo, tako da se sporočila uokvirijo v konstruktivno perspektivo. Uredniško koordinacijo upravlja ARPA FVG. Ves uredniški, grafični in produkcijski proces poteka interno brez dodatnega financiranja.

Delavnice in spremljevalni dogodki

Med konferenco so potekale številne dejavnosti, med njimi delavnice, predstavitve znanstvene revije EMS, vremenska poročila, dogodki za širšo javnost ter letno srečanje združenja zasebnih ponudnikov meteoroloških informacij PRIMET. Ob konferenci so se odvijali tudi številni poslovni sestanki.

Sodelavci Agencije RS za okolje so vsak dan pripravili dobro obiskana vremenska poročila, ki so bila še posebej zanimiva na dan, ko je Agencija RS za okolje izdala najvišje opozorilo na izdaten dež.

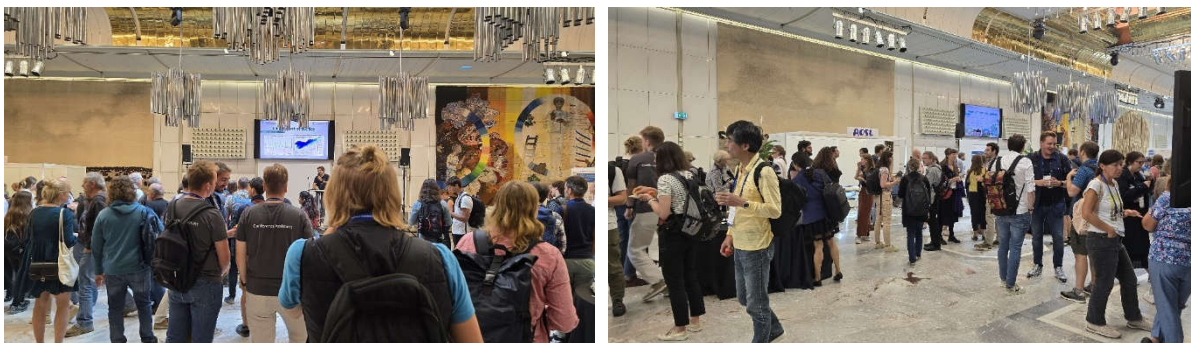
ECMWF, Svetovna meteorološka organizacija in EUMETSAT so v torek izvedli tradicionalno enodnevno delavnico o komunikaciji, na kateri so bili predstavljeni primeri dobrih praks v posredovanju informacij strokovni in laični javnosti. Tokrat smo pozornost namenili predvsem oblikovanju grafičnih prikazov in načinu, kako v množici podatkov izpostaviti glavno sporočilo.

Slovensko meteorološko društvo je skupaj z Agencijo RS za okolje, Mednarodnim društvom za biometeorologijo ter odborom EMS za medije in komunikacijo, ob finančni podpori Fundacije Solco W. Tromp, izvedlo delavnico o vplivu vremena na zdravje in počutje ljudi. Na delavnici smo predstavili različne vplive okolja na počutje in zdravje ljudi. Na njej so sodelovali meteorologi, sociologi, biologi in zdravniki. Posnetki predavanj so objavljeni na spletni strani fundacije.

Univerza v Ljubljani je v stavbi rektorata gostila dva dogodka za splošno zainteresirano javnost, ki smo ju organizirali Slovensko meteorološko društvo in Agencija RS za okolje. Na prvem smo predstavili glavne poudarke konference. Uvodoma je prisotne nagovoril rektor Univerze v Ljubljani, dr. Gregor Majdič. Drugi dogodek za splošno zainteresirano javnost je bil namenjen komunikaciji meteoroloških in podnebnih vsebin.



Slika 8 - Govorci na prvem (levo) in drugem (desno) dogodku za zainteresirano javnost v prostorih Univerze v Ljubljani (foto: Miha Korenčan, Tanja Cegnar)



Slika 9 - Vremensko poročilo je vsak dan pritegnilo veliko poslušalcev (levo); udeleženci konference med odmorom (desno) (foto: Tanja Cegnar)

Izbor izjemnega posterja in zaključek konference v petek popoldne

Konferenca se je zaključila v petek popoldne s podelitvijo nagrade za najboljši poster, ki jo je prejela Csilla Ilyés-Vincze. Komisija za izbor je soglasno izbrala njen poster z naslovom "Napovedovanje časovnih vrst teže panja z uporabo meteoroloških dejavnikov med tokom nektarja *R. pseudoacacia*", pri čemer je bila odločitev močno podprta tudi s strani udeležencev konference. Komisija, katere član je bil dr. Gregor Skok, je izbor utemeljila takole: "Privlačen slog plakata in njegova intuitivna struktura sta izpolnjevala oblikovalska merila za nagrado. Komisija je ocenila, da se zmagovalni poster odlično ujema s poudarkom letošnjega srečanja ter odraža vse večjo uporabo umetne inteligence in strojnega učenja v atmosferskih znanostih in meteoroloških aplikacijah." Nagrajeni poster odlikuje izvirna in inovativna uporaba vremenskih podatkov na področju čebelarstva. Rezultati raziskave imajo resnično družbeno vrednost in uporabnost, saj lahko čebelarska skupnost iz njih črpa konkretne koristi - na primer z uporabo javno dostopnih vremenskih napovedi za optimizacijo učinkovitih čebelarskih praks. Delo je znanstveno relevantno, izpolnjuje strokovna merila za nagrado in je objavljeno v recenzirani znanstveni reviji.

Več informacij in posnetki predavanj so dostopni na uradni spletni strani: <https://www.ems2025.eu/>

Pomen globoke raziskovalne vrtine v Bovški kotlini za seizmologijo in ocenjevanje potresne nevarnosti – projekt DOVE

Andrej Gosar*

Povzetek

V okviru projekta Drilling Overdeepened Alpine Valleys (DOVE) bomo v Bovški kotlini izvrtali do 300 m globoko raziskovalno vrtino, ki bo omogočila interdisciplinarne geološke, geomorfološke, geofizikalne, paleoklimatske in druge raziskave. Ker gre za območje z največjo potresno nevarnostjo v Sloveniji, bo vrtina skupaj s spremljajočimi geofizikalnimi raziskavami pomembna tudi za seizmologijo. V jezerskem sedimentu pri Srpenici so že odkrili plast s seizmiti, ki nakazujejo na velik potres pred okoli 13.000 leti. Predvidevamo, da bomo v okoli 200 m debeli plasti laminiranih sedimentov, ki so se odlagali v nekdanjem ledeniškem jezeru, odkrili nove plasti s seizmiti in z njihovim datiranjem pridobili podatke o povratnih dobah velikih potresov. Obliko sedimentnega bazena in njegovo notranjo strukturo bomo raziskali z refleksijskimi seizmičnimi raziskavami s P- in S-valovi. To bo omogočilo boljše razumevanje vpliva heterogenih ledeniško-rečnih sedimentov na potresno nihanje tal, saj so bile ob potresih 1998 in 2004 v Bovški kotlini ugotovljene zelo velike razlike v poškodbah stavb, predvsem zaradi resonance med različno debelimi plastmi mehkih sedimentov in objekti. Z refleksijskim profiliranjem bomo raziskali tudi potek dveh vej seizmogenega Ravenskega preloma pod Bovško kotlino, saj gre za aktivno napredujočo strukturo, kar bo omogočilo boljšo seizmotektonsko opredelitev tega preloma.

Ključne besede: seizmologija, potresna nevarnost, geologija, geofizikalne raziskave, sedimentni bazen, raziskovalna vrtina, seizmiti, Bovška kotlina

Keywords: seismology, earthquake hazard, geology, geophysical investigations sedimentary basin, research borehole, seismites, Bovec basin

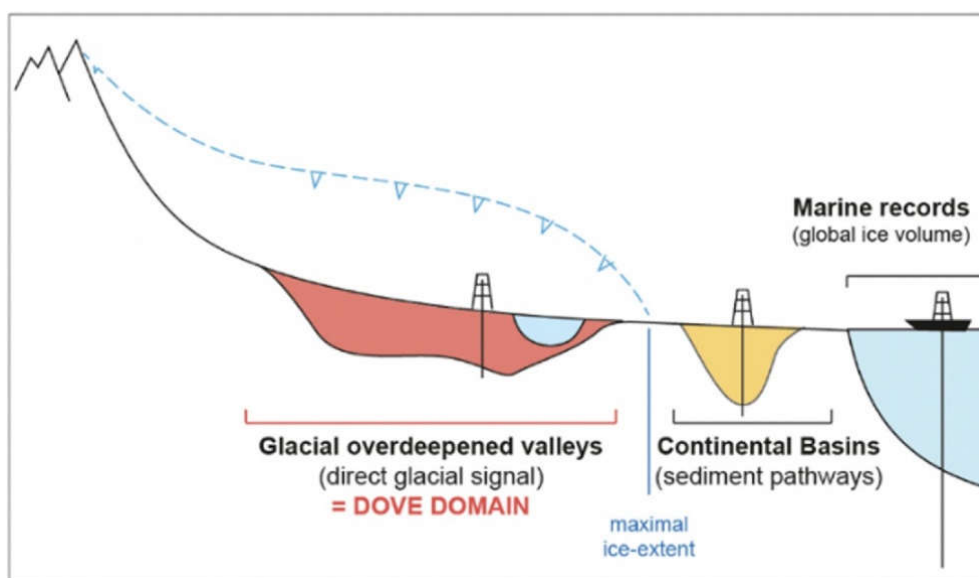
Uvod

Znatno poglabljene doline in sedimentni bazeni, ki so nastali zaradi ledeniškega delovanja, so raziskovalno vedno bolj zanimivi, tudi zaradi vse pomembnejšega proučevanja preteklih podnebnih sprememb. Znatno poglabljene alpske doline (angl. Overdeepened Alpine Valleys) so na območju ledeniške erozije globlje od rečnih. Ker so zapolnjene s kvartarnimi sedimenti (slika 1), so dober geološki arhiv, s katerim lahko dobimo vpogled v dinamiko preteklih poledenitev (Preusser et al., 2010). So tudi pomemben vir čiste podzemne vode. Heterogeni ledeniško-rečni sedimenti so na potresnih območjih pogosto vzrok izrazitim in zelo spremenljivim ojačitvam tresenja tal in je zato njihovo proučevanje pomembno za ocenjevanje potresne nevarnosti. V drobnozrnatih sedimentih, ki so se odlagali na dnu ledeniških jezer, so pogosto tudi sledovi zelo velikih preteklih potresov, saj je močno tresenje sedimente premešalo in ustvarilo seizmite – plasti s kaotičnim vzorcem (McCalpin, 2009). Ti so pomemben paleoseizmološki indikator, s katerim lahko razširimo

* Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana in UL, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

poznavanje potresne zgodovine nekega ozemlja in ocenimo povratne dobe velikih potresov, ki so ključen podatek pri verjetnostnem ocenjevanju potresne nevarnosti.

Za proučevanje vsega naštetega, je treba skozi kvartarne sedimente, odložene v poglabljeni dolini, pazljivo izvrtati vrtino na jedro, da se v čim večji meri ohrani struktura razmeroma mehkih sedimentov. Pomen raziskovanja poglabljenih alpskih dolin za boljše razumevanje raznovrstnih geoloških problemov so prepoznali tudi v mednarodnem programu International Continental Drilling Programme (ICDP), ki spodbuja in sofinancira globoko raziskovalno vrtanje na celinah za najrazličnejše namene, pri čemer je pomemben predvsem bistven doprinos k znanosti. Zato so odobrili dolgoleten projekt Drilling Overdeepened Alpine Valleys (DOVE), ki se izvaja v dveh fazah (Anselmetti et al., 2022; DOVE Science Team, 2024).



Slika 1 – Shematski prikaz (ni v merilu) nastanka znatno poglabljene doline z erozijo pod ledenikom, ki sega globlje od baznega fluvialnega nivoja (Anselmetti et al., 2022).

Projekt Drilling Overdeepened Alpine Valleys – DOVE

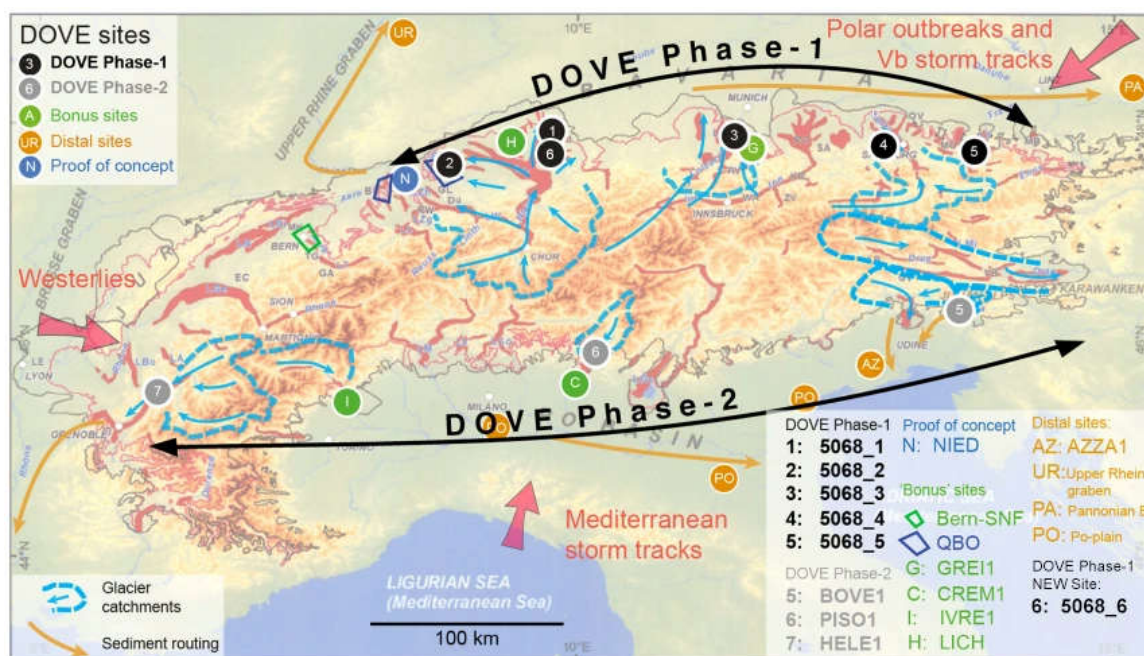
V prvi fazi projekta ICDP-DOVE so poglabljene doline raziskovali samo na severnem obrobju Alp (slika 2). Projekt je iskal odgovore na tri pomembna znanstvena vprašanja (Anselmetti et al., 2022; Preusser et al., 2010):

- Kakšen je bil natančen čas in obseg preteklih poledenitev v Alpskem prostoru? Glavna hipoteza: Napredovanje poledenitve in z njo povezana erozija poglabljenih dolin se je na obrobju Alp v kvartarju spreminjala tako časovno kot po obsegu glede na lokacijo.
- Kako so vzorci kroženja zraka v atmosferi vplivali na tokove ledu v Alpah? Hipoteza: Atmosferska cirkulacija nad Alpami se je med poledenitvami spreminjala, zato je bila porazdelitev vlage ključen dejavnik za tvorjenje ledu.
- Kako so se gorski masivi in predgorja oblikovali s ponavljajočimi poledenitvami? Hipoteza: Čas in obseg erozije kamnin in odlaganja sedimentov se nista spreminjala samo okoli Alpske verige, temveč tudi znotraj posameznih sistemov.

Dodatna področja, ki se raziskujejo in potencialna uporaba znanstvenih spoznanj:

- Pomen različnih geofizikalnih raziskav pred, med in po vrtanju.
- Modeliranje geomorfoloških procesov, ledeniške erozije in preteklega podnebja.

- Zgodovina vegetacije v Alpskem prostoru, povezana s klimatskimi spremembami.
- Delovanje mikrobov v jezerskih sedimentih.
- Kakšen je potencial poglobljenih dolin z vidika virov podzemne vode?
- Kakšen je potencial kvartarnih sedimentov za izkoriščanje plitve geotermalne energije?

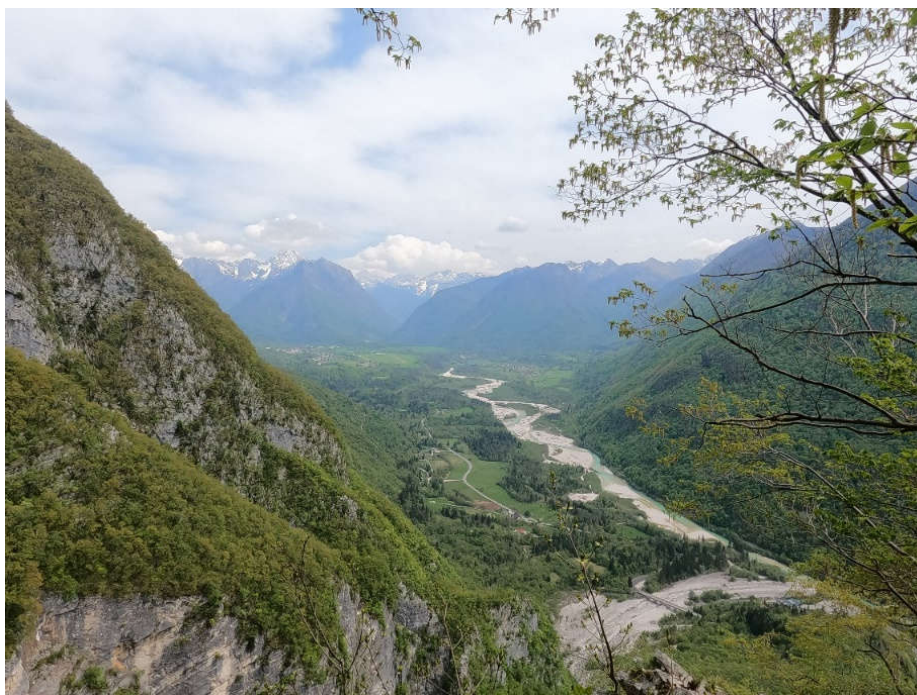


Slika 2 – Lokacije vrtin, izvrtanih v okviru ICDP projekta Drilling Overdeepened Alpine Valleys – DOVE. V prvi fazi so raziskovali severno obrobje Alp, v drugi pa bomo raziskovali južno obrobje (Anselmetti et al., 2022).

Ker se je prva faza DOVE izvajala na severnem obrobju Alp, kjer je potresov zelo malo, seizmološke teme niso bile v ospredju. Z drugo fazo na južnem obrobju, vsaj v Sloveniji in Italiji, pa se bo to spremenilo, saj je potresna nevarnost tam izrazita (Danciu et al., 2021).

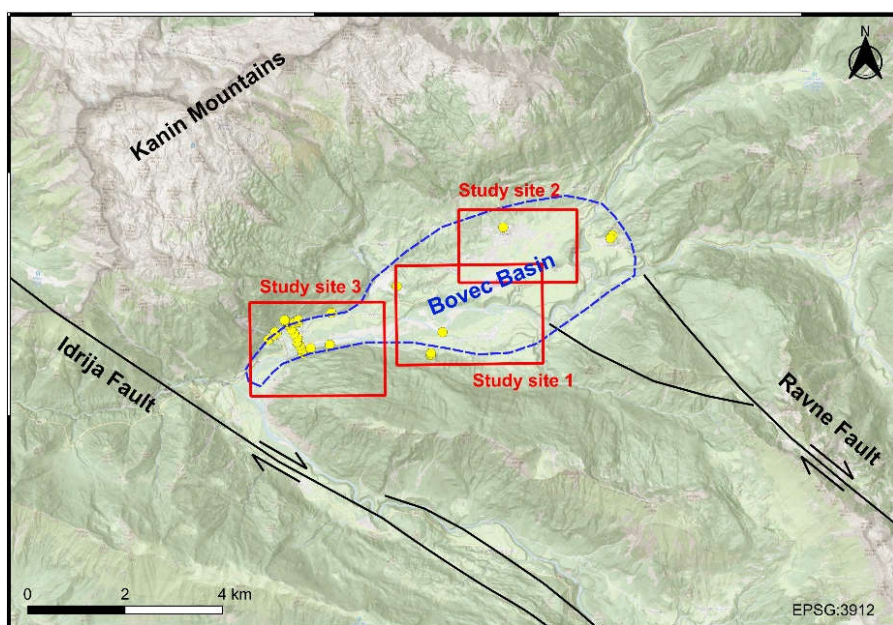
Seizmološke značilnosti Zgornjega Posočja

Bovška kotlina (slika 3) se nahaja ob meji s Furlanijo, na območju največje potresne nevarnosti v Sloveniji, s projektnim pospeškom med 0,275 in 0,3 g za povratno dobo 475 let (Šket Motnikar et al., 2022). Seizmotektonsko gre za prehod med alpskimi strukturami, usmerjenimi V-Z, ter prevladujočimi reverznimi prelomi ali narivi v Furlaniji in dinarsko usmerjenimi (SZ-JV) desnozmičnimi prelomi Idrijskega prelomnega sistema v zahodni Sloveniji (Gosar, 2020). Na tem območju sta se zgodila dva velika zgodovinska potresa, ki v veliki meri opredeljujeta veliko potresno nevarnost; najmočnejši znan potres na območju, t. i. idrijski potres, leta 1511 z ocenjeno navorno magnitudo 6,8 in furlanski potres leta 1976 z navorno magnitudo 6,5 (Šket Motnikar et al., 2022).



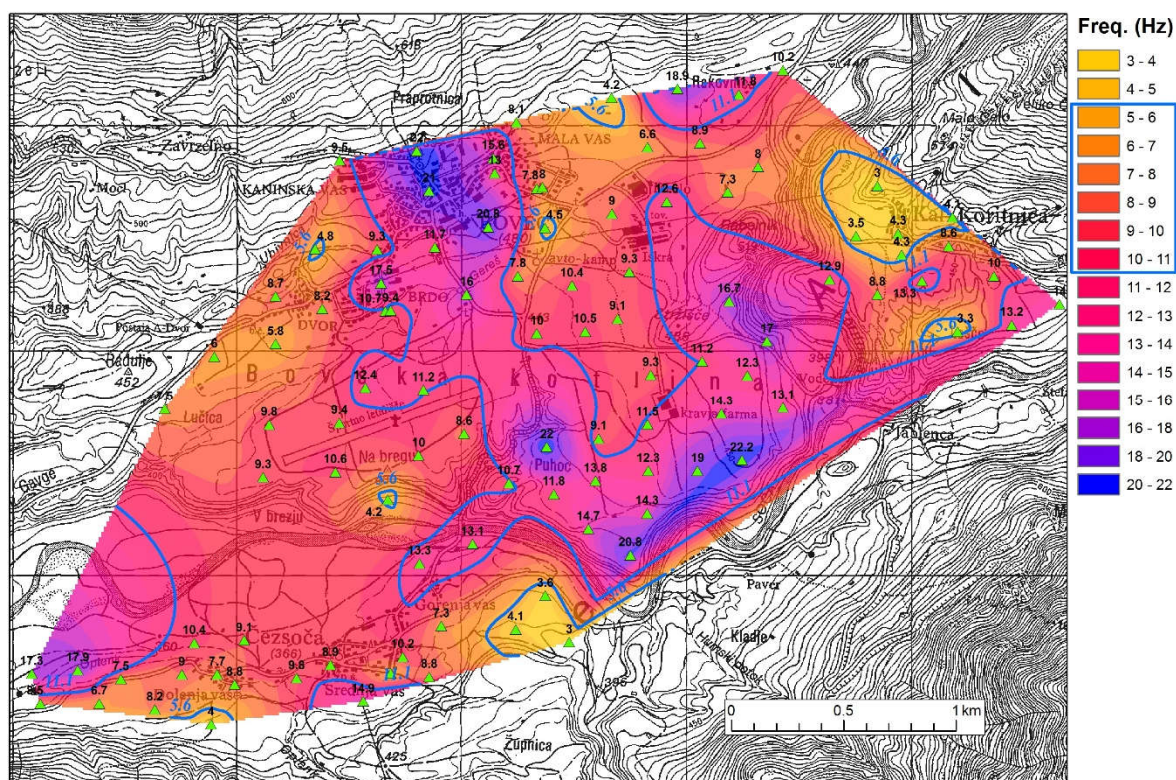
Slika 3 – Pogled na Bovško kotlino s slapu Boka.

Bovška kotlina se nahaja na območju med Idrijskim in Ravenskim prelomom (slika 4). V letih 1998 in 2004 sta jo prizadela dva večja potresa z magnitudama 5,6 in 4,9, ki sta se zgodila na Ravenskem prelomu. Ob potresu leta 1998 je v globini prišlo do 10 km dolgega pretrga ob tem prelomu, ki je v celoti dolg preko 40 km (Kastelic et al., 2008). Ob njem bi zato lahko nastal še precej večji potres. Na podlagi seizmoloških analiz in geološkega kartiranja ocenjujemo, da gre pri Ravenskem prelomu na severozahodnem koncu za aktivno napredovanje pod Bovško kotlino, pri čemer ni znano njegovo nadaljevanje v Kaninskem pogorju. Dokazati morebitno nadaljevanje preloma v SZ smeri je zato velik raziskovalni izziv.



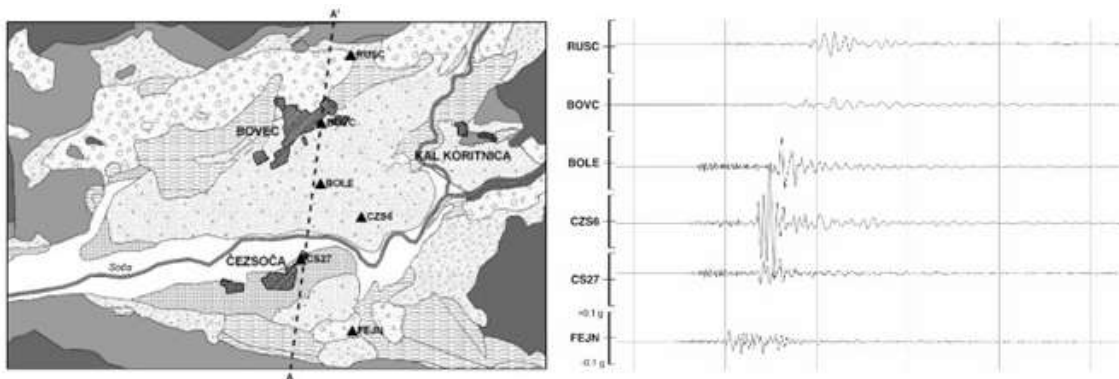
Slika 4 – Bovška kotlina se nahaja med Idrijskim in Ravenskim prelomom. Označena so tri območja načrtovanih geofizikalnih raziskav.

Oba potresa sta povzročila obsežne poškodbe stavb v Bovški kotlini, Drežniškem kotu in Lepeni. Nenavadno velikih razlik pri porazdelitvi poškodb na majhnih razdaljah znotraj Bovške kotline ni bilo mogoče razložiti le z različno ranljivostjo objektov (Gosar, 2007). Pokazalo se je, da je bil glavni razlog zelo izrazit in neenakomeren vpliv heterogenih ledeniško-rečnih sedimentov, ki zapolnjujejo kotlino. Ker na območju ni globokih vrtin, smo to raziskali s plitvimi geofizikalnimi raziskavami in seizmološkimi metodami. Predvsem metoda spektralnega razmerja mikrotremorjev (metoda HVSR) je jasno pokazala zelo velike razlike v lastni frekvenci različno debelih plasti mehkih sedimentov, ki so odloženi na skalno podlago in izrazito resonanco med sedimenti in stavbami (slika 5). S tem smo dokazali pomemben vpliv lokalne geološke zgradbe na porazdelitev poškodb (Gosar, 2007).



Slika 5 – Karta lastnih frekvenc sedimentov v Bovški kotlini izmerjenih z metodo spektralnega razmerja mikrotremorjev. Z modro črto je označeno območje nevarnosti resonančnih učinkov med tlemi in stavbami v primeru potresa (po Gosar, 2007).

Po potresu 2004, ki je povzročil dodatne poškodbe in nakazal, da gre pri Ravenskem prelomu najbolj verjetno za dve veji na območju stika z Bovško kotlino (slika 4), smo v njej namestili več seizmografov za beleženje popotresov (slika 6 levo). Njihovi seizmogrami (slika 6 desno) so zelo jasno pokazali velik vpliv kvartarnih sedimentov na amplitude potresnega nihanja tal, ki so največje v srednjem delu kotline (Gosar, 2008).



Slika 6 – Po potresu 2004 smo v Bovški kotlini postavili več seizmografov, ki so beležili popotrese (levo). Seizmogrami potresa magnitude 2,9 (desno) kažejo ojačenje potresnega valovanja v sredini bazena zaradi mehkejših sedimentov (Gosar, 2008).

Geološka zgradba osrednjega dela Bovške kotline v globini ni znana, saj ni vrtin, ki bi dosegle skalno podlago sedimentov. Opravljene so bile le redke raziskave z geoelektričnim upornostnim sondiranjem. So pa bile v šestdesetih letih prejšnjega stoletja izvedene obsežne raziskave v zahodnem delu kotline, v profilu Suhi potok preko doline Soče pri Boki, kjer so razmišljali o gradnji 80 m visoke pregrade za veliko akumulacijsko jezero, strojnica hidroelektrarne pa bi bila pri Trnovem ob Soči. V profilu Suhi potok so vrtnice prevrtale do 250 m sedimentov in dosegle dachsteinski apnenec v podlagi (Kuščer et al., 1974). V geološkem stolpcu prevladuje sediment, ki so ga takrat poimenovali jezerska kreda, gre pa za drobnnozrnati melj. Odlagal se je v ledeniškem jezeru, ki je predvidoma segalo od Trnovega do osrednjega dela Bovške kotline (Bavec et al., 2004). Ta sediment so izkoriščali v glinokopu pri Srpenici za potrebe kemične industrije, ki je danes opuščena. V steni razkopa so vidne tanke plasti (lamine) jezerskega sedimenta z značilnim menjavanjem barv (geol. varve). Ocenjena hitrost odlaganja melja je bila 4-5 mm/leto. Sedimenti so se predvidoma odlagali v obdobju med 160.000 leti in 6.500 leti, med zadnjima dvema poledenitvama.

Marjanac et al. (2001) so v navpični steni opuščene glinokopa v Srpenici našli dve plasti z značilno kaotično zgradbo, ki so jo interpretirali kot seizmit (slika 7). Seizmit nastane, ko zelo močno tresenje tal, zaradi velikega potresa v bližini, premeša rahel sediment na jezerskem dnu. Zaradi sicer zelo mirnega okolja odlaganja takšna struktura ostane tudi po tem, ko se sediment utrdi in ga prekrijejo mlajše plasti. Košček lesa najden na vrhu spodnje deformirane plasti je omogočil datiranje s ^{14}C metodo, s katero so starost ocenili na 12.790 ± 85 let.



Slika 7 – Plast s seizmiti v opuščnem glinokopu pri Srpenici nakazuje na velik potres pred okoli 13.000 leti, ki je premešal sedimente na jezerskem dnu (Marjanac et al., 2001)

Pomen raziskovalnega vrtanja in spremljajočih se geofizikalnih raziskav v Bovški kotlini za seizmologijo

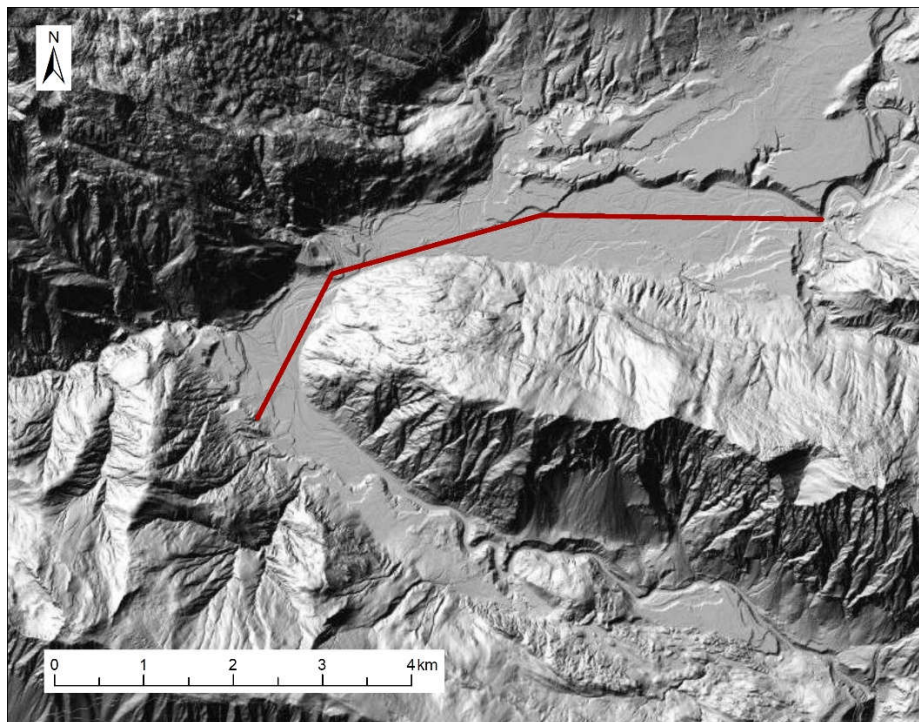
Zaradi opisanih seizmoloških značilnosti Bovške kotline z okolico, predstavlja to po eni strani območje, ki je seizmotektonsko in seizmološko razmeroma dobro raziskano, po drugi strani pa tu ne manjka odprtih raziskovalnih izzivov. V dveh preglednih člankih je podan podroben pregled vseh geoloških in seizmotektonskih raziskav (Gosar, 2019a) ter seizmoloških (Gosar, 2019b) raziskav, ki so bili opravljene na območju Zgornjega Posočja in Bovške kotline po potresih leta 1998 in 2004.

Pričakujemo, da bodo dali raziskovalna vrtina in vse spremljevalne raziskave, predvsem geofizikalne, izvedene v okviru projekta DOVE, pomembne nove podatke za seizmologijo in ocenjevanje potresne nevarnosti. Raziskovalne izzive na področju seizmologije in ocenjevanja potresne nevarnosti v Bovški kotlini delimo v tri skupine.

1. Seizmiti kot paleoseizmološki indikatorji, so v danih geoloških razmerah najpomembnejši način kako ugotoviti pojav velikih potresov v kvartarju (Lu et al., 2020). Že odkriti seizmiti pri Srpenici (Marjanac et al., 2001) so pomembni, vendar je bil v opuščnem glinokopu raziskovalcem dosegljiv le vrhnji del do 250 m debelih jezerskih sedimentov. Pričakujemo lahko, da bomo z globoko vrtino odkrili še več plasti s seizmiti in da se jih bo dalo dovolj natančno datirati s sedimentološkimi ali radiometričnimi metodami (McCalpin, 2009). Odkritje novih plasti s seizmiti bi pomenilo zelo pomemben vpogled v potresno zgodovino območja, dopolnitev potresnega kataloga in prve zanesljive podatke o povratni dobi velikih potresov na območju severozahodne Slovenije in Furlanije. Ker je to območje največje potresne nevarnosti v Sloveniji (Šket Motnikar et al., 2022), lahko ti podatki izjemno izboljšajo zanesljivost njene ocene. Na območjih z zmerno seizmičnostjo, kot je Slovenija, kjer se zelo veliki potresi dogajajo s presledkom več tisoč ali celo deset tisoč let, je pri

verjetnostnem ocenjevanju potresne nevarnosti (PSHA) prav povratna doba najbolj nezanesljiv vhodni podatek (McCalpin, 2009).

2. Obsežne raziskave po potresih leta 1998 in 2004 so pokazale zelo pomemben vpliv mehkih sedimentov na amplitudo potresnega nihanja tal in posledično porazdelitev poškodb objektov (Gosar, 2007; Gosar 2019b). Ker pa so zaradi ledeniško-rečnega značaja ti sedimenti zelo heterogeni, so njihova razprostranjenost in seizmogeološke lastnosti še slabo znani. *In-situ* podatki o različnih vrstah sedimentov iz vrtine, predvsem jezerskega melja, bodo omogočali boljše razumevanja njihovega vpliva. Refleksijske seizmične raziskave v celotni Bovški kotlini pa bodo podale prve podatke o sami obliki sedimentnega bazena, ki tudi močno vpliva na širjenje in lokalno ojačenje potresnih valov, kakor tudi o strukturi kvartarnih sedimentov.



Slika 8 – Senčen relief doline Soče med Kal-Koritnico in Trnovim. Rdeče črte kažejo možen potek refleksijskih seizmičnih profilov.

3. V neposredni bližini Bovške kotline potekata dva pomembna seizmogeni preloma (slika 4), ob katerih lahko nastanejo zelo veliki potresi. Idrijski prelom je z dolžino več kot 120 km najdaljši prelom v Sloveniji (Jamšek-Rupnik et al., 2022) in zelo verjetno odgovoren za največji znan zgodovinski potres leta 1511 (Fitzko et al., 2005). Ravenski prelom (Kastelic et al., 2008; Gosar, 2019a), ob katerem sta nastala potresa 1998 in 2004, je aktivno napredujoča prelomna struktura, ki na še neznan način napreduje v severozahodni smeri pod Bovško kotlino. Refleksijsko seizmično profiliranje, ki ga načrtujemo vzdolž kotline (sliki 4 in 8) bo predvidoma dalo pomembne podatke o deformacijah, povezanih z dvema vejama tega kompleksnega preloma.

Refleksijsko seizmično profiliranje bo ob podpori slovenskih raziskovalcev izvedel Leibniz Institute für Angewandte Geophysik (LIAG) iz Hannovra, ki razpolaga s posebno opremo (vibratorji) za tvorjenje P- in S- seizmičnega valovanja ter izvaja napredne postopke obdelave meritev. Raziskave bomo sodelavci Geološkega zavoda Slovenije, ARSO in NTF dopolnili še z različnimi plitvimi seizmičnimi raziskavami (MASW in SRT) za podrobno

opredelitev porazdelitev seizmičnih hitrosti, kar bo pripomoglo tudi k boljšemu razumevanju vpliva mehkih sedimentov. V okviru prve faze projekta DOVE je LIAG že izvedel refleksijske raziskave na nekaterih lokacijah na severnem obrobju Alp v Nemčiji in pridobil zelo dobre podatke (Burschil et al., 2018), kar pričakujemo tudi v Bovški kotlini.

Na podlagi rezultatov refleksijskega seizmičnega profiliranja bo izbrana natančna lokacija raziskovalne vrtine. Cilj je najti lokacijo z največjo debelino sedimentov, vendar bo končna lokacija določena tudi glede na izvedljivost, ki vključuje pridobitev soglasij lastnikov in gradbenega dovoljenja. Na podlagi obstoječih podatkov predvidevamo, da je največja debelina kvartarnih sedimentov oziroma poglobljene doline na območju Boke, kjer so tudi obstoječe vrtine iz profila Suhi potok. Na obliko skalne podlage sedimentov vzvodno proti Bovcu, Čezsoči in Kalu-Koritnica pa lahko samo sklepamo. Prav tako pričakujemo, da se debelina jezerskega melja hitro tanjša v tej smeri, saj predvidevamo da t. i. Srpeniško ledeniško jezero ni segalo dlje od črte Bovec-Čezsoča. Te hipoteze bodo preverjene predvsem z refleksijskim seizmičnim profiliranjem (slika 8), ki bo omogočilo tudi poglobljeno sedimentološko in stratigrafsko interpretacijo (Schaller et al., 2025).

Raziskovalna vrtina bo predvidoma globoka med 260 in 280 m in bo izvrtana do podlage iz triasnega apnenca. V celoti bo izvrtana na jedro, z napredno tehnologijo, ki pridobljeno jedro čim manj poškoduje. Obsežne interdisciplinarne raziskave jedra vrtine predstavljajo osrednji del projekta DOVE. Sledile bodo večletne laboratorijske raziskave tega jedra v Sloveniji in v najsodobnejših laboratorijih projektnih partnerjev v tujini. V vrtini bo izveden tudi obsežen program geofizikalnih karotažnih meritev, ki bo prispeval *in-situ* podatke o fizikalnih, kemičnih in geoloških lastnostih prevrtanih plasti. Dodatno bodo izvedene tudi down-hole meritve seizmičnih hitrosti P- in S-valov, ki bodo dale podatke o geomehanskih, seizmoloških in geoloških lastnostih mehkih sedimentov (Beraus et al., 2024). Omogočale bodo tudi boljšo globinsko interpretacijo refleksijskih seizmičnih profilov s pomočjo modeliranja s sintetičnimi seizmogrami.

Sklepne misli

Druga faza projekta DOVE je bila odobrena pomladi leta 2025. V organizaciji Geološkega zavoda Slovenije, ki je koordinator slovenskega konzorcija, smo imeli marca 2025 v Bovcu zelo uspešno mednarodno delavnico z udeležbo vseh partnerjev projekta DOVE. Sledila je prijava LIAG s pridruženimi slovenskimi partnerji na razpis nemške raziskovalne agencije za izvedbo refleksijskih seizmičnih raziskav. Te so predvidene v letu 2026, leta 2027 pa bo izvrtana raziskovalna vrtina.

Literatura

- Anselmetti, F., Bavec, M., Crouzet, C., Fiebig, M., Gabriel, G., Preusser, F., Ravazzi, C. & DOVE scientific team, 2022: Drilling Overdeepened Alpine Valleys (ICDP-DOVE): quantifying the age, extent, and environmental impact of Alpine glaciations. *Scientific Drilling*, 31/1, 51-70.
- Bavec, M., Tulaczyk, S.M., Mahan, S.A., Stock, G.M. 2004: Late Quaternary glaciation of the Upper Soča River Region (Southern Julian Alps, NW Slovenia). *Sediment. Geol.*, 165, 265-283.
- Beraus, S., Burschil, T., Buness, H., Köhn, D., Bohlen, T., Gabriel, G. 2024: A comprehensive crosshole seismic experiment in glacial sediments at the ICDP DOVE site in the Tannwald Basin. *Scientific Drilling*, 33/2, 237-248,
- Burschil, T., Buness, H., Tanner, D.C., Wielandt-Schuster, U., Ellwanger, D., Gabriel G. 2018: High-resolution reflection seismics reveal the structure and the evolution of the Quaternary glacial Tannwald Basin. *Near Surf. Geophys.*, 16/6, 593-610.

- Danciu L., Nandan S., Reyes C., Basili R., Weatherill G., Beauval C., Rovida A., Vilanova S., Sesetyan K., Bard P-Y., Cotton F., Wiemer S., Giardini D. (2021) - The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview. EFEHR Technical Report 001, v1.0.0, <https://doi.org/10.12686/a15>.
- DOVE Science Team 2024: Drilling overdeepened Alpine Valleys (DOVE) - Results of Phase 1 and implications for overarching goals, and perspectives for Phase 2. Report for ICDP, 43 p.
- Fitzko, F., Suhadolc, P., Aoudia, A., Panza, G.F. 2005: Constraints on the location and mechanism of the 1511 Western Slovenia earthquake from active tectonics and modeling of macroseismic data, *Tectonophysics*, 404, 77-90.
- Gosar, A. 2007: Microtremor HVSr study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. *Engin. Geol.*, 91, 178-193.
- Gosar, A. 2008: Site Effects Study in a Shallow Glaciofluvial Basin Using H/V Spectral Ratios from Ambient Noise and Earthquake Data: The Case of Bovec Basin (NW Slovenia). *J. Earthq. Eng.*, 12, 17-35.
- Gosar, A. 2019a: Review of geological and seismotectonic investigations related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes in Krn Mountains. *Geologija*, 62/1, 59-71.
- Gosar, A. 2019b: Review of seismological investigations related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes in Krn Mountains. *Geologija*, 62/1, 73-86.
- Gosar, A. 2020: Measurements of tectonic micro-displacements within the Idrija fault zone in the Učja valley (W Slovenia). *Acta Geographica Slovenica*, 60/1, 79-93.
- Jamšek Rupnik, P., Žebre, M., Jež, J., Zajc, M., Preusser, F., Monegato, G. 2022: Deciphering the deformation mechanism in Quaternary deposits along the Idrija Fault in the formerly glaciated Soča Valley, southeast European Alps. *Engin. Geol.*, 297, 106515.
- Kastelic, V., Vrabec, M., Cunningham, D., Gosar, A. 2008: Neo-Alpine structural evolution and present-day tectonic activity of the eastern Southern Alps: The case of the Ravne Fault, NW Slovenia. *J. Struct. Geol.*, 30, 963-975.
- Kuščer, D., Grad, K., Nosan, A., Ogorelec, B. 1974: Geološke raziskave soške doline med Bovcem in Kobaridom. *Geologija*, 17, 425-476.
- Lu Y., Wetzler N., Waldmann N., Agnon A., Biasi G. P., Marco S. 2020: A 220,000-year-long continuous large earthquake record on a slow-slipping plate boundary. *Sci. Adv.* 6, eaba4170.
- Marjanac, T., Marjanac, L., Poljak, M., Živčič, M., Bavec, M. 2001: Srpenica seismites - indicators of paleoseismicity in the Upper Soča valley, NW Slovenia. *Geologija*, 44/2, 341-350.
- McCalpin, J.P. 2009: Paleoseismology. Academic Press Int. Geophysics Series Vol. 95, 615 p.
- Preusser, F., Reitner, J., Schlüchter, C. 2010: Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. *Swiss J. Geosci.*, 103, 407-426.
- Schaller, S., Schuster, B., Beraus, S., Buechi, M.W., Bunnell, H., Anselmetti, F.S. 2025: Seismic- and core-based glacial sequence stratigraphy in an overdeepened trough in the northern Alpine foreland of Switzerland. *Swiss J. Geosci.*, 118, 1-20.
- Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Živčič, M., Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Čarman, M., Danciu, L., Gosar, A. 2022: The 2021 seismic hazard model for Slovenia (SHMS21): overview and results. *Bulletin of earthquake engineering*, 20/10, 4865–4894.

Mikro-klimatski monitoring v Postojnski jami v obdobju pred, med in po pandemiji COVID-19

Microclimatic monitoring in Postojna Cave before, during and after COVID-19 pandemics

Stanka Šebela *

Povzetek

V Postojnski jami, ki je v letu 2024 sprejela 890.000 obiskovalcev, izvajamo redni mikro-klimatski monitoring v urnih intervalih od leta 2009. Tako smo pridobili več-letne zvezne podatke temperature zraka, koncentracije CO₂, zračnega tlaka, relativne vlage, jamske ventilacije na več lokacijah. Obdobje pandemije COVID-19 je močno vplivalo na jamski turizem, saj so bile jame zaprte od 13. marca do 2. junija 2020 in od 26. oktobra 2020 do 9. junija 2021. Hkrati pa nam je zaprtje jam omogočilo, da lahko primerjamo podatke mikro-klimatskega monitoringa pred, med in po obdobju pandemije COVID-19. Pred obdobjem COVID-19 (2009 – 2019) je temperatura zraka v Postojnski jami (Lepe jame) narasla za ~0.55 °C. V obdobju COVID-19 v Lepih jamah opazimo izrazit padec temperature za ~1 °C, kar je povezano z upadom obiskovalcev v obdobju, ko je bila jama zaprta za ~10 mesecev. V letih 2022 – 2025 je temperatura začela ponovno rasti, kot narašča tudi število obiskovalcev. V Speleobiološki postaji opravljamo zvezne meritve temperature zraka in koncentracije CO₂ od leta 2015. Gre za manjšo jamsko dvorano, ki na leto lahko sprejme tudi 130.000 obiskovalcev. Ker so bila kovinska vrata, ki preprečujejo povezavo s preostalim delom Postojnske jame, leta 2015 vseskozi zaprta, je v dvorani poleti močno narasla koncentracija CO₂, ki je znašala ~4.300 ppm. Z omilitvenim ukrepom smo predlagali, da vrata ostanejo odprta vse leto saj smo le tako lahko znižali temperaturo zraka in preveliko koncentracijo CO₂. Vendar pa po marcu 2022 opazujemo, da se je temperatura kljub odprtim vratom začela dvigati in se močno približuje najvišjim poletnim vrednostim v letih 2015 – 2017, kar je povezano z obiskovalci in zunanjimi klimatskimi spremembami.

Ključne besede: mikro-klimatski monitoring, Postojnska jama, COVID-19, Slovenija.

Abstract

In the Postojna Cave, which received 890,000 visitors in 2024, regular microclimatic monitoring at hourly intervals has been organised since 2009. In this way, long-term data on air temperature, CO₂ concentration, atmospheric pressure, relative humidity, and cave ventilation have been obtained at several locations. The COVID-19 pandemic period strongly affected cave tourism, as the cave was closed from 13 March to 2 June 2020 and from 26 October 2020 to 9 June 2021. This situation enabled us to compare microclimatic data from before, during, and after the COVID-19 pandemic period. Before the COVID-19 period (2009–2019), air temperature in Postojna Cave (Lepe jame) rose by approximately 0.55 °C. During the COVID-19 period, we detected a temperature drop of about 1 °C in Lepe jame, which is connected to the decrease in visitors during the approximately 10 months when the cave was closed. During 2022–2025, the temperature began to rise again, as did the number of visitors. In the Speleobiološka postaja, continuous monitoring of air temperature and CO₂ concentration has been organised since 2015. This is a small cave chamber that can accommodate 130,000 visitors per year. Because the metal doors that prevent ventilation from this chamber to the rest of the cave were closed in 2015, the CO₂ concentration rose sharply, reaching approximately 4,300 ppm. As a mitigation measure, we suggested that the metal doors remain open throughout the year, as only in this way were we able to reduce the high temperature and CO₂ concentration. However, after March 2022, we noticed that the temperature started to rise again, even with the doors open, and its values are close to the highest summer temperatures recorded in 2015–2017, which is related to visitor numbers and changes in the outside climate.

Keywords: micro-climatic monitoring, Postojna Cave, COVID-19, Slovenia

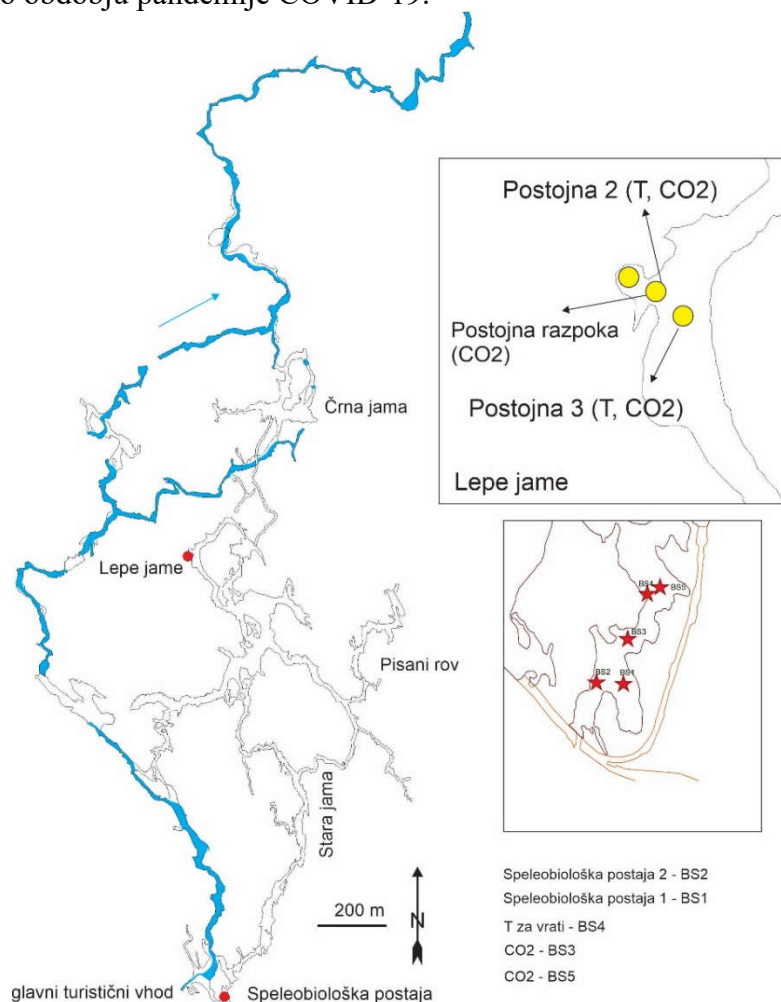
* Inštitut za raziskovanje kraša ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija

Uvod

V Katastru jam Slovenije je bilo konec leta 2025 registriranih ~15.600 jam (Kataster jam, 2025), ki jih najdemo na 10.184 km², kar predstavlja razširjenost kraškega terena v Sloveniji (Gostinčar in Stepišnik, 2023). Najpomembnejši turistični jami sta Postojnska jama in Škocjanske jame, katerih obiskovalci so skupaj v letu 2022 predstavljali že 13,3% vseh turistov v Sloveniji. Po zakonu je v turističnih jamah potrebno spremljanje stanja jamskega okolja, spremljanje žive narave, jamskega inventarja, ekoloških pogojev, onesnaženja v jamah in števila obiskovalcev (Zakon o varstvu podzemnih jam, 2019).

Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU opravlja vlogo jamskega skrbnika za Postojnsko jamo in Predjamo, kjer že od leta 2009 izvajamo redni mikro-klimatski in biološki monitoring (Šebela, 2022). Tako smo pridobili več-letne zvezne podatke temperature zraka, koncentracije CO₂, zračnega tlaka, vlage, jamske ventilacije na več lokacijah.

Obdobje pandemije COVID-19 je močno vplivalo na jamski turizem, saj so bile jame zaprte od 13. marca do 2. junija 2020 in od 26. oktobra 2020 do 9. junija 2021. Hkrati pa nam je zaprtje jam omogočilo, da lahko primerjamo podatke mikro-klimatskega monitoringa pred, med in po obdobju pandemije COVID-19.



Slika 1 – Tloris Postojnske jame in lokacije mikro-klimatskih merilnih mest v Lepih jamah in Speleobiološki postaji.

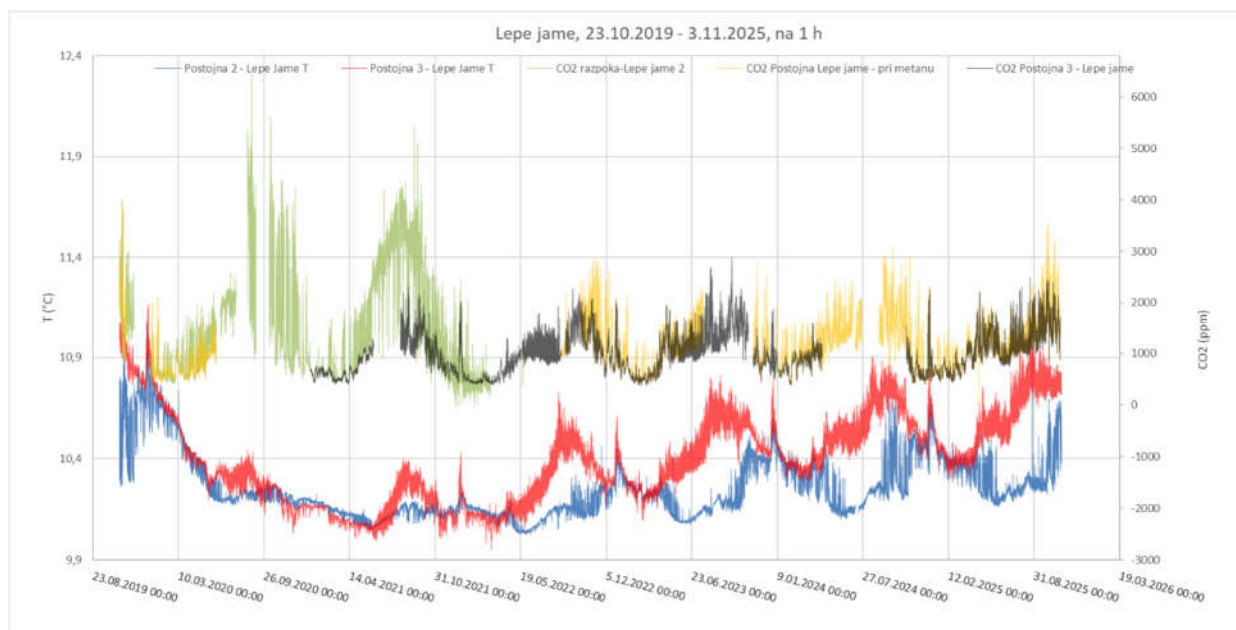
V tem prispevku obravnavamo rezultate meritev temperature zraka in koncentracijo CO₂ v turistično najbolj obremenjenem rovu Postojnske jame - Lepih jamah (Slika 1), ki se izvajajo na več lokacijah. Hkrati so predstavljeni tudi podatki meritev temperature zraka in koncentracije CO₂ v Speleobiološki postaji, ki predstavlja manjšo dvorano v vhodnih delih Postojnske jame (Slika 1). Primerjava zelo turistično obiskanega obdobja pred COVID-19 z obdobjem, ko je bila Postojnska jama zaprta za obiskovalce je pomembna za razumevanje vpliva obiskovalcev na jamsko mikro-klimo.

Namen študije je bil tudi pridobivanje in analiza večletnih podatkov mikro-klimatskih parametrov (temperatura zraka in koncentracija CO₂) iz turističnih jam v Sloveniji na osnovi FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) usmeritev (<https://www.go-fair.org/fair-principles>) in vključevanje le-teh v baze podatkov kot so: Karst Metadata Portal (IZRK Metadata Portal, 2021-) in EPOS Near Fault Observatories portal (<http://fridge.ingv.it/>).

Rezultati meritev temperature zraka in koncentracije CO₂ v Lepih jamah

Postojnska jama je v letu 2024 sprejela 890.000 obiskovalcev, podobno kot leta 2019. Leta 2020 je število obiskovalcev padlo za 85% v primerjavi z letom 2019 in tudi v letu 2022 smo še vedno imeli za 72% manj obiskovalcev kot leta 2019.

Pred obdobjem COVID-19 (2009 – 2019) je temperatura zraka v Postojnski jami (Lepe jame) narasla za ~0.55 °C. V obdobju COVID-19 v Lepih jamah opazimo izrazit padec temperature za ~1 °C (Slika 2), kar je povezano z upadom obiskovalcev v obdobju, ko je bila jama zaprta za ~10 mesecev. V letih 2022 – 2025 je temperatura začela ponovno rasti, kot narašča tudi število obiskovalcev. V obdobju brez obiskovalcev je padec temperature zraka v jami hiter (~1 °C v 10 mesecih), medtem ko kljub vsakoletnemu naraščanju števila turistov, jamsko ozračje potrebuje daljše obdobje (2022 – 2025), da se temperatura zraka zopet približa višjim vrednostim, kot so bile pred obdobjem COVID-19.



Slika 2 – Podatki temperature zraka (°C) in koncentracije CO₂ (ppm) za Lepe jame v Postojnski jami za obdobje 23.10.2019 – 3.11.2025.

V obdobju pred COVID-19 smo na lokacijah Postojna 2 in 3 v Lepih jamah opazovali obrnjeni trend za temperaturo. Sprva smo predvidevali, da gre za naravno obnašanje temperature (Šebela in Turk, 2011; Šebela, 2022), vendar pa je obdobje COVID-19 pokazalo drugačne pogoje. Ko je bila jama zaprta, sta si bili obe lokaciji temperaturno mnogo bolj podobni, kot ko je jama odprta za turizem. To pomeni, da je obrnjeni temperaturni trend na teh dveh mestih pogojen z obiskovalci in verjetno s spremenjeno ventilacijo, čeprav je med obema merilnima mestoma razdalja le ~15 m.

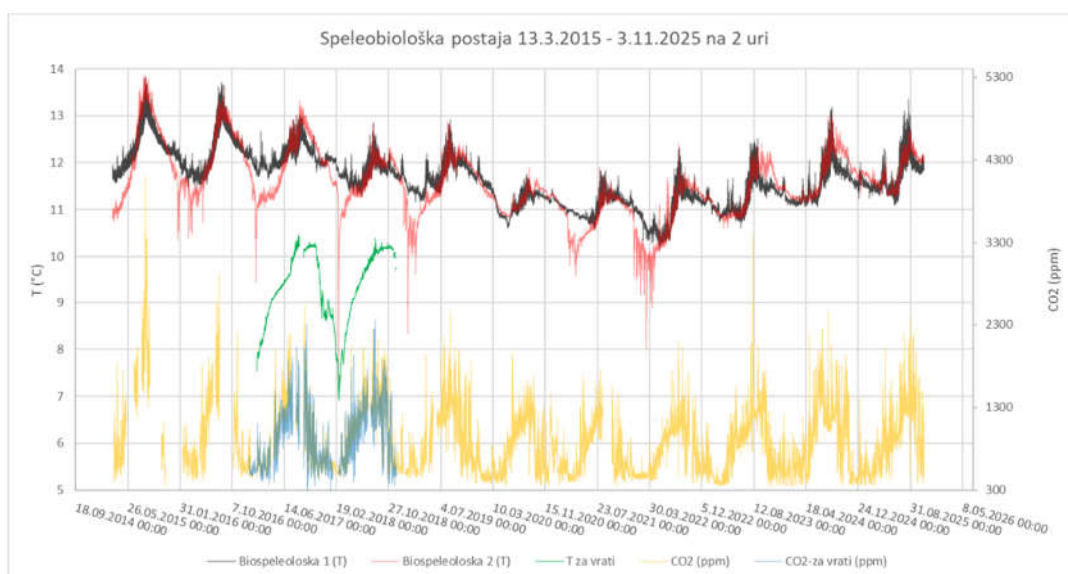
Tudi koncentracije CO₂ na mestu Postojna 3 so med obdobjem COVID-19 kazale nižja dnevna nihanja kot pa v obdobju z obiskovalci (Slika 2).

Na Sliki 2 opazimo tudi pet temperaturnih in CO₂ viškov, in sicer konec decembra 2019, 2021, 2022, 2023 in 2024. Ti dogodki so povezani s prireditvijo Jaslice v Postojnski jami, ki jo obišče tudi 25.000 obiskovalcev v petih dneh (Šebela in Turk, 2014; Šebela, 2022). Med prireditvijo koncentracija CO₂ lahko naraste za 1.200 ppm (Šebela et al., 2013), kar je povezano z večjim številom obiskovalcev. Tudi temperatura zraka se v tem obdobju dvigne za vsaj 0,3°C (Šebela, 2022). Naravni pogoji, ki smo jih opazovali, ko je bila jama zaprta, kažejo padanje temperature zraka in koncentracije CO₂ med 500 do 600 ppm, kar je primerljivo z zimskimi pogoji zunaj jame.

Rezultati meritev temperature zraka in koncentracije CO₂ v Speleobiološki postaji

V Speleobiološki postaji (Slika 3) opravljamo zvezne meritve temperature zraka in CO₂ od leta 2015. Gre za dvorano z volumnom 36.000 m³ (Šebela in Novak, 2024), ki na leto lahko sprejme tudi 130.000 obiskovalcev.

Dostop iz Speleobiološke postaje proti nadaljevanju Postojnske jame je zaprt s kovinskimi vrati, ki preprečujejo izmenjavo zraka med močno turistično obremenjeno dvorano in preostalimi deli jami. Ker so bila vrata leta 2015 vseskozi zaprta, je v dvorani poleti močno narasla koncentracija CO₂, ki je znašala ~4.300 ppm (Slika 3). Odprta vrata v obdobju 2016 – 2018 ter meritve v dvorani in za vrati-izven dvorane, so potrdila, da je smiselno pustiti vrata odprta celo leto, saj le tako lahko, kljub podobnemu številu obiskovalcev, znižamo temperaturo zraka in preveliko koncentracijo CO₂.



Slika 3 – Podatki temperature zraka (°C) in koncentracije CO₂ (ppm) za Speleobiološko postajo za obdobje 13.3.2015 – 3.11.2025.

S predlaganim omilitvenim ukrepom, ko smo vrata pustili odprta, smo v obdobju od 2015 do 2022 lahko opazovali znižanje temperature zraka, in sicer za skoraj 2 °C. Vendar pa po marcu 2022 lahko opazujemo, da se je temperatura kljub odprtim vratom začela dvigati in se močno približuje najvišjim poletnim vrednostim v letih 2015 – 2017.

Ker se Speleobiološka postaja nahaja blizu površja in vhoda v Postojnsko jamo, je poleg turističnega vpliva na jamsko mikro-klimo izpostavljena tudi vplivom zunanjega segrevanja ozračja. Tudi poletni viški koncentracije CO₂ se v zadnjih letih dvigujejo in lahko dosežejo 2.300 ppm, medtem, ko so bili v obdobju COVID-19 z občutno nižjim številom obiskovalcev ~1.700 ppm.

Zaključki

Zvezno merjenje mikro-klimatskih parametrov v Postojnski jami, ki se na nekaterih mestih izvaja že od leta 2009 je v obdobju pandemije COVID-19, ko je bila jama ~ 10 mesecev zaprta pokazalo stanje mikro-klime brez prisotnosti obiskovalcev.

V Lepih jamah je padec temperature za ~ 1 °C med obdobjem COVID-19 povzročil spremembo v jamski ventilaciji na merilnih mestih Postojna 2 in 3, saj smo na obeh mestih zabeležili podobni temperaturni krivulji, ki se močno razlikujeta od obdobja, ko so prisotni turisti. Ko je jama odprta za turizem, opazujemo obrnjen temperaturni trend na mestih Postojna 2 in 3, kar kaže na antropogeni vpliv.

Tudi vsakoletna zimska prireditev v Postojnski jami s povečanim številom obiskovalcev (~ 5.000/dan) kaže antropogeni vpliv, saj koncentracija CO₂ lahko naraste za 1.200 ppm in temperatura zraka za vsaj 0,3°C.

V Speleobiološki postaji smo glede na močno povišane koncentracije CO₂ v letu 2015 predlagali omilitveni ukrep, da naj kovinska vrata, ki omejujejo dvorano, ostanejo odprta skozi celo leto. Tako se je v obdobju 2015 – 2022 temperatura zraka znižala za skoraj 2 °C. Hkrati v tem obdobju nismo več zabeležili izjemnih koncentracij CO₂. Vendar pa po marcu 2022 lahko opazujemo, da se je temperatura kljub odprtim vratom začela dvigati in se močno približuje najvišjim poletnim vrednostim v letih 2015 – 2017. Vzrok je vpliv obiskovalcev, hkrati pa tudi bližina površja in zunanje klimatske spremembe.

Zahvala

Raziskava je bila del: Infrastrukturnega programa "Sofinanciranje izvajanja mednarodnega infrastrukturnega projekta EPOS" (ARIS I0-E017); programa "Raziskovanje krasa" (ARIS P6-0119); RI-SI-EPOS projekta; HORIZON Research and Innovation Actions projekta EPOS ON in HORIZON-INFRA projekta TRANSFORM².

Literatura

- Gostinčar, P., Stepišnik, U. (2023). Extent and spatial distribution of karst in Slovenia. *Acta geographica Slovenica*, 63, 1. <https://doi.org/10.3986/AGS.11679>.
<http://fridge.ingv.it/>, Accessed 15. 11. 2025
<https://www.go-fair.org/fair-principles/>, Accessed 15. 11. 2025
IZRK metadata portal (2021-). Aljančič, M. (Ur), Kafol, Ž. (Ur), Pipan, T. (Ur), Šebela, S. (Ur), Čeligoj Biščak, J. (Ur), Ravbar, N. (Ur). Postojna: Karst Research Institute ZRC SAZU, <https://metadata.izrk.zrc-sazu.si/srv/eng/catalog/search#/home>.
Kataster jam (2025). <https://www.katasterjam.si/> Accessed 15. 11. 2025

- Šebela, S., Turk, J. (2011). Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 371–386. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2013.06.011>.
- Šebela, S. (2022). Natural and anthropogenic impacts on cave climates. Elsevier, 275 pp., <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04882-0>.
- Šebela, S., Novak, U. (2024). Attenuating Anthropogenic Impact on Subterranean Micro-Climate: Insights from the Biospeleological Station in Postojna Cave. *Geosciences*, 14, 3, 87. <https://doi.org/10.3390/geosciences14030087>.
- Šebela, S., Novak, U., Năpăruș-Aljančič, M. (2025). SLO KARST NFO Geochemical data-part 1 [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15599149>.
- Zakon o varstvu podzemnih jam, (2019). <https://pisrs.si/api/datoteke/integracije/356181932>. Accessed 15. 11. 2025

Vpliv telurskih tokov na meritve lokalnega magnetnega polja

Rudi Čop¹

Povzetek

Stalne meritve spremembe geomagnetnega polja se opravljajo na geomagnetnih observatorijih. Za njihovo uspešno delovanje je potrebno upoštevati posebnosti mesta njihove postavitve in posebnosti okolice. Pri postavitvi geomagnetnega observatorija v Slovenski Istri je bilo med drugim potrebno upoštevati, da je to območje močno obremenjeno z atmosferskimi razelektritvami. Na magnetometre strele nimajo le električnega vpliva temveč tudi posredno termičnega in mehanskega. Strele vplivajo na delovanje magnetometrov tudi posredno preko podzemnih električnih tokov, telurskih tokov. Ti lokalni toki so del globalnega električnega tokokroga GEC (angl. global electric circuit), katerega osnovni generatorji so električne strele. Električni tok v tem tokokrogu pogojujejo tudi geomagnetne razmere v polarnem krogu, ki jih narekuje vreme v vesolju (angl. space weather).

Ključne besede: magnetometri, telurski toki, razelektritve v atmosferi, magnetni tornadi v polarnem območju

Abstract

The influence of telluric currents on the measurement of the local magnetic field

Continuous measurements of changes in the geomagnetic field are carried out at geomagnetic observatories. For their successful operation, it is necessary to take into account the specifics of the installation site and the surrounding area. When setting up a geomagnetic observatory in Slovenian Istria, it was necessary to take into account, among other things, that this area is heavily overloaded by atmospheric discharges. Lightning has not only an electrical effect on magnetometers, but also an indirect thermal and mechanical effect. Lightning also affects the operation of magnetometers indirectly through underground electric currents, telluric currents. These local currents are part of the global electric circuit (GEC), the basic generators of which are electric lightning. The electric current in this circuit is also conditioned by geomagnetic conditions in the polar circle, which are dictated by space weather.

Keywords: magnetometers, telluric currents, atmospheric discharges, magnetic tornadoes in the polar caps

Magnetno polje

Magnetno poje je prostor, v katerem deluje magnetna sila F_m . V merskem sistemu SI (fr. *Système international d'unités*, angl. *International System of Units*) je ta sila merjena v enotah newton [$N = kg \cdot m/s^2$]. Magnetna sila deluje v magnetnem polju brez posrednika in takoj, ko je v njem vzpostavljen njen izvor (Morrish, 2001). Ustreza Coulombovemu zakonu, ki ga v simbolični obliki lahko zapišemo z enačbo (1). Enačba je postavljena na osnovi posameznega elektrostaticnega poizkusa in idealizirana. V izhodišču opisuje medsebojno delovanje dveh točkastih električnih nabojev, ki sta na natančno določeni medsebojni razdalji. Enačba (1) torej velja za vse poenostavljene primere in ob sprejetih predpostavkah (Spavieri et al, 2004).

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

$$F_m \propto \frac{1}{r^{2\pm\epsilon}} \quad (1)$$

V enačbi (1) je r razdalja od izvora polja sile in ϵ odstopanje od vrednosti 2. S to enačbo se opisujejo tudi sile v gravitacijskem in v magnetnem polju. Kot izvora gravitacijskega in elektrostatičnega polja sta prepoznana masa in električni naboj v monopolni obliki. Magnetno polje pa se oblikuje le ob premikanju električnega naboja oziroma ob prisotnosti magnetnega dipola. Primer magnetnega dipola je paličasti permanentni magnet. V poenostavljenih primerih in ob magnetnem dipolu kot izvoru magnetne sile F_m je ta obratno proporcionalna vrednosti r^3 .

Kot vse planete našega osončja, ki imajo tekočo sredico, tudi Zemljo ovija magnetno polje. Obstoj tega polja lahko ugotavljamo s kompasno iglo, ki se monotono obrača proti severnemu magnetnemu polu Zemlje. Podrobneje pa se s tem poljem ukvarja geofizika, področje znanosti, ki planet Zemlja proučuje s pomočjo fizikalnih principov. Geomagnetno polje je rezultat medsebojnega delovanja različnih izvorov:

- glavno magnetno polje, ki izvira iz sredine Zemlje;
- magnetno polje skorje Zemlje, ki ga ustvarjajo namagnetene kamnine v njej;
- zunanje magnetno polje, ki ga ustvarjajo električni tokovi v ionosferi kot rezultat medsebojnega delovanja sončevega vetra in magnetosfere;
- magnetno polje, ki ga ustvarjajo električni toki v skorji Zemlje in v zgornji plasti njenega plašča.

Magnetno polje Zemlje se spreminja tako po kraju kot tudi po času (Lanza & Meloni, 2006). Okoli 95% tega polja, izmerjenega na površini Zemlje, izhaja iz njene notranjosti. Na globini 2890 km se začne zunanje jedro našega planeta. Njegova gostota je tolikšna, da je najverjetneje njegova glavna sestavina železo. Pri pritisku, ki vlada v zunanjem delu jedra, ima kovinska zlitina viskoznost vode. Njeno konvekcijsko pretakanje povzroča toplota iz trdega notranjega jedra. To pretakanje je pod vplivom nehomogene strukture tako notranjega jedra kot tudi plašča nad zunanjim jedrom. Skupaj z rotacijo celotnega planeta in z diferencialno rotacijo notranjega jedra so podani vsi pogoji za nastanek in vzdrževanje geomagnetnega polja. Teorija o magnetnem polju Zemlje izhaja iz razlage nastanka magnetnega polja Sonca (Larmor, 1919). Izhodišče je enopolni električni dinamo, ki se z ustreznimi dopolnitvami uporablja tudi za teoretično razlago delovanja in za modeliranje geomagnetnega dinamika (Jones, 2011).

Gostota energije v elektromagnetnem polju merjena na površini Zemlje w [J/m^3] je približno obratno proporcionalna frekvenci f [Hz] tega polja, kar opisuje tudi enačba (2) (Füllekrug & Fraser-Smith, 2011). V frekvenčnem območju od 10^{-9} Hz do 10^7 Hz odstopa zakon $w = k/f^2$ od dejanskih merilnih vrednosti pri posamezni frekvenci za največ ± 2 eksponentni stopnji.

$$w(f) \propto \frac{1}{f^{2\pm\epsilon}} \quad (2)$$

Glavni izvor gostote energije elektromagnetnega polja pri frekvencah pod $f < 1$ Hz je magnetno polje z izvorom v središču Zemlje, pri katerem prevladuje magnetna komponenta tega polja. Pri frekvencah $f > 1$ Hz so glavni izvori različne oblike razelektritev v atmosferi, pri katerih prevladuje električna komponenta. Izvori v razponu preko 16 eksponentnih stopenj glede na njihovo frekvenco so naključni in se s časom stalno spreminjajo. Pojav je sicer podoben Brownovemu gibanju, vendar v naravi ni poznan podoben pojav, ki bi imel enake lastnosti, kot jih ima razporeditev gostote energije

elektromagnetnega polja, merjene na površini Zemlje glede na frekvenco in v odvisnosti od časa, kraja in izvora.

Geomagnetni observatorij

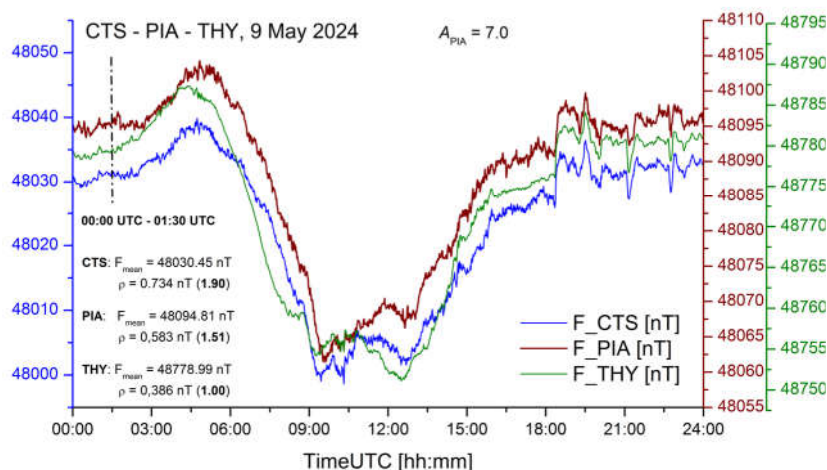
Slovenija v celoti leži na severozahodnem delu Jadranske tektonske mikroplošče, ki je v središču jugovzhodne Evrope (Slika 1). Na njenem ozemlju obstaja preko sto tektonskih prelomov, narivov in večjih razpok (Placer, 2008; Gosar, 2020). Glede na sosednjo Evrazijo je na ozemlju Slovenije povečan šum v lokalnem magnetnem polju. V zadnjih desetih letih na jugozahodnem delu Slovenije redno obratuje geomagnetni observatorij PIA (Piran, Slovenia). Ta observatorij je vključen v INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network), mednarodno informacijsko mrežo za izmenjavo merilnih podatkov o stanju lokalnih magnetnih polj v skoraj realnem času. Zato smo lahko magnetograme iz observatorija PIA primerjali z magnetogrami vseh tistih observatorijev iz vsega sveta, ki so vključeni v to informacijsko mrežo (BGS, 2025). Ker nismo našli nobenega primerljivega, smo primerjavo nadaljevali z magnetogrami geomagnetnih observatorijev nacionalnega pomena v neposredni sosesčini Slovenije.



Slika 1: Osrednji del Jadranske tektonske mikroplošče z vrisanim ozemljem Slovenije in z okoliškimi geomagnetnimi observatoriji vključenimi v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET: LON (Lonjsko polje, Croatia), THY (Tihany, Hungary), HRB (Hurbanovo, Slovakia), NCK (Nagycenk, Hungary), WIC (Conrad Observatory, Austria), FUR (Furstenfeldbruck, Germany), BFO (Black Forest, Germany), AQU (L'Aquila, Italiy), DUR (Duronio, Italy) (INTERMAGNET, 2025).

Po nivoju šuma so rezultati meritev na observatoriju PIA primerljivi z meritvami na observatoriju CTS (Castello Tisino, Italy), ki je geomagnetni observatorij nacionalnega pomena (Real-Time, 2025). Kot izhodišče za primerjavo smo izbrali observatorij THY (Tihany, Hungary), ker je ta najbližji mejam Slovenije in tudi najstarejši v njeni bližnji okolici (Csontos et al., 2007). V mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET je observatorij THY vključen v skupino IMO (INTERMAGNET Magnetic Observatory).

Šum v lokalnem magnetnem polju na ozemlju Slovenije se povečuje od vzhoda proti zahodu, od meje z Madžarsko proti observatoriju CTS. Od vzhodne meje tega ozemlja pa do njegove sredine se poveča za 51% in do geomagnetnega observatorija CTS še za nadaljnjih 39% (Slika 2). Prav tako ta šum narašča od obal Jadranskega morja proti severu. Od observatorija PIA do observatorija SNV (Sinji vrh, Slovenia) se poveča za 20% (Čop et al., 2021). Povečan šum v lokalnem magnetnem polju na Jadranski tektonski mikroplošči ima svoje izvore. Do sedaj smo odkrili naslednje izvore tega šuma: prehod nevihtnih front MCS (Mesoscale Convective System) (Čop, 2015), Luna (Kuhar et al, 2020) in napetost v Jadranski tektonski mikroplošči (Pavlovčič-Prešeren et al, 2020). Geomagnetno polje prodira skozi vse plasti plašča in skorje Zemlje in s seboj prinaša informacije o spremembah v gibanju konvekcijskih tokov v notranjosti našega planeta ter s tem tudi o spremembah napetosti tektonskih plošč. Je izrazit geofluid, kot so tudi podzemne in geotermalne vode, slanice (angl. basinal brines) in nafta.

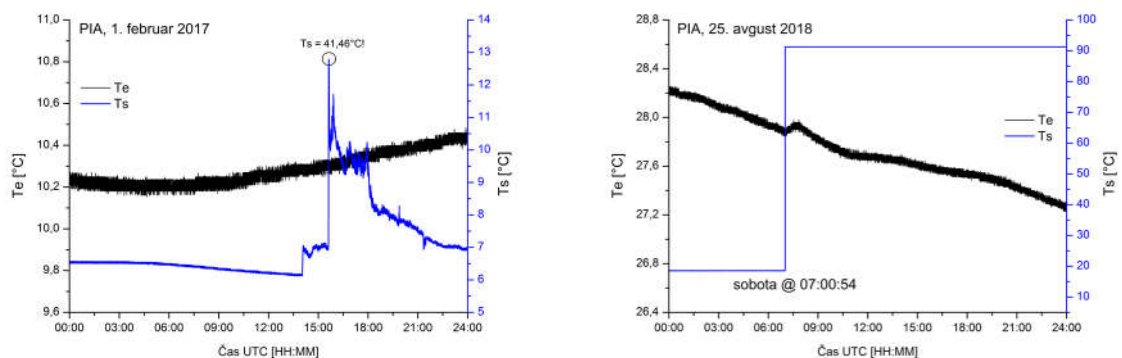


Slika 2: Na ozemlju Slovenije se nivo šuma v lokalnem magnetnem polju povečuje od vzhoda proti zahodu.

Gradnja observatorija PIA je bila prilagojena razmeram na jugozahodnem delu Slovenije kjer ta observatorij tudi stoji. To področje spada med tiste dele Evrope, kjer je letna gostota strel na kvadratni kilometer med najvišjimi. Zato je bila zelo pozorno urejena zaščita merilne opreme pred prenapetostmi (Čop et al, 2014). Zaradi temperaturne stabilizacije in večje zaščite pred gozdnimi požari, poplavami površinskih vod in vandalizmom so magnetometri za zvezne meritve sprememb lokalnega magnetnega polja nameščeni v podzemne jaške. Zaradi lokacije observatorija na robu kmetijskih zemljišč in precej stran od naselij je bilo potrebno uspešno rešiti tudi prenos merilnih podatkov preko omrežja mobilne telefonije (Čop, 2016). To omrežje omogoča tako dostop do interneta kot tudi galvansko ločitev observatorija od celotnega komunikacijskega sistema.

Za zvezno merjenje sprememb magnetnega polja na geomagnetnih observatorijih se uporabljajo protonski magnetometri in magnetometri, ki merijo spremembe treh med seboj neodvisnih komponent lokalnega magnetnega polja. Protonske magnetometre, ki merijo skalarno vrednost vektorja gostote magnetnega polja S [nT], smo uporabili tudi pri začetnih meritvah lastnosti magnetnega polja na ozemlju Slovenije (Čop & Kosovac, 2010). Triosni magnetometri fluxgate so na observatoriju najobčutljivejši instrumenti.

Zanje je potrebno zagotoviti zelo majhno nihanje temperature, ki preko celega dneva ne sme preseči 1°C. Zahtevajo tudi redno spremljanje delovanja in redno vzdrževanje. Z njimi se zvezno merijo spremembe magnetnega polja, so variometri. Prav zaradi njih je vzdrževanje geomagnetnega observatorija v Slovenski Istri zelo zahtevno. Zaradi potresno aktivnega področja je uporabna le konstrukcija variometrov pri katerih senzor ni obešen (Čop et al., 2021). Udari strel variometre ogrožajo zaradi prenapetosti in posredno zaradi termičnih in mehanskih vplivov. Najmanjša škoda nastane v primeru, ko je poškodovan samo senzor za temperaturo T_s [°C] triosnega senzorja. V primeru, ko pride do popolnega uničenja senzorja za temperaturo T_s pa je običajno prizadeta tudi celotna konstrukcija senzorja. Zato mora biti triosni magnetometer fluxgate ustrezne mehanske konstrukcije za pogoje v katerih deluje observatorij PIA. Na njegovo delovanje v veliki meri vplivajo lokalni podzemni električni toki (telurski toki) (Slika 3), ki so del globalnega električnega tokokroga GEC (Global electric circuit).



Slika 3: Vplivi telurskih tokov na meritev temperature elektronike T_e [°C] in na meritev temperature T_s [°C] senzorja neodvisnih komponent magnetnega polja: nepravilna meritev T_s , ki se je po 14 dneh ponovno popravila (levo) in popolno uničenje tipala za T_s (desno).

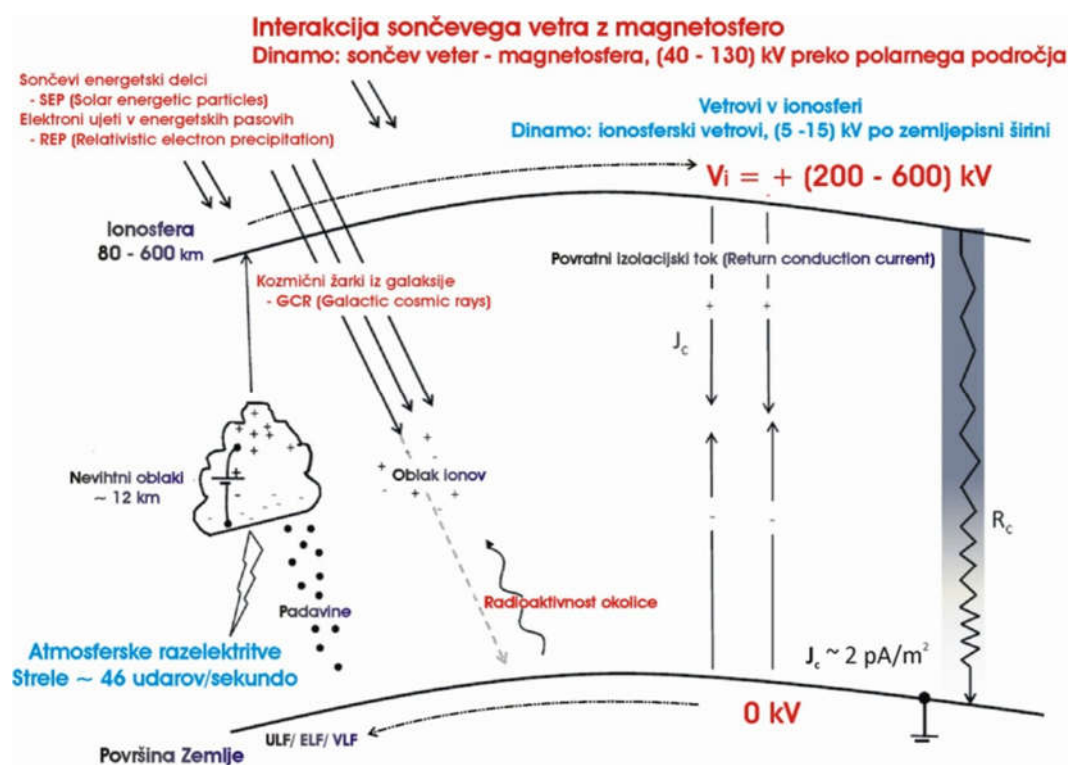
Globalni električni tokokrog

Globalni električni tokokrog GEC (Global Electric Circuit) poteka skozi atmosfero do površine Zemlje. Ta tokokrog se nadaljuje skozi skorjo in zgornje plasti plašča Zemlje ter se zaključuje skozi spodnje plasti njene ionosfere. V začetku preteklega stoletja je že bilo znano, da v atmosferi obstaja pozitivna naelektrenost, da je zrak ioniziran in da slabo prevaja električni tok. Ker sta tako površina Zemlje kot tudi ionosfera dobra električna prevodnika, o velikosti električnega toka v globalnem električnem tokokrogu odloča električna prevodnost atmosfere. Ta se povečuje od površine Zemlje do višine okoli 50 km, kjer se začneja ionosfera. Glavni izvor ionov v atmosferi nad oceani so kozmični žarki (Shao et al., 2025; Tacza et al., 2024), nad kontinenti pa tudi naravna radioaktivnost tal, ki se zaznavno poveča v območju aktivnih tektonski prelomnic (Pulinets, 2009). V atmosferi ustvarjeni ioni predstavljajo njeno naelektrenost in omogočajo vertikalne električne toke. Na osnovi električnih meritev atmosfere, ki so bile narejene v zadnjih dveh stoletjih, se spremembe v globalnem električnem tokokrogu odražajo na več različnih sicer neodvisno obravnavanih geofizikalnih področjih.

Med letom 1905 in 1908 so bile na Tihem oceanu narejene začetne raziskave z leseno jadrnico Galilee, ki je bila predelana v geomagnetni observatorij. Merili so tudi

naelektrenost atmosfere v času lepega vremena (angl. Carnegie curve) (Harrison, 2004; Aplin et al, 2008). Večino Zemlje prekrivajo oceani, zato je bilo najprej prevzeto, da je električna prevodnost njene površine enaka prevodnosti slane vode. Pri raziskavah geomagnetizma v začetku preteklega stoletja pa je bilo ugotovljeno, da je električna prevodnost vlažne zemlje dober približek električni prevodnosti celotnega planeta (Chapman, 1919).

Naelektrenost atmosfere v času lepega vremena je raziskoval tudi C.T.R. Wilson. Izvor električnega polja v atmosferi je videl v pretoku vertikalnih električnih tokov skozi električno slabo prevodno atmosfero. Opisal je senzor za merjenje teh tokov in s tem povezanim električnim poljem. V dvajsetih letih preteklega stoletja je v svojih člankih predstavil svojo teorijo o globalnem električnem tokokrogu (Wilson, 1921). Nastanek električnega polja je pripisal strelam v troposferi, najnižji plasti atmosfere. Te strele, ki nastajajo predvsem v ekvatorialnem pa tudi v srednjem širinskem pasu, dovajajo ionosferi pozitivne naboje, površini Zemlje pa negativne naboje (Slika 4). Ob lepem vremenu je v tem tokokrogu napetost med površino Zemlje in ionosfero okoli 250 kV in vertikalni električni tok okoli 2 pA/m² (Liu et al., 2010; Mach et al., 2011).



Slika 4: Globalni električni tokokrog GEC (Global Electric Circuit) (Aplin et al., 2008).

Prevodnost ionosfere je odvisna od fizikalnih procesov v njej, ki so odvisni od lokalnega časa, geografske širine, letnega časa, od sončevega cikla in od stoletnega cikla (RTO, 2009). Ta prevodnost je odvisna od opazovane smeri v ionosferi (anizotropija). Gibanje elektronov je namreč vezano na magnetne silnice, gibanje pozitivnih ionov pa na premikanje električno nevtralnega plina v ionosferi. Električni toki v ionosferi v polarnem krogu, ki tečejo vzdolž magnetnih silnic, so Birkelandovi toki (angl. Birkeland current). Ti toki, imenovani tudi toki FAC (field-aligned currents), povezujejo magnetosfero z ionosfero v območju magnetnih polov Zemlje. Elektroni, ki vletavajo v ionosfero, povzročajo električne toke FAC, ki tečejo iz ionosfere v magnetosfero. Ob povečani

aktivnosti v magnetosferi se povečajo tudi ti toki, ki pri tem povzročajo polarni sij. Poleg Birkelandovih tokov v ionosferi okoli magnetnih polov Zemlje tečejo vzporedno z električnim poljem Pedersenovi toki (angl. Pedersen currents), ki dodatno segrevajo ionosfero. Hallovi toki (angl. Hall currents) pa tečejo pravokotno na električno polje in so odvisni od jakosti geomagnetnega polja.

V zadnjih desetih letih potekajo pospešene raziskave razmer v polarnem krogu. V ta namen se uporabljajo permanentne postaje GNSS (Global Navigation Satellite System) na Grenlandiji za merjenje scintilacije v ionosferi, flota telekomunikacijskih satelitov Iridium, ki so opremljeni tudi z magnetometri, in flota treh raziskovalnih satelitov Swarm, ki so opremljeni tako z magnetometri kot tudi z merilci električnega polja. Ob povečani geomagnetni aktivnosti nastajajo v polarnem področju magnetni tornadi, ob katerih Birkelandovi toki vnašajo v zgornje plasti atmosfere električno moč ocenjeno na ~ 1 TW (Lu et al., 2025; ESA, 2025).

Zaključek

Osnovni zakon o lastnostih gravitacijskega, elektrostatičnega in magnetnega polja je bil postavljen koncem 18. stoletja, zakon o gostoti energije elektromagnetnega polja na površini Zemlje pa je bil postavljen na osnovi meritev, ki so bile opravljene v drugi polovici 20. stoletja. Oba zakona veljata z ustreznimi omejitvami za vse z zakonom obravnavane primere. Postavljena sta bila na induktivni način na osnovi velikega števila meritev. Ostaja pa nepojasnen mehanizem, ki omejuje gostoto energije elektromagnetnega polja na površini Zemlje na ugotovljenem nivoju $w(f) = k/f^2$. Prav tako še niso dokazane vse trditve glede vpliva telurskih tokov na stabilizacijo tektonskih plošč tako v lokalnih razmerah kot na globalni ravni. Telurski toki so namreč del globalnega električnega tokokroga. Tako sprememba gostote energije kot tudi spremembe v jakosti telurskih tokov vplivajo na biosfero in s tem tudi na nas in na našo civilizacijo. Njihove spremembe pa se odražajo tudi v spremembi lokalnega magnetnega polja.

Slovenija v celoti leži na Jadranski tektonski mikroplošči, ki je izjemni naravni geofizikalni laboratorij. Z meritvijo sprememb lokalnega magnetnega polja na njenem ozemlju in z vključitvijo geomagnetnega observatorija PIA v mednarodni informacijski sistem je omogočeno dolgoročno zbiranje merilnih podatkov. Na geomagnetnem observatoriju merimo elektromagnetno polje s frekvenco $f \leq 1$ Hz pri katerem je električna komponenta zanemarljivo majhna. Z analizo merilnih podatkov iz takega observatorija se pridobivajo nova spoznanja, ki so tudi praktično uporabna za razumevanje našega obstoja in boljšo organizacijo našega življenja.

Literatura

- Aplin, K. L. Harrison, R. G. Rycroft, M. J. (2008). Investigating Earth's atmospheric electricity: a role model for planetary studies. *Space Science Reviews*, 137, 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9372-x>.
- BGS. (2025). INTERMAGNET - British Geological Survey. INTERMAGNET Data Viewer. Edinburgh (United Kingdom): Geomagnetism. https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2 (21.10.2025)
- Chapman, S. (1919). 1. The Solar and Lunar Diurnal Variation of the Earth's Magnetism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 218, 1–118.

- Csontos, A. Hegymegi, L. Heilig, B. Kovács, P. Merényi, L. Szabó, Z. (2007). 50 Years of History of the Tihany Geophysical Observatory. Publication of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences, C-99 (398), 32–37.
- Čop, R. (2015). Snowstorm at the geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 4, 1–5.
- Čop, R. (2016). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (2), 197–211.
- Čop, R. Kosovac, P. (2010). Primerjalne meritve Overhouserjevega protonskega gradiometra. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2009. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 23–30.
- Čop, R. Milev, G. Deželjin, D. Kosmac, J. (2014). Protection against lightning at a geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation Methodes and Data Systems*, 3, 135–141.
- Čop, R. Rasson, L. J. Bilc, A. (2021). Accelerations in the Local Magnetic Field on the Adriatic Tectonic Microplate. *Open Journal of Earthquake Research*, 10, 95–104.
- ESA. (2025). Birkeland currents. European Space Agency – ESA, 23/03/2017. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/03/Birkeland_currents (28.11.2025)
- Gosar, A. (2020). Measurements of tectonic micro-displacements within the Idrija fault zone in the Učja valley (W Slovenia). *Acta geographica Slovenica*, 60 (1), 79–94.
- Füllekrug, M. Fraser-Smith, C. A. (2011). The Earth's electromagnetic environment. *Geophysical Research Letters*, 38, L21807.
- Harrison, R. G. (2004). The global atmospheric electrical circuit and climate. *Surveys in Geophysics*, 25 (5-6), 441–484.
- INTERMAGNET. (2025). Map of Observatories. World-wide consortium of institutes operating ground-based magnetometers. <https://intermagnet.org/metadata/#/map> .(19.8. 2025)
- Jones, A. C. (2011). Planetary Magnetic Fields and Fluid Dynamos. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43, 583–614.
- Kuhar, M. Čop, R. Pavlovčič Prešeren, P. (2020). Določitev vpliva Lune na geomagnetni šum. The influence of the Moon on geomagnetic noise. In Slovenian. *Geodetski vestnik*, 64 (2), 303–319.
- Lanza, R. Meloni, A. (2006). *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*. Berlin (Germany): Springer.
- Larmor, J. (1919). How could a Rotating Body such as the Sun become a Magnet? Report of the British Association for the Advancement of Science, 159–160.
- Liu, C. Williams, R. E. Zipser, J. E. Burns, G. (2010). Diurnal Variations of Global Thunderstorms and Electrified Shower Clouds and Their Contribution to the Global Electrical Circuit. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 309–323.
- Lu, S. Xing, Z-Y. Zhang, Q-H. Zhang, Y-L. Yang, H-G. Oksavik, K. Lyons, L. R. Shiokawa, K. Wang, Y. Ma, Y-Z. Wang, X-Y. Xu, T. Zhang, S-J. zhang, D. (2025). Ionospheric Scintillation and Geomagnetic Disturbance Caused by Space Hurricanes. *Space Weather*, 23 (7), e2025SW004435.
- Mach, D. M. W. Blakeslee, J. R. Bateman, G. M. (2011). Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics. *Journal of Geophysical Research*, 116, D05201.
- Morrish, H. A. (2001). *The Physical Principles of Magnetism*. New York (YN, US): Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, 2001.
- Pavlovčič-Prešeren, P. Čop, R. Kuhar, M. (2020). The use of geomagnetic measurements to study local tectonics: case for the NE part of the Adria-Eurasia collisional zone. *Open Journal of Earthquake Research – OJER*, 9 (2).
- Placer, L. (2008). Principles of tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija*, 51 (2), 205-217.
- Pulinets, S. A. (2009). Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults. *Advances in Space Research*, 44, 767–773.
- Real-Time Data Environment. (2025). Geomagnetic observations. Castello Tesino. Rome (Italy): Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia – INGV. <https://www.ingv.it/en/ambiente-in-tempo-reale> (20.10. 2025)

- RTO. (2009). Characterising the Ionosphere. RTO Technical Report: TR-IST-051. North Atlantic Treaty Organisation – NATO; Research And Technology Organisation – RTO.
- Shao, X-M. Jensen, P. D. Ho, C. Caffrey, P. M. Raby, Y. E. Graham, S. P. Brian, W. Blaine, G. W. (2025). 3D radio frequency mapping and polarization observations show lightning flashes were ignited by cosmic-ray showers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130, e2024JD042549.
- Spavieri, G. Gillies, G. T. Rodriguez, M. (2004). Physical implications of Coulomb's Law. *Metrologia*, 41 (5), S159–S170.
- Tacza, J. Li, G. Raulin, J.-P. (2024). Effects of Forbush Decreases on the global electric circuit. *Space Weather*, 22, e2023SW003852.
- Wilson, C. T. R. (1921). III. Investigations on lightning discharges and on the electric field of the earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, A221 (582-593), 73-115.

Improved modeling of tree rainfall interception in urban hydrology: Quantifying the stormwater reduction by birch (*Betula pendula* Roth.) and pine (*Pinus nigra* Arnold) trees

Mark Bryan Alivio*, Mojca Šraj*, Nejc Bezak*

Abstract

The renewed interest in incorporating trees into cities as part of nature-based solutions has increased the demand for explicit representation and modelling of tree rainfall interception process in urban hydrological models. In this study, we explicitly modelled the rainfall interception, throughfall (T_f), and stemflow (S_f) of birch and pine trees using the SWMM canopy module, and evaluated the stormwater reduction benefits of both trees. Model validation against measured data confirmed the accuracy of the canopy module in capturing and simulating the temporal dynamics of $T_f + S_f$. A strong correlation was found between observed and modelled estimates of $T_f + S_f$ ($r = 0.97\text{--}0.99$) and interception ($r = 0.72$) across all storm events in each phenoseason. Both birch and pine trees significantly reduced the volume and peak flow of stormwater runoff across all phenoseasons and scenarios. The mixed-species planting of birch and pine maximizes the stormwater reduction benefits, reducing runoff volume and peak flow by up to 25%, respectively. These findings underscore the broader value of integrating diverse tree species into urban green initiatives and provide (practical) insights for key stakeholders on how to appropriately credit the stormwater reduction benefits provided by urban trees within urban planning and stormwater management frameworks.

Key words: birch, pine, rainfall interception, stormwater, SWMM canopy module, urban trees

Povzetek

Povečan interes vključevanja dreves v mesta kot del sonaravnih rešitev zahteva natančnejšo predstavitev in modeliranje procesa prestrežanja padavin v urbanih hidroloških modelih. V študiji smo z uporabo modula krošenj SWMM modelirali prestrežanje padavin, prepuščene padavine skozi krošnjo (T_f) in odtok po deblu (S_f) breze in bora ter ocenili koristi obeh vrst dreves na zmanjšanje odтока padavinske vode. Preverjanje modela s pomočjo izmerjenih vrednosti je potrdilo natančnost modula pri zajemanju in simuliranju časovne dinamike $T_f + S_f$. Ugotovljena je bila močna korelacija med opazovanimi in modeliranimi ocenami $T_f + S_f$ ($r = 0,97\text{--}0,99$) in prestrežanjem ($r = 0,72$) za vse padavinske dogodke v vseh fenoloških fazah in različnih scenarijih. Obe vrsti dreves, tako breza kot bor, sta znatno zmanjšali količino padavinskega odтока in konico pretoka v vseh fenoloških sezonah in scenarijih. Mešana zasaditev obeh vrst dreves maksimira koristi zmanjšanja padavinske vode, saj zmanjša količino odтока in največji pretok za do 25 %. Rezultati kažejo širšo vrednost vključevanja različnih drevesnih vrst v urbano okolje in ključnim deležnikom zagotavljajo praktični vpogled v ustrezno upoštevanje in koristi zmanjšanja količine padavinske vode, ki jih zagotavljajo urbana drevesa v okviru urbanističnega načrtovanja in upravljanja s padavinsko vodo.

Ključne besede: breza, bor, prestrežanje padavin, površinski odtok, modul krošenj SWMM, mestna drevesa

* University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Jamova 2, Ljubljana

Introduction

Urban trees play a crucial role in regulating the urban hydrological cycle by altering both the quantity and spatiotemporal variability of rainfall (Swaffer et al., 2014) through interception, evapotranspiration, and infiltration, thus reducing the surface runoff (Berland et al., 2017; FAO, 2016). Canopy interception begins at the onset of a storm event when rainfall is captured by tree canopies and temporarily stored on tree surfaces (e.g., leaves, stems, branches) before being redistributed as throughfall, stemflow, or evaporation (Dunkerley, 2000; Park & Cameron, 2008). Previous studies show that interception rates differ greatly among tree species and environmental conditions, indicating that results from natural and rural forests cannot be directly applied to urban environments (Beidokhti & Moore, 2021; Carlyle-Moses et al., 2020; Zabret & Šraj, 2019). Urban trees differ in vegetation characteristics (e.g., leaf area index, canopy structure, phenology) and experience distinct meteorological conditions compared to forest trees. From an urban hydrological perspective, the contribution of canopy interception can be highly beneficial for reducing runoff, particularly for mature trees with larger canopies (Berland et al., 2017; Livesley et al., 2016; Rahman et al., 2023).

The renewed interest in incorporating trees in urban areas as part of nature-based solutions (NbS) within the framework of urban greening and sponge city has created a demand for more sophisticated urban hydrology models capable of simulating their stormwater runoff reduction benefits (Berland et al., 2017; Kuehler et al., 2017; Selbig et al., 2022). Hydrological models designed for urban areas tend to single out vertical and horizontal hydrological processes, with much focus on surface runoff, while vegetation-related hydrological processes are often neglected or oversimplified (Medina Camarena et al., 2022). Tree canopies are often simplified as a generic land use type, with their hydrological functions represented as a fixed value depression storage or part of broader vegetation cover (e.g., curve number, runoff coefficients) (Selbig et al., 2022; Zi et al., 2021). This approach ignores the dynamics of interception, throughfall, and stemflow. Such limited modelling effort can be attributed to a lack of empirical data to validate and test the models, as well as the complex interaction of trees with soil, atmosphere, meteorological conditions, and the surrounding urban landscape (Berland et al., 2017; Carlyle-Moses et al., 2020; Rahman et al., 2023).

To improve the understanding of the hydrological roles of urban trees, this study aims to explicitly model the dynamics of rainfall interception, throughfall, and stemflow of birch and pine trees using an updated SWMM canopy model, comparing the simulation results with measurements from the experimental plot. Additionally, the study quantifies the stormwater reduction benefits provided by both tree species. This study focuses on detailed, species-specific modeling and the differentiation of tree contributions across phenological seasons. By providing local, species-specific data and research-backed evidence, this work supports urban greening efforts and offers valuable insights for policymakers, stormwater managers, and urban foresters. It emphasizes the importance of integrating trees as functional green infrastructure within urban planning frameworks, beyond their traditional role as mere landscaping elements.

Description of research plot measurements and methods

Rainfall partitioning measurements

The small urban park (~600 m², Figure 1) served as the site for measuring rainfall partitioning beneath the open-grown birch (*Betula pendula* Roth.) and pine (*Pinus nigra*

Arnold) tree canopies. The soil type in the experimental plot is primarily classified as loam and silt loam across most identified horizons at three locations (open area, under the birch, and pine). The partitioning of rainfall under the birch and pine trees (Figure 1) was monitored from July 2021 to early June 2024, encompassing the canopy phenological seasons of the trees. Open (or gross, P_g) rainfall was measured using a tipping bucket rain gauge at 5-minute intervals, positioned in the clearing of the plot. Individual rainfall events were separated by at least a 4-hour dry period, which was determined based on field observations and previous measurements (Zabret & Šraj, 2018, 2021). Throughfall (T_f) was measured with a combination of roving funnel-type gauges and fixed V-shaped steel trough collectors equipped with automatic data loggers and manual collection systems. Stemflow (S_f) from each tree was captured using spiral-type gauges. For each rainfall event, canopy interception (I_c) was calculated as the difference between P_g and the sum of T_f and S_f : $I_c = P_g - (T_f + S_f)$. This data facilitated the estimation of canopy storage capacities (S_{vmax}) for both tree species.

Furthermore, the seasonal variations in the foliage of birch and pine trees were monitored through their leaf area index (LAI), which was measured using LAI-2200c Plant Canopy Analyzer (LI-COR Biosciences Inc., Lincoln, NE, USA) between October 2022 and June 2024.

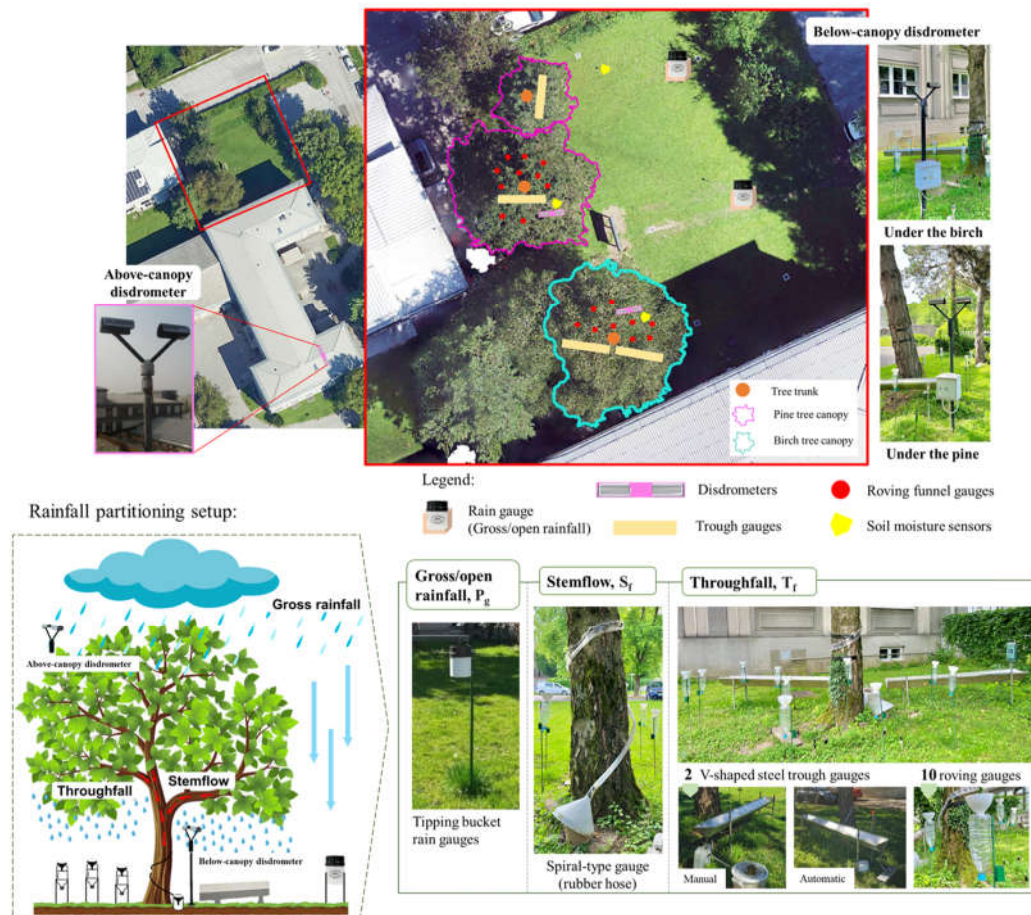


Figure 1 – Setup of the rainfall partitioning measurements at the experimental plot.

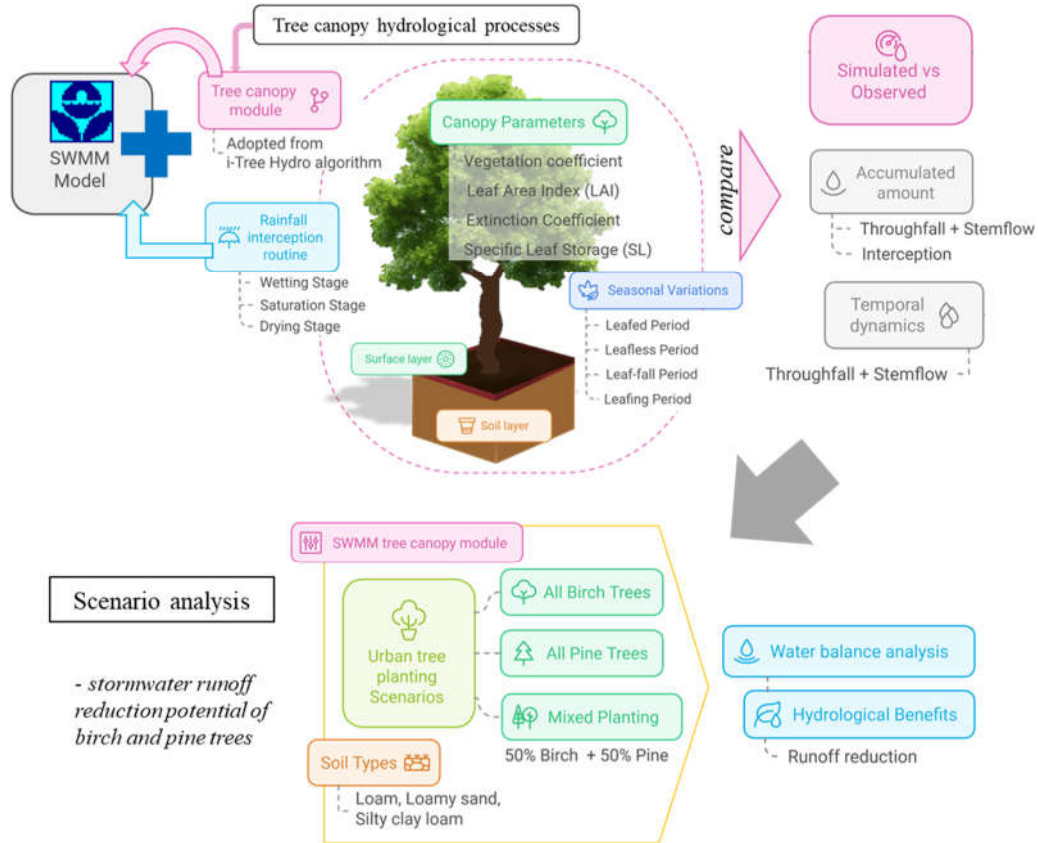


Figure 2 – Modelling framework of the rainfall interception process and stormwater reduction of birch and pine trees.

Modelling rainfall interception using the SWMM canopy module

The modelling and explicit representation of the rainfall interception process of birch and pine trees were carried out using the SWMM canopy module developed by Zi et al. (2021). The canopy module has been added as a new feature in the LID modules of SWMM that takes into account the dynamics of interception, throughfall, and stemflow (Figure 2). Thus, it dynamically represents the canopy hydrological processes within and through the trees, similar to other green infrastructures in SWMM. The canopy module introduces several key canopy parameters to characterize the canopy structures of different trees, namely the canopy evaporation multiplier (or the crop coefficient, V_c), LAI, extinction coefficient (k), and specific leaf storage (Table 1). As part of the modelling results in SWMM, the model generates a timeseries of combined throughfall and stemflow ($T_f + S_f$).

The derivation of parameters characterizing the canopy layer was based on field measurements and existing literature (Table 1). LAI was measured for both tree species, and specific leaf storage was estimated from rainfall partitioning measurements. On the other hand, both the vegetation (or crop) and extinction coefficients were determined using literature-based equations and values. A constant k value of 0.7 was adopted in this study for both tree species, following established defaults (Hirabayashi, 2013; Huang et al., 2017; Wang et al., 2008; Zi et al., 2021) due to limited available data. It is important to note that this overlooks important species-specific and seasonal differences in canopy structure, radiation transfer, and interception. Furthermore, surface and soil parameters characterizing the conditions below the tree canopies were also defined in the model. The

surface layer represents the topmost layer of the system under the tree, directly interacting with the throughfall and stemflow.

Table 1 – Tree-specific parameters for the SWMM canopy module

Parameter	Birch				Pine				Remarks
	Leafed	Leaf-less	Leafing	Leaf-fall	Leafed	Leaf-less	Leafing	Leaf-fall	
LAI	2.61	0.95	1.38	1.03	3.72	2.25	2.40	2.44	Measurement
$S_{v_{max}}$ (mm) ¹	2.65	1.01	1.61	1.91	4.01	3.04	3.14	3.72	Calculated from field data
V_c	2.50	2.41	2.38	2.50	2.37	2.27	2.25	2.38	Equation using Allen et al. (1998)
k	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	Ross (1975)

¹ From this canopy storage capacity ($S_{v_{max}}$), the specific leaf storage (SL), which is an input to the model, is calculated as $SL = S_{v_{max}}/LAI$.

To evaluate the capability of the SWMM tree canopy module, we compared the simulated temporal dynamics of $T_f + S_f$ for birch and pine trees with the observed data from rainfall partitioning measurements in the experimental plot. The agreements between the simulated and measured accumulative amounts of $T_f + S_f$ and interception for both tree species during the considered storm events were then assessed using the Pearson correlation coefficient (r).

Quantifying the stormwater reduction benefits of birch and pine trees

Given the capability of the SWMM canopy module in modeling the interception of birch and pine, processes related to runoff generation below their canopy are considered. To quantify the impacts of urban trees as a form of green infrastructure on stormwater runoff, a rainfall-runoff model was developed using the EPA Storm Water Management Model (SWMM) (Rossman, 2015). The SWMM model for the selected study catchment (Figure 3) was created based on the drainage network and hydraulic elements (e.g., pipe diameter, pipe length, invert elevation, etc.) provided by the local public utility company (JP VODOVOD KANALIZACIJA SNAGA d.o.o.). Additionally, a land use map (GURS, 2024) served as complementary data to delineate the 27 contributing sub-catchments. Surface runoff was measured using a Doppler area velocity sensor installed inside the 800-mm diameter pipe close to the outlet of the sewer system (Figure 3). Rainfall data were obtained from the rain gauge in the experimental plot (Figure 1). To calibrate the rainfall-runoff model, a continuous simulation utilizing rainfall-runoff data (5-min) from the entire month of September 2022 using the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) with 3 objective functions (RMSE, NSE, KGE). The calibrated model was then validated using an event-based approach at the same temporal resolution, considering distinct multiple rainfall events from 4 different seasons (summer, winter, autumn, and spring). The calibrated and validated SWMM model was then applied in a scenario analysis involving the planting of birch and pine trees across three different configurations (Figure 2): S1 with only birch, S2 with only pine, and S3 with a

mixed species composition (50% birch and 50% pine), to evaluate the stormwater reduction benefits of birch and pine trees.

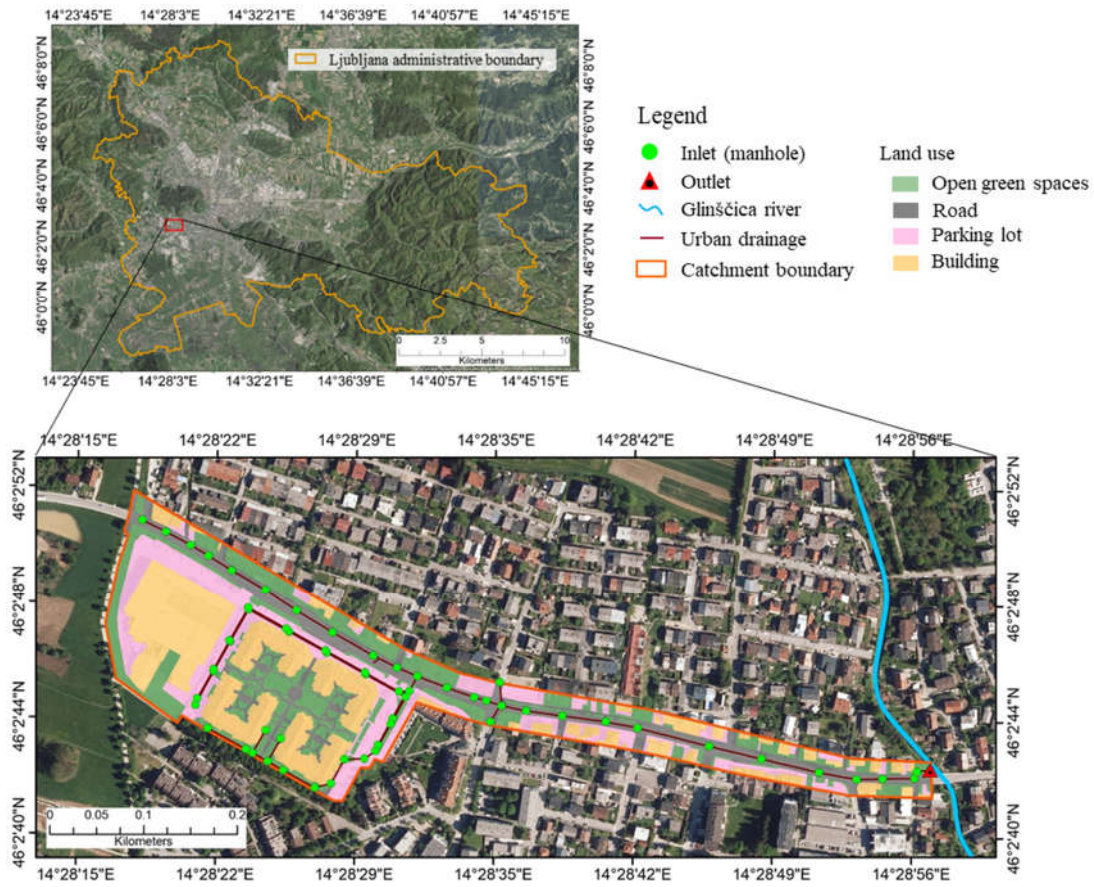


Figure 3 – Selected case study area in Cesta na Brdo to evaluate the stormwater runoff reduction potential of birch and pine trees. The land use and locations of hydraulic elements are also shown.

Results and discussion

The first step in model evaluation pertains to analyzing the interception process and components within the SWMM canopy module. The event-based analysis presented in Figures 4 and 5 demonstrates that the model effectively captures the temporal dynamics of $T_f + S_f$ and the progression of cumulative $T_f + S_f$ amount. This holds true for the timing of increases in $T_f + S_f$ and the cumulative values over time, particularly under the birch. However, the model tends to overestimate the cumulative amount of $T_f + S_f$ under the pine, which in turn results in an underestimation of its canopy interception. This can be attributed to several parameterizations in the canopy module that may have inadequately represented the canopy architecture of the pine tree. For example, optical sensors such as the LAI-2200C tend to underestimate true LAI in conifers because they do not fully account for needle clumping and the gaps between shoots that partially cover woody elements (Stenberg et al., 1994; Jonckheere et al., 2005). Additionally, the extinction coefficient and crop coefficient were derived from generalized literature values rather than site- or species-specific measurements. Calibrating these canopy parameters would therefore improve model accuracy in simulating the temporal dynamics of interception

processes of urban trees, particularly for conifers like pine, across different phenoseasons and rainfall magnitudes.

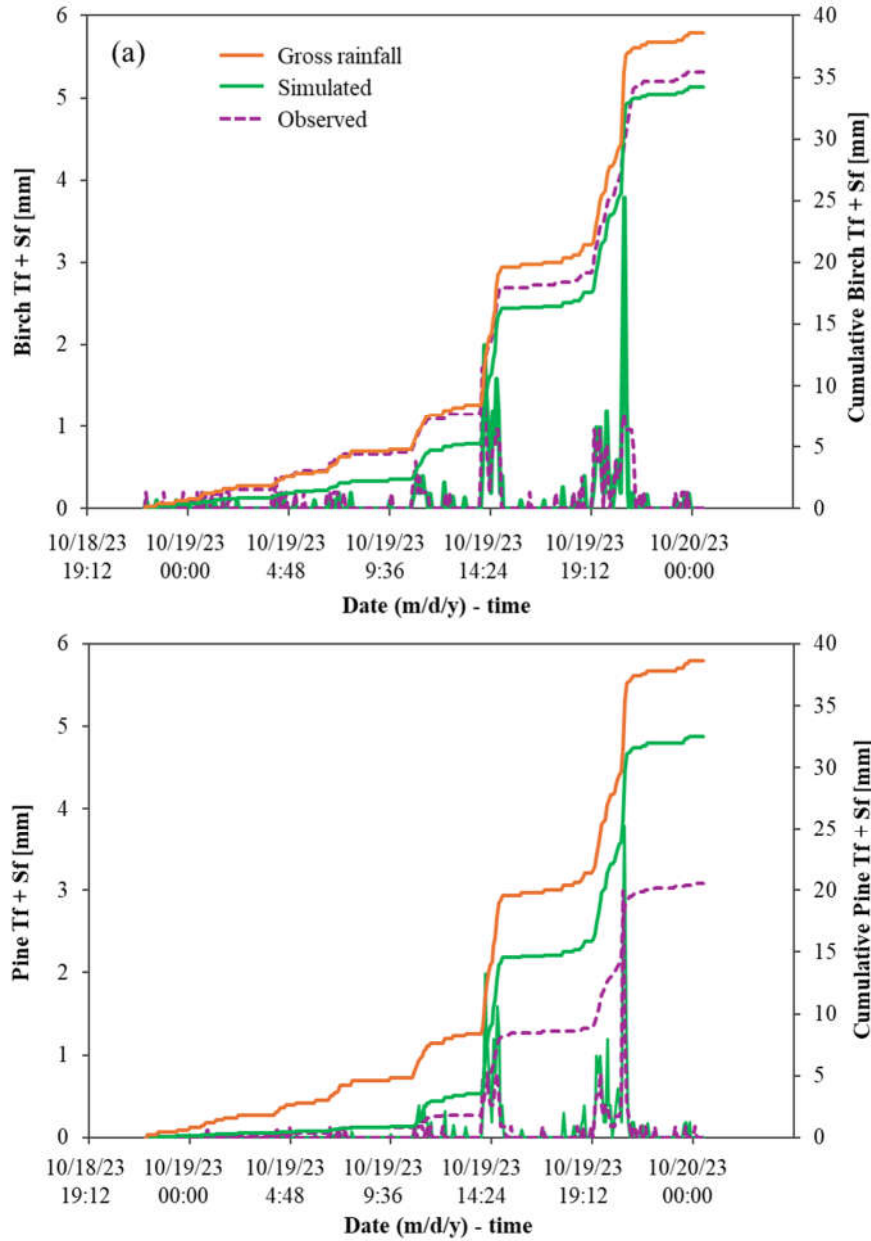


Figure 4 – Comparison of observed and simulated temporal dynamics and cumulative amount of $T_f + S_f$ under the (a) birch and (b) pine trees for the 38.6 mm storm event in the leaf-fall period (October 18, 2023, 21:55 to October 19, 2023, 23:49) during validation of the tree canopy module.

Nevertheless, there is a good agreement between field-measured and modelled estimates of $T_f + S_f$ and interception loss for both birch and pine trees across all storm events observed in each phenoseason (Figure 6). A high correlation was observed, ranging from 0.98 to 0.99, for $T_f + S_f$ in both trees, indicating that the model accurately predicts T_f and S_f beneath their canopies. On an event basis, however, the model underestimates canopy interception by 3.1% for birch and 19.6% for pine, predicting 24.5% and 35.6% of gross rainfall, respectively, compared to 27.6% and 55.2% derived indirectly from field T_f and S_f data. This discrepancy may explain the lower correlation

coefficients observed for interception in most seasonal phases (Figure 6), especially for pine, because interception is inferred from T_f and S_f rather than measured directly. Hence, assuming a 5% random error in rainfall, throughfall, and stemflow measurements (Gash et al., 1995), the combined error calculations yield interception measurement uncertainties of 24% for birch and 12% for pine. These error margins fall within the standard error ranges reported in previous studies (Bruijnzeel, 1990; Šraj et al., 2008).

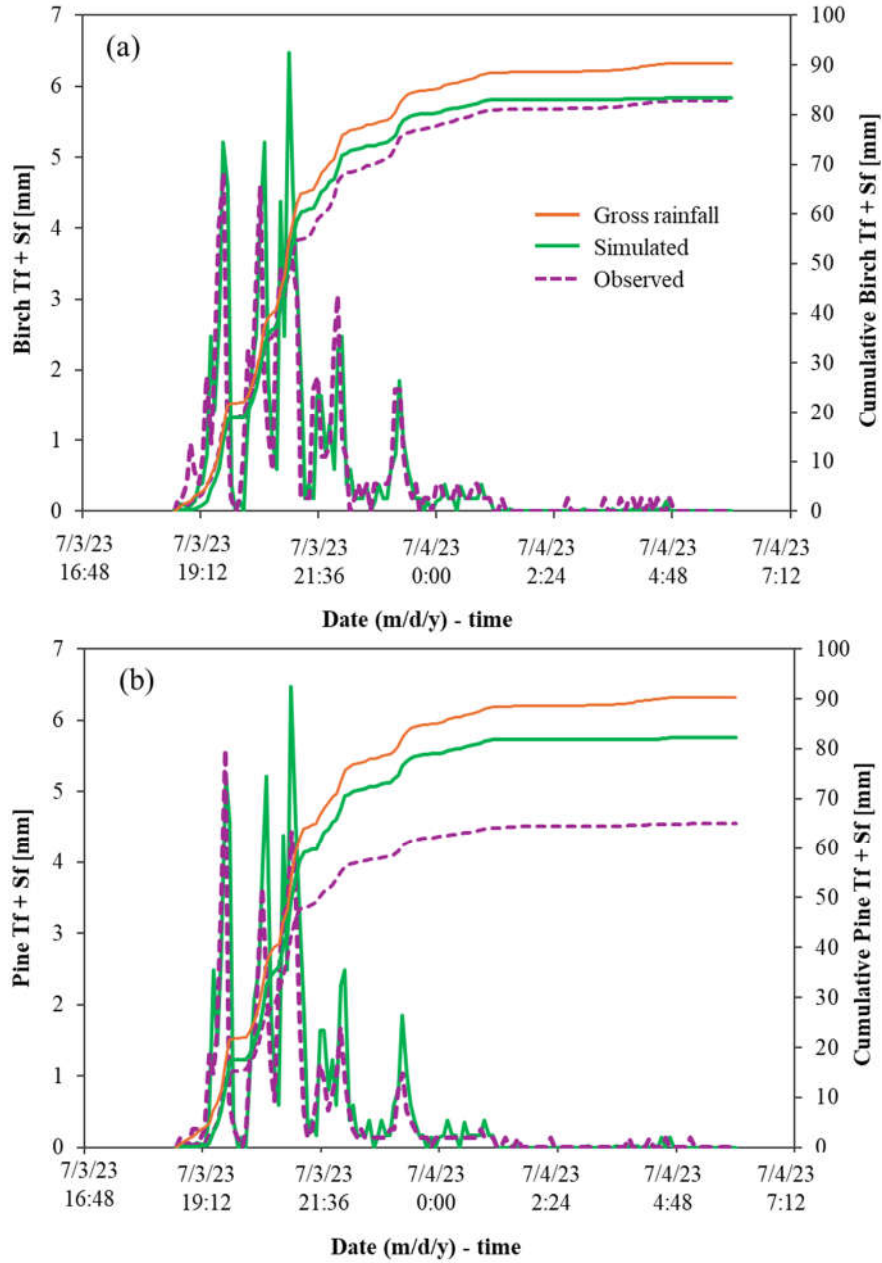


Figure 5 – Comparison of observed and simulated temporal dynamics and cumulative amount of $T_f + S_f$ under the (a) birch and (b) pine trees for the 90.3 mm storm event in the leafed period (July 3, 2023, 18:41 to July 4, 2023, 4:35) during validation of the tree canopy module.

After demonstrating the capability of the SWMM canopy module in modelling the rainfall interception process of birch and pine trees, the rainfall-runoff model also showed strong calibration results in simulating catchment outlet flows, with an NSE of 0.71, a KGE of 0.70, and an RMSE of 44.36 L/s. Validation results demonstrate that the calibrated model performs well across storm events occurring in different seasons, with NSE, KGE, and RMSE values ranging from 0.63 to 0.78, 0.56 to 0.81, and 14.14 to 22.77 L/s, respectively, indicating good transferability to independent events.

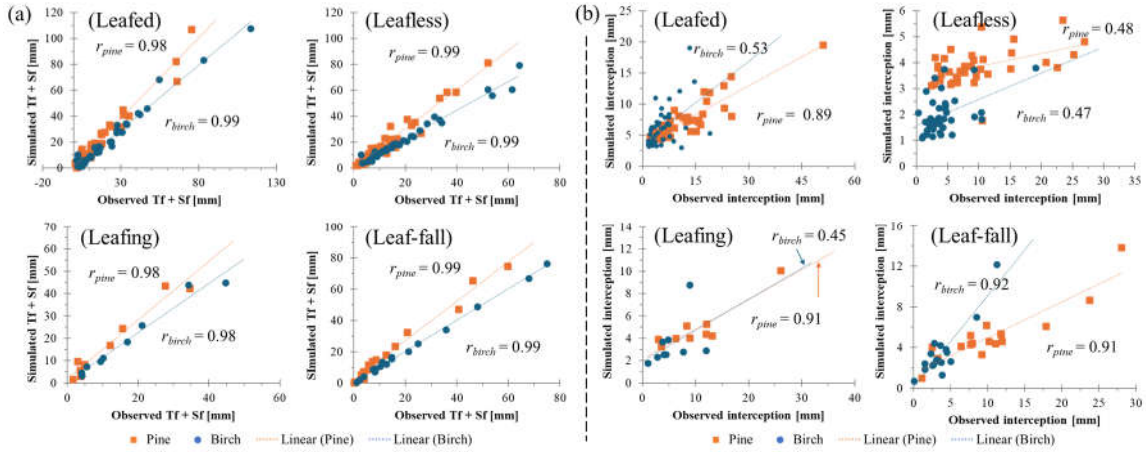


Figure 6 – Regression plots between simulated vs. observed amounts of (a) cumulative $T_f + S_f$ and (b) interception of the birch and pine trees during storm events in different phenoseasons.

The stormwater reduction performance of birch and pine trees was evaluated through scenario modelling (S1, S2, and S3), using the current condition of the case study area (S0) as a reference. Table 2 summarizes the event-based percentage reduction in runoff volume and peak flow across three planting scenarios during four phenoseasons for birch and pine trees. The results show that birch and pine trees consistently reduce both runoff volume and peak flow, but the magnitude of reduction varies depending on canopy conditions, rainfall characteristics, and planting scenarios. Across all phenoseasons and scenarios, reductions in runoff volume range mostly between 13–25% and peak flow by 1.2–24.7%. S1 (birch only) and S2 (pine only) yield substantial reductions in runoff volume, generally ranging from 20–23% and 17–25% in peak flow. However, in high-intensity and heavy rainfall events (e.g., leaf-fall: 291 mm and leafed: 90.3 mm), the reduction drops notably below 15%. Peak flow reductions are also lowest (< 10%) during these two extreme storm events, which have a return period of > 10-year (90.3 mm) and > 100-year (291 mm). Extreme rainfall events, characterized by both high volume and intensity, quickly exceeded the interception capacity of the birch and pine, leading to increased throughfall and subsequent surface runoff. Mixed species scenario (S3) consistently shows a higher percentage reduction in runoff volume and peak flow compared to single-species scenario, because S3 leverages the respective strengths of birch's larger canopy area and pine's higher interception capacity.

Table 2 – Storm event-based reduction in runoff volume and peak flow for the three scenarios (S1, S2, and S3) during different phenoseasons

Rainfall event characteristics			Runoff volume reduction [%]			Peak flow reduction [%]		
Rainfall [mm]	Max 5-min intensity [mm/hr]	Intensity [mm/hr]	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Leafed								
23.2	31.2	2.2	22.2%	20.0%	24.5%	21.5%	19.3%	24.0%
54.2	28.8	3.0	23.0%	20.6%	24.6%	21.3%	19.0%	23.8%
90.3	78.12	9.1	15.9%	14.1%	15.4%	1.3%	1.2%	1.5%
126.8	62.4	2.6	23.1%	20.7%	24.0%	17.3%	15.6%	19.4%
Leafless								
23.2	7.2	1.9	22.4%	20.1%	24.6%	22.6%	20.5%	25.1%
38	12	1.5	22.7%	20.4%	24.8%	22.5%	20.1%	24.8%
63	26.4	2.0	23.1%	20.7%	24.8%	22.2%	19.9%	24.5%
Leaf-fall								
291	74.4	5.9	13.8%	12.2%	13.2%	8.8%	8.8%	8.8%
83.2	45.6	3.8	22.3%	19.8%	22.3%	14.2%	11.6%	8.0%
52.4	31.2	3.5	23.0%	20.6%	24.2%	19.8%	17.6%	22.5%
16.2	16.8	1.3	21.8%	19.7%	24.3%	21.7%	19.4%	24.2%
Leafing								
46.6	14.4	6.2	22.9%	20.5%	23.9%	22.9%	20.5%	22.4%
21	24	4.7	22.3%	20.0%	24.5%	21.6%	19.4%	24.2%
53.6	9.6	1.8	22.9%	20.6%	24.9%	22.6%	20.3%	24.7%
28.6	12	3.5	22.6%	20.3%	24.7%	22.1%	19.9%	24.6%

The modelling results further highlight the significant role of canopy interception in stormwater reduction, a process that is frequently underrepresented in urban hydrology modelling. The contribution of canopy interception is especially beneficial in reducing the runoff when the birch and pine trees are planted over or near directly connected impervious areas (DCIA), where their canopies capture rainfall before it reaches the ground. Thus, the limited runoff reduction efficiency of birch and pine trees during extreme rainfall events highlights the necessity of integrating complementary stormwater control measures (e.g., rain gardens, permeable pavements) to mitigate the impacts of such events.

Conclusions

This study evaluated the canopy hydrological processes and stormwater reduction benefits of birch and pine trees by explicitly modelling rainfall interception, throughfall, and stemflow using an updated SWMM canopy module. Model evaluation showed that the updated SWMM canopy module accurately simulates the dynamics of $T_f + S_f$, with strong correlation to field-measured data for birch and pine trees in all phenoseasons. Although slight overestimations of the cumulative $T_f + S_f$ amount were observed for pine, which underestimated the interception, overall agreement with observed interception was maintained. Scenario modelling (S1: birch, S2: pine, S3: mixed species) demonstrated that birch and pine trees across phenoseasons consistently reduced runoff volume and

peak flow by 13–25% and 1.2–24.7%, respectively. Mixed-species plantings (S3) provide greater reductions in both runoff volume and peak flow by leveraging the complementary traits of birch’s larger canopy area and pine’s higher interception capacity. Reductions were lowest during extreme rainfall events. The results strongly emphasize the significant, yet often underrepresented, role of canopy interception in stormwater reduction, particularly when trees are planted over or near directly connected impervious areas (DCIA). The study improved the representation of rainfall interception by urban trees, providing a detailed differentiation between individual tree species in urban hydrological modelling. This understanding offers a more comprehensive view of the impact of urban trees on runoff reduction across different seasonal conditions to ensure that this hydrological benefit is properly credited within the framework of urban planning and stormwater management.

Acknowledgment

This research received support from the program P2-0180: “Water Science and Technology, and Geotechnical Engineering: Tools and Methods for Process Analyses and Simulations, and Development of Technologies,” through the first author’s PhD grant by the Slovenian Research and Innovation Agency (ARIS). Additional funding was provided by ARIS via ongoing projects [J6-4628, J2-4489, and N2-0313] and Horizon Europe project “SpongeScapes” (Grant Agreement No. 101112738), funded by the European Union’s Horizon Europe Research and Innovation Programme.

References

- Beidokhti, A. N., & Moore, T. L. (2021). The effects of precipitation, tree phenology, leaf area index, and bark characteristics on throughfall rates by urban trees: A meta-data analysis. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127052. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127052>.
- Berland, Adam, Shiflett, Sheri A., Shuster, William D., Garmestani, Ahjond S., Goddard, Haynes C., Herrmann, Dustin L., Hopton, Matthew E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162(), 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>.
- Carlyle-Moses, D. E., Livesley, S., Baptista, M. D., Thom, J., & Szota, C. (2020). Urban Trees as Green Infrastructure for Stormwater Mitigation and Use. *Ecological Studies*, 397–432. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6_17.
- Dunkerley, D. 2000. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: A brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes* 14: 669–678. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200003\)14:4<669::AID-HYP965>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<669::AID-HYP965>3.0.CO;2-I).
- Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. (30 November 2016). Building greener cities: nine benefits of urban trees. FAO. <https://www.fao.org/zhc/detail-events/en/c/454543/>.
- Hirabayashi, S. (2013). i-Tree Eco precipitation interception model descriptions. US Department of Agriculture Forest Service: Washington, DC, USA, 1, 0-21. https://www.itreetools.org/documents/61/iTree_Eco_Precipitation_Interception_Model_Descriptions.pdf.
- Huang, J. Y., Black, T. A., Jassal, R. S., & Lavkulich, L. L. (2017). Modelling rainfall interception by urban trees. *Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne des Ressources Hydriques*, 42(4), 336-348. <https://doi.org/10.1080/07011784.2017.1375865>.

- Jonckheere, I., Muys, B., & Coppin, P. (2005). Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. *Tree physiology*, 25(6), 723-732. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.723>.
- Kuehler, E., Hathaway, J., & Tirpak, A. (2017). Quantifying the benefits of urban forest systems as a component of the green infrastructure stormwater treatment network. *Ecohydrology*, 10(3), e1813. <https://doi.org/10.1002/eco.1813>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of environmental quality*, 45(1), 119-124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>.
- Medina Camarena, K. S., Wübbelmann, T., & Förster, K. (2022). What is the contribution of urban trees to mitigate pluvial flooding?. *Hydrology*, 9(6), 108. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060108>.
- Park, A., & Cameron, J. L. (2008). The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. *Forest Ecology and Management*, 255(5-6), 1915-1925. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.025>.
- Rahman, M. A., Pawijit, Y., Xu, C., Moser-Reischl, A., Pretzsch, H., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2023). A comparative analysis of urban forests for storm-water management. *Scientific Reports*, 13(1), 1451. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28629-6>.
- Stenberg, P., Linder, S., Smolander, H., & Flower-Ellis, J. (1994). Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands. *Tree Physiology*, 14(7-8-9), 981-995. <https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.981>.
- Swaffer, B. A., Holland, K. L., Doody, T. M., & Hutson, J. (2014). Rainfall partitioning, tree form and measurement scale: a comparison of two co-occurring, morphologically distinct tree species in a semi-arid environment. *Ecohydrology*, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1002/eco.1461>.
- Šraj, M., Brilly, M., & Mikoš, M. (2008). Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and forest meteorology*, 148(1), 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.007>.
- Selbig, W. R., Loheide II, S. P., Shuster, W., Scharenbroch, B. C., Coville, R. C., Kruegler, J., ... & Nowak, D. (2022). Quantifying the stormwater runoff volume reduction benefits of urban street tree canopy. *Science of the Total Environment*, 806, 151296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151296>.
- Wang, J., Endreny, T. A., & Nowak, D. J. (2008). Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(1), 75-85. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00139.x>.
- Zabret, K., & Šraj, M. (2018). Spatial variability of throughfall under single birch and pine tree canopies. *Acta hydrotechnica*, 31(54), 1-20. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.01>.
- Zabret, K., & Šraj, M. (2019). Rainfall interception by urban trees and their impact on potential surface runoff. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 47(8), 1800327. <https://doi.org/10.1002/clen.201800327>.
- Zabret, K. & Šraj, M. (2021). Relation of influencing variables and weather conditions on rainfall partitioning by birch and pine trees. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69(4), 456–466. <https://doi.org/10.2478/johh-2021-0023>.
- Zi, T., Whipple, A., Kauhanen, P., Spotswood, E., Grenier, L., Grossinger, R., Askevold, R. (2021). *Trees and Hydrology in Urban Landscapes*. SFEI Contribution No. 1034. San Francisco Estuary Institute: Richmond, CA. <https://www.sfei.org/projects/healthy-watersheds-resilient-baylands>.

Primerjalna analiza prepuščenih padavin pod borom, pod drevesi v mešanem gozdu in pod koruzo

Lana Radulović¹, Mojca Šraj¹, Borbála Széles², Juraj Parajka², Günter Blöschl², Dušan Marjanović², Urša Vilhar³, Janez Pavčič³, Peter Strauss⁴, Mark Bryan Alivio¹, Tamara Kuzmanić¹, Klaudija Lebar¹, Nejc Bezak¹, Katarina Zabret¹

Povzetek

Vegetacija na različne načine vpliva na lastnosti prepuščenih padavin, kar posledično vpliva na hidrološke procese, kot je na primer erozija tal. V prispevku obravnavamo lastnosti prepuščenih padavin pod tremi vrstami vegetacije: pod borom v mestnem parku, pod krošnjami dreves v mešanem urbanem gozdu in pod koruzo na polju. Analizirali smo osnovne značilnosti dogodkov in mikrostrukturo kapljic, ki smo jo za vsak dogodek prikazali z diagrami odvisnosti hitrosti in premera kapljic (v-D). Rezultati analize kažejo, da je koruza prepustila največji delež padavin, sledila sta mešani gozd in samostojni bor. Pod koruzo so bile kapljice tudi največje in najhitrejšje. Z uporabo metode hierarhičnega združevanja v-D diagramov smo določili tri skupine dogodkov glede na porazdelitev prepuščenih dežnih kapljic. Dogodki pod borom so bili uvrščeni v skupino 1, dogodki v mešanem gozdu v skupino 2, dogodki pod koruzo pa so bili razdeljeni med skupini 1 in 3. Rezultati so pokazali, da so bili dogodki, zabeleženi pod koruzo, ki so bili uvrščeni v skupino 3, v primerjavi s tistimi v skupini 1, večji in intenzivnejši ter da so bile pri teh dogodkih kapljice prepuščenih padavin pod koruzo znatno večje od kapljic padavin na prostem.

Ključne besede: prepuščene padavine, bor, mešani gozd, koruza, diagrami hitrost-premer, hierarhično združevanje

Key words: throughfall, pine, mixed forest, maize, velocity-diameter ratio, hierarchical clustering

Uvod

Del padavin, ki padejo nad vegetacijo, tla doseže posredno s kapljanjem in škropljenjem z vej in listja, zato nima enakih lastnosti kot padavine, ki padejo na tla neposredno. Lastnosti prepuščenih padavin se precej razlikujejo tudi pod različnimi vrstami vegetacije. Poljščine na primer, imajo povsem drugačen režim interakcije padavin z rastlino kot posamezna drevesa ali gozdovi (Frasson in Krajewski, 2011; Zhang et al., 2023). Na to vpliva predvsem njihova nižja višina in hitre spremembe med rastno sezono. Poleg vrste vegetacije na značilnosti prepuščenih padavin pomembno vplivajo tudi osnovne značilnosti padavinskih dogodkov, kot so količina, trajanje in intenziteta padavin (Brasil et al., 2018; Zabret in Šraj, 2019). Prejšnje študije so pokazale, da lahko vegetacija prestreže znatne količine padavin. Na primer, Geiger et al. (1995) so ugotovili, da listnati gozdovi prestrežejo v povprečju med 20 in 25 % padavin, medtem ko iglasti gozdovi prestrežejo v povprečju med 20 in 40 %.

¹ UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

² Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, TU Vienna, Karlsplatz 13 E222/2, 1040 Vienna, Austria

³ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

⁴ Institute for Land and Water Management Research, Federal Agency of Water Management, Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen, Austria

Primerljive vrednosti prestrežanja od 22 do 58 % so bile opažene tudi za poljščine (Kozak et al., 2007).

Proces prestrežanja padavin vpliva na vodno bilanco (Šraj et al., 2008; Van Stan et al., 2011) in na naravne procese, kot je na primer erozija tal (Brasil et al., 2024; Li et al., 2019; Zabret et al., 2025; Zore et al., 2022). Lastnosti prepuščenih padavin namreč vplivajo na erozivno moč kapljic (Kermavnar in Vilhar, 2017; Zore et al., 2022), ki je glavni dejavnik erozije tal. Prestrežanje padavin lahko zmanjša erozivnost padavin zaradi zmanjšane količine, ki pride skozi krošnjo (Cao et al., 2008), vendar lahko večje kapljice, ki kapljajo z listov, erozijo tal povečajo (Nanko et al., 2006). Levia in sodelavci (2017) so ugotovili, da so kapljice pod iglavci manjše in počasnejše, saj iglice lahko eno večjo kapljico razdelijo na več manjših. Po drugi strani pa so nekatere študije pod koruzo pokazale, da so kapljice prepuščenih padavin lahko znatno večje kot kapljice na prostem in da je njihova mikrostruktura močno odvisna od razvojne stopnje rastline (Frasson in Krajewski, 2011; Zhu et al., 2024).

Zaradi različnih vrst vegetacije, njihovih edinstvenih lastnosti in spremenljivosti glede na podnebje in letne čase, je na področju prestrežanja padavin še vedno veliko odprtih znanstvenih vprašanj. Redke so študije, ki primerjajo drevesa in poljščine ter podajajo širšo sliko o tem, kako različne vrste vegetacije oblikujejo porazdelitev kapljic prepuščenih padavin. Glavni cilj te študije je zato preučiti značilnosti prepuščenih padavin v treh različnih situacijah: pod samostojnim borom v urbanem parku, pod prekrivajočimi se krošnjami v mešanem urbanem gozdu in pod koruzo na polju.

Podatki in metode

V tej študiji so prikazani rezultati meritev s treh raziskovalnih ploskev (slika 1), in sicer: raziskovalna ploskev v majhnem mestnem parku v Ljubljani, raziskovalna ploskev v urbanem mešanem gozdu v Ljubljani in kmetijska površina na eksperimentalnem porečju HOAL (Hydrological Open Air Laboratory) v Petzenkirchnu v Avstriji. Upoštevali smo podatke, zbrane od sredine julija do sredine septembra 2024, kar ustreza sezoni rasti koruze. V tem času smo zabeležili dvanajst dogodkov na lokacijah v Ljubljani in devet v Avstriji (HOAL), pri čemer velja, da je med vsakim dogodkom minilo vsaj šest ur z manj kot 1 mm izmerjenega dežja.

Urbani park v Ljubljani je raziskovalna ploskev s površino približno 600 m² (46,0422 S 14,4926 V) in leži na nadmorski višini 292 m. Glede na Köppen-Geigerjevo klasifikacijo (Szeles et al., 2025) je uvrščen v kategorijo zmerne oceanskega podnebja (Cfb). V opazovanem obdobju smo padavine na prostem merili z dežemerom (Onset RG2-M, 0.2 mm/tip), med tem ko smo prepuščene padavine merili z optičnim disdrometrom (OTT Parsivel²). Karakteristike prepuščenih padavin smo spremljali pod borom (*Pinus nigra* Arnold), ki se nahaja na zahodni strani ploskve (slika 1).

Mešani urbani gozd se nahaja v krajinskem parku Tivoli, Rožnik in Šišenski hrib v Ljubljani. Raziskovalna ploskev (46,0527 S 14,4795 V) obsega približno 2.500 m² in leži na 310 m nadmorske višine. Optični disdrometer (OTT Parsivel²), ki smo ga uporabili za merjenje prepuščenih padavin, je nameščen pod krošnjami različnih drevesnih vrst, in sicer: navadnega hrasta (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.), sladkega kostanja (*Castanea sativa* (Mill.)) in navadne smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) (Kermavnar and Vilhar, 2017) (slika 1). Zaradi bližine obeh lokacij smo za padavine na prostem upoštevali podatke z dežemera v urbanem parku.

Eksperimentalno porečje HOAL se nahaja v bližini Petzenkirchna v spodnji Avstriji (48,1500° S, 15,1497° V) in obsega približno 660.000 m². Tudi ta lokacija je na podlagi

Köppen-Geigerjeve klasifikacije (Szeles et al., 2025) uvrščena v zmerno oceansko podnebje (Cfb). Večina območja je kmetijska pokrajina (87 %), preostanek pa je gozdnat, tlakovan ali pa se uporablja kot pašnik (Blöschl et al., 2016). Poljščine vključujejo koruzo (slika 1), na katero se osredotoča ta študija. Značilnosti padavin na prostem in prepuščenih padavin pod koruzo smo merili z optičnimi disdrometri (OTT Parsivel²).



Slika 1 - Merjenje prepuščenih padavin z disdrometri na treh lokacijah: a) pod borom v mestnem parku v Ljubljani, Slovenija; b) pod drevesnimi krošnjami v urbanem mešanem gozdu v Ljubljani, Slovenija; c) pod koruzo na porečju HOAL, Avstrija.

Glavni vir podatkov te študije so bile meritve padavin z disdrometri OTT Parsivel², nameščenimi na vseh treh lokacijah (slika 1). Disdrometer deluje na podlagi laserskega senzorja, ki ustvarja vodoravni svetlobni žarek in zazna vsako njegovo prekinitev (OTT Hydromet, 2024). Velikost kapljic določi na podlagi časa, v katerem kapljica prečka svetlobni snop, in intenzitete sprememb v zaznani svetlobi. Hitrost kapljic pa določi na podlagi časovnega zamika med zaznavo začetka in konca prehoda kapljice skozi svetlobni snop. (OTT Hydromet, 2024).

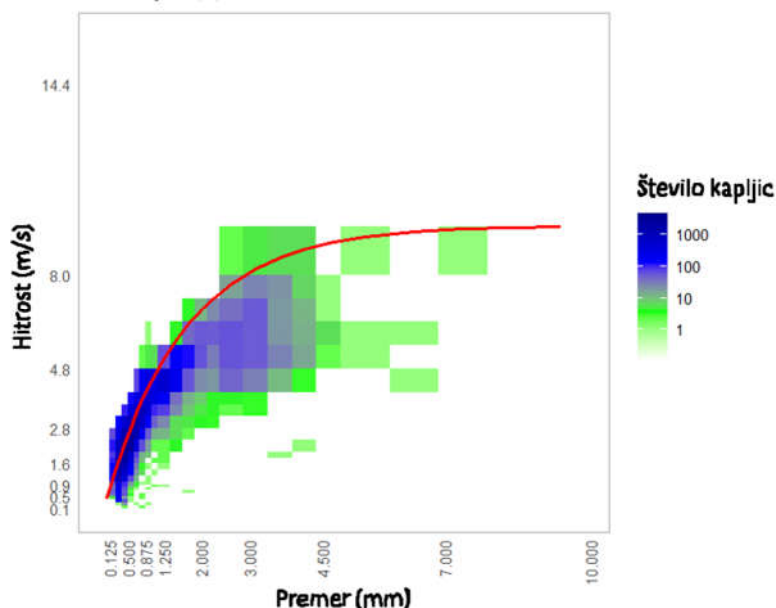
Vrednosti indeksa listne površine (LAI) smo spremljali na vseh treh lokacijah z merilnim instrumentom LAI-2200c (LI-COR, Inc.). V obravnavanem obdobju je bila povprečna vrednost LAI za bor enaka 3,62 in za mešani gozd 2,98. Za koruzo je bila vrednost LAI, izmerjena 3. julija, enaka 2,3 in se je do 8. avgusta povečala na 4,0.

Iz merjenih podatkov disdrometrov in dežemerov smo določili padavinske dogodke, za katere velja, da je med njimi minilo vsaj 6 ur, v katerih je bilo zabeleženih manj kot 1 mm padavin. Za vsak tako določen dogodek smo pripravili samostojno datoteko za nadaljnje analize v programskem orodju R (R Core Team, 2023). Podatke o padavinah na prostem v Ljubljani, ki so bile izmerjene z dežemerom, smo najprej korigirali glede na regresijsko enačbo med količino padavin, izmerjenih z dežemerom in z disdrometrom, saj se način merjenja posameznih instrumentov razlikuje, kar se kaže v razliki izmerjenih vrednosti (Petan et al., 2010). Enačbo smo določili iz korelacijske analize podatkov z dežemera in podatkov z disdrometra na isti lokaciji za predhodno obdobje, ko so bile na voljo vse meritve. Za padavine na prostem in prepuščene padavine pod vegetacijo smo izračunali količino, trajanje in intenziteto. Za prepuščene padavine pa smo izračunali še število in povprečno velikost ter hitrost prepuščenih kapljic.

Podatke o velikostni porazdelitvi prepuščenih kapljic smo za vsak dogodek posebej prikazali na v-D (hitrost-premer) diagramih. Na diagramih os x predstavlja povprečen premer kapljic, os y pa njihovo povprečno hitrost (slika 2). Barvna lestvica je prilagojena za vsak diagram posebej, da omogoča jasno prikazano porazdelitev padavin znotraj posameznega dogodka. Najsvetlejša zelena barva predstavlja najmanjše število kapljic, najtemnejša modra pa največje število kapljic. Rdeča krivulja na diagramih predstavlja teoretično končno hitrost kapljic, ki je bila izračunana z enačbo (1), ki so jo predlagali Atlas et al. (1973).

$$v = 9,65 - 10,3 \times e^{-0,6D} \quad (1)$$

Enačba predstavlja eksperimentalno določeno empirično razmerje med premerom kapljice (D) v mm in končno hitrostjo (v) v m/s.



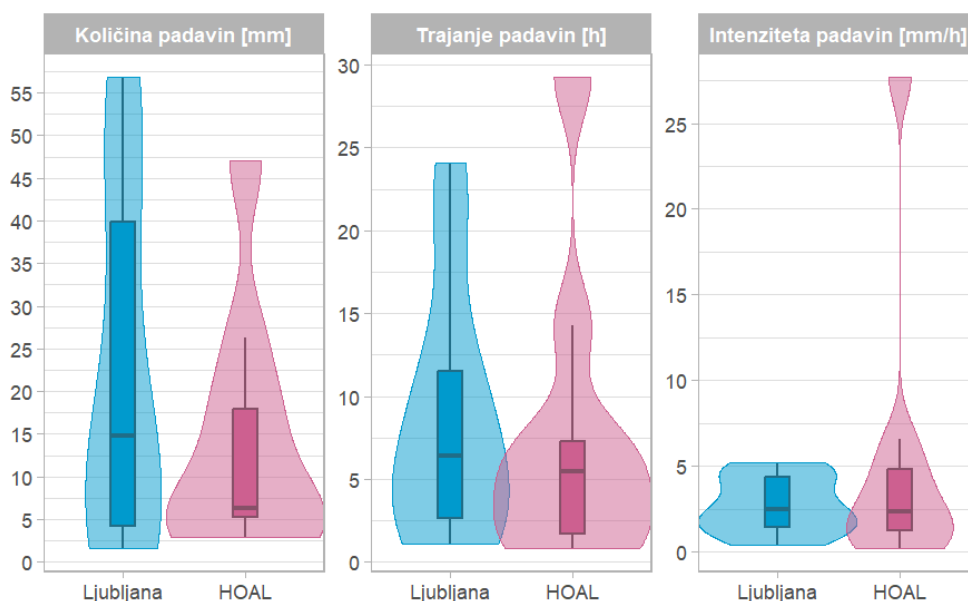
Slika 2 - Primer v-D diagrama, ki prikazuje porazdelitev prepuščenih padavin za izbran dogodek. X os prikazuje premer kapljic, y os hitrost kapljic, barvna skala podaja število kapljic, rdeča krivulja pa teoretično končno hitrost.

Odvisnost značilnosti prepuščenih padavin od vrste vegetacije smo analizirali z ugotavljanjem vizualne podobnosti med v-D diagrami z uporabo metode hierarhičnega združevanja. Hierarhično združevanje je metoda nenadzorovanega učenja, ki postopoma združuje objekte v skupine na podlagi njihove podobnosti. v-D diagrame za 33 dogodkov prepuščenih padavin, ki smo jih izmerili na treh lokacijah, smo uvozili v programsko orodje Orange (Demšar et al., 2013) in jih pretvorili v vektorske značilnosti z uporabo modula Image Embedding. Nato smo izračunali medsebojne razdalje z uporabo kosinusne razdalje. Kosinusna razdalja meri kot med dvema vektorjema in ne njuno velikost (Li et al., 2025). V našem primeru to zagotavlja, da diagrami s podobnimi oblikami ostanejo skupaj, ne da bi se ločili zaradi različnih intenzivnosti dogodkov. Hierarhično združevanje je bilo izvedeno na dobljeni matriki razdalj z uporabo metode povprečne povezave. Število skupin smo izbrali na podlagi vrednosti "silhouette" indeksa, ki je bil najvišji za primer treh skupin. Vrednost indeksa se giblje med -1 in 1, pri čemer višja vrednost pomeni, da je točka bolj podobna svoji skupini (Shutaywi in Kachouie, 2021).

Rezultati in diskusija

Lastnosti padavin in prepuščenih padavin

Osnovne lastnosti analiziranih padavinskih dogodkov na raziskovalnih ploskvah v Ljubljani in v HOAL so prikazani na sliki 3. Količina padavin na prostem v Ljubljani je znašala med 1,6 mm in 56,9 mm na dogodek, z mediano enako 14,7 mm. V HOAL je dogodek z najmanjšo količino padavin znašal 2,9 mm, medtem ko je bil dogodek z največjo količino padavin enak 47,1 mm. Mediana vrednosti padavin na dogodek v HOAL je bila 6,2 mm. Dogodki so v Ljubljani in na HOAL trajali povprečno 6,4 ur oziroma 5,5 ur. Mediana intenzitete padavin je bila enaka 2,5 mm/h v Ljubljani in 2,3 mm/h v HOAL. Čeprav smo v analizi upoštevali le krajše obdobje med 19. julijem in 9. septembrom, ko je bila kora dovolj visoka, izbrani dogodki odražajo splošne lastnosti obeh lokacij. Značilnosti analiziranih dogodkov v tej analizi so namreč podobne značilnostim poletnih dogodkov, ki so jih predstavili Szeles et al. (2025) v dolgoročni analizi značilnosti padavin na obravnavanih lokacijah. Dolgoročna mediana količine padavin, ki so jo navedli, je bila 10,2 mm v Ljubljani in 6,8 mm v HOAL, mediana trajanja pa 5,5 ur v Ljubljani in 5,3 ur v HOAL.



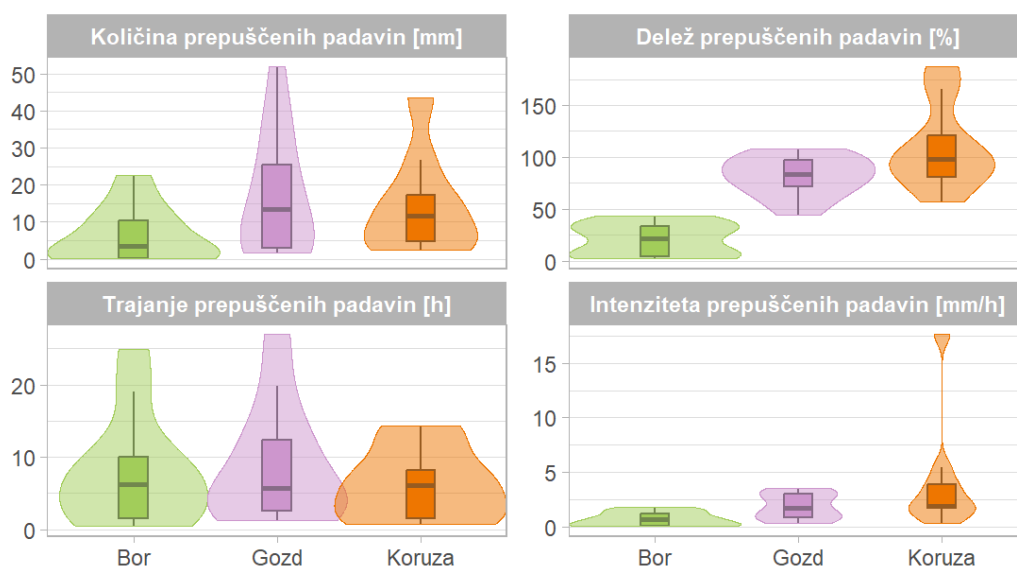
Slika 3 - Osnovne značilnosti padavin na prostem (količina, trajanje in intenziteta) na območju raziskovalnih ploskev v Sloveniji (Ljubljani) in Avstriji (HOAL).

Osnovne značilnosti prepuščenih padavin pod tremi obravnavanimi vrstami vegetacije so prikazane na sliki 4. Bor je prepustil med 2,2 % in 43,8 % padavin na dogodek, z mediano enako 21,7 % (3,4 mm). Mediana trajanja prepuščenih padavin je bila 6,2 ure, mediana intenzitete pa 0,7 mm/h. Podobne vrednosti prepuščenih padavin (v povprečju 27 %) smo zabeležili tudi pri meritvah, opravljenih pod istim borom v daljšem časovnem obdobju (Zabret et al., 2018).

Mešani gozd je prepustil med 44,6 % in 108,5 % padavin na dogodek, z mediano enako 83,7 %. Podobne vrednosti (80,2 % in 82,8 %) so bile zabeležene kot povprečna količina prepuščenih padavin v istem gozdu v obdobju olistanih krošenj (Kermavnar in Vilhar, 2017). Mediana trajanja prepuščenih padavin v mešanem gozdu je znašala 5,8 ure in je bila v večini primerov v povprečju za 0,8 ure daljša od trajanja padavin na prostem. Poleg tega je bila v

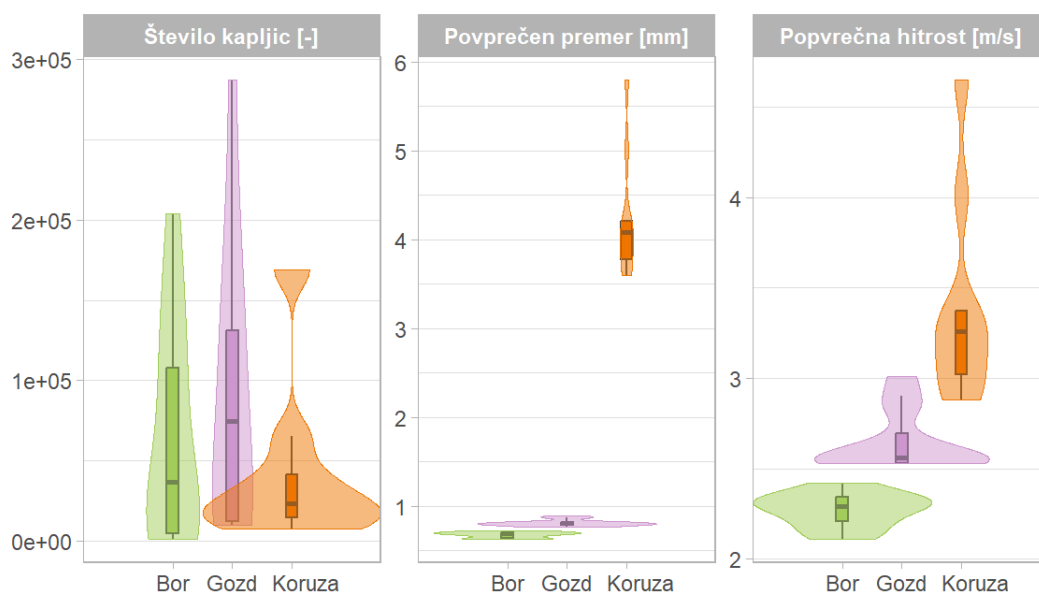
gozdu mediana intenzitete prepuščenih padavin enaka 1,7 mm/h, kar ustreza znatno večjim količinam prepuščenih padavin v gozdu kot pod borom. Večje količine prepuščenih padavin ter daljše trajanje in večja intenziteta, ki smo jih opazili v gozdu, so najverjetneje povezane s prekrivanjem različnih krošenj, česar pri posameznih drevesih ni (Levia et al., 2017).

Koruza je prepustila največji delež padavin na dogodek, in sicer med 56,8 % in 187 %, z mediano enako 98 %. Vrednosti, večje od 100 %, so povezane z nastankom tako imenovanih točk kapljanja (ang. dripping points). Zaradi določenih značilnosti vegetacije lahko pride do poudarjenega stekanja prestreženih padavin, ki po tem v določeni točki v večji meri kapljajo na tla (Shachnovich in Berliner, 2008; Zabret in Šraj, 2018). Ta odziv je pričakovan v primeru koruze zaradi njenih značilnih podolgovatih listov (Ma et al., 2015; Zheng et al., 2019). To pa se odraža tudi v najdaljšem trajanju in največji intenziteti prepuščenih padavin, ki znaša 6,1 ure oziroma 1,9 mm/h.



Slika 4 - Osnovne značilnosti prepuščenih padavin (količina, delež, trajanje in intenziteta) pod borom, v mešanem gozdu in pod koruzo.

Mediana števila kapljic prepuščenih padavin je bila najvišja v mešanem gozdu, sledijo vrednosti pod borom in pod koruzo (slika 5). Največje število kapljic, ki smo jih izmerili v gozdu, se ujema z največjo vrednostjo mediane količine prepuščenih padavin, izmerjenih v gozdu. Najmanjše povprečno število kapljic pa smo zaznali pod koruzo, kjer so prepuščene padavine predstavljale največje deleže. Maloštevilne kapljice pod koruzo pa so bile v povprečju največje in najhitrejšje, s povprečnim premerom 4,1 mm in hitrostjo 3,3 m/s (slika 5). Mediana povprečnega premera kapljic na dveh lokacijah v Ljubljani je bila 0,7 mm pod borom in 0,8 mm v mešanem gozdu, mediana hitrosti kapljic pa je bila 2,3 m/s pod borom in 2,6 m/s v mešanem gozdu, kar je znatno manj od velikosti in hitrosti kapljic pod koruzo. Čeprav so padavine spremljane na različnih lokacijah (tj. v Ljubljani in v HOAL), so razlike v porazdelitvi kapljic prepuščenih padavin povezane predvsem z vplivom vegetacije. V povprečju so velikosti in hitrosti dežnih kapljic na odprtem v Ljubljani manjše, vendar so v Ljubljani posamezne kapljice večje in hitrejšje kot v HOAL (Szeles et al., 2025).

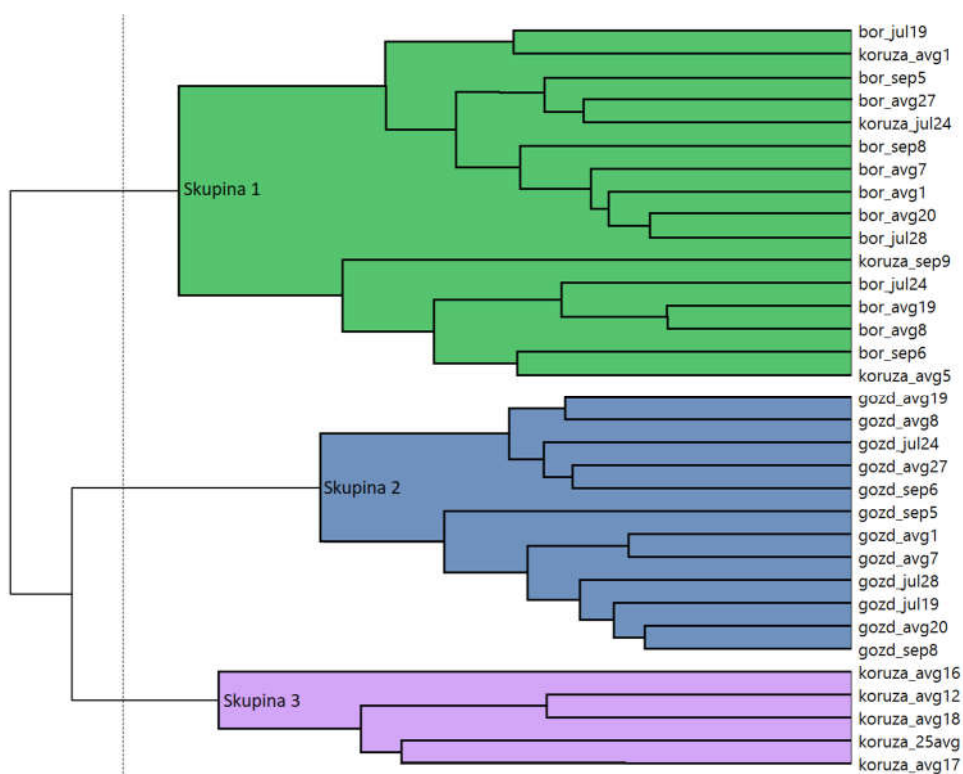


Slika 5 - Mikrostruktura kapljic (število, velikost in hitrost) prepuščenih padavin pod borom, v mešanem gozdu in pod koruzo.

Hierarhično združevanje v-D (hitrost-premer) diagramov

Na podlagi rezultatov hierarhičnega združevanja v-D (hitrost-premer) diagramov in "silhouette" testa smo dogodke prepuščenih padavin na treh lokacijah razdelili v tri skupine (slika 6). Dendrogram (slika 6) prikazuje dve homogeni in eno heterogeno skupino. Heterogena skupina vključuje vse diagrame za dogodke pod borom ter štiri diagrame za dogodke pod koruzo. Druga, homogena skupina, vključuje diagrame za vse dogodke v mešanem gozdu. Tretja, prav tako homogena skupina pa vsebuje preostalih pet diagramov za dogodke pod koruzo.

Nadalje smo analizirali značilnosti posameznih skupin, da bi ugotovili razloge za takšno razvrstitev diagramov. Najmanjša povprečna vrednost deleža prepuščenih padavin je bila zabeležena za skupino 1 (37.2 %), ki vključuje vse dogodke, izmerjene pod borom. To ustreza najnižjemu deležu prepuščenih padavin pod borom, vendar so bili štirje dogodki, zabeleženi pod koruzo, prav tako razvrščeni v skupino 1. Preostali dogodki, zabeleženi pod koruzo, so bili razvrščeni v skupino 3 in so v povprečju pokazali najvišji delež prepuščenih padavin (117 %), kot je bilo pričakovano glede na analizo splošnih značilnosti prepuščenih padavin (slika 5). Mediana premera kapljic je bila največja za dogodke, razvrščene v skupino 3 (3,9 mm). Skupini 1 in 2 sta imeli podobne vrednosti, in sicer 0,7 mm oziroma 0,8 mm. Dogodki, uvrščeni v skupino 3, so imeli tudi največjo povprečno hitrost prepuščenih kapljic 3,2 m/s, v primerjavi z 2,3 m/s in 2,6 m/s za skupini 1 in 2.



Slika 6 – Dendrogram razvrstitve dogodkov prepuščenih padavin v tri skupine glede na vizualno podobnost v-D (hitrost-premer) diagramov.

Rezultat združevanja diagramov je za dogodke pod borom in v mešanem gozdu pričakovan, saj so bili ti dogodki razvrščeni v dve ločeni skupini. Diagrami, ki prikazujejo lastnosti dogodkov pod koruzo, pa so bili razvrščeni v dve različni skupini. Za razumevanje tega pojava je potrebna nadaljnja analiza.

Na splošno so bili dogodki, katerih diagrami so združeni v skupini 3, večji in intenzivnejši (preglednica 1). Poleg tega je LAI koroze 8. avgusta presegel vrednost 4, kar je ravno med prvimi tremi in preostalimi šestimi dogodki, ki so razporejeni v skupini 1 in 3. Vendar je bil zadnji izmerjen dogodek 9. septembra prav tako uvrščen v skupino 1. Primerjava uteženega povprečnega premera kapljic na prostem in prepuščenih padavin pod koruzo z 1-minutnim časovnim korakom kaže, da so kapljice prepuščenih padavin bistveno večje od kapljic na prostem za dogodke, dodeljene skupini 3 (preglednica 1).

Analiza kaže, da na lastnosti prepuščenih padavin pomembno vplivajo tako padavine kot značilnosti vegetacije. Ko so vrednosti LAI nizke, skladiščna zmogljivost površine koroze še ni v celoti dosežena (Zagyvai-Kiss et al., 2025). Ker so listi koroze zelo dolgi in fleksibilni, pričakujemo, da se bodo upognili pod težo zadržane vode, kar omogoča prehod večjemu deležu neposrednih prepuščenih padavin. Zato so velikosti kapljic prepuščenih padavin v tem primeru bolj podobne velikostim kapljic na prostem (Nanko et al., 2013), kar smo opazili pri dogodkih, ki so bili uvrščeni v skupino 1. Podoben odziv se lahko pojavi tudi v poznejših fazah rasti v primerih dogodkov z veliko količino padavin v daljšem obdobju, kot na primer pri septembrskem dogodku. Ko pa je LAI večji, se kapljice zbirajo na listih, po katerih se stekajo do konic, kjer se združujejo v večje kaplje, ki padajo na tla. To se odraža tudi v večjih premerih, ki smo jih opazili za dogodke v skupini 3.

Preglednica 1 - Primerjava količine, intenzitete in velikosti kapljic (D) za padavine na prostem in prepuščene padavine pod koruzo.

Padavine	Dogodek	Skupina	Količina [mm]	Intenziteta [mm/h]	D kapljic [mm]
Na prostem	24. julij	1	2,97	3,56	1,12
Prepuščene			3,01	3,84	0,92
Na prostem	1. avgust	1	5,27	1,40	0,91
Prepuščene			6,37	1,73	0,98
Na prostem	5. avgust	1	2,87	0,39	0,71
Prepuščene			2,33	0,32	0,71
Na prostem	12. avgust	3	5,81	6,58	1,09
Prepuščene			4,63	5,45	0,90
Na prostem	16. avgust	3	47,09	27,70	1,19
Prepuščene			26,73	17,62	1,34
Na prostem	17. avgust	3	26,26	4,80	1,07
Prepuščene			43,43	3,38	1,52
Na prostem	18. avgust	3	6,25	0,21	1,06
Prepuščene			11,69	1,93	1,52
Na prostem	25. avgust	3	15,22	2,33	0,89
Prepuščene			14,91	1,83	2,43
Na prostem	9. september	1	17,89	1,25	0,83
Prepuščene			17,20	1,20	0,81

Zaključki

Značilnosti vegetacije bistveno vplivajo na količino ter velikostno in hitrostno porazdelitev kapljic prepuščenih padavin. Ugotovili smo, da najmanjši delež padavin prepusti bor, sledita pa mu mešani gozd in koruza. V primeru slednje k visokim deležem prepuščenih padavin, ki lahko presegajo 100 %, najverjetneje pomembno prispevajo točke kapljanja, ki se lahko pojavijo na posameznih rastlinah koruske in se odražajo v večji intenziteti, količini, premeru in hitrosti prepuščenih padavin. Rezultati odražajo lokalno porazdelitev prepuščenih padavin pod izbrano rastlino.

Analiza je pokazala, da se tri skupine v-D diagramov, oblikovane s hierarhičnim združevanjem, med seboj pomembno razlikujejo. Nepričakovana je bila razdelitev dogodkov pod koruzo v dve skupini: eno, ki združuje dogodke pod koruzo in borom, in drugo, ki združuje preostale dogodke pod koruzo. Slednji dogodki so bili na splošno večji in intenzivnejši, s precej večjimi premeri in hitrostmi prepuščenih dežnih kapljic.

Namen te analize je bil prikazati razlike med načini, na katere različne vrste vegetacije oblikujejo prepuščene padavine ter tako poudariti ključni vpliv vrste vegetacije na erozijo tal.

Zahvala

Predstavljena raziskava je bila podprta z raziskovalnim programom P2-0180 v okviru doktorskega študija prvega avtorja, financiranega s strani Javne agencije za raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS). Ta prispevek je del tekočega raziskovalnega projekta z naslovom »Ocena vpliva prestrežanja padavin na erozijo tal«, ki

ga podpirata Javna agencija za raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (J2-4489) in Avstrijski sklad za znanost (FWF) I 6254-N. Dodatno je bila raziskava delno financirana tudi s strani programa Evropske unije za raziskave in inovacije Horizon Europe preko projekta SpongeScapes (Grant agreement ID 101112738).

Reference

- Atlas, D., Srivastava, R.C., Sekhon, R.S., 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Reviews of Geophysics* 11, 1–35.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/RG011i001p00001>
- Blöschl, G., Blaschke, A., Broer, M., Bucher, C., Carr, G., Chen, X., Eder, A., Exner-Kittridge, M., Farnleitner, A., Flores Orozco, A., Haas, P., Hogan, P., Kazemi Amiri, A. (Mehrad), Oismüller, M., Parajka, J., Silasari, R., Stadler, P., Strauss, P., Vreugdenhil, M., Zessner, M., 2016. The Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) in Petzenkirchen: A hypothesis-driven observatory. *Hydrol Earth Syst Sci* 20, 227–255. <https://doi.org/10.5194/hess-20-227-2016>
- Brasil, J.B., Andrade, E.M. de, Guerreiro, M.S., Palácio, H.A. de Q., Ribeiro Filho, J.C., Fernández-Raga, M., Medeiros, P.H.A., 2024. Measurement and modelling of kinetic energy and erosivity of rainfall and throughfall in a tropical semiarid region. *J Hydrol (Amst)* 644, 132088. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132088>
- Brasil, J.B., de Andrade, E.M., de Queiroz Palácio, H.A., Medeiros, P.H.A., dos Santos, J.C.N., 2018. Characteristics of precipitation and the process of interception in a seasonally dry tropical forest. *J Hydrol Reg Stud* 19, 307–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.10.006>
- Cao, Y., Ouyang, Z.Y., Zheng, H., Huang, Z.G., Wang, X.K., Miao, H., 2008. Effects of forest plantations on rainfall redistribution and erosion in the red soil region of Southern China. *Land Degrad Dev* 19, 321–330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.812>
- Demšar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hocevar, T., Milutinovic, M., Možina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Staric, A., Stajdohar, M., Žagar, L., Žbontar, J., Žitnik, M., Zupan, B., 2013. Orange: Data Mining Toolbox in Python. *Journal of Machine Learning Research* 14, 2349–2353.
- Frasson, R., Krajewski, W., 2011. Characterization of the drop-size distribution and velocity–diameter relation of the throughfall under the maize canopy. *Agric For Meteorol* 151, 1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.001>
- Geiger, R., Aroq, R.H., Todhunter, P., 1995. *The climate near the ground*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.
- Kermavnar, J., Vilhar, U., 2017. Canopy precipitation interception in urban forests in relation to stand structure. *Urban Ecosyst* 20. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0689-7>
- Kozak, J., Ahuja, L., Green, T., Ma, L., 2007. Modeling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture. *Hydrol Process* 21. <https://doi.org/10.1002/hyp.6235>
- Levia, D.F., Hudson, S.A., Llorens, P., Nanko, K., 2017. Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research. *WIREs Water* 4, e1225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wat2.1225>
- Li, Chen, M., Wang, K., Ma, J., Bovik, A.C., Zhang, Y., 2025. SAMScore: A Content Structural Similarity Metric for Image Translation Evaluation. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence* 6, 2027–2040. <https://doi.org/10.1109/TAI.2025.3535456>
- Li, G., Wan, L., Cui, M., Wu, B., Zhou, J., 2019. Influence of Canopy Interception and Rainfall Kinetic Energy on Soil Erosion under Forests. *Forests* 10. <https://doi.org/10.3390/f10060509>
- Ma, B., Liu, Y., Liu, X., Ma, F., Wu, F., Li, Z., 2015. Soil splash detachment and its spatial distribution under corn and soybean cover. *Catena (Amst)* 127, 142–151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.009>
- Nanko, K., Hotta, N., Suzuki, M., 2006. Evaluating the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution. *J Hydrol (Amst)* 329, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.036>

- Nanko, K., Watanabe, A., Hotta, N., Suzuki, M., 2013. Physical interpretation of the difference in drop size distributions of leaf drips among tree species. *Agric For Meteorol* 169, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.018>
- OTT Hydromet, 2024. Operating instructions Present Weather Sensor OTT Parsivel 2.
- R Core Team, 2023. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [WWW Document]. URL <http://www.r-project.org/> (accessed 3.10.25).
- Shachnovich, Y., Berliner, P., 2008. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. *J Hydrol (Amst)* 349, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.051>
- Shutaywi, M., Kachouie, N.N., 2021. Silhouette Analysis for Performance Evaluation in Machine Learning with Applications to Clustering. *Entropy* 23. <https://doi.org/10.3390/e23060759>
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M., 2008. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agric For Meteorol* 148, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.007>
- Szeles, B., Parajka, J., Šraj, M., Blöschl, G., Marjanović, D., Bezak, N., Lebar, K., Vidmar, A., Strauss, P., Krammer, C., Schmaltz, E., Hogan, P., Rab, G., Zabret, K., 2025. Comparative analysis of rainfall event characteristics and rainfall erosivity between two experimental plots in Austria and Slovenia. *J Hydrol Reg Stud* 59, 102353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102353>
- Van Stan, J.T., Siegert, C.M., Levia, D.F., Scheick, C.E., 2011. Effects of wind-driven rainfall on stemflow generation between codominant tree species with differing crown characteristics. *Agric For Meteorol* 151, 1277–1286. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.008>
- Zabret, K., Radulović, L., Alivio, M.B., Bezak, N., Šraj, M., 2025. Factors influencing the kinetic energy of throughfall drops. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-8204>
- Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M., 2018. Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area. *J Hydrol (Amst)* 558, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.025>
- Zabret, K., Šraj, M., 2019. Evaluating the influence of rain event characteristics on rainfall interception by urban trees using multiple correspondence analysis. *Water (Switzerland)* 11, 2659. <https://doi.org/10.3390/W11122659>
- Zabret, K., Šraj, M., 2018. Spatial variability of throughfall under single birch and pine tree. *Acta hydrotechnica* 31, 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.01>
- Zagyvai-Kiss, K.A., Gribovszki, Z., Kalicz, P., Zabret, K., Szilágyi, J., Herceg, A., 2025. Physically Based Canopy Interception Model for a Beech Forest Using Remote Sensing Data. *Forests* 16. <https://doi.org/10.3390/f16091469>
- Zhang, R., Seki, K., Wang, L., 2023. Quantifying the contribution of meteorological factors and plant traits to canopy interception under maize cropland. *Agric Water Manag* 279, 108195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108195>
- Zheng, J., Fan, J., Zhang, F., Yan, S., Wu, Y., Lu, J., Guo, J., Cheng, M., Pei, Y., 2019. Throughfall and stemflow heterogeneity under the maize canopy and its effect on soil water distribution at the row scale. *Science of The Total Environment* 660, 1367–1382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.104>
- Zhu, Z., Li, J., Zhu, D., 2024. Exploring the effects of maize canopy on the spatiotemporal distribution heterogeneity of the determinants of sprinkler irrigation droplet splash erosivity. *Agric Water Manag* 306, 109158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109158>
- Zore, A., Bezak, N., Šraj, M., 2022. The influence of rainfall interception on the erosive power of raindrops under the birch tree. *J Hydrol (Amst)* 613, 128478. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128478>

Anomalous shallow fault creeping event on the Idrija Fault in summer 2025

Nenavadno plitvo lezenje Idrijskega preloma poleti 2025

Uroš Novak¹, Roger Bilham², Blaž Vičič³, Abdelkrim Aoudia^{4†}

Abstract

The Idrija Fault, a dextral strike-slip structure crossing the karstified carbonate Dinarides, exhibits complex shallow deformation strongly influenced by hydrological processes. Two Hall-effect creepmeters installed 8 km apart at Oblakov vrh and Kanomlja recorded abrupt shallow slip events of 0.15–0.50 mm during summer 2025. These slip episodes lasted up to 40 hours, consistent with creeping behavior and occurred without any accompanying seismicity, with regional earthquake magnitudes and frequencies remaining low. The last significant events were the 1998 and 2004 Posočje earthquakes. The observed deformation patterns cannot be explained by uniform tectonic slip and instead indicate different local mechanisms, including rainfall-driven pore-pressure diffusion, barometric pressure changes, karstic fluid pathways, and possibly shallow mass movement, that act along the fault. The observations highlight the strong coupling between hydrology, karst processes, and shallow fault mechanics, demonstrating that to some degree environmental controls dominate near-surface fault deformation on the Idrija Fault.

Keywords: Idrija Fault, shallow creep, active faulting, hydrological deformation, karst, Dinarides.

Povzetek

Idrijski prelom, desno zmični prelom, ki seka močno zakrasele karbonatne Dinaride, kaže zapletene plitve deformacije skorje, ki so močno pod vplivom hidroloških procesov. Dva Hall-ova creepmetra, postavljena 8 km narazen na Oblakovem vrhu in v Kanomlji, sta poleti 2025 zabeležila nenadne plitve zdrse v velikosti 0,15–0,50 mm. Ti zdrsi so trajali do 40 ur, kar je značilno za lezenje, in so potekali brez kakršnekoli spremljajoče seizmične aktivnosti; magnituda in frekvenca regionalnih potresov sta ostali nizki. Zadnja pomembnejša potresa v širšem območju sta bila Posočska potresa leta 1998 in 2004. Zaznane deformacije ni mogoče razložiti z enotnim tektonskim (seizmičnim) zdrsom in kažejo, da vzdolž preloma delujejo različni lokalni aseizmični mehanizmi, med drugim padavinsko povzročena difuzija pornege tlaka, spremembe zračnega tlaka, pretakanje vode v kraških kanalih ter verjetno tudi plitvo premikanje pobočja. Opažanja poudarjajo močno povezanost med hidrologijo, kraškimi procesi in plitvo prelomno-mehaniko, kar kaže, da okoljski dejavniki v določeni meri prevladujejo pri plitvih deformacijah vzdolž Idrijskega preloma.

Ključne besede: Idrijski prelom, plitvo lezenje, aktivno prelamljanje, hidrološke deformacije, kras, Dinaridi.

¹ ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna; Univerza v Novi Gorici, Vipavska 13, 5000 Nova Gorica

² Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences at the University of Colorado Boulder, 216 UCB, University of Colorado Boulder campus, Boulder CO 80309, United states of America

³ Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova cesta 1b, 1000 Ljubljana

⁴ Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Strada Costiera, 11, 34151 Trieste, Italy

Tectonic setting

The Idrija Fault is one of the major active faults in western Slovenia (Figure 1), characterized by dextral (right-lateral) strike-slip kinematics and a cumulative geological offset of approximately 2.5 km (Vičič et al., 2019). It transects the Dinarides, a mountain belt composed almost entirely of thick carbonate successions that are deeply and pervasively karstified. This lithological setting generates a highly permeable and complex subsurface hydrological network, enabling rapid infiltration and redistribution of water and strongly influencing shallow mechanical behavior.

Similar to other carbonate-hosted faults worldwide, the Idrija Fault exhibits mechanical conditions conducive to hydrologically modulated deformation, including episodic shallow creep, even in the absence of tectonic earthquakes. Historically, the fault is considered as the likely source of the destructive 1511 Idrija earthquake and has produced multiple Holocene surface-rupturing events (Grützner et al., 2021). Understanding its modern behavior is essential for regional seismic hazard assessment.

Monitoring sites and instrumentation

In 2022, two Hall-effect creepmeters were installed along the Idrija Fault as part of a broader monitoring initiative of the western Dinaric Fault System. The instruments, located 8 km apart, were placed at Idrija-Kanomlja and Oblakov vrh (Figure 1). At Oblakov vrh, the creepmeter spans a colluvial wedge above karstified carbonate bedrock. At Idrija-Kanomlja, the device crosses alluvial deposits adjacent to a terrace riser at a site where paleoseismic trenching has documented past surface rupture.

The creepmeters utilize carbon-fiber rods and Hall-effect sensors telemetered and logging at one-minute intervals and fault-slip resolution of 2 μm . This allows the instruments to capture both interseismic and co-seismic fault slip (Lindsey et al., 2014; Bilham et al., 2020, 2023).

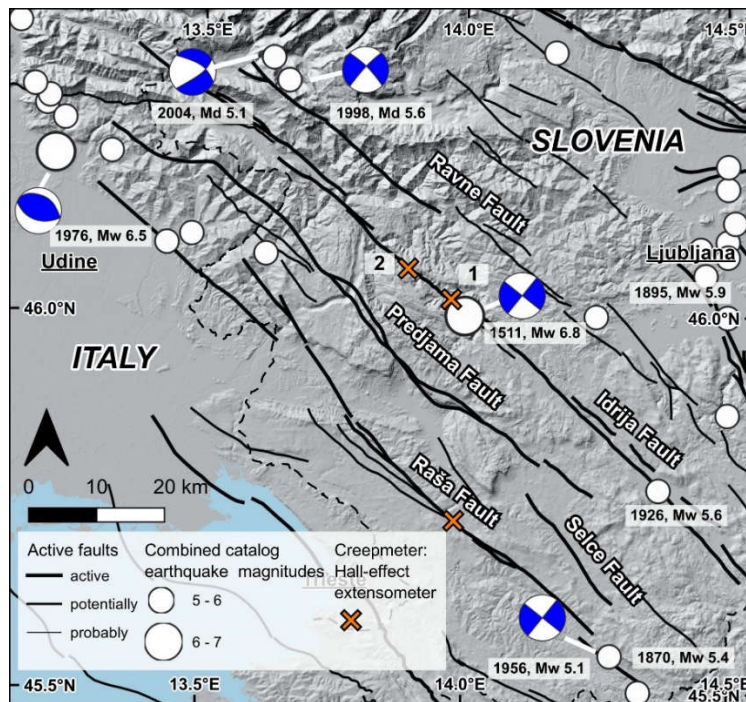


Figure 1: Seismotectonic map (Danciu et al., 2021) of western Slovenia (NW Dinarides) and creepmeter deployment scheme across the Western Dinaric Fault System. Number 1 is Idrija-Kanomlja site, number 2 is Oblakov vrh site.

Shallow episodic creep events of Idrija Fault in 2025 and environmental controls

During summer and autumn 2025, both instruments on the Idrija Fault recorded abrupt shallow creep events (Figure 2) between approximately 0.15 and 0.50 mm, with slip durations exceeding ten minutes, compatible with creeping deformation rather than instantaneous offsets or sensor artefacts. No major seismic activity occurred in the region during these episodes; the last significant events were the 1998 and 2004 Posočje earthquakes. The absence of seismic triggers confirms that the 2025 deformation was aseismic and potential environmentally induced shallow creep rather than coseismic or afterslip processes.

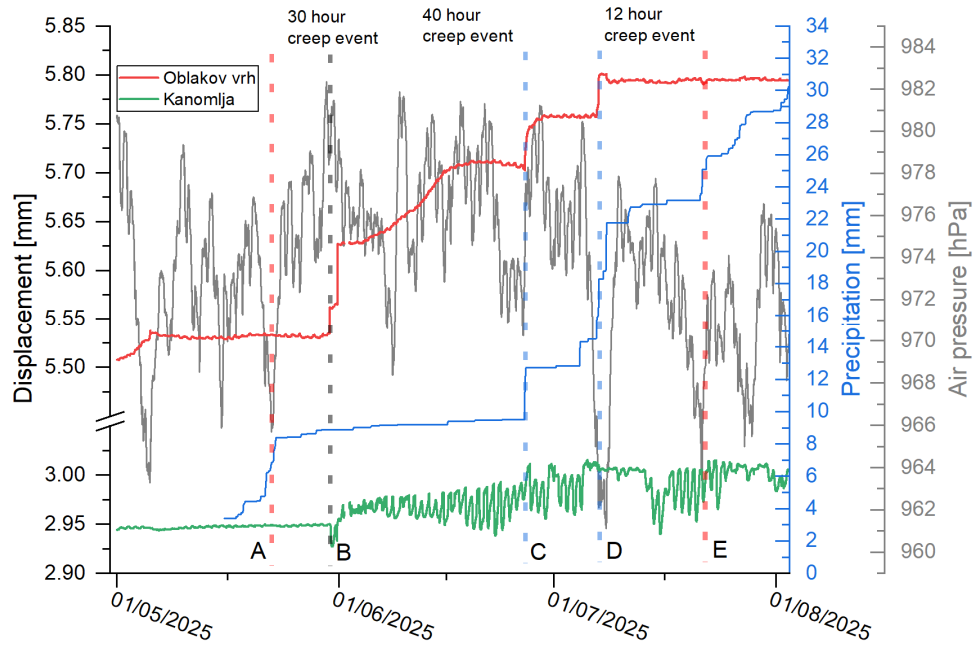


Figure 2: Creepmeter displacement on Idrija Fault, rainfall and barometric air pressure with annotated creeping events, A–E.

Although the 2025 displacement signals represent real ground deformation, they do not fit any of the established categories of tectonic creep described in recent classifications by Gittins (2022). The most striking feature is that the two sites, though separated by only 8 km, recorded opposite displacement polarities (Figure 2: event B), dextral at one and sinistral at the other. This polarity reversal is incompatible with the known dextral strike-slip motion of the Idrija Fault and demonstrates that these events were governed not by uniform tectonic slip at depth but by localized and partitioned hydrological influences, fault-zone geometries, or geomorphic processes acting independently at each site.

Rainfall exerted a strong but variable influence on the deformation patterns. Heavy precipitation usually preceded the slip events, yet deformation often began only after a delay of several hours to about a day, consistent with infiltration of water from the surface into the karstified carbonate bedrock. Not all hydrometeorological events produced the same response: events A and E involved rainfall and low-pressure spikes but resulted in no measurable deformation, whereas events C and D, despite appearing similar at the surface, generated clear displacement increments. The behavior observed during events C and D points to deeper hydrological processes within the bedrock or karstified fault zone, rather than shallow soil responses, since pore-pressure changes in the soil layer would occur too rapidly to account for the observed timing (Zhu et al., 2020; Lui et al 2021). These variations

show that hydrological triggering depends not only on rainfall and atmospheric pressure changes but also on deeper subsurface factors such as hydraulic connectivity and the prior water level within the karst aquifer (Zhu et al., 2020; Liu et al 2021).

Not all slip episodes fit to rainfall-related patterns. A puzzling event occurred under high atmospheric pressure and no rainfall, accompanied by fairly large displacement record on Oblakov vrh site. Although some of the associated electronic noise on the Idrija-Kanomlja site may be explained by moisture infiltration into the sensor's control board, the magnitude and persistence of the displacement on the Oblakov vrh site indicate that additional mechanisms were active, possibly involving subsurface pressure changes in karst conduits, deeper infiltration processes, or subtle geomorphic adjustments in saturated soils.

Interpretation of shallow fault behavior

When considered within the broader geological context of the Idrija Fault, its dextral strike-slip kinematics, its Holocene surface ruptures, its 2.5 km geological offset, the 2025 anomalies illustrate that shallow segments of the fault are probably strongly controlled by hydrological, geomorphic, fault geometry, and karstic processes that operate independently from deeper tectonic loading at seismogenic depths. The observations demonstrate that shallow aseismic deformation along the Idrija Fault cannot be interpreted solely as tectonic creep but must be understood through the combined context of environmental forcing and complex near-surface faulting mechanics, especially in karstified carbonate terrains.

The 2025 creepmeter anomalies recorded on the Idrija Fault underscore the importance of continuous monitoring and integrated geological, hydrological, and geophysical analyses in order to separate environmentally driven deformation from tectonic processes. These findings refine our understanding of active fault behavior in strongly karstified carbonate regions and contribute to improved seismic hazard assessment along the Idrija Fault.

The study is carried out within the framework of the Karst Research Programme (P6-0119) and Infrastructure Programme EPOS (I0-E017), 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 EC Horizon projects EPOS ON and TRANSFORM².

In memory of Abdelkrim (Karim) Aoudia (1968–2025)

Karim Aoudia, who passed away in October 2025, was a key figure in advancing solid Earth geophysics in the Adriatic-Dinaric region. Born and raised in Algeria, he completed his PhD in geophysics and seismology in Trieste in 1997 and later joined the International Centre for Theoretical Physics (ICTP), where he led research and supervised numerous students from all around the world, who now work at leading institutions worldwide.

Karim's scientific contributions span Coulomb stress modeling, earthquake relocation, fault-system mechanics and dynamics, tomographic imaging, and geodetic studies across the Mediterranean, Himalaya, Africa, and the Alps. His long-standing collaborations in Slovenia significantly improved the understanding of interactions between the Adriatic microplate, the Alps, and the Dinarides, and contributed to studies ranging from the Friuli and Bovec earthquakes to the geometry and behavior of the western Dinaric Fault system.

He played an essential role in paleoseismological investigations on the Raša Fault and in speleothem-damage studies in the NW Dinarides, advancing seismic-hazard assessments in western Slovenia. He also helped initiate the installation of creepmeters on the western

Dinaric Faults, enabling continuous monitoring of fault slip. Beyond his scientific achievements, Karim was known for his openness, mentorship, and warmth, and his curiosity and generous, collegial spirit will stay with us as a lasting part of our work and be remembered with deep respect. May future earthquake research in Slovenia carry forward the memory of his work and spirit.

Literature

- Danciu L., Nandan S., Reyes C., Basili R., Weatherill G., Beauval C., Rovida A., Vilanova S., Sesetyan K., Bard P-Y., Cotton F., Wiemer S., Giardini D. (2021). The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview, <https://doi.org/10.12686/a15>, EFEHR Technical Report 001.
- Bilham, R., Ayruk, T. E., Turğut, M., İrgüren, R., Köküm, M., Elhisso, A., Farımaz, İ., Doğan, U. (2023). Afterslip and triggered slip following the 6 Feb 2023 Kahramanmaraş earthquakes, East Anatolian Fault, Türkiye. Conference Proceedings of MedGU 2023, Istanbul.
- Bilham, R., Castillo, B. (2020). The July 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence Recorded by Creepmeters: Negligible Epicentral Afterslip and Prolonged Triggered Slip at Teleseismic Distances. *Seismological Research Letters*; 91 (2A): 707–720. doi: <https://doi.org/10.1785/0220190293>.
- Gittins, D. Hawthorne, J.C. (2022) Are Creep Events Big? Estimations of Along-Strike Rupture Lengths, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, doi: <https://doi.org/10.1029/2021JB023001>.
- Grützner, C., Aschenbrenner, S., Jamšek Rupnik, P., Reicherter, K., Saifelislam, N., Vičič, B., Vrabec, M., Welte, J., and Ustaszewski, K. (2021). Holocene surface-rupturing earthquakes on the Dinaric Fault System, western Slovenia, *Solid Earth*, 12, 2211–2234, <https://doi.org/10.5194/se-12-2211-2021>.
- Lindsey, E. O., Fialko, Y., Bock, Y., Sandwell, D. T., and Bilham, R. (2014). Localized and distributed creep along the southern San Andreas Fault, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 7909–7922, doi:10.1002/2014JB011275.
- Lui, S. K. Y., Huang, Y., & Young, R. P. (2021). The role of fluid pressure-induced aseismic slip in earthquake cycle modulation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JB021196>
- Vičič, B., Aoudia, A., Javed, F., Foroutan, M., Costa, G. (2019). Geometry and mechanics of the active fault system in western Slovenia. *Geophysical Journal International*, 217, 3, 1755–1766. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz118>.
- Zhu, W., Allison, K.L., Dunham, E.M. et al. (2020). Fault valving and pore pressure evolution in simulations of earthquake sequences and aseismic slip. *Nature Communications*, 11, 4833, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18598-z>

Snežišča pod Prisojnikom in v Martuljški skupini iz fotografij in spletnih kamer

Adna Vukalić¹, Nina Bončina¹, Tanja Skumavc¹, Mihaela Triglav Čekada^{1,2}

Povzetek

Raziskavo, ki sledi predhodnim študijam snežišč na območju Prisojnika v vzhodnem delu Julijskih Alp, smo razširili še na območje Martuljske skupine, kjer je več snežišč, ki vztrajajo dolgo v poletno sezono. Podrobno letno analizo spreminjanja teh snežišč smo izvedli s pomočjo posnetkov iz spletnih kamer pri jezeru Jasna in Erjavčevi koči, dopolnjenih s prostovoljno pridobljenimi fotografijami. Fotografije so bile ključne predvsem pri spremljanju snežišč v Martuljški skupini, saj za to območje ni na voljo spletnih kamer. V Martuljški skupini smo podrobno preučili več snežišč, ki jih v nadaljevanju navajamo od vzhoda proti zahodu: snežišče pod Grlom in Velikim Oltarjem, snežišče med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco, snežišče v Kotlih med Veliko in Malo Ponco, Špikov graben ter snežišče pod Srcem. Združevanje obeh virov podatkov nam je omogočilo natančnejši vpogled v dinamiko posameznih snežišč, ki se nahajajo na različnih nadmorskih višinah. Analiza se osredotoča na obdobje med letoma 2019 in 2025 za snežišča v Martuljški skupini ter na leti 2024 in 2025 za snežišča pod Prisojnikom.

Ključne besede: snežišče, snežišče v Skednju pod Prisojnikom, snežišča nad dolino Suhe Pišnice, snežišča v Martuljški skupini, površina, interaktivna metoda fotogrametrične orientacije, meteorološki podatki

Key words: snowfield, snowfield Skedenj below Prisojnik, snowfields above the valley of Suha Pišnica river, snowfields in the Martuljek mountain group, area, monoplotted, meteorological data

Uvod

Raziskava predstavlja nadaljevanje članka iz 2024 (Triglav Čekada in Lamovec, 2024), v katerem so obravnavana snežišča v okolici Prisojnika, med njimi največje snežišče v Skednju ter tri manjša nad dolino Suhe Pišnice. Hkrati nadgrajuje diplomsko nalogo Matko (2024), v kateri so analizirana snežišča v Martuljški skupini. V okviru raziskave smo analizirali površine snežišč pod Prisojnikom za leti 2024 in 2025 ter snežišč v Martuljški skupini v obdobju med letoma 2019 in 2025.

Spremljanje prostorske dinamike ledenikov in snežišč v Sloveniji je zelo aktualna raziskovalna tematika (Triglav Čekada in sod., 2014; Triglav Čekada in Zorn, 2020; Triglav Čekada in sod., 2020; Triglav Čekada in Gnidovec, 2020). V primerjavi z obema slovenskima ledenikoma, ki ju neprekinjeno spremljajo že od leta 1946, se sistematično spremljanje snežišč ne izvaja redno. Snežišča so obenem eden najbolj spremenljivih naravnih pojavov v visokogorskih območjih, saj se njihova pojavnost in obseg iz leta v leto spreminjata, vsako leto znova nastajajo ter odražajo značilnosti trenutnih podnebnih in sezonskih vremenskih razmer (Gams, 1959; Šifrer, 1961). V zadnjem obdobju so izvedli več raziskav, ki se osredotočajo na prostorsko dinamiko snežišč in njihove dolgoročne spremembe. Triglav Čekada in Adjova (2023) sta na podlagi topografskih kart, arhivskih

¹ Geodetski inštitut Slovenije, Jamova c. 2, 1000 Ljubljana

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

fotografij in državnih prostorskih podlag ugotovili, da se snežišče v Skednju pod Prisojnikom v izjemno toplih poletjih do konca talilne dobe lahko skoraj popolnoma stali. Največjo površino snežišča sta izmerili na starih Badjurinih kartah, medtem ko so se kot najbolj zanesljive izkazale meritve, pridobljene iz razglednic in arhivskih fotografij. Vrtačnik (2023) je z analizo ortofotov CAS in satelitskih posnetkov Sentinel-2 preučevala snežišča v Martuljskih gorah ter ugotovila, da se njihove površine med leti spreminjajo po podobnih letnih vzorcih. Triglav Čekada in Lamovec (2024) sta z opazovanjem snežišč pod Prisojnikom s pomočjo spletnih kamer ugotovila, da so vsa snežišča nad dolino Suhe Pišnice približno za polovico manjša od snežišča v Skednju ter večinoma izginejo že pred koncem avgusta, medtem ko se slednje ob ugodnih razmerah ohrani vsaj do sredine septembra. Pokazala sta tudi, da je za trajanje snežišč ključna povprečna letna temperatura. V diplomski nalogi (Matko, 2024) so analizirane spremembe površin snežišč v Martuljski skupini med letoma 2005 in 2024. Ugotovila je, da se površina snežišč od julija do avgusta zmanjša za približno 50 %, do konca talilne dobe pa za okoli 90 %, pri čemer je največje snežišče pod Grlom in Velikim Oltarjem, najmanjše pa pod Srcem. Vse navedene raziskave potrjujejo, da snežišča v Julijskih Alpah delujejo kot naravni kazalci dolgoročnih podnebnih sprememb.

Opis obravnavanih snežišč

Snežišče v Skednju, ki ga v starejši literaturi zasledimo pod imenom V Škednju, domačini pa ga poznajo kot U Skednjah (Polajnar, 2023), je eno izmed najbolj prepoznavnih snežišč pod Prisojnikom. Dobro je vidno z jezera Jasna, ene najbolj obiskanih turističnih točk v Sloveniji. Leži na severovzhodni strani Prisojnika (znanega tudi kot Prisank), med vrhovi Prednja glava, Mali Prisojnik in Zadnja glava; vsi so nad dolino Krnice, na nadmorski višini okrog 1750 metrov.

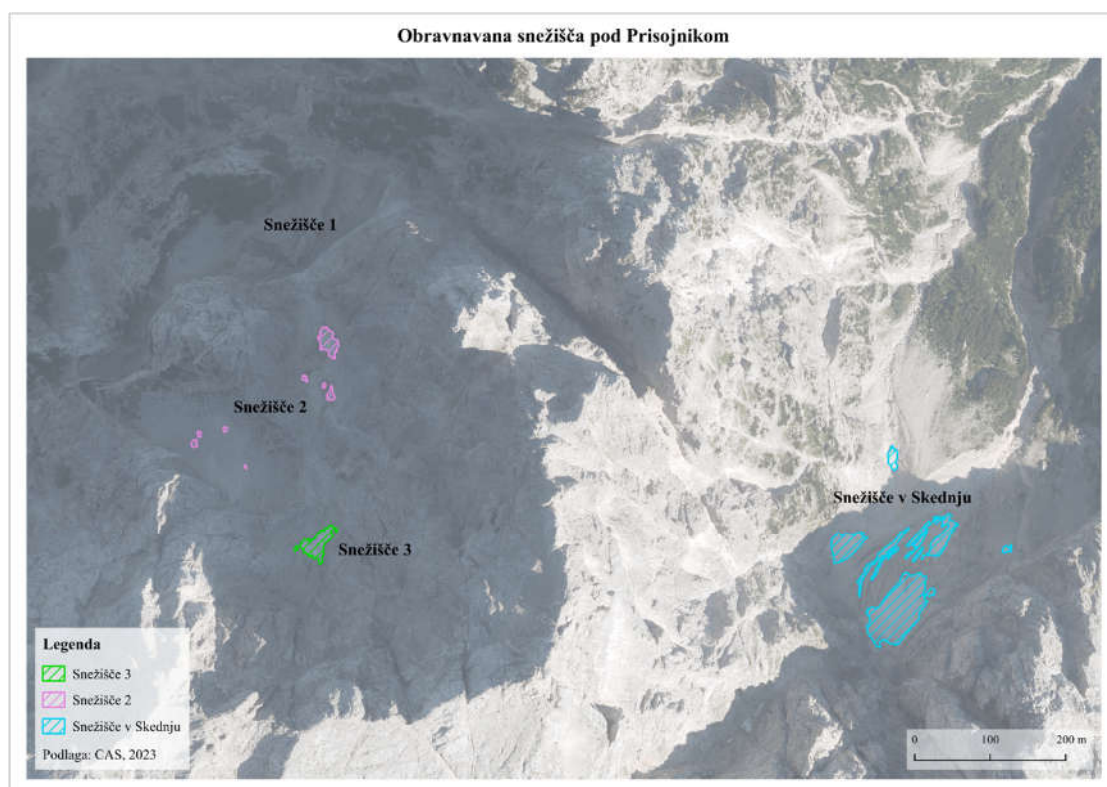
Na severozahodni strani Prisojnika, nad dolino Suhe Pišnice, so tri snežišča – dve manjši ter eno večje, ki ga sestavljata dve večji in ena manjša snežna zaplata. Gams (1961) jih je poimenoval ledišče v Suhi Pišnici, zgornje snežišče v Suhi Pišnici in snežišče nad slapom v Prisojniku. Vendar pa natančna identifikacija teh snežišč v naravi glede na Gamsovo poimenovanje ni povsem zanesljiva, zato so v tej raziskavi označena s številkami. Manjše snežišče, označeno s številko 1, leži na nadmorski višini približno 1600 m in predstavlja najnižje ležeče snežišče v skupini snežišč pod Prisojnikom. Snežišče številka 2 je največje in je na nadmorski višini okoli 1700 m, medtem ko je snežišče številka 3 najvišje ležeče, na približno 2000 m nadmorske višine. Vsa tri snežišča se raztezajo ob zelo zahtevni Hanzovi planinski poti.

Martuljska skupina (pogosto imenovana tudi Martuljkova ali Špikova skupina) je gorska veriga v vzhodnem delu Julijskih Alp. Gams (1961) omenja v njej naslednja snežišča: spodnje in zgornje snežišče Za Akom, snežišče v Amfiteatru, snežišče pod Grlom in Velikim Oltarjem, snežišče v Rdečem žlebu pod Gulcami, snežišče med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco, Kotli med Veliko in Malo Ponco, Špikov graben ter snežišče pod severnimi stenami Rigljice. Pri pogledu iz Gozd Martuljka, npr. kampa Špik, izstopajo vrhovi Široka Peč, Veliki in Mali Oltar, Velika in Mala Ponca ter Špik. Pod njimi se najlepše vidijo v tem prispevku obravnavana snežišča: snežišče pod Grlom in Velikim Oltarjem, snežišče med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco ter snežišče v Kotlih med Veliko in Malo Ponco. Ležijo na nadmorski višini med 2000 in 2250 m. Poleg njih izstopata še dve snežišči: Špikov graben, najdaljše snežišče v skupini, ki se razteza med okrog 1750 in 2000 m nadmorske višine, ter snežišče pod Srcem, ki leži na okoli 1500 m nadmorske višine.

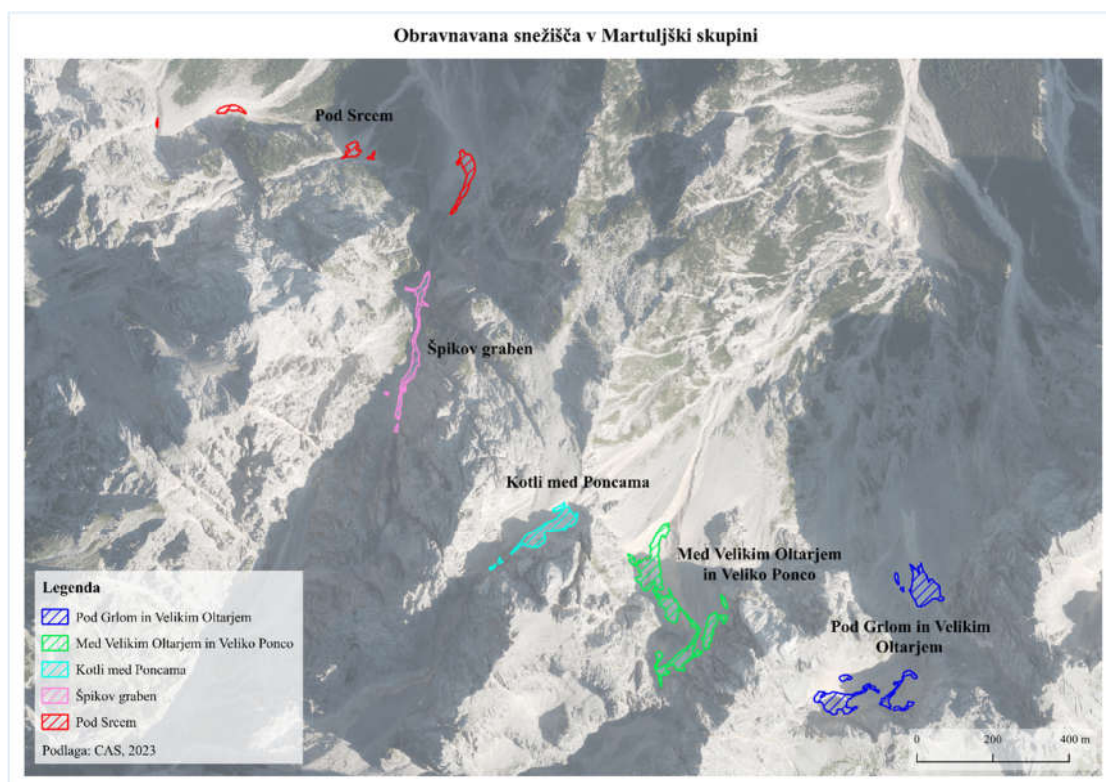
Vsa obravnavana snežišča ležijo v krnicah usmerjenih proti severu, kar jim kljub nižji nadmorski višini omogoča daljši obstoj. Snežišča, ki jih obravnavamo v tem prispevku, so

predstavljena na slikah 1 in 2. Kot podlago za predstavitev smo uporabili državni ortofoto Cikličnega aerofotografiranja Slovenije (CAS) iz avgusta 2023, na katerem smo zajeli vidne obode snežišč. Slika 1 kaže snežišča pod Prisojnikom. Snežišča št. 1 na ortofotu ni bilo mogoče zaznati, saj se je do časa snemanja (21. avgusta) že popolnoma stalilo. Slika 2 pa prikazuje obravnavana snežišča v Martuljški skupini.

Na podlagi izmerjenih obodov iz različnih ortofotov CAS smo izračunali površine snežišč za obdobje 2006–2023, ki so zbrane v preglednici 1.



Slika 1: Obravnavana snežišča pod Prisojnikom (Vir podlage: ortofoto CAS, 2023)

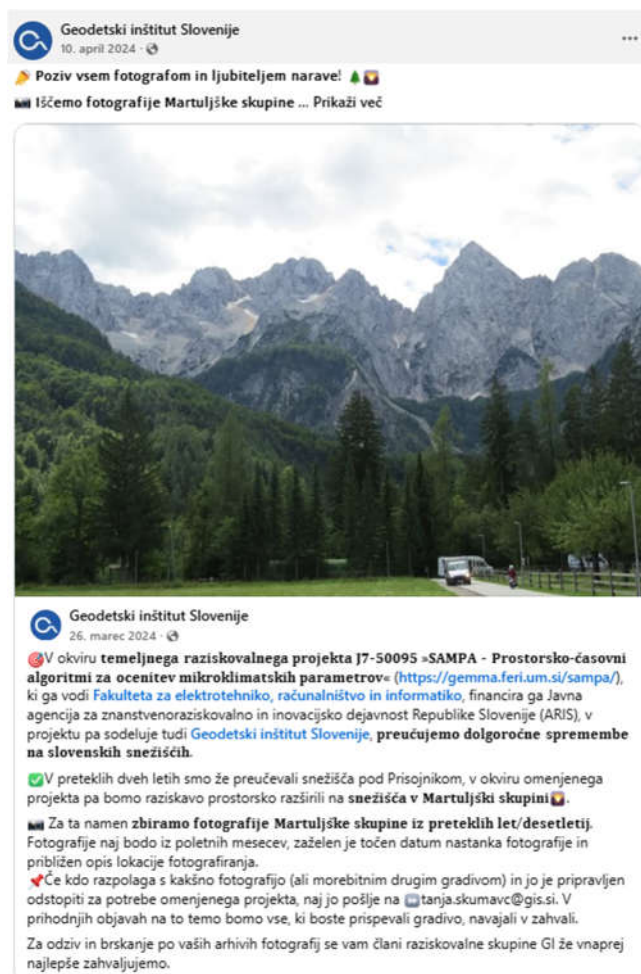


Slika 2: Obravnavana snežišča v Martuljski skupini (Vir podlage: ortofoto CAS, 2023)

Metodologija

Obode snežišč smo zajeli iz ortofotov CAS, ekranskih posnetkov spletnih kamer ter fotografij stranskega pogleda posnetih iz roke z različnimi fotoaparati in s strani različnih prostovoljcev z različnih lokacij. Te fotografije smo pridobili prek poziva namenjenega splošni javnosti, ki smo ga izvedli prek Facebook profila Geodetskega inštituta Slovenije v letu 2024 (slika 3). Na poziv se je odzvalo večje število prostovoljcev, ki so nam odstopili eno ali več fotografij narejenih z različnih stojišč, z različnimi fotoaparati ali pametnimi telefoni. Z nekaterimi identificiranimi prostovoljci smo sodelovali še v letu 2025. Zbrane fotografije zajemajo časovni niz 1991–2025, zaradi lažje primerjave z drugimi podatki pa v tem članku predstavljamo le rezultate za obdobje 2019–2025.

Snežišče v Skednju smo opazovali še prek spletne kamere nameščene pri Jasna Chalet Resortu ob jezeru Jasna, tri snežišča nad dolino Suhe Pišnice pa smo spremljali s spletno kamero, postavljeno na Erjavčevi koči na Vršiču. Zaslonske posnetke z obeh spletnih kamer smo zajemali v približno dvotedenskem intervalu med junijem in začetkom septembra med letoma 2024 in 2025. Površine snežišč, določene na podlagi posnetkov spletnih kamer, so lahko v primerjavi z drugimi viri podatkov delno precenjene ali podcenjene. Natančnost teh meritev je namreč odvisna od več dejavnikov. Na prvem mestu je kakovost uporabljene fotografije, ki je spet odvisna od ločljivosti kamere, osvetlitve in prisotnosti senc, na katere ni mogoče bistveno vplivati, saj so kamere postavljene na fiksnih lokacijah.



Slika 3: Poziv Geodetskega inštituta Slovenije, objavljen na Facebook profilu konec marca 2024.

Pridobljene zaslonske posnetke iz spletnih kamer in terenske fotografije prostovoljcev smo prostorsko umestili z uporabo interaktivne metode orientacije, enako kot v prejšnjih raziskavah Triglav Čekada in Adjova (2023) ter Triglav Čekada in Lamovec (2024).

Zmanjševanje površin snežišč v posameznem letu smo primerjali s povprečnimi poletnimi temperaturami posameznega leta, ki so bile izmerjene na meteorološki postaji na Kredarici (Arhiv ARSO, 2025). Povprečno poletno temperaturo smo izračunali kot povprečje povprečnih mesečnih temperatur v obdobju maj–september, pri čemer poudarjamo, da se tako izračunana povprečna temperatura razlikuje od povprečne temperature meteorološkega poletja (junij–avgust). Za primerjavo smo dodatno uporabili še povprečne letne temperature ter največjo sezonsko skupno višino snežne odeje. Raziskava na Triglavskem ledeniku je namreč pokazala, da je poleg letne temperature pri spremljanju dinamike ledenikov pomembno upoštevati tudi višino snežne odeje (Triglav Čekada in Gabrovec, 2013).

Obravnavana snežišča na ortofotih CAS

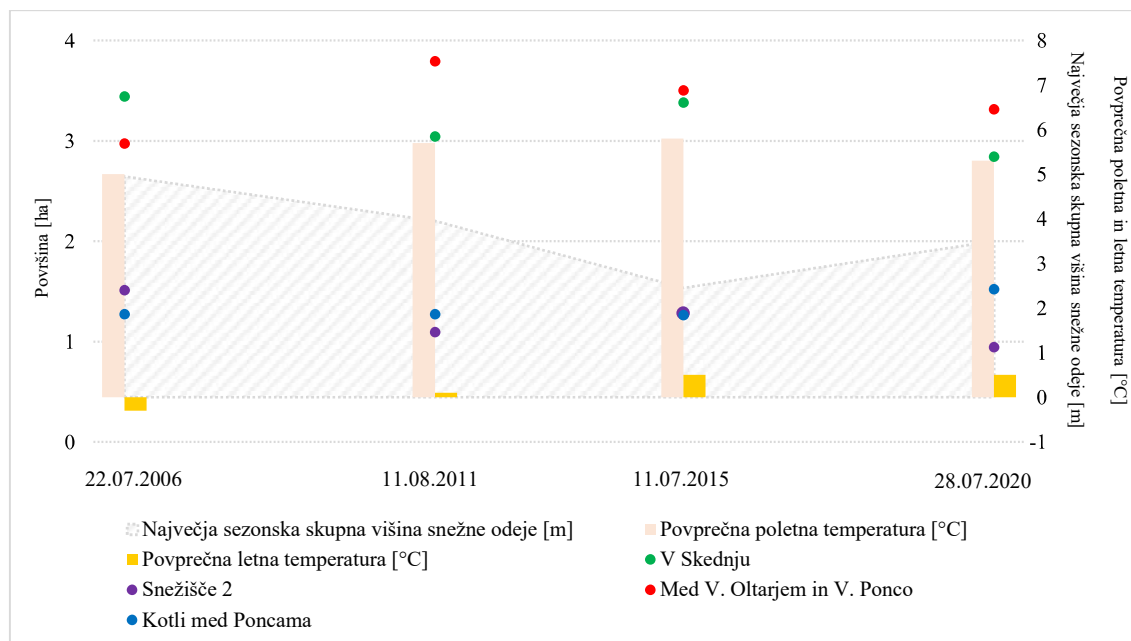
Za analizo sprememb površin snežišč skozi daljše časovno obdobje smo na ortofotih CAS, posnetih med letoma 2006 in 2023 v približno triletnem ciklu, izmerili obsege snežišč in izračunali njihove površine. Aeorosnemanje za izdelavo ortofotov poteka v poletnih

mesecih, med junijem in avgustom, odvisno od vremenskih razmer in posameznega leta, zato vsa leta niso neposredno primerljiva.

Izmerjene površine snežišč (preglednica 1) smo primerjali s povprečnimi poletnimi in letnimi temperaturami ter z največjo sezonsko skupno višino snežne odeje na Kredarici (grafikon 1). Na grafikonu 1 smo narisali po eno veliko in manjše primerljivo veliko snežišče iz Martuljske skupine in izpod Prisojnika. Pri tem je treba poudariti, da se uporabljeni meteorološki podatki nanašajo na merilno postajo Kredarica in zato niso neposredno primerljivi z lokacijami in površinami obravnavanih snežišč. Namenjeni so predvsem kot orientacijski okvir, ki omogoča lažje razumevanje in ustrežnejšo interpretacijo pridobljenih rezultatov. Na grafikonu so zaradi boljše preglednosti prikazana le štiri snežišča in še ta le za leta 2006, 2011, 2015 in 2020, ko je bilo aerofotografiranje CAS izvedeno približno ob istem času, to je med koncem julija in začetkom avgusta. Primerjava kaže, da je povprečna temperatura v času taljenja ključni dejavnik, ki vpliva na velikost snežišč. Najmanjše izmerjene površine sicer dobimo iz ortofotov CAS za leti 2017 in 2023, ko so bile poletne temperature tudi višje (5,7 °C za 2017 in 6,5 °C za 2023), vendar je bilo takrat snemanje izvedeno avgusta in zato ti podatki niso neposredno primerljivi z julijskimi. Za nekatera snežišča so bile površine na ortofotih določene že v prejšnjih raziskavah, vendar so bili izračuni v tej študiji ponovljeni z namenom preverjanja skladnosti rezultatov. Določanje obsegov snežišč na ortofotih je bistveno enostavnejše kot na fotografijah narejenih iz roke. Kljub prednostim pa je uporaba ortofotov omejena z dejstvom, da se ti za celotno Slovenijo izdelujejo le v triletnem ciklu, kar onemogoča neprekinjeno vsakoletno spremljanje sprememb snežišč.

Preglednica 1: Površine obravnavanih snežišč iz državnih ortofotov CAS v obdobju med 2006 in 2023.

<i>Snežišče</i>	<i>Datum CAS površina snežišč [ha]</i>					
	<i>22.07.2006</i>	<i>11.08.2011</i>	<i>11.07.2015</i>	<i>24.08.2017</i>	<i>28.07.2020</i>	<i>21.08.2023</i>
<i>V Skednju</i>	3,44	3,04	3,38	0,37	2,84	0,82
<i>Snežišče št. 1</i>	0,56	0,41	0,36	0	0,36	0
<i>Snežišče št. 2</i>	1,51	1,09	1,28	0	0,94	0,09
<i>Snežišče št. 3</i>	0,33	0,23	0,22	0	0,23	0,10
<i>Pod Grlom in Velikim Oltarjem</i>	4,10	4,20	3,83	0,38	4,23	1,19
<i>Med V. Oltarjem in V. Ponco</i>	2,97	3,79	3,50	0,61	3,31	1,58
<i>Kotli med Poncama</i>	1,27	1,27	1,26	0,42	1,52	0,60
<i>Špikov graben</i>	1,20	0,90	0,96	0,23	0,85	0,49
<i>Pod Srcem</i>	2,24	1,63	1,66	0,21	1,68	0,51



Grafikon 1: Površine izbranih snežišč iz državnih ortofotov CAS (2006–2020) v povezavi s povprečno poletno in letno temperaturo, ter največjo sezonsko skupno višino snežne odeje na Kredarici.

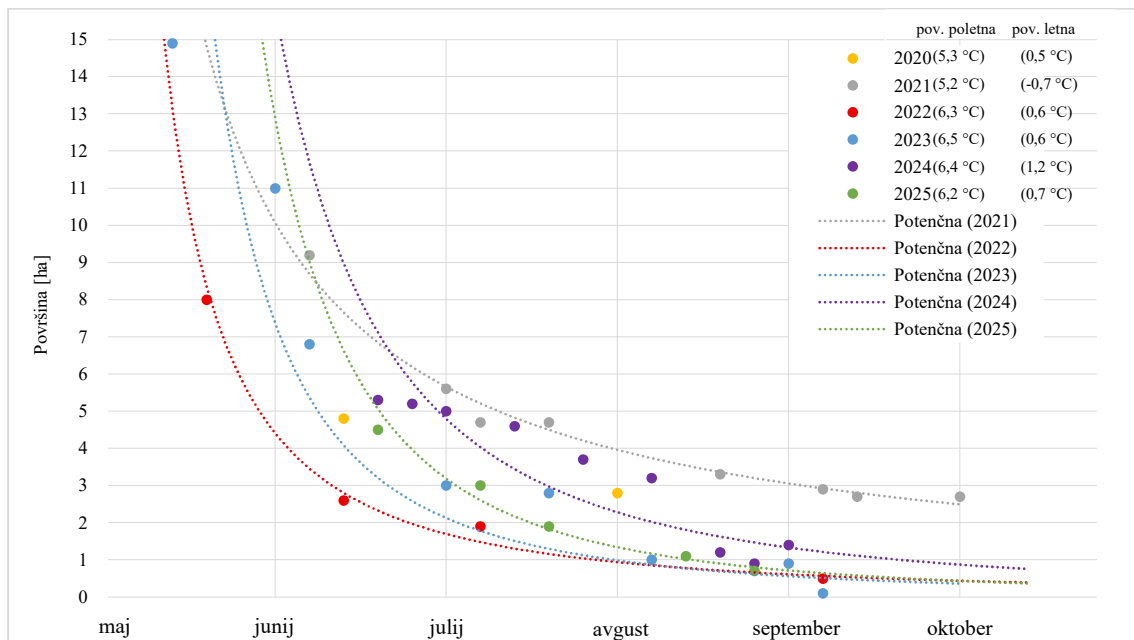
Spletne kamere in snežišča v Skednju ter nad dolino Suhe Pišnice

Snežišče v Skednju in snežišča nad dolino Suhe Pišnice smo spremljali s pomočjo spletnih kamer, ki omogočajo neprekinjeno opazovanje njihovega spreminjanja med talilno dobo. Medtem, ko je snežišče v Skednju na posnetkih iz Jasne v celoti vidno, je bilo pri snežiščih, opazovanih z Erjavčeve koče, vidno polje delno omejeno zaradi kamnite glave Turn, ki zakriva največjega med njimi – snežišče št. 2. Ob koncu avgusta 2025 smo izvedli še terenski ogled, pri katerem smo obe lokaciji pod Prisojnikom dodatno fotografirali z digitalnim fotoaparatom. Snežišče v Skednju smo fotografirali z istega stojišča, kjer je nameščena spletna kamera, medtem ko smo snežišča nad dolino Suhe Pišnice zaradi zaprtja ceste na Vršič posneli z bližnjega stojišča pri Tonkini koči, od koder sta snežišči št. 1 in 3 skriti, medtem ko je iz tega kota viden le del snežišča št. 2. Kljub temu pa smo glede na zadnji posnetek spletne kamere predvidevali, da sta se preostali snežišči do takrat že popolnoma stalili.

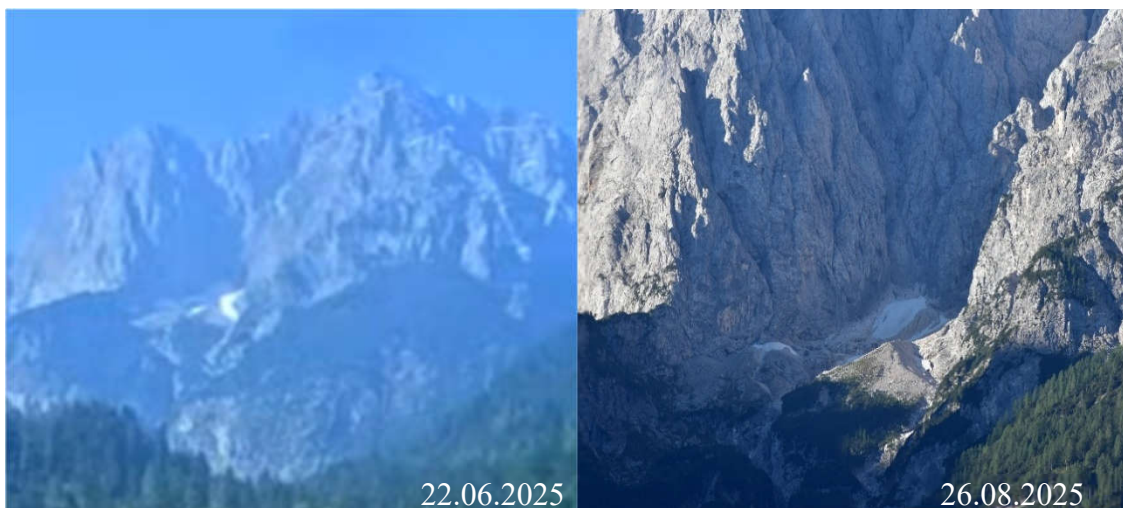
Primerjava poletij 2024 in 2025 (preglednica 2) kaže, da je taljenje v letu 2025 potekalo hitreje. Junija 2025 (9,4 °C) so bile temperature višje kot v enakem obdobju leta 2024 (6,7 °C), kar je verjetno povzročilo intenzivnejše taljenje snega že na začetku poletja. Čeprav je bila povprečna temperatura celotne talilne sezone leta 2025 (6,2 °C) nekoliko nižja kot leto prej (6,4 °C), se je površina snežišč zmanjševala hitreje. Vsa snežišča so kazala podoben trend upadanja površin skozi poletje. Na grafikonu 2 je za boljšo preglednost predstavljeno le večje snežišče Skedenj v obdobju med letoma 2020 in 2025. Vidimo tudi, da je zmanjševanje njegove površine v poletjih 2023 in 2025 skoraj enako. Poletna temperatura je bila leta 2023 nekoliko višja kot leta 2025, medtem ko je bila povprečna letna temperatura v letu 2023 nižja.

Preglednica 2: Spreminjanje površin snežišč pod Prisojnikom v poletjih 2024 in 2025, določeno iz posnetkov spletnih kamer ter terenskih fotografij.

<i>Datum</i>	<i>Snežišče v Skednju [ha]</i>	<i>Snežišče št. 1 [ha]</i>	<i>Snežišče št. 2 [ha]</i>	<i>Snežišče št. 3 [ha]</i>
22.06.2024	5,31	0,31	1,74	0,30
30.06.2024	5,16	0,28	1,19	0,28
02.07.2024	4,98	0,27	1,19	0,26
08.07.2024	4,61	0,16	0,93	0,24
29.07.2024	3,74	0,14	0,13	0,10
04.08.2024	3,16	0,09	0,09	0,07
16.08.2024	ni vidno	0,08	0,06	0,02
23.08.2024	1,23	0,03	0,04	0
27.08.2024	0,92	0,03	0,04	0
01.09.2024	1,40	0	0,03	0
22.06.2025	4,54	0,25	1,21	0,18
04.07.2025	2,95	0,16	0,53	0,15
18.07.2025	1,89	0,12	0,24	0,09
14.08.2025	1,11	0,09	0,08	0,03
26.08.2025	0,67	0	0,01	0



Grafikon 2: Spremembe površin snežišča v Skednju in povezanost s povprečno poletno in letno temperaturo na Kredarici.

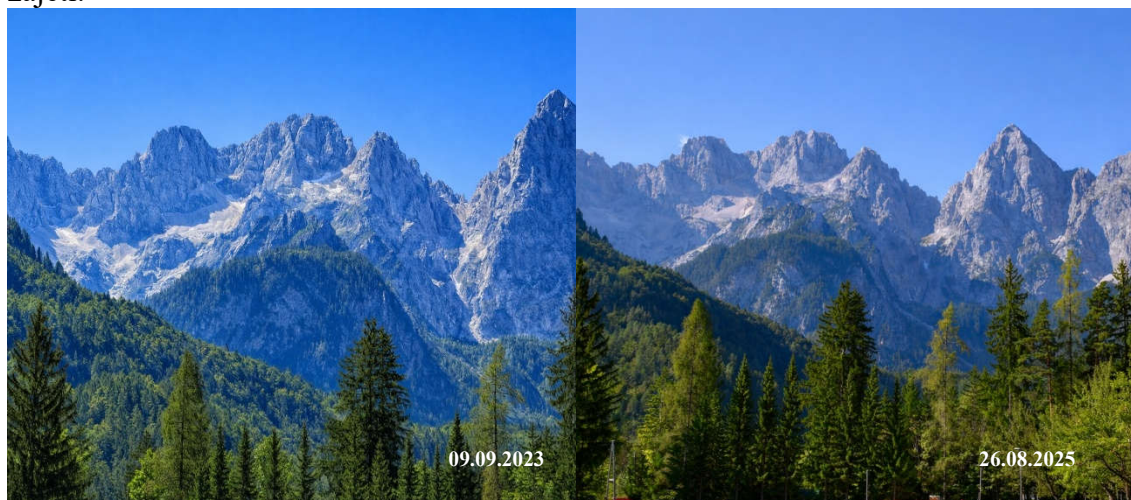


Slika 4: Snežišče v Skednju levo na posnetku s spletne kamere ob jezeru Jasna in desno fotografija narejena s profesionalnim fotoaparatom (foto: levo spletna kamera Jasna, desno Adna Vukalić).

Snežišča v Martuljški skupini iz fotografij prostovoljcev

V primerjavi s snežišči pod Prisojnikom, kjer spletne kamere omogočajo sprotno spremljanje taljenja snega skozi celotno sezono, smo morali pri snežiščih v Martuljški skupini uporabiti drugačen pristop. Ker na tem območju ni kamer, smo spremembe njihovih površin analizirali na podlagi fotografij, zbranih prek javnega poziva na Facebook profilu Geodetskega inštituta Slovenije. Na temelju teh fotografij smo nadgradili analizo, ki je bila za snežišča v Martuljški skupini izvedena prvič v okviru diplomske naloge Matko (2024).

Največje težave pri snežiščih v Martuljški skupini predstavljata izbira primerne stojišča in zakritost posameznih snežišč med vrhovi. Večji del snežišč pod Grlom in Velikim Oltarjem ter pod Srcem je s stojišča pri kampu Špik skrit, medtem ko sta snežišče med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco ter snežišče v Kotlih med Poncama bolj vidni. Snežišče v Špikovem grabnu pa je zaradi dolge in ozke reliefne oblike, v kateri leži težje natančno zajeti.



Slika 5: Snežišča v Martuljški skupini, levo fotografija z začetka septembra 2023, desno fotografija s konca avgusta 2025 (foto: levo Mihaela Triglav Čekada, desno Adna Vukalić).

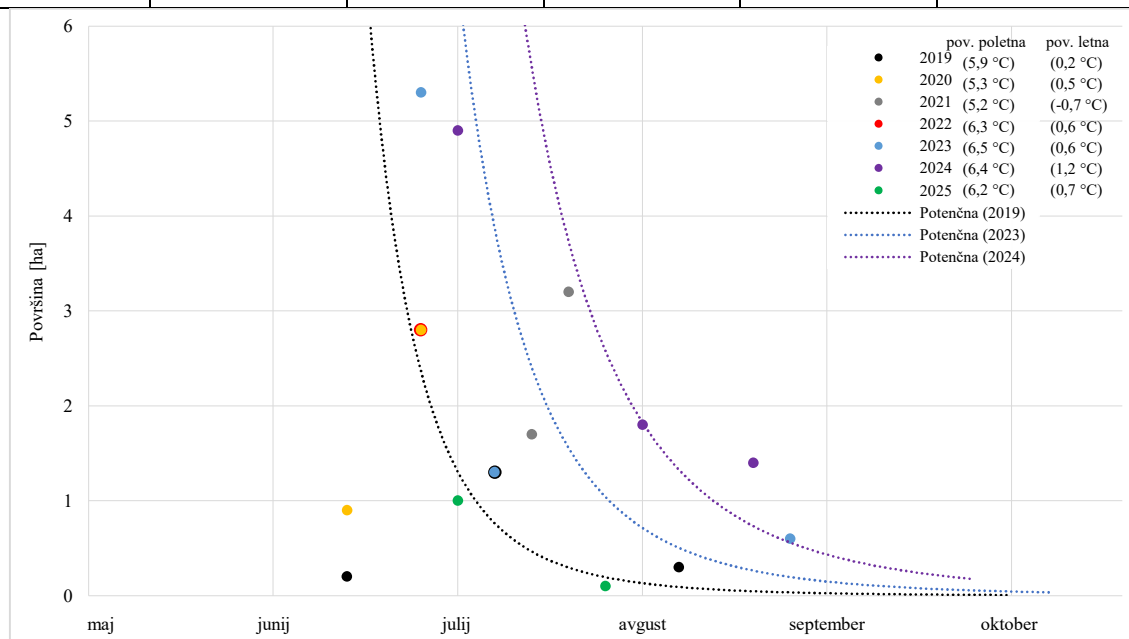
V spodnji preglednici so predstavljene površine obravnavanih snežišč v obdobju od leta 2019 do 2025, medtem ko je v grafikonu 3 zaradi boljše preglednosti predstavljeno zgolj snežišče med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco. Pri interpretaciji rezultatov je treba upoštevati, da so se stojišča na katerih so bile posnete uporabljene fotografije razlikovala, zato neposredna primerjava istih snežišč ni vedno mogoča. Vidnost snežišč se med stojišči razlikuje, na nekaterih fotografijah so snežišča v celoti vidna, na drugih delno ali popolnoma zakrita, kar lahko navidezno prikaže povečanje površine ob koncu talilne sezone, kar smo zaznali tudi pri naši analizi. Kljub tem omejitvam je bilo mogoče primerjati površine, izmerjene konec avgusta za zadnja tri leta. Ugotovili smo, da so površine konec avgusta vsako leto nekoliko manjše. Med obravnavanimi snežišči se je kot največje pokazalo snežišče pod Grlom in Velikim Oltarjem, čeprav so pri nekaterih datumih zabeležene manjše površine, kar je posledica omejene vidljivosti zaradi različnih stojišč. To snežišče vztraja vse do konca avgusta. V nasprotju z njim je najmanjše snežišče pod Srcem, ki se že pred koncem avgusta v celoti stali. Poleg tega pri tem snežišču pogosto nastopajo težave zaradi zgruščenosti in slabše vidljivosti, saj je na večini obravnavanih fotografij slabo vidno ali celo nevidno.

Če pogledamo grafikon 3, hitro ugotovimo, da na slednjem v posameznih poletjih lahko opazimo tudi pozitivne skoke v površini snežišča med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco, kar pa ni realno, saj je posledica tega, da je bila površina vsakič izmerjena z drugega stojišča in fotografije, na kateri se je različno dobro dalo interpretirati rob snežišča, v odvisnosti od senc in zgruščenosti. Če tudi tukaj pogledamo obnašanje snežišča v poletjih 2023 in 2025, ugotovimo, da se je površina leta 2023 zmanjševala počasneje, kljub višji povprečni poletni temperaturi v primerjavi z letom 2025. Enako kot pri snežišču v Skednju vidimo, da na počasno zmanjševanje bolj vpliva povprečna letna temperatura, ki je bila v letu 2025 nekoliko višja od 2023.

Preglednica 3: Površina snežišč v Martuljski skupini med letoma 2019 in 2025 iz fotografij prostovoljcev.

<i>Datum</i>	<i>Pod Grlom in V. Oltarjem [ha]</i>	<i>Med V. Oltarjem in V. Ponco [ha]</i>	<i>Kotli med Poncama [ha]</i>	<i>Špikov graben [ha]</i>	<i>Pod Srcem [ha]</i>
15.06.2019	9,05	0,19	0,36	ni vidno	ni vidno
08.07.2019	2,85	1,29	1,54	0,90	ni vidno
09.08.2019	0,90	0,28	0,48	0,21	ni vidno
14.06.2020	3,02	0,91	1,29	0,58	ni vidno
23.06.2020	7,73	2,77	2,71	ni vidno	ni vidno
16.07.2021	1,38	1,72	2,57	1,66	1,78
20.07.2021	5,89	3,18	2,03	0,74	ni vidno
junij 2022	4,29	2,54	1,85	1,62	1,82
26.06.2022	ni vidno	2,78	1,58	ni vidno	ni vidno
25.06.2023	ni vidno	5,26	3,05	1,46	0,54
08.07.2023	1,14	1,32	0,59	0,34	0,21
23.08.2023	1,14	0,59	0,56	0,23	0
29.06.2024	4,97	4,85	2,04	1,67	0,68
01.08.2024	1,38	1,84	0,86	0,25	0,31

22.08.2024	0,83	1,38	0,59	0,12	0
30.07.2025	ni vidno	1,01	0,51	0,17	0,23
26.08.2025	0,06	0,09	0,12	0,10	0,07



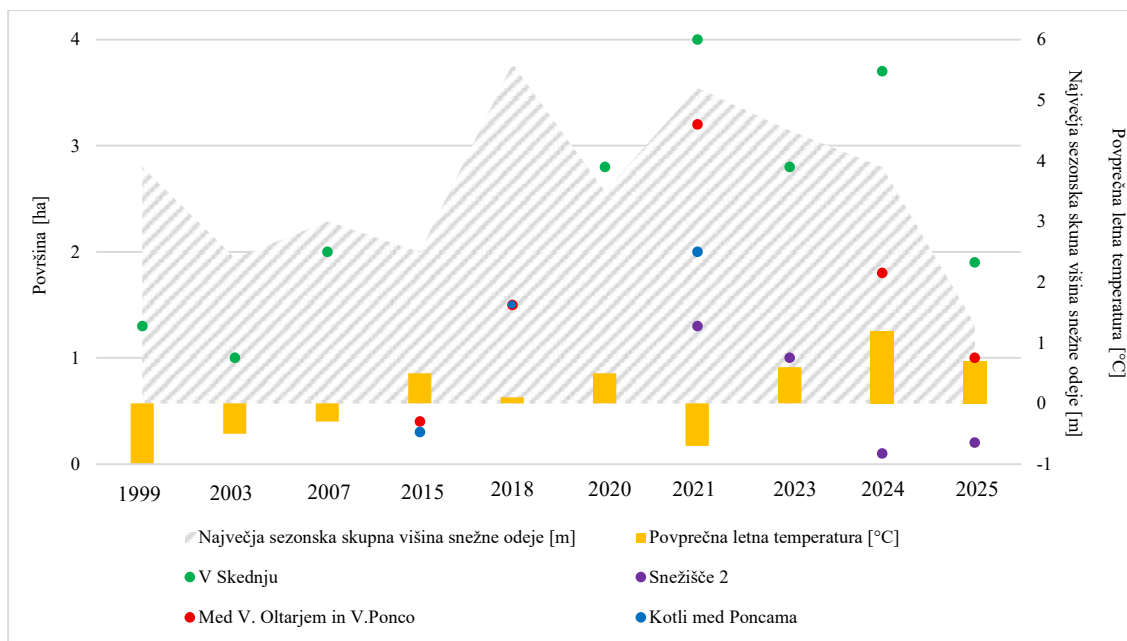
Grafikon 3: Spremembe površin snežišča med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco ter povezanost s povprečno poletno temperaturo na Kredarici.

Primerjava in sklep

V okviru te raziskave smo prvič celostno obravnavali širše območje, v katerem smo analizirali več snežišč na različnih nadmorskih višinah. Poleg povprečne letne temperature smo rezultate prvič primerjali tudi s povprečno poletno temperaturo ter z višino snežne odeje.

Na grafikonu 4 so prikazane površine štirih snežišč, določene na podlagi analize fotografij, posnetih v drugi polovici julija v obdobju med letoma 1999 in 2025. Površine so primerjane s povprečno letno temperaturo in največjo sezonsko skupno višino snežne odeje na Kredarici. Pri snežišču v Skednju se površine v drugi polovici julija med posameznimi leti gibljejo med 1 in 4 ha, medtem ko se površine Snežišča št. 2 gibljejo med 0,1 in 1,3 ha. Za natančnejše sklepe bi bila namreč potrebna višinska korekcija temperatur, saj je razlika v nadmorski višini med obema snežiščema in meteorološko postajo skoraj 800 m.

Pri višje ležečih snežiščih v Martuljški skupini – med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco ter Kotli med Poncama, je primerjava z meritvami na Kredarici bolj smiselna, saj je razlika v nadmorski višini precej manjša. Površine v drugi polovici julija, glede na različna leta, pri snežišču med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco se gibljejo med približno 0,5 in 3 ha, pri snežišču Kotli med Poncama pa med 0,5 in 2 ha. Zaključkov na temelju spodnjega grafikona še ne moremo podati, saj imamo predvsem za snežišča v Martuljški skupini prekratko časovno vrsto, ki pa jo bomo z nadaljevanjem opazovanj v naslednjih letih še razširili.



Grafikon 4: Površine izbranih snežišč v drugi polovici julija (1999–2025) v primerjavi s povprečno letno temperaturo in največjo sezonsko skupno višino snežne odeje na Kredarici.

Spremljanje snežišč v Sloveniji poteka že vrsto let, pri čemer kakovost izmerjenih površin določa vrsta uporabljenih podatkovnih virov in način njihove obdelave. Arhivske fotografije, stare karte in razglednice sicer omogočijo vpogled daleč v preteklost, na podlagi česar smo v prejšnjih raziskavah že ocenili površino snežišča v Skednju že za leto 1906. Nadgradnja zgodovinskih virov z novjšimi fotografijami prostovoljcev in spletnih kamer je bistveno zgostila časovno vrsto podatkov, ki jih lahko uporabimo za primerjavo zmanjševanja snežišč, vidnih iz Gozd Martuljka ali Kranjske Gore. Kot najbolj uporabna se je pokazala kombinacija fotografij, posnetih iz roke, in fotografij spletnih kamer, še posebej, če sta stojišči obeh virov enaki ali vsaj približno enaki. Ugotovitve potrjujejo rezultate prejšnjih analiz, tri manjša snežišča pod Prisojnikom se ob povprečno toplem poletju popolnoma stalijo že do konca avgusta, medtem ko snežišče v Skednju ob povprečnih temperaturah zdrži vse do konca poletja. Obravnavana snežišča v Martuljski skupini kažejo podobne vzorce sprememb. Največje snežišče pod Grlom in Velikim Oltarjem ter snežišči med Velikim Oltarjem in Veliko Ponco in Kotli med Poncama proti koncu avgusta praviloma ne presegajo 1,5 ha, pogosto pa so manjša od 0,5 ha. Najmanjše snežišče, pod Srcem, se večinoma v celoti stali že v avgustu. Na podlagi pridobljenih površin sklepamo, da se večina obravnavanih snežišč proti koncu talilne sezone najverjetneje povsem stali.

Pridobljene površine snežišč iz ortofotov in fotografij smo primerjali s povprečnimi letnimi in poletnimi temperaturami ter z največjo sezonsko skupno višino snežne odeje na Kredarici. Rezultati kažejo določeno povezanost med obravnavanimi dejavniki in obsegom snežišč, pri čemer ima posebej pomembno vlogo povprečna letna temperatura, ki bi ob upoštevanju daljšega časovnega obdobja verjetno kazala še izrazitejšo povezanost z obsegom snežišč. Za neposredno primerjavo vplivov posameznih dejavnikov bi bila potrebna za posamezna snežišča višinska korekcija oziroma prilagoditev vrednosti. Poleg tega bi bilo v prihodnjih raziskavah smiselno podrobneje preučiti vpliv drugih dejavnikov na spremembe površine snežišč, predvsem količine padavin in ne samo najvišje sezone skupne višine snežne odeje za daljše obdobje.

Zahvala

Najprej bi se najlepše zahvalili vsem avtorjem fotografij, ki so se odzvali na na poziv zbiranja fotografij snežišč: Tinkara Butara, Anton Cedilnik, Benjamin Črv, Katja Jus, Katarina Kralj, Ana Matko, Barbara Matko, Brane Mihelič, Ajda Pavlovčič, Dušan Polajnar, Darja Primc, Dalibor Radovan, Jona Rakuš, Kristina Robič, Ana Šušteršič, Marko Tarman, Nina Tomec in Marko Zore. Hkrati bi se za arhivske fotografije zahvalili še Slovenskemu planinskemu muzeju.

Zahvalili bi se še Jasna Chalet Resortu na jezeru Jasna ter Erjavčevi koči na Vršiču, da sta nam dovolila uporabo njihovih spletnih kamer. Potem bi se posebej zahvalili še Dušanu Polajnarju za podrobno zgodovinsko preverbo poimenovanj snežišč v Martuljskih gorah. Delo je delno nastalo v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J7–50095, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

Literatura

- Arhiv ARSO (2025). Arhiv – opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji, <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (dostopano 04. 11. 2025)
- Gams, I. (1959). Še o nastanku in ohranitvi snežišč in ledenikov v gorah. *Geografski vestnik*, 31/1: 135–140.
- Gams, I. (1961). Snežišča v Julijskih Alpah. *Geografski zbornik*, 6, 243–269.
- Erjavčeva koča na Vršiču (2025).
- Spletna kamera: https://www.hribi.net/spletna_kamera/erjavceva_koca_na_vrsicu/4354
- Jasna Chalet Resort (2025).
- Spletna kamera: https://www.hribi.net/spletna_kamera/jezero_jasna/3352
- Matko, A. (2024). Preučevanje snežišč v Martuljskih gorah z interaktivno metodo orientacije posameznih fotografij. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=167075&lang=sv>
- Polajnar, D. (2023). Osebna komunikacija z Triglav Čekada.
- Šifrer, M. (1961). Snežišča v Kamniških Alpah. *Geografski zbornik*, 6, 271–286.
- Triglav Čekada, M., Adjova, L. (2023). Površina snežišča v Skednju pod Prisojnikom iz fotografij. V: Kuhar, M. (ur.), et al. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2022: zbornik del: 28. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 26. januar 2023. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, str. 95–103.
- Triglav Čekada, M., Barbo, P., Pavšek, M., Zorn, M. (2020). Changes in the Skuta Glacier (southeastern Alps) assessed using non-metric images. *Acta geographica Slovenica*. 60–2, 175–190. <https://ojs.zrc-sazu.si/ags/article/view/7674>
- Triglav Čekada, M., Gabrovec, M. (2013). Documentation of Triglav glacier, Slovenia, using non-metric panoramic images. *Annals of Glaciology* 54(62). 80–86.
- DOI: <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A095>
- Triglav Čekada, M., Gnidovec, T. (2020). Zmanjšanje ledenikov Vzhodnih Alp od leta 1807 do danes. V: Kuhar, M. (ur.), et al. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2019: zbornik del: 25. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 30. januar 2020. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, str. 55–63.
- Triglav Čekada, M., Lamovec, P. (2024). Snežišča okoli Prisojnika iz spletnih kamer. V: Kuhar, M. (ur.), et al. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2023: zbornik del: 29. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 1. februar 2024. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, str. 103–112.
- Gabrovec, M., Hrvatin, M., Komac, B., Ortar, J., Pavšek, M., Topole, M., Triglav Čekada, M., Zorn, M. (2014). Triglavski ledenik. *Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU*.

DOI: <https://doi.org/10.3986/9789610503644>

Triglav Čekada, M., Zorn, M. (2020). Thickness and geodetic mass balance changes for the Triglav Glacier (southeastern Alps) from 1952 to 2016. *Acta geographica Slovenica*, 60–2, 155–173.
DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.7673>

Vrtačnik, L. (2023). Snežišča Slovenije na prosto dostopnih fotogrametričnih, lidarskih in satelitskih posnetkih. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=148103&lang=slv>

Uporaba geofizikalnih metod pri odkrivanju jamskih rogov in sedimentnih zapolnitev (jamski sistem Loza, Z Slovenija)

Application of geophysical methods in the detection of cave channels and their sedimentary fills (Loza Cave System, W Slovenia)

Astrid Švara¹, Andrej Gosar²

Povzetek

Raziskava obravnava uporabnost geofizikalnih metod georadarja (GPR) in električne upornostne tomografije (ERT) v zahtevnih pogojih kontaktnega krasa Slavinskega ravnika, kjer zakraselost, razgiban relief in alogeni sedimenti omejujejo kakovost zajema podatkov. Cilj je bil opredeliti razvoj, geometrijo in sedimentno zapolnitev večnivojskega jamskega sistema Loza, zlasti na nedostopnih mestih. GPR je zaradi šibke penetracije dal omejene rezultate; uporabni so bili predvsem podatki s profila, vzdolž katerega smo lahko določili medsebojni položaj Šimčevega spodmola in Brezstrove jame v Lozi. Z metodo ERT smo dobili boljše rezultate, saj je kontrast v električni upornosti med apnenci in sedimenti velik. Vzdolž profila z najboljšimi meritvami smo lahko določili položaj vhoda in rogov, potek delno zasutih rogov in podali debelino sedimentov v Brezstropi jami (tj. 20 m). S pomočjo te metode smo zaznali tudi še nepoznane stranske rove. Kljub omejitvam meritev zaradi suše, slabega stika elektrod s tlemi in šuma, se je kombinirana uporaba GPR in ERT izkazala kot pomembno orodje pri raziskavah kontaktnega krasa.

Ključne besede: georadar, električna upornostna tomografija, alogeni sedimenti, kontaktni kras, Slavinski ravniki.

Abstract

The research addresses the applicability of geophysical methods of ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) in the harsh conditions of the Slavina Plain contact karst, where karstification, hilly relief and allogenic sediments limit the quality of data. The aim was to define the development, geometry and sedimentary filling of the multi-level Loza Cave System, especially in inaccessible places. Due to weak penetration, GPR gave limited results; mainly, data from the profile along which we were able to determine the mutual position of Šimčev spodmol and the Unroofed Cave Loza were useful. The ERT method gave better results, as the contrast in electrical resistivity between limestones and sediments is large. Along the profile with the best measurements, we were able to determine the position of the cave entrance and channels, the course of partially filled channels and provide the thickness of sediments in the Unroofed Cave Loza (i.e. 20 m). With this method, we also detected previously unknown side passages. Despite measurement limitations due to drought, poor electrode contact with the ground, and noise, the combined use of GPR and ERT has proven to be an important tool in contact karst research.

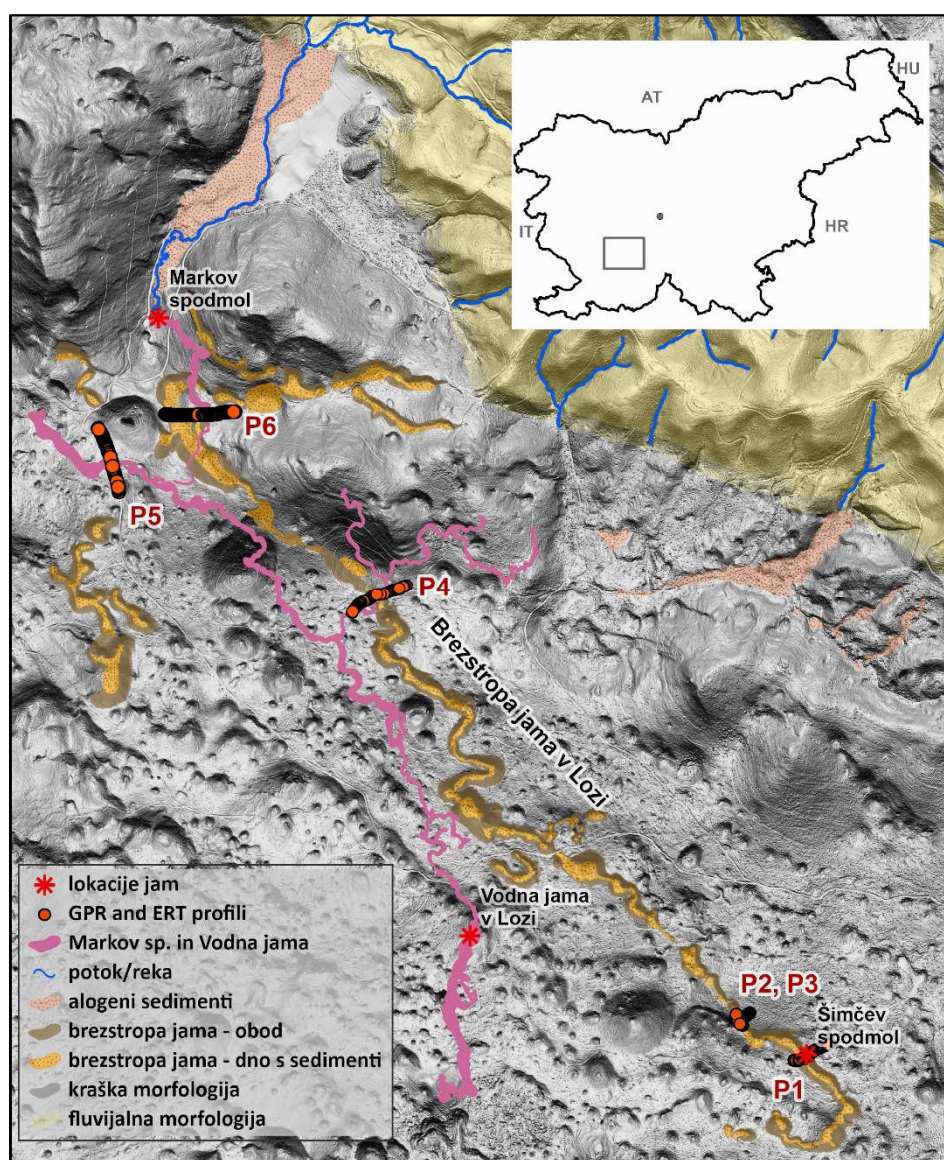
Keywords: ground penetrating radar, electrical resistivity tomography, allogenic sediments, contact karst, Slavina Plain.

¹ Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, Postojna

² Agencija RS za okolje, Vojkova c. 1b, Ljubljana in UL NTF, Aškerčeva c. 12, Ljubljana

Uvod

Uporaba geofizikalnih metod na območju kontaktnega krasa je zahtevna. Večje količine alogenih sedimentov in gosta vegetacijska odeja lahko močno otežijo izvedbo meritev z georadarjem (v nadaljevanju GPR) in s tem zaznavanje geoloških struktur pod površjem. Pri uporabi električne upornostne tomografije (v nadaljevanju ERT) pa zaznavanje litoloških sprememb v kraškem podzemlju olajša ravno prisotnost mokrih alogenih sedimentov. V tem primeru so problematična predvsem sušna obdobja. Strmi in skaloviti kraški tereni lahko preprečijo dober prodor signala pri obeh metodah, kar je za kontaktni kras in njegove značilne geomorfološke oblike (npr. vrtače, brezstrobe jame) pogosta težava. Kljub izzivom, lahko metodi izvedemo uspešno z dobrim poznavanjem površja in podzemlja na izbranem območju (npr. Stepišnik & Mihevc 2008; Breg Valjavec 2014; Čeru in sod. 2018; Čeru in Gosar 2019; Kalenda in sod. 2017). To nam je uspelo tudi na primeru jamskega sistema Loza, na Slavinskem ravniku, JZ od Postojne (Slika 1).



Slika 1 – Raziskovano območje v Slavinskem ravniku (siva), južno od Postojnske kotline (bledo rumena), v zahodni Sloveniji. Prikazane so lege Brezstrobe jame ter jam Markov spodmol, Vodne jame in Šimčevega spodmola (rdeče zvezde). sistema Markov spodmol in

Vodna jama. Prikazani so profili (P1–P6) GPR in ERT meritev (Vir: DEM – LiDAR, ARSO. Kartografija: A. Švara, Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU).

Metode raziskav

Pri metodi GPR v tla oddajamo kratke impulze elektromagnetnih valov in zaznavamo njihove odboje med materiali z različnimi elektromagnetnimi lastnostmi (Blindow in sod. 2007). Kontrasti v njihovih dielektričnih lastnostih se odražajo v različni jakosti odbojev (Neil 2004), zato je uporaba tudi pri zaznavanju podpovršinskih geoloških in kraških struktur. Pri načrtovanju raziskav sta ključna dejavnika globina prodiranja in ločljivost, ki je odvisna predvsem od frekvence signala. Višje frekvence (>250 MHz) omogočajo boljše ločljivost, vendar bistveno manjši globinski doseg, ki je odvisen še od električnih, magnetnih in dielektričnih lastnosti tal (Reynolds 2011; Čeru et al. 2018), nanj pa vplivajo tudi vlažnost površinskega sloja, koercitivnost in poroznost materiala, nasičenost tal z vodo ter vegetacija (Čeru in sod. 2018; Čeru in Gosar 2019).

V zadnjem desetletju se je GPR izkazal za zelo uporabnega v raziskavah na dinarskem krasu (npr. Čeru in sod. 2018; Čeru in Gosar 2019). Slabljenje signala in slab globinski doseg sta pogosta zaradi izrazite heterogenosti kraškega sistema, vključno z jamskimi prazninami, razpokanostjo ter stikom med karbonatno podlago in alogeniimi sedimenti. V tej raziskavi je bil uporabljen MALÅ ProEX GPR, opremljen s ščiteno 250 MHz anteno ter neščiteno 50 MHz RTA anteno z 9,25 m dolgo fleksibilno cevjo.

Rezultat meritev z električno upornostno tomografijo (ERT) je porazdelitev električne upornosti pod površjem. Elektrode v enakih razmakih namestimo v tla, posamezna meritev pa poteka preko dveh tokovnih in dveh potencialnih elektrod (Zhou in sod. 2000). Kombinacije različno oddaljenih elektrod omogočajo meritve v različnih globinskih dosegih, s pomočjo katerih izračunamo navpično porazdelitev električne upornosti vzdolž profila. Metoda je bila v Sloveniji uporabljena za proučevanje sedimentov (Rajh in sod. 2014), površinske morfologije (Komac 2006) in kraških geomorfoloških oblik (Stepišnik in Mihevc 2008; Breg Valjavec 2014). Interpretacija rezultatov ERT temelji na kontrastih v upornosti, ki lahko nastanejo zaradi razlik v litologiji, poroznosti, vlažnosti in geoloških struktur.

Karbonatne kamnine imajo običajno upornosti nad 1000 Ωm in lahko presegajo 30.000 Ωm , medtem ko so vrednosti v tleh in preperini med 200 in 1000 Ωm , v alogeniimi sedimentih pa pogosto pod 150 Ωm , še nižje v primeru visoke vlažnosti (Stepišnik in Mihevc 2008; Breg Valjavec 2014). Za večjo ločljivost se uporabljajo konfiguracije 28 ali 56 elektrod (dipol-dipol), prilagojene terenskemu stanju. V tej študiji je bila uporabljena naprava AGI Super Sting R1/IP/SP, podatki pa so bili obdelani z Earth Imager 2D.

Namen študije je bil razumeti in dokazati obstoj jamskega sistema, razvitega v treh vzporednih nivojih od površja do 100 m globine. Poudarek je bil na zaznavanju sedimentov in jamskih rogov nad Brezstropo jamo v Lozi (v nadaljevanju: Brezstropo jamo), jamo Šimčev spodmol, Markovim spodmolom in Vodno jamo v Lozi (v nadaljevanju: Vodno jamo), ki so vsi deli jamskega sistema Loza. Uporabljena kombinacija metod GPR in ERT nam je med drugim pomagala predvideti položaj stranskih rogov sistema, ki so ponekod popolnoma zapolnjeni z alogeniimi sedimenti, zato jamarjem nedostopni in neznani. Študija predstavlja manjši del obširnih raziskav kontaktnega krasi Postojnske kotline (Švara 2023), kjer nam poznavanje jamskih sistemov in njihovih zapolnitev pomaga razumeti njen razvoj in kronologijo hidroloških sprememb v zadnjih 6 Ma (Švara 2023).

Rezultati ERT metode

Z uporabo ERT metode smo izvedli 6 meritev (Preglednica 1, Slike 2-7):

- UL1 – prečno nad Brezstropo jamo in nad jamo Šimčev spodmol;
- UL2 – vzdolž Brezstrobe jame;
- UL3 – pravokotno na UL2;
- UL4 – pravokotno na Brezstropo jamo in Vodno jamo;
- UL5 – vzdolž makedamske poti v severnem delu Slavinskega ravnika, nad Vodno jamo;
- UL6 – vzdolž makedamske poti v severnem delu Slavinskega ravnika, nad Markovim spodmolom.

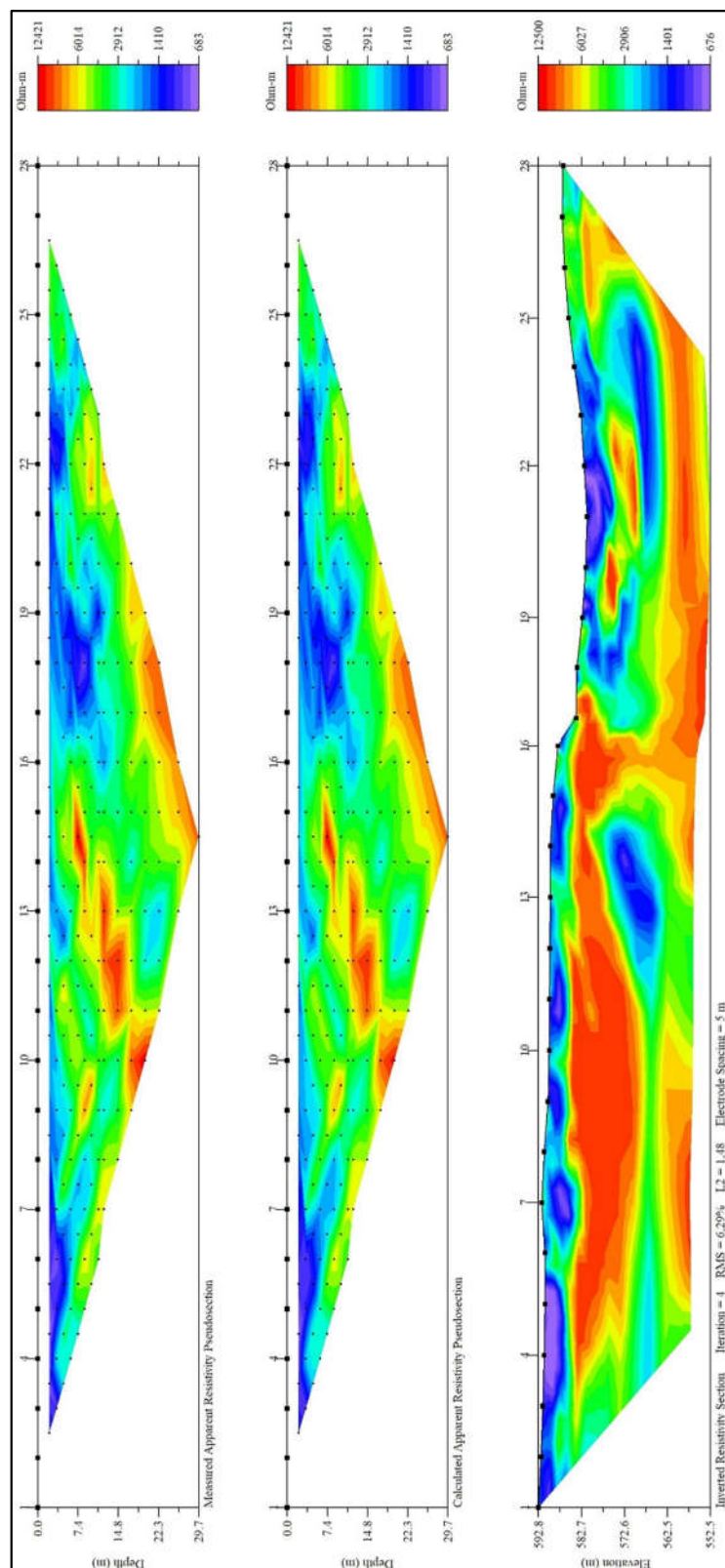
Pri tem smo uporabili dipol-dipol elektrodno razvrstitev. Meritve so prikazane na zgornjih diagramih, sintetične (izračunane) meritve na sredinskem diagramu, izračunane meritve (rezultati) pa na spodnjih diagramih (Slike 2-7). Pod njimi so razvidna posamezna števila iteracij ter napaka RMS in evklidska norma (L2) vrednosti za inverzijo. Barvna skala ob desni strani modelov predstavlja električne upornosti v Ωm , od najnižjih (vijoličnih) do najvišjih (rdečih) vrednosti:

- vijolična do modra – vlažna do suha prst/alogeni sedimenti, zakrasele kamnine, razpoke zapolnjene s sedimenti, prostori zapolnjeni s sedimenti;
- zelena do rumena – močno do slabo zakrasele/razpokane kamnine, jame zapolnjene s kapniki;
- oranžna do rdeča – močno do slabo zakrasela kamnina.

Preglednica 1. Podatki o ERT meritvah in lastnosti UL profilov (Slike 2-7)
nad jamskim sistemom Loza.

profil	položaj meritev	elektr. [št.]	razdalja [m]	dolž. [m]	elektr. razvrstitev
UL1	JV del Brezstrobe jame, nad Šimčevim spodmolom in preko Brezstrobe jame (V-Z)	28	5	140	dip-dip
UL2	JV del Brezstrobe jame, vzdolžno na rov (JV-SZ)	28	3	84	dip-dip
UL3	JV del Brezstrobe jame, preko rova in pravokotno na UL2 (Z-V)	28	2	56	dip-dip
UL4	osrednji del Brezstrobe jame, preko rova in nad Vodno jamo (V-Z)	56	4	224	dip-dip
UL5	S del Slavinskega ravnika, vzdolž makadamske poti, nad Vodno jamo (J-S)	56	4	224	dip-dip
UL6	S del Slavinskega ravnika, vzdolž makadamske poti, nad Markovim spodmolom (Z-V)	55	4	220	dip-dip

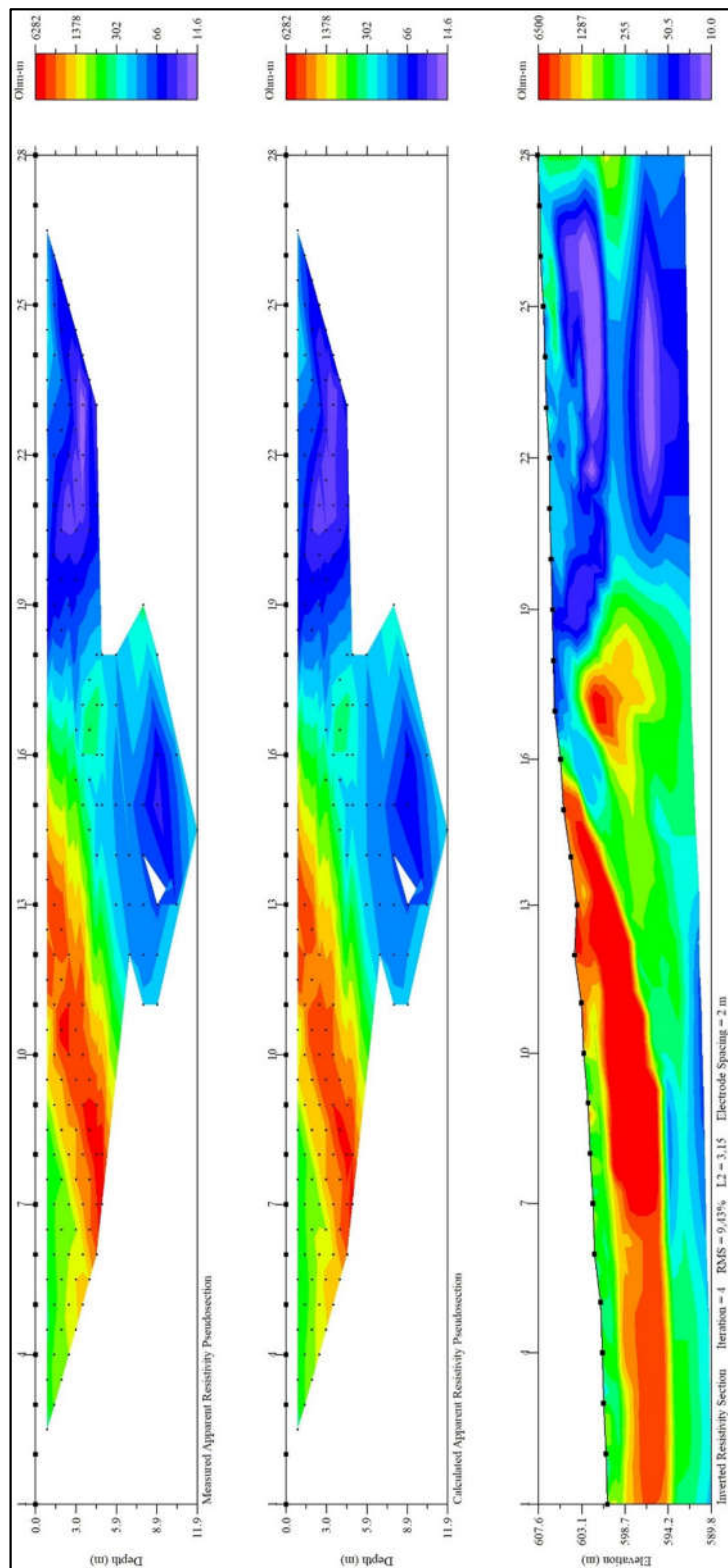
Profil UL1 (Preglednica 1, Slika 2) je na JV delu Slavinskega ravnika. Najgloblji doseg je bil 35 m. Končni model prikazuje upornosti 676–12.500 Ωm (Slika 2). Največji del območja predstavlja srednje velike vrednosti električne upornosti. Jamo smo zaznali pri nadmorski višini 574 m, kjer so vrednosti upornosti 8.000–12.500 Ωm (rdeče vrednosti). Nadaljevanje jame je razvidno na nadmorski višini 560 m in poteka proti vzhodu, med elektrodama 16 in 25. Vrednosti upornosti alogenih sedimentov so na profilu UL1 > 676 Ωm . Na nadmorski višini 578 m je pod elektrodo 14 razviden s sedimenti zapolnjen prostor.



Slika 2 – Meritve in rezultati ERT profila UL1.

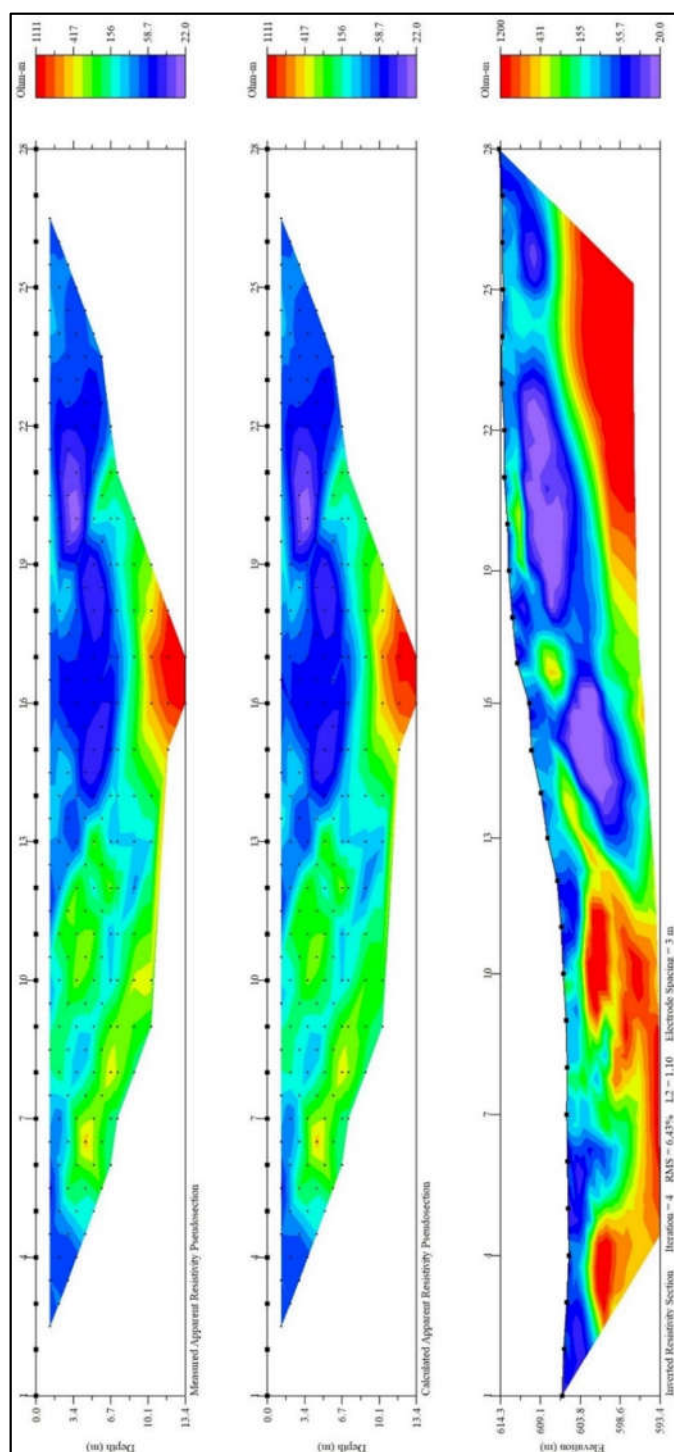
Profil UL2 (Preglednica 1, Slika 3) je 230 m severno od profila UL1. Največji globinski doseg je bil 18 m. Za zanesljivo interpretacijo je bilo kvalitetnih meritev žal premalo. Na končnem modelu je razvidna velika razlika med visokimi (tj. 1.200–6.500 Ωm ; med

elektrodami 1 in 16) in nizkimi upornostmi (tj. 100–200 Ωm ; med elektrodami 16 in 27), kar najverjetneje nakazuje na anomalijo v meritvah, ki se je nakazovala že med samim merjenjem. Slednje je lahko posledica slabih pogojev ob kontaktu elektrod s tlemi (tj. slab stik elektrod s tlemi zaradi zakraselosti površja in odsotnost električne prevodnosti medija, npr. prsti/sedimenta) ali prisotnosti neznanih geoloških/jamskih struktur.



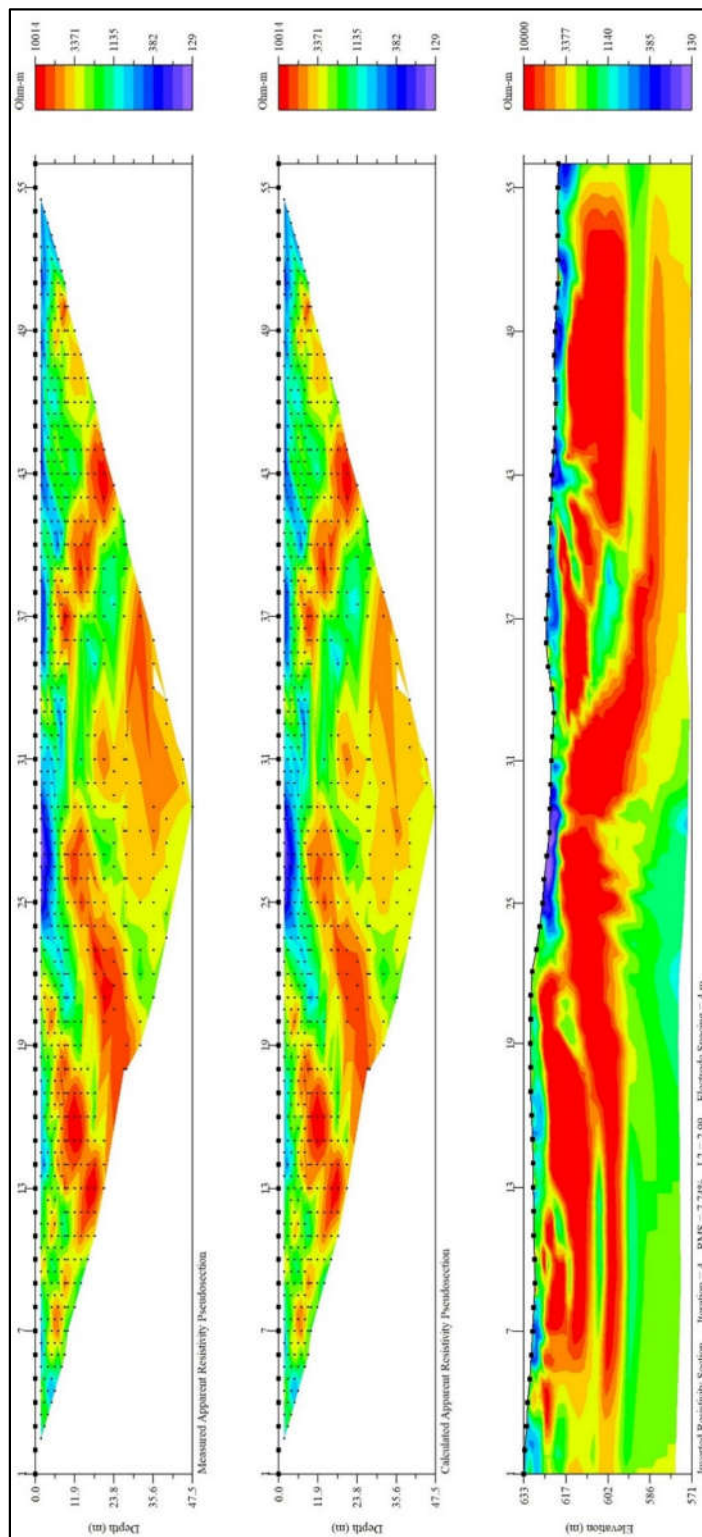
Slika 3 – Meritve in rezultati ERT profila UL2.

Profil UL3 (Preglednica 1, Slika 4) je pravokoten na profil UL2. Največji globinski doseg je bil 18 m. Končni model prikazuje upornosti med 20 in 1.200 Ωm . Profil je prečkal dno Brezstrove jame (med elektrodama 4 in 12), jamsko steno (med elektrodama 12 in 21) in se povzpел na kraško planoto (med elektrodama 21 in 28). Ocenjena debelina alogenih sedimentov, ki zapolnjujejo dno Brezstrove jame, je tu 6 m, medtem ko je količina sedimentov zaznanih na uravnavi nad Brezstropo jamo visoka, kar nakazuje na neobičajno količino sedimentov tako na površju kot do globine 15 m. Slednje lahko priča tudi o obstoju z alogenimi sedimenti zapolnjenega stranskega jamskega rova.



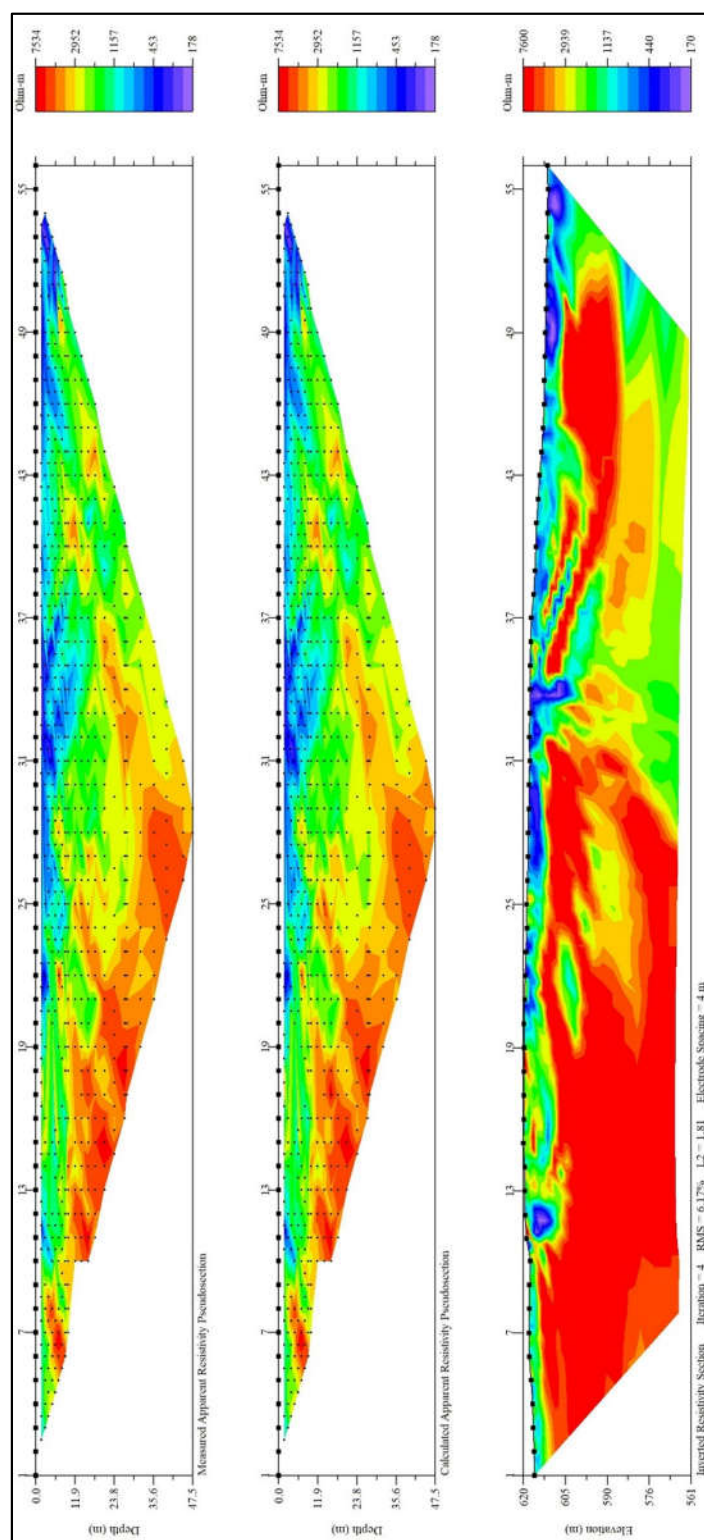
Slika 4 – Meritve in rezultati ERT profila UL3.

Profil UL4 (Preglednica 1, Slika 5) je v osrednjem delu Brezstrope jame. Največji globinski doseg je bil 50 m. Končni model prikazuje upornosti med 130 in 10.000 Ωm . Profil preči Brezstropo jamo med elektrodama 22 in 37 proti zahodu, kjer se dvigne na kraško planoto (med elektrodama 37 in 56). Najnižje upornosti (tj. 130–600 Ωm) smo zabeležili na dnu Brezstrope jame, kjer je ocenjena povprečna debelina alogenih sedimentov 8 m, največja pa 10 m. Z UL4 profilom nismo dosegli Vodne jame, saj je ta globlje.



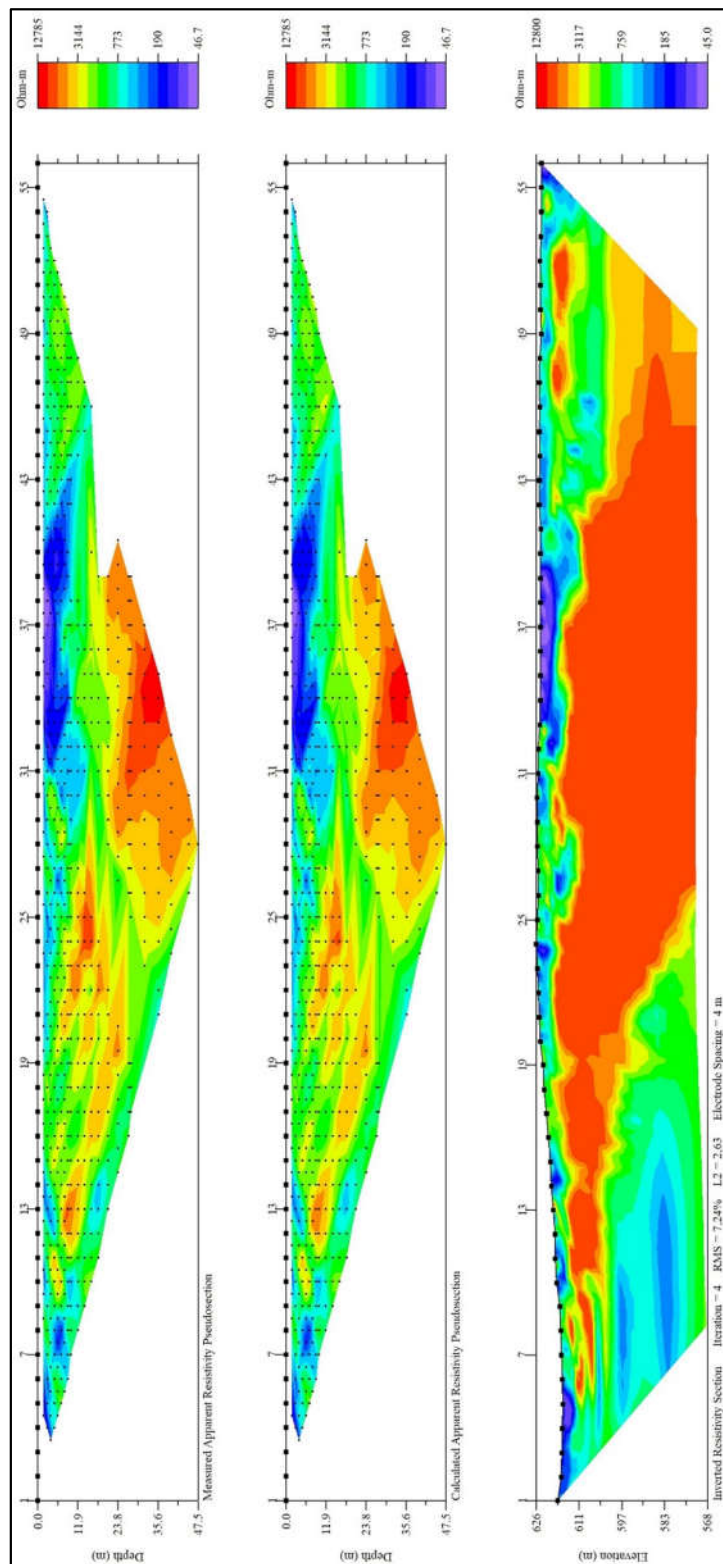
Slika 5 – Meritve in rezultati ERT profila UL4.

Profil UL5 (Preglednica 1, Slika 6) je na severnem delu Slavinskega ravnika. Največji globinski doseg je bil 50 m. Končni model prikazuje upornosti med 170 in 7.600 Ωm . Ker je Vodna jama vsaj 70 m pod profilom, je po pričakovanjih zaradi globinskega dosega metode nismo zaznali. Večina območja ima visoke vrednosti električne upornosti (tj. 2.500–7.600 Ωm). Na območjih najnižjih vrednosti (tj. 170–800 Ωm) na površju, smo elektrode zaradi suše zalili s slano vodo. Jamski rov smo prepoznali med elektrodama 19 in 24.



Slika 6 – Meritve in rezultati ERT profila UL5.

Profil UL6 (Preglednica 1, Slika 7) je na severu Slavinskega ravnika. Največji globinski doseg je bil 50 m. Končni model prikazuje upornosti med 45 in 12.800 Ωm . Najnižje vrednosti nakazujejo na prisotnost alogenih sedimentov na površju (med elektrodama 1 in 7 ter 32 in 45). Med elektrodama 1 in 19 profil preči Brezstropo jamo, kjer je bila ocenjena debelina alogenih sedimentov 7 m.



Slika 7 – Meritve in rezultati ERT profila UL6.

Rezultati GPR metode

Z uporabo GPR metode smo izvedli 6 meritev (Preglednica 2, Slika 1):

- GP1 – prečno na Brezstropo jamo ter nad jamo Šimčev spodmol;
- GP2 – vzdolž Brezstrobe jame;
- GP3 – pravokotno na profil GP2;
- GP4 – prečno na Brezstropo jamo in Vodno jamo;
- GP5 – vzdolž makadamske poti, prečno na Vodno jamo;
- GP6 – vzdolž makadamske poti, prečno na Markov spodmol.

Preglednica 2. Podatki o GPR meritvah GP profilov nad jamskim sistemom Loza.

profil	položaj meritev	antena [MHz]	meritev [št.]
GP1	JV del Brezstrobe jame, nad Šimčevim spodmolom in preko Brezstrobe jame (Z-V)	50	2
		250	2
GP2	JV del Brezstrobe jame, vzdolž rova (JV-SZ)	50	2
		250	2
GP3	JV del Brezstrobe jame, vzdolž rova in pravokotno na profil GP2 (Z-V)	50	2
		250	2
GP4	osrednji del Brezstrobe jame, preko rova in nad Vodno jamo (Z-V)	50	2
		250	2
GP5	S del Slavinskega ravnika, vzdolž makadamske poti, nad Vodno jamo (J-S)	50	2
GP6	S del Slavinskega ravnika, vzdolž makadamske poti, nad Markovim spodmolom (Z-V)	50	2

Vzdolž profilov GP1, GP2, GP3 in GP4 sta bili uporabljeni 50 MHz in 250 MHz antena, vendar slednja zaradi premajhne zmožnosti penetracije ni dala uporabnih rezultatov. Globinski doseg 50 MHz antene je v prisotnosti alogenih sedimentov običajno manjši kot v apnencu – med 8 in 18 m globine (Čeru in Gosar 2019), kar se je izkazalo tudi v tej raziskavi. Dodatno so se pojavile napake v podatkih, ki so posledica zakraselosti površja, saj je bil stik med anteno in tlemi občasno prekinjen. Za končno interpretacijo smo lahko uporabili le profil GP1.

Interpretacija in diskusija rezultatov GPR in ERT raziskav jamskega sistema Loza

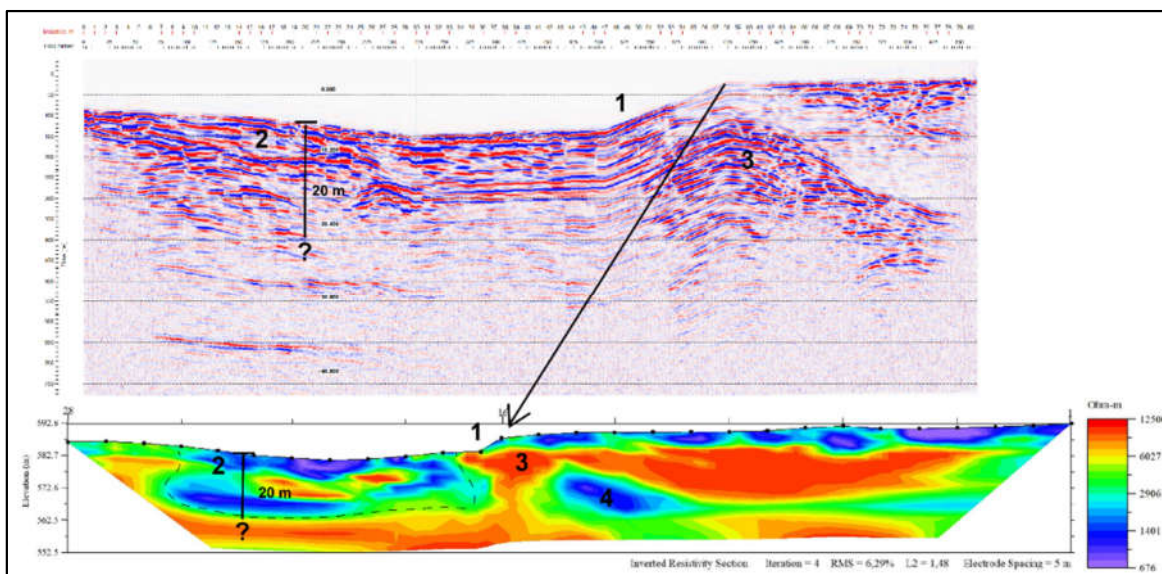
Kraška območja so za poglobljene analize z geofizikalnimi metodami velik izziv. Metodi ERT in GPR, ki sta bili uporabljeni za raziskave na Slavinskem ravniku, sta zaradi kompleksnosti terena (Slika 8), prisotnosti zakraselih kamnin, pretežno slabega prodiranja EM valovanja skozi sedimente in slabe prevodnosti električnega toka skozi suhe sedimente, dali precej pomanjkljive rezultate.



Slika 8 – GPR meritve GP1 profila nad jamo Šimčev spodmol (Foto: A. Švara).

Vrednosti izmerjenih upornosti alogenih sedimentov so visoke ($>676 \Omega\text{m}$). Zaradi velike količine peska (predvsem kremenovega), rezultati nakazujejo na visoko koercitivnost, kar potrjuje sedimentna analiza (Švara 2023). Elektrode smo po obodu brezstrobe jame postavljali s težavo, predvsem zaradi velike količine skal in kamenja. Manjša količina prsti je onemogočala kvalitetno prevajanje toka v tla.

Najboljše rezultate za namene interpretacije smo dobili za profila GP1 in UL1 (Slika 9), locirana na južnem delu raziskovanega območja Slavinskega ravnika. Profil UL1 je imel najmanj šuma v podatkih, ki so pokazali najnižje vrednosti napake RMS in L2. Horizontalni vhod v Šimčev spodmol v stranskem pobočju Brezstrobe jame se nahaja med elektrodama št. 16 in 17 (Slika 9, št. 1). Obseg denudiranega rova na mestu profila GP1 kaže največjo širino 30 m, kar se ujema s stanjem na terenu. Dno brezstrobe jame ima visoke vrednosti upornosti, ki ustrezajo masivnemu apnencu, medtem ko ima apnenec na površini Slavinskega ravnika nižje upornosti, ki ustrezajo zakraselemu epikraškemu območju. Alogeni sediment, ki zapolnjuje rov Brezstrobe jame, je bil zaznan kot slabljenje radarskega signala na profilu GP1 in kot najnižje vrednosti upornosti na profilu UL1 do globine približno 20 m (Slika 9, št. 2). Nadaljevanje horizontalnega vhoda in prehoda Šimčevega spodmola smo zaznali kot neprekinjene poševne odboje na radargramu in kot visoke vrednosti upornosti (Slika 9, št. 3). Nadaljevanja jame predvidoma zaradi sedimentov in podornih blokov nismo mogli določili.



Slika 9 – Primerjava GPR in ERT rezultatov profila P1 (UL1 in GP1) – preko Brezstope jame v Lozi in jame Šimčev spodmol. Legenda: 1-lega horizontalnega vhoda v Šimčev spodmol, 2-alogeni sedimenti znotraj Brezstope jame, 3-jama, 4-alogene sedimentne zapolnitve jamskega rova.

Podatki iz profilov UL2 in UL4 so kazali največ šuma, po obsežnem filtriranju pa so rezultati za nadaljnjo interpretacijo postali neuporabni. Najnižje vrednosti upornosti v UL2 (10–200 Ωm) kažejo na vlažne alogene sedimente, medtem ko visoke vrednosti (1200–6500 Ωm) kažejo na zakrasevanje apnencev. Vrednosti upornosti izmerjene na protilu UL2 bi morale biti zaradi zapolnjenosti jamskega rova Brezstope jame s sedimenti nizke in podobne vzdolž celega profila, vendar so nekatera odstopanja onemogočila nadaljnjo interpretacijo. Vrednosti upornosti sedimenta vzdolž UL3 so bile zaradi lege profila podobne UL2 (10–150 Ωm). Najvišje vrednosti (420–1200 Ωm) kažejo na zakrasele kamnine, kjer so vmesni prostori zapolnjeni s sedimenti. Višje vrednosti upornosti pod brezstropo jamo lahko kažejo na bloke apnenca ali zakraselost. Večina profila UL4 ima visoke upornosti (2000–10.000 Ωm), kar sovpada z zakraselostjo razvidno na terenu. Ponekod je mogoče opaziti geološke strukture, kot so razpoke/prelomi/plastnice (glej Sliko 5). Večji del profila UL5 kaže precej visoke upornosti (tj. 2.500–7.600 Ωm), ki sovpadajo z močno zakraselimi apnenci. Profil UL6 nakazuje na območja s suhim do mokrim alogenim sedimentom ter relativno homogenih in slabo razpokanih/zakraselih apnencev. Nižje vrednosti upornosti (400–600 Ωm) globlje od dna Brezstope jame lahko predstavljajo prazno jamo zapolnjeno s sedimentom. Pod alogenim sedimentom so vidni bloki apnenca, ki lahko predstavljajo razpadlo jamsko steno ali strop.

Poletna suša je preprečevala dobro električno prevodnost tal, kar smo izboljšali z zalivanjem elektrod s slano vodo. Posledica tega so bile lažne zelo nizke vrednosti upornosti ob stiku z elektrodami, katere so popačile naravne nižje vrednosti in posledično spremenile lestvico upornosti.

Globinski doseg metode je v kontaktnem krasu zanesljiv do 50 m. Zato jam Markov spodmol in Vodna jama v Lozi, ki se nahajata približno 70–100 m pod površjem, z metodo ERT nismo zaznali. Zaznani so bili nekateri drugi prej neznani stranski rovi (glej UL1, UL2, UL4, UL5).

Debelina sedimentne zapolnitve Brezstope jame je bila v tej študiji izmerjena prvič. Rezultati kažejo, da je ta večja v njenem južnem delu (tj. 20 m), kot v njenem severnem delu

(tj. 10 m). V jami so razmere bolj kompleksne, saj zapolnjevanje in erozija sedimentov zaradi spremenljive aktivnosti vode skupaj in tektonskih premikov območja, v katerem se jama nahaja, potekajo sočasno. To pomeni, da je na podlagi trenutnega stanja praktično nemogoče oceniti debelino nekdanje sedimentne zapolnitve v jami (npr. Bosák 2008; Zupan Hajna in sod. 2008, 2020).

Zaključki

Z metodama ERT in GPR smo na Slavinskem ravniku, nad Brezstropo jamo v Lozi ter aktivnem jamskem sistemu Loza, posneli 12 profilov – 6 GPR in 6 ERT profilov. Najboljša interpretacija je bila možna pri profilu P1 (tj. UL1 in GP1), kjer smo zaznali vhod in rov jame Šimčev spodmol ter ocenili, da ima Brezstropa jama v Lozi v tem delu 30 m širok rov, njeno dno pa sestavljajo masivni in nezakraseli apnenci. Stopnja zakraselosti nad jamo je visoka, kar smo zaznali z obema uporabljenima metodama. GPR z izjemo prvega profila, ni dal rezultatov uporabnih za analizo ali interpretacijo. Problematičen je bil tudi ERT profil UL2, kjer se je anomalija v meritvah pokazala že na terenu. Zaradi manjkajočih podatkov, interpretacija ni bila mogoča. S profilom UL3 smo zaznali 6 m debelo plast alogenihi sedimentov, ki zapolnjujejo Brezstropo jamo v Lozi. Sedimenti na ravniku v tem delu pričajo o možnem obstoju stranskega rova, ki pa še ni popolnoma denudiran. S profilom UL4 smo lahko ocenili 8–10 m debelo sedimentno zapolnitev Brezstrobe jame. Kljub globinskem dosegu metode 50 m, Vodne jame v Lozi nismo zaznali, kar najverjetneje nakazuje na odstopanje jamskih meritev v tem delu ravnika. S profilom UL5 smo zaznali nepoznan s sedimenti zapolnjen jamski rov. S profilom UL6 smo lahko ocenili debelino sedimentne zapolnitve Brezstrobe jame na 7 m, alogeni sedimenti, katere smo prepoznali na površju Slavinskega ravnika, pa pričajo na zapleteno zgodovino razvoja kontaktnega krasa, ki se pogosto odraža predvsem bližje litološkemu kontaktu.

Geofizikalne raziskave z georadarjem in električno upornostno tomografijo prinašajo na (kontaktno-) kraškem terenu številne izzive. Metodi sta lahko uporabni pri: (1) oceni debeline zapolnitve jamskega rova z alogenimi sedimenti, (2) oceni porušenosti jamskih rogov pod alogenimi sedimenti (tj. prisotnost podornih blokov in skal), (3) ugotavljanju pojava neraziskanih manjših jamskih rogov in (4) ugotavljanja morebitnih neskladnosti z jamarskimi meritvami. Predvsem metoda ERT, katera alogene sedimente dobro razloči, lahko pri geomorfoloških raziskavah kontaktnega krasa predstavlja zelo koristno komplementarno metodo. Obe metodi sta na kontaktnem krasu pomembni za oceno debeline sedimentnih zapolnitev in položaja jamskih rogov, predvsem tam, kjer ocena stanja na terenu zaradi dostopnosti in obsega ni možna.

Zahvala

Raziskava je bila del ARIS programa za mlade raziskovalce, raziskovalnega programa ARIS (P6-0119), in projekta RI-SI-EPOS »Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost slovenskega RRI prostora – RI-SI-EPOS«, v sofinanciranju RS, Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport in Evropske unije iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- ARSO LIDAR (2016). http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso [Accessed 10 December 2021].
- Blindow, Eisenburger, D., Illich, B., Petzold, H., Richer, T. (2007). Ground penetrating radar. V: Knödel (Ur.), Lange (Ur.), Voigt (Ur.) Environmental Geology. Handbook of Field Methods and Case Studies, Springer, 283-335, Berlin. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_10
- Bosák, P. (2008). Karst processes and time. *Geologos* 14, 19-36.
- Breg Valjavec, M. (2014). Study of filled dolines by using 3D stereo image processing and electrical resistivity imaging. *International Journal of Speleology*, 43, 1, 57-68. doi: <https://doi.org/10.5038/1827-806X.43.1.6>
- Čeru, T., Šegina, E., Knez, M., Benac, Č., Gosar, A. (2018). Detecting and characterizing unroofed caves by ground penetrating radar. *Geomorphology*, 303, 524-539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.004>
- Čeru, T., Gosar, A. (2019). Application of ground penetrating radar in karst environments: An overview. *Geologija*, 62, 2, 279-300. doi: <https://doi.org/10.5474/geologija.2019.014>
- Kalenda, P., Tengler, R., Šebela S., Blatnik, M., Gosar, A. (2017): Detection of Divaška jama corridors behind (to the SW) Trhlovca cave using low frequency high power ground penetrating radar. *Acta carsologica*. 47, 2-3, 153–167. doi: <https://doi.org/10.3986/ac.v47i2-3.5187>
- Komac, B. (2006). Meritve električne upornosti kot sredstvo za ugotavljanje lastnosti gradiva na dolomitnih območjih. *Geografski vestnik*, 78, 2, 65-76.
- Neil, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth Science Reviews*, 66, 261-330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York.
- Rajh, G., Car, M., Gosar, A. (2014). Electrical resistivity tomography investigations along the planned dykes of the HPP Brežice water accumulation basin. *Geologija*, 57(2), 183–191. doi: <https://doi.org/10.5474/geologija.2014.016>
- Stepišnik, U., Mihevc, A. (2008). Investigation of structure of various surface karst formations in limestone and dolomite bedrock with application of the Electrical Resistivity Imaging. *Acta carsologica*, 37, 133-140. doi: <https://doi.org/10.3986/ac.v37i1.165>
- Švara, A. (2023). *Morphogenesis of the Postojna Basin karst periphery : dissertation*. Doktorska disertacija, Nova Gorica.
- Zhou, W., Beck, B. F., Stephenson, J. B. (2000). Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terrains. *Environmental Geology*, 39, 760-766. doi: <https://doi.org/10.1007/s002540050491>
- Zupan Hajna, N., Mihevc, A., Pruner, P., Bosák, P. (2008). Palaeomagnetism and Magnetostratigraphy of Karst Sediments in Slovenia. *Carsologica* 8, Založba ZRC, pp. 266, Ljubljana. doi: <https://doi.org/10.3986/9789612540586>
- Zupan Hajna, N., Bosák, P. & Pruner, P., Mihevc, A., Hercman, H., Horáček, I. (2020). Karst sediments in Slovenia: Plio-Quaternary multi-proxy records. *Quaternary International*, 546, 4-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.11.010>

Motnje signalov GNSS: vloga omrežij SIGNAL ter 0. red pri zanesljivem pozicioniranju in sinhronizaciji časa na območju Slovenije

Polona Pavlovčič Prešeren¹, Miran Kuhar¹, Klemen Ritlop¹, Oskar Sterle¹, Maja Filač¹, Bojan Stopar¹, Franc Dimc², Matej Bažec², Mihaela Triglav Čekada³, Natalija Novak³, Niko Fabiani³, Aljaž Blatnik⁴, Andrej Lavrič⁴, Luka Zmrzlak⁴, Staš Dolinšek⁴, Boštjan Batagelj⁴

Povzetek

Motnje signalov globalnih navigacijskih sistemov (GNSS) so v zadnjem času postale precej pogost globalni pojav in predstavljajo vse večje tveganje za zanesljivo delovanje sistemov satelitskega pozicioniranja, navigacije in sinhronizacije časa. Signali GNSS so zaradi svoje nizke jakosti in slabe zaščite zelo ranljivi na nenamerno in namerno motenje. Motenje signalov lahko vodi do nezmožnosti določanja položaja ali celo do nepravilno določenega položaja. Zanesljivo delovanje omrežij stalnih postaj GNSS in zaznavanje motenj je zato ključnega pomena za opozarjanje na prisotnost motenj z učinkom nezmožnosti ali nepravilne določitve položaja. V Sloveniji imata pri tem osrednjo vlogo državno omrežje stalnih postaj SIGNAL ter omrežje 0. reda, ki delujeta neprekinjeno in imata možnost spremljanja kakovosti signalov GNSS. Motnje signalov GNSS lahko neposredno vplivajo na kakovost in zanesljivost produktov omrežij, predvsem pa na goreferenciranje prostorskih entitet. V prispevku obravnavamo odpornost teh dveh omrežij na motnje signalov GNSS. Posebna pozornost je namenjena lastnostim sprejemnikov GNSS v omrežjih, s poudarkom na njihovih zmožnostih zaznavanja različnih vrst motenj, ter uporabljenih metod nadzora kakovosti signalov ter možnostim prepoznavanja vrste motenj. Na podlagi analiz podajamo predloge za izboljšanje spremljanja, obvladovanja ali zmanjševanja tveganj napačne določitve položaja ali nepravilne časovne sinhronizacije, ki bi lahko imele negativen vpliv na delovanje infrastrukturnih omrežij, internetnih storitev, v bančništvu ter pri zagotavljanju varnosti zračnega in pomorskega prometa.

Ključne besede: motnje signalov GNSS, stalno delujoče omrežje referenčnih postaj SIGNAL, 0. red, georeferenciranje, časovna sinhronizacija

Keywords: GNSS signal interference, continuously operating reference station network SIGNAL, 0th order network, georeferencing, time synchronization

Uvod

Motnje signalov globalnih navigacijskih satelitskih sistemov (angl. *Global Navigation Satellite Systems* – GNSS) predstavljajo resno nevarnost za zanesljivo delovanje sodobnih sistemov pozicioniranja, navigacije in sinhronizacije časa. Uporaba taktik onesposobitve pozicioniranja z GNSS je prisotna predvsem na vojaških in kriznih območjih, čeprav se širijo tudi izven neposrednega območja delovanja. Motnje vplivajo na razpoložljivost in zanesljivost civilnih storitev GNSS. Prizadenejo lahko tako moderno geodetsko

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamove ceste 2, SI-1000, Ljubljana

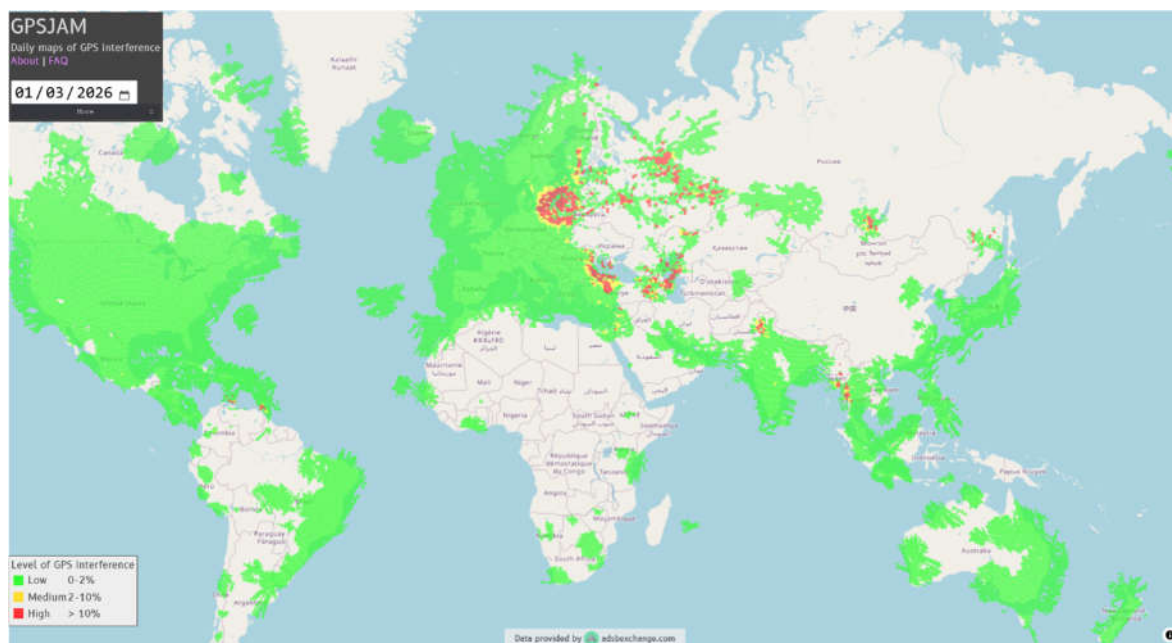
² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet, Pot pomorščakov 4, SI-6320, Portorož

³ Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, SI-1000, Ljubljana

⁴ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, SI-1000, Ljubljana

infrastrukturo za vzpostavitev in vzdrževanje koordinatnih sistemov kot tudi druge sisteme opazovalnic, ki temeljijo na GNSS. Zaradi povečanja radijskega onesnaževanja pogosto prihaja tudi do nenamernih motenj in izkrivljanja signalov GNSS. Nenamerne in namerne motnje prizadenejo vse uporabnike storitev GNSS, uporabnike navigacije, predvsem zračni in pomorski promet, kot tudi delovanje telekomunikacijskih, energetskih finančnih in internetnih storitev, ki GNSS uporabljajo predvsem za sinhronizacijo časa.

V zadnjem času so bile motnje zaznane v različnih delih sveta, pri čemer ne gre več zgolj za posamezne ali kratkotrajne dogodke, temveč za ponavljajoče se in prostorsko obsežne pojave. Poročila mednarodnih organizacij in za ta namen specializiranih institucij (flightradar24.com, 2025; gpsjam.org; 2025; gpswise.aero, 2025) navajajo povečano pojavnost motenj predvsem v regijah z zaostrenimi varnostnimi razmerami ter ob pomembnih prometnih koridorjih. Posebej so izpostavljena območja Baltskega in Črnega morja, vzhodnega Sredozemlja, Rdečega morja in Perzijskega zaliva, kjer so bile zaznane tako motnje sprejema signalov GNSS kot tudi sistematične anomalije v določitvi položaja in časa (Goward, 2025; Liu et al., 2024; Goward, 2025; Mellor, 2025; Pullen 2025). Vplivi motenj pogosto razširijo na območja, ki so bistveno oddaljena od domnevnega vira motenja, kar otežuje njihovo zaznavo, lokalizacijo in obvladovanje. V številnih primerih so motnje zaznane na ladjah in letalih (Lomas, 2025), ki poročajo o izgubi signalov GNSS, nenadnih skokih položaja ali prehodu v degradirane navigacijske načine delovanja. Takšni dogodki potrjujejo, da GNSS-motnje niso omejene zgolj na lokalno okolje, temveč lahko vplivajo na širše regionalne in mednarodne sisteme. Slika 1 prikazuje globalno zaznane motnje signalov GNSS na dan 3. januarja 2026, določene na podlagi letalskih opazovanj prek sistema ADS-B. Izrazito območje motenj je vidno nad Venezuelo v času poročanega ameriškega napada, dodatno pa izstopajo motnje v severovzhodni Evropi, ki segajo iz območja Kaliningrada proti osrednji Evropi.



Slika 1. Globalno zaznane motenj signalov GNSS na dan 3. januar 2026, pridobljene na podlagi letalskih informacij iz sistemov ADS-B (gpsjam.org, pridobljeno 5. 1. 2026).

Zgornja slika (Slika 1) ne zajema lokalnih in kratkotrajnih motenj GNSS, ki se pojavljajo tudi v Sloveniji. Nenamerne motnje v Sloveniji in drugod najpogosteje nastanejo zaradi elektromagnetnih interferenc v urbanih območjih, industrijskih obratih, prometni

infrastrukturi ali zaradi nepravilno delujočih radijskih in elektronskih naprav, ki oddajajo v frekvenčnih pasovih GNSS. Precej pogoste so na območju Luke Koper, kjer zaradi gostega elektromagnetnega okolja in intenzivne uporabe različnih radijskih naprav občasno prihaja do nezmožnosti določitve položaja in/ali nepravilno določenega položaja (gpswise.aero, 2025).

Za zanesljivo pozicioniranje in prenos časa z GNSS so ključni ustrezni pogoji sprejema signalov ter zmožnost GNSS-sprejemnikov, da prepoznajo in obvladujejo signale, obremenjene z motnjami (Bažec et al., 2020; Dimc et al., 2021; Pavlovčič-Prešeren et al., 2021). Večina dosedanjih raziskav je bila usmerjena predvsem v proučevanje kakovosti GNSS signalov in obdelave opazovanj v oteženih pogojih izmere, ki so posledica fizičnih ovir, zasenčenja signalov ter njihovega odboja od objektov, kar vodi v več-žarkovno razširjanje signalov (angl. *multipath*). Namerni posegi v GNSS signale so bili v preteklosti večinoma omejeni na vojaško področje, danes pa je zaradi splošne razširjenosti tehnologije GNSS treba upoštevati, da je satelitske signale razmeroma enostavno motiti do onemogočanja sprejema signalov (angl. *jamming*) ali potvoriti (angl. *spoofing*) do te mere, da storitev GNSS ni več razpoložljiva ali pa je njena zanesljivost vprašljiva. Pri tem je bistvenega pomena poznavanje odziva sprejemnikov GNSS različnih proizvajalcev in generacij v pogojih motenj, saj se ti na namerne in nenamerne vplive odzivajo različno.

S spremljanjem kakovosti signalov (angl. *Signal Quality Monitoring – SQM*) je v GNSS-sprejemnikih mogoče zaznati problematične ali potvorjene satelitske signale, ki lahko bistveno vplivajo na zanesljivost določitve položaja in časovne sinhronizacije. Večina geodetskih sprejemnikov temelji pri ocenjevanju kakovosti signalov na spremljanju različnih kazalnikov, kot so navzkrižna korelacija, razmerje med signalom in šumom, zaznavanje nenadnih sprememb jakosti signala ter analiza razlik med kodnimi in faznimi opazovanji. Del vplivov je mogoče zaznati in izločiti že na ravni sprejemnika (Borio et al., 2016; Bhunia et al., 2016), medtem ko je druge potrebno obravnavati v nadaljnjih fazah obdelave opazovanj.

Poudariti velja, da vsaka motnja še ne vpliva na nezmožnost določitve položaja ali na nepravilno določen položaj, saj imajo sprejemniki vgrajena sita za izločitev motenj oziroma se z obdelavo signalov v kodni in fazni zanki velikokrat moteče signale lahko tudi odstrani.

Vloga omrežij SIGNAL in 0. red pri prepoznavanju motenj

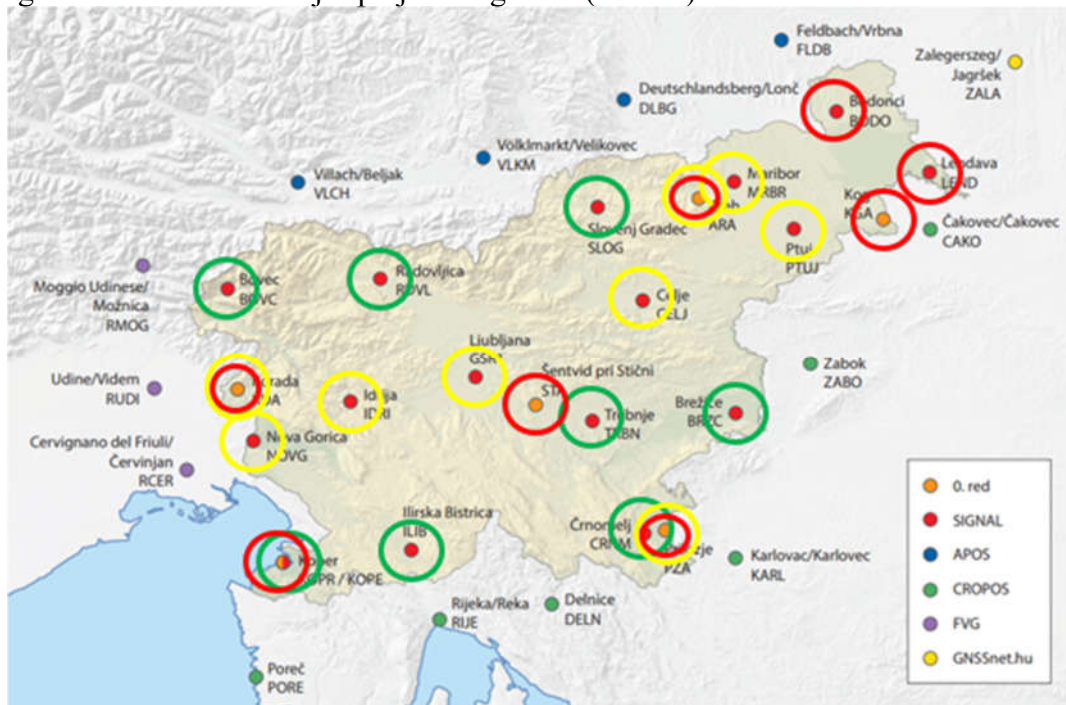
Državno omrežje stalnih GNSS-postaj SIGNAL ima poleg svoje temeljne geodetske vloge vse pomembnejšo funkcijo pri prepoznavanju in spremljanju motenj signalov. Zaradi neprekinjenega delovanja, geografske razporeditve postaj in uporabe visoko kakovostnih sprejemnikov GNSS omogočata sistematično spremljanje stanja frekvenčnega okolja GNSS na območju Slovenije in v njeni širši okolici. S tem predstavljata dragocen vir podatkov za zaznavanje anomalij, ki lahko kažejo na prisotnost nenamernih ali namernih motenj.

Podatki stalnih postaj SIGNAL ter mreže 0. reda omogočajo analizo sprememb v signalih in v kakovosti pazovanj, kot so nenadni padci razmerja med signalom in šumom (angl. *Signal-to-Noise Ratio – SNR*), izguba posameznih frekvenc ali satelitov, povečanje števila izpadov meritev ter nenavadna odstopanja v kodnih in faznih opazovanjih. Takšni pojavi se pojavljajo lokalno na eni postaji, v primeru motenj večjih razsežnosti pa tudi sočasno na več postajah. To omogoča prostorsko in časovno opredelitev območij z motnjami ter razlikovanje med lokalnimi vplivi in širšimi regionalnimi dogodki.

Pomembna prednost omrežij SIGNAL ter 0. reda je tudi možnosti primerjave podatkov med postajami ter povezovanja z drugimi omrežji in sistemi za spremljanje motenj. To omogoča zgodnje zaznavanje dogodkov, oceno njihovega obsega in trajanja ter podporo pri

obveščanju uporabnikov in pristojnih institucij. V kontekstu vse pogostejših motenj signalov GNSS geoinfrastrukturni omrežji Slovenije predstavljata ključno nacionalno infrastrukturo za spremljanje zanesljivosti storitev GNSS izven geodezije.

Pomemben vidik prepoznavanja motenj GNSS predstavlja spremljanje frekvenčnega spektra sprejetih signalov, kjer lahko prepoznavamo večjo jakost motečih signalov znotraj ali v bližini frekvenčnih pasov, ki so specifični za GNSS. Analiza spektrov omogoča zaznavanje nenavadnih vzorcev, kot so širokopasovni šum, ozkopasovne motnje ali periodične emisije, ki lahko bistveno vplivajo na kakovost signalov in iz teh izvedenih opazovanj. Te napredne možnosti spremljanja spektra so na voljo na večini stalnih GNSS-postajah, kjer uporabljeni sprejemniki in programska oprema omogočajo neposreden vpogled v frekvenčno okolje sprejema signalov (Slika 2).



Slika 2. Možnost spremljanja spektra signalov GNSS na omrežjih SIGNAL in 0. red; rdeče: ni možnosti, rumeno: mogoče, vendar storitev trenutno ni vključena, zeleno: je mogoče.

Nasprotno pa večina uporabniških sprejemnikov GNSS možnosti spremljanja spektra nima in motnje zaznava predvsem posredno, prek sprememb kazalnikov kakovosti signalov, kot so razmerje med signalom in šumom, izgube inicializacije ter anomalije v kodnih in faznih opazovanjih. Neposredno spremljanje spektra na stalnih postajah zato predstavlja pomembno prednost pri hitri in zanesljivi identifikaciji motenj ter razlikovanju med nenamernimi in namernimi posegi v signale GNSS.

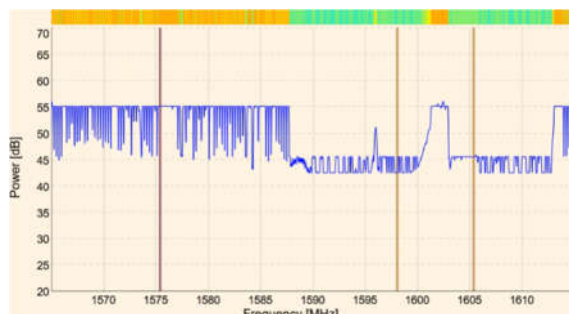
Meritve spektrov signalov s sprejemniki GNSS

Meritve spektrov signalov s sprejemniki GNSS omogočajo neposreden vpogled v frekvenčno okolje sprejema satelitskih signalov in predstavljajo učinkovito orodje za zaznavanje motenj. Spektralne meritve se praviloma izvajajo v ozkem frekvenčnem pasu okoli nominalnih frekvenc GNSS (npr. L1, L2, L5) in so prikazane kot odvisnost spektralne gostote moči signala od frekvence. V normalnih pogojih je v spektru razviden značilen šumni nivo, nad katerim se pojavljajo razširjeni signali z enakomerno porazdeljeno energijo.

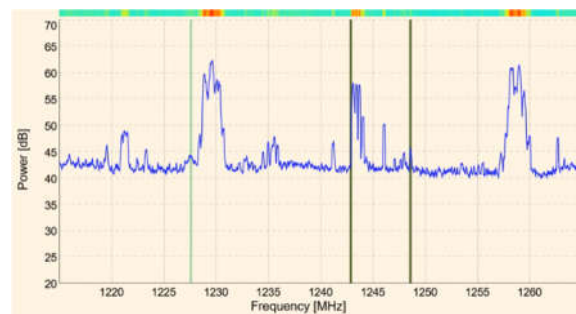
Prisotnost motenj se v spektru pokaže kot izrazita odstopanja od tega vzorca. Ozkopasovne motnje se kažejo kot ozki, jasno izraženi vrhovi pri določenih frekvencah, medtem ko se širokopasovne motnje odražajo kot splošno povišanje šumnega nivoja v večjem delu GNSS pasu. Periodične ali pulzne motnje lahko povzročijo ponavljajoče se strukture v spektru ali časovno spremenljivo porazdelitev energije. Pri potvorjenih signalih (angl. *spoofing*) so lahko v spektru zaznani dodatni signali z nenavadno razporeditvijo moči ali z večjo energijo, kot jo imajo običajni signali GNSS.

Poudariti velja, da vsaka motnja še ne vpliva na nezmožnost določitve položaja ali na nepravilno določen položaj, saj imajo sprejemniki vgrajena sita za izločitev motenj oziroma se z obdelavo signalov v kodni in fazni zanki velikokrat moteče signale lahko tudi odstrani.

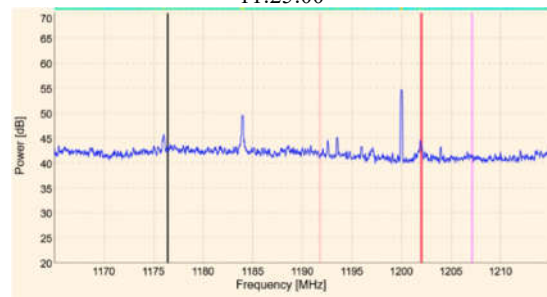
Takšne spektralne značilnosti omogočajo razlikovanje med nenamernimi motnjami, lokalnimi viri elektromagnetnega šuma in namernimi motnjami. V kombinaciji z drugimi kazalniki kakovosti pomembno prispevajo k celoviti oceni vpliva motenj na GNSS-opazovanja, k zanesljivejšemu prepoznavanju njihovega izvora ter oceno kakovosti določitve položaja.



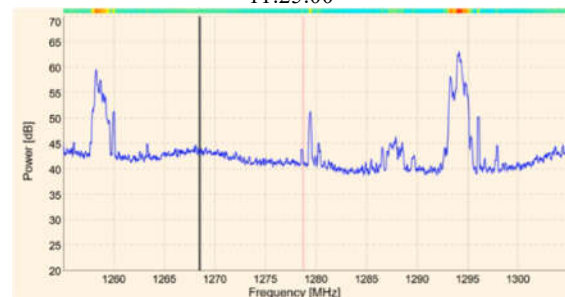
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



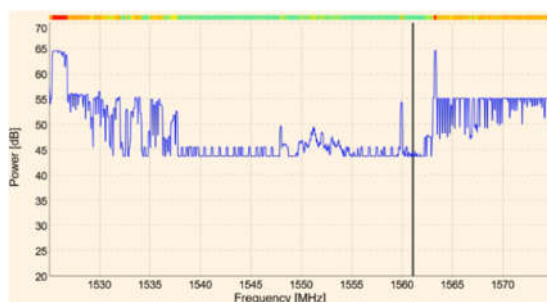
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b), Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



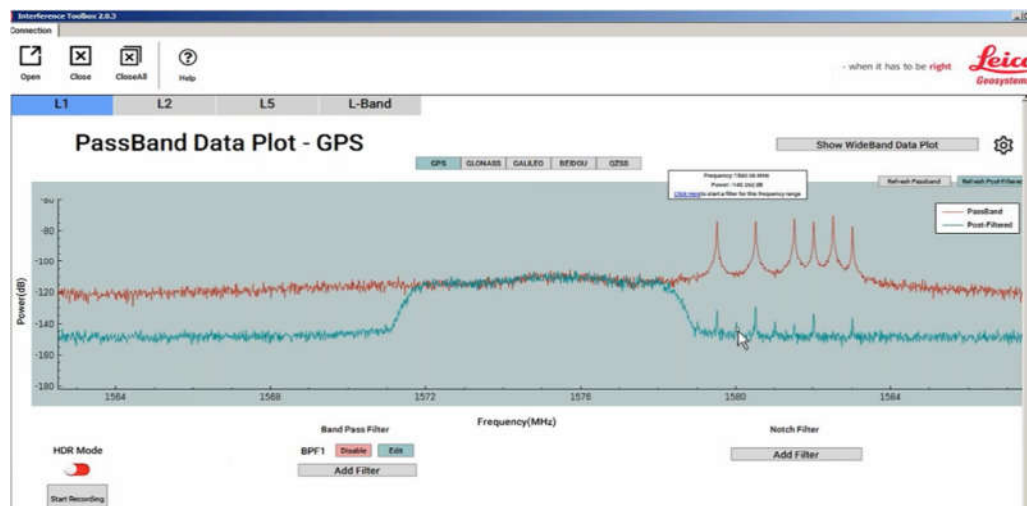
(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



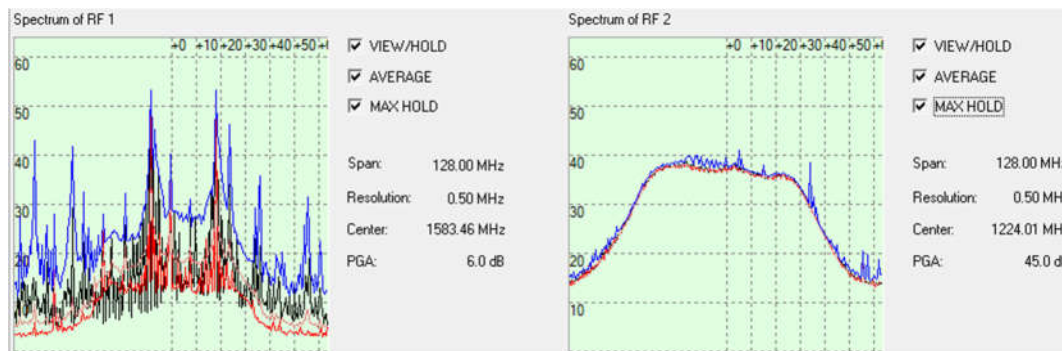
(e) izris B1 z označeno frekvenco B1, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00

Slika 3. Spektralne meritve s Trimble R12i v času namernega motenja signalov GNSS (Črnotiče, 15. 5. 2024).

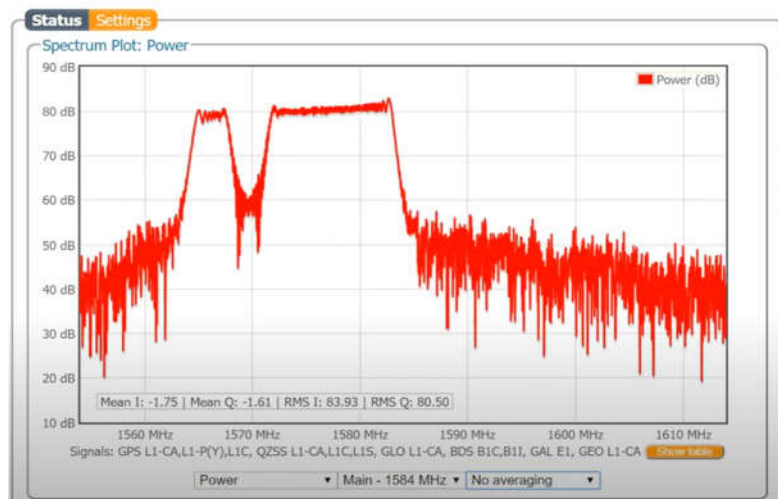
Vsak proizvajalec sprejemnikov GNSS spektralne meritve grafično prikaže na svoj način. Na Sliki 3 je prikaz spektralnih meritev sprejemnika *Trimble R12i* proizvajalca Trimble Inc. (Westminster, Colorado, ZDA), na Sliki 4 je prikaz motenj s sprejemniki *Leica Geosystems* (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Švica), na Sliki 5 je prikaz motenj s sprejemniki *u-blox* (u-blox AG, Thalwil, Švica) in na Sliki 6 prikazan primer zaznanih motenj s sprejemnikom *Septentrio* (Septentrio NV/SA, Leuven, Belgija).



Slika 4. Spektralne meritve s sprejemnikom Leica GS18 v času namernega motenja signalov GNSS (Leica Geosystems).



Slika 5. Spektralne meritve s sprejemnikom ublox ZED-F9P v času namernega motenja signalov GNSS (Črnotiče, 15. 5. 2024)



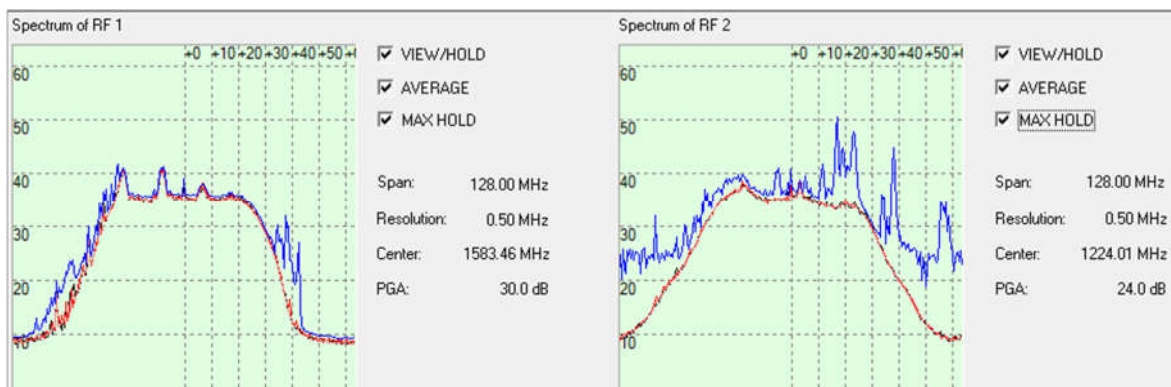
Slika 6: Spekter signalov v sprejemniku Septentrio Mosaic X5 ob prisotnosti motilnika s preletnim signalom

Odziv sprejemnikov GNSS na nenamerne motnje

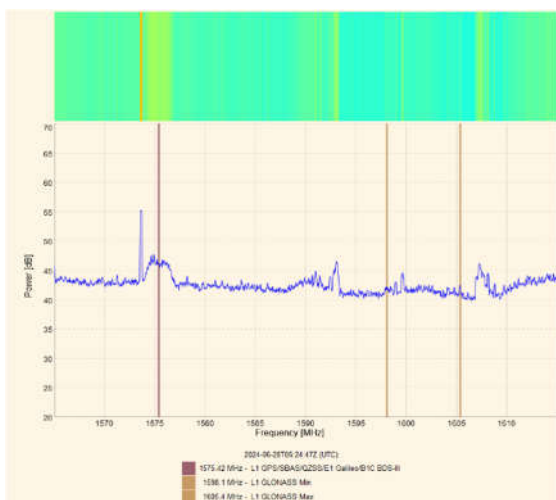
Motnje signalov GNSS na stalni postaji FGG3, nameščeni na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani, je mogoče spremljati neprekinjeno zaradi stalnega delovanja postaje s sprejemnikom Trimble Alloy. V nadaljevanju predstavljamo le bistvene izsledke spektralnih meritev. Poleg stalne postaje smo v njeni neposredni bližini izvedli enourno izmero tudi z nizkocenovnim sprejemnikom u-blox ZED-F9P (Slika 7), da bi naredili primerjavo spektralnih meritev med geodetskim (Trimble Alloy) in nizkocenovnim sprejemnikom GNSS (u-blox ZED F9P). Arhiv dnevnik spektralnih datotek stalne postaje FGG3 kaže, da so na tej lokaciji občasno močno prisotne motnje v širokem frekvenčnem območju od 1,1 do 1,7 GHz, posebej izrazite pa so v frekvenčnih pasovih G1 in G2 sistema GLONASS ter v območju L5 – Slika 8 (levo), Slika 9 (b)).



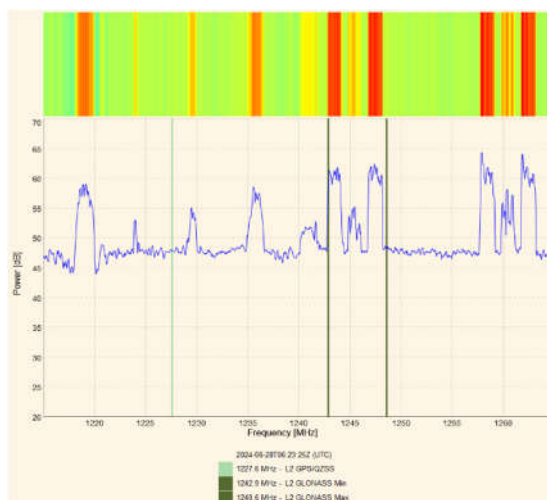
Slika 7: Spremljanje motenj signalov na točki FGG3, na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana



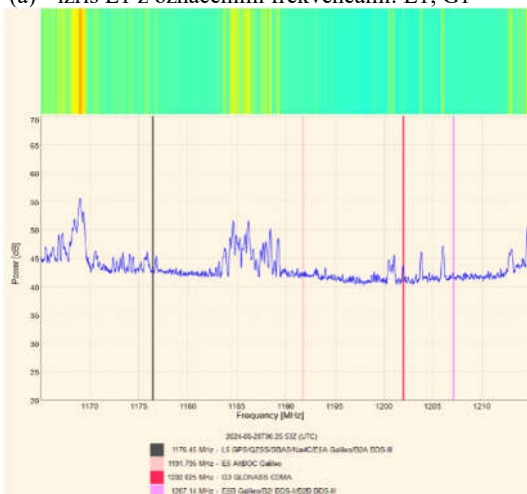
Slika 8: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz.



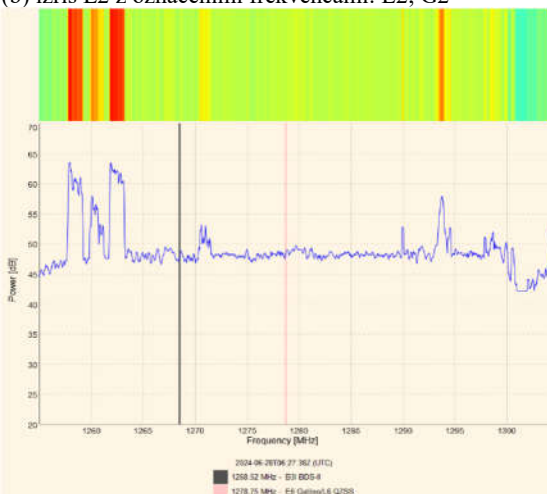
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, G1



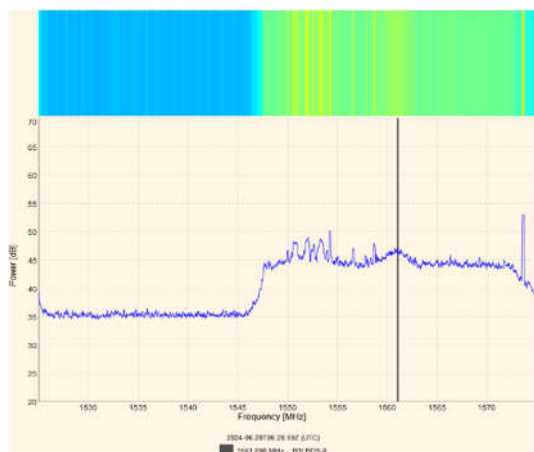
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, G2



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b)



(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6



(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

Slika 9: Spremljanje motenj signalov s sprejemnikom Trimble Alloy na točki FG3, na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana (28/06/2024).

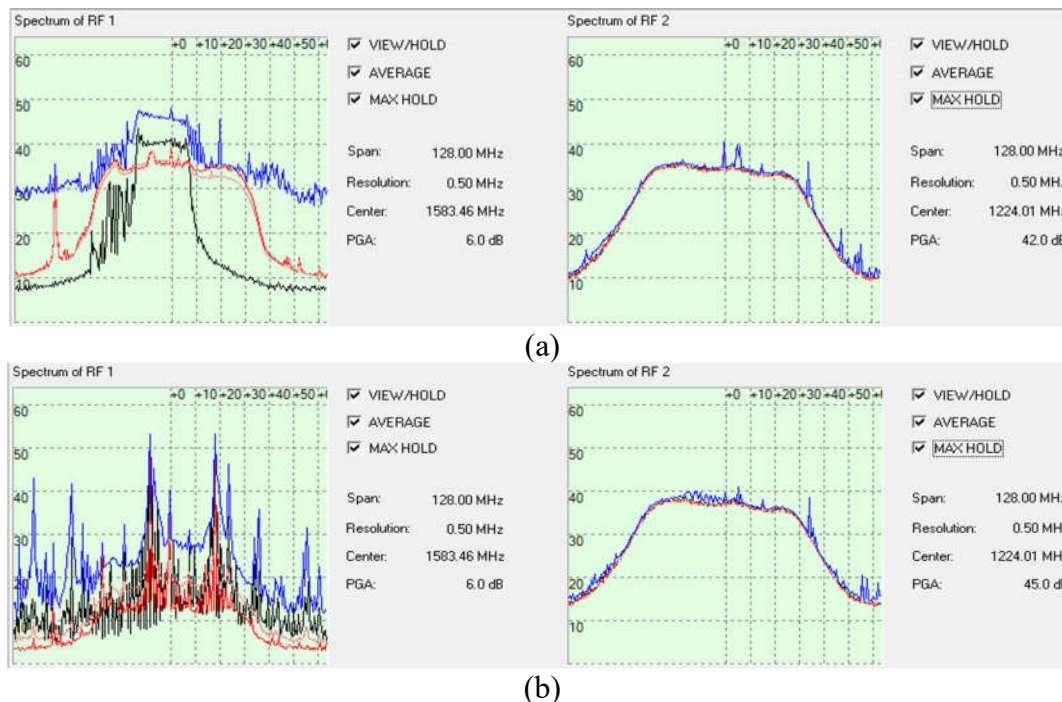
Motnje so bile jasno razpoznavne v spektru signalov, prav tako so se odražale v samih opazovanjih, predvsem v obliki prekinitev ter nenadnih skokov faze (angl. *cycle slips*). Kljub temu se vpliv motenj ni pokazal v položaju, saj sta oba uporabljena sprejemnika nenamerne motnje uspešno zaznala in odpravila v postopku obdelave. Takšne razmere zato predstavljajo primere obvladljivih motenj, pri katerih je z ustrežno strojno in programsko podporo mogoče zagotoviti zanesljivo določanje položaja.

Odziv sprejemnikov GNSS na namerne motnje

Geodetski sprejemniki novejšega datuma na namerne motnje praviloma reagirajo šele, ko jakost motilnega signala preseže določeno mejo, pred tem motilne signale skušajo odstraniti. Pri dovolj močnih motnjah lahko pride do zavrnitve opazovanj ali celo do popolne prekinitve delovanja sprejemnika, čeprav je treba poudariti, da je marsikateri sprejemnik (predvsem starejšega datuma izdelave) kljub vgrajenim zaščitnim mehanizmom mogoče tudi prelisičiti. V okviru izvedenih meritev na območju Črnotič smo delovali v okolju z največjo močjo motilnika do približno 1 W, kar se je izkazalo kot raven motenj, pri kateri sprejemniki še niso popolnoma prenehali delovati, temveč so motnje zaznavali predvsem na ravni opazovanj in spektralnih izrisov.

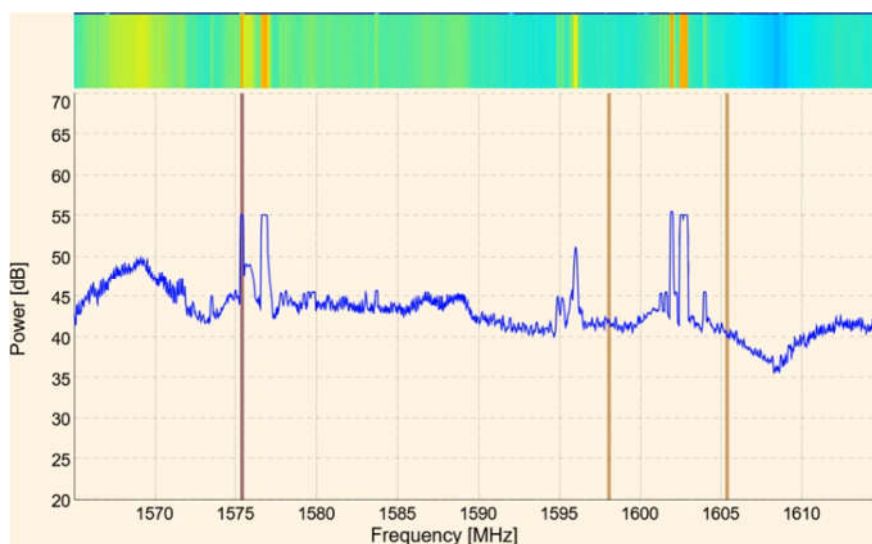


Slika 10: Spremljanje odziva sprejemnikov GNSS (spredaj) na namerne motnje z motilnikom Keysight (v ozadju); Črnotiče, 15. 5. 2024.

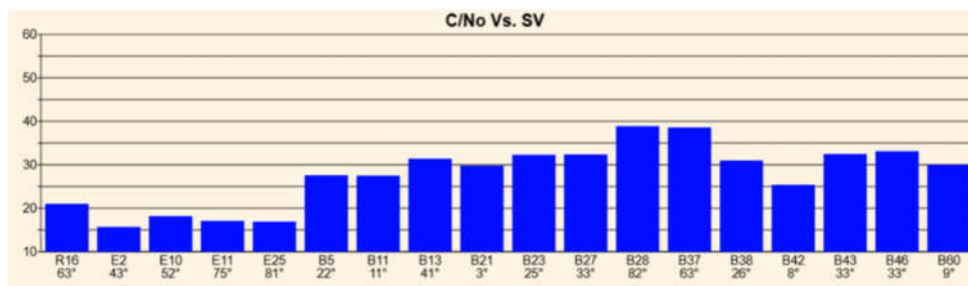


Slika 10: Spremljanje odziva sprjemnika u-blox ZED-F9P na motilnik Rušička (a) in na motilnik Keysight N5182B (b); Črnotiče, 15. 5. 2024.

Če primerjamo spektralne meritve namernih motenj, izvedene z motilnikom Rušička (Slika 10-a in in z motilnikom Keysight (Slika 10-b), lahko ugotovimo, da so namerne motnje z motilnikom Rušička po obliki spektra precej drugačne kot tiste z motilnikom Keysight. Pri obeh motilnikih smo motne izvajali na frekvenci L1, vendar je bila jakost motenj drugačna.



Slika 11: Spekter GNSS na frekvenci L1, Max Hold, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 08:00:00



Slika 12: Vidni sateliti v času motenja z motilnikom Keysight N5182B.

Nasprotno so spektralni izrisi iz sprejemnika Trimble R12i bistveno drugačni (Slika 11). Na frekvenci L1 je zaznaven skok oziroma dvig grafa v območju tik pred nosilno frekvenco L1 (1575,42 MHz), podobno pa tudi na frekvenčnem območju signalov GLONASS G1. Drugačna slika se pokaže pri uporabi profesionalnega motilnika Keysight N5182B. V tem primeru so bile z geodetskim sprejemnikom Trimble R12i na frekvenčnem območju L1 zaznane izrazite motnje, jasno razpoznavne tako na nefiltriranih spektralnih meritvah kot tudi v izrisih v načinu *Max Hold*. Hkrati je prišlo do občutnega zmanjšanja števila zaznanih satelitskih signalov (Slika 12), vse do popolne izgube signalov sistema GPS, kar potrjuje, da je bila v tem primeru jakost motenj že blizu ali nad pragom, pri katerem zaščitni mehanizmi sprejemnika niso več sposobni zagotavljati normalnega delovanja.

Primerjava spektralnih izrisov med geodetskim sprejemnikom Trimble R12i, kjer se spekter izrisuje z internim programjem sprejemnika, in nizkocenovnim sprejemnikom u-blox ZED-F9P, pri katerem se izrisi izvajajo v programu u-center, pokaže, da so motnje, ki jih je mogoče zaznati že neposredno med terensko izmero, praviloma bolj očitne pri nizkocenovnih sprejemnikih. Dodatna prednost sprejemnikov u-blox je možnost shranjevanja spektralnih meritev v binarnem formatu *.ubx, kar omogoča naknadno analizo in celo predvajanje motenj. Pri sprejemniku Trimble R12i je na voljo zgolj grafični odtis spektra v obliki slike za čas trajanja izmere, zato naknadna ponovitev ali poglobljena analiza motenj ni mogoča. Kljub navedenim razlikam so bile namerne motnje v vseh primerih zaznane z obema vrstama sprejemnikov, razlika pa se kaže predvsem v načinu prikaza, občutljivosti na jakost motenj ter možnosti njihove nadaljnje analize.

Zaključek

Geodetski sprejemniki GNSS so praviloma opremljeni z naprednimi algoritmi za nadzor kakovosti signalov in zato namerne motnje zaznajo zelo hitro. V številnih primerih se to odrazi v zavrnitvi opazovanj ali celo v začasni prekinitvi delovanja sprejemnika. Če do prekinitve ne pride, se prisotnost motenj pogosto pokaže v spektralnih meritvah kot tudi v nenormalno visokih vrednostih razmerja signal-šum (SNR), ki lahko dosega ali celo presegajo 60 dB-Hz (sumljive vrednosti do nad 55 dB-Hz). Takšne vrednosti bistveno odstopajo od običajnih vrednosti satelitskih signalov in so posledica nasičenja vhodnih stopenj sprejemnika ali vpliva močnih, širokopasovnih motilnih signalov.

Nizkocenovni sprejemniki GNSS takšnih zaščitnih in nadzornih mehanizmov večinoma nimajo, zato motenj ne zaznajo ali jih ne obravnavajo ustrezno, kar lahko vodi v navidežno nemoteno delovanje ob napadih na signale. Posledično je njihova uporabnost v okoljih z motnjami vprašljiva. Kljub temu pa je tudi pri takih sprejemnikih mogoče na podlagi časovnega in frekvenčnega vzorca pojavljanja motenj sklepati na značilnosti oddajanja motilne naprave in s tem prispevati k prepoznavanju vrste uporabljenega motilnika.

Tekom raziskave se je porodila ideja o možni nadgradnji sistema spremljanja motenj GNSS na postajah omrežij SIGNAL in 0. reda z nizkocenovnimi sprejemniki, ki bi bili namenjeni izključno zaznavanju in karakterizaciji motenj.

Tii sprejemniki zaenkrat ne vsebujejo agresivnih mehanizmov za zavrnitev motenih signalov, zaradi česar lahko v prisotnosti motenj še naprej zajemajo opazovanja. Posledično je iz njihovih podatkov analizirati časovni in frekvenčni vzorec motenj, intenziteto in trajanje motilnih signalov ter sklepati na vrsto uporabljene motilne naprave (npr. ozkopasovni ali širokopasovni motilniki). V kombinaciji z geodetskimi sprejemniki, ki motnje hitro zaznajo in zavrnejo, bi tak hibridni pristop omogočal tako zanesljivo določanje položaja ter sinhronizacijo časa kot tudi izboljšano zaznavanje in razumevanje motilnih pojavov.

Takšna rešitev bi bila stroškovno učinkovita, saj nizkocenovni sprejemniki predstavljajo majhen dodaten vložek, hkrati pa bi bistveno prispevali k razvoju kontinuiranega sistema za zgodnje zaznavanje in spremljanje motenj GNSS na ožjem ali širšem območju Slovenije.

Zahvale

Za podporo in sodelovanje pri obravnavani tematiki, predvsem pa za možnost izvedbe meritev namernih motenj, se iskreno zahvaljujemo Agenciji za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije (AKOS).

Raziskava je nastala v sklopu ciljnega raziskovalnega projekta »V2-2342: Care4SIGNAL: Ocena tveganja motenj signalov GNSS v državnem omrežju stalnih postaj GNSS SIGNAL«, ki sta ga v obdobju 1. 10. 2023 do 30. 9. 2025 sofinancirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Ministrstvo za naravne vire in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije.

Raziskava je nastala (tudi) v sklopu raziskovalnega programa »P2-0227 Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije«, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

- Bažec, M.; Dimc, F.; Pavlovčič-Prešeren, P. (2020). Evaluating the vulnerability of several geodetic GNSS receivers under chirp signal L1/E1 Jamming. *Sensors (Switzerland)* 2020, 20, doi:10.3390/s20030814.
- Borio, D.; Dovis, F.; Kuusniemi, H.; Lo Presti, L. (2016). Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. *Proc. IEEE* 2016, 104, 1233–1245, doi:10.1109/JPROC.2016.2543266.
- Bhunia, S.; Behzadan, V.; Regis, P.A.; Sengupta, S. (2016). Adaptive beam nulling in multihop ad hoc networks against a jammer in motion. *Comput. Networks* 2016, 109, 50–66, doi:10.1016/j.comnet.2016.06.030
- Dimc, F.; Pavlovčič-Prešeren, P.; Bažec, M. Operation of geodetic GNSS instruments under chirp signal L1 jamming. *Geod. Vestn.* 2021, 65, 189–204, doi:10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.189-204.
- Flightradar24 (2025). Spletna stran, <https://www.flightradar24.com/data/gps-jamming> Pridobljeno 4. 1. 2026.
- Goward, D. A. (2025) Kaliningrad jamming and spoofing up close. *Inside GNSS*, <https://insidegnss.com/kaliningrad-jamming-and-spoofing-up-close/>, spletna stran. Pridobljeno 4. 1. 2026.
- gpsjam (2025). Spletna stran, <https://gpsjam.org/>. Pridobljeno 4. 1. 2026.
- gpswise.aero (2025). Spletna stran, <https://gpswise.aero/map>. Pridobljeno 4. 1. 2026.

- Liu, Z.; Lo, S.; Walter, T. (2024). W: What has been learned recently about GNSS RF jamming and spoofing events? What tools are available online to track and investigate these events?, *Inside GNSS*, <https://insidegnss.com/q-what-has-been-learned-recently-about-gnss-rf-jamming-and-spoofing-events-what-tools-are-available-online-to-track-and-investigate-these-events/>, spletna stran. Pridobljeno 4. 1. 2026.
- Lomas, C. (2025). GPS jamming: the benign, the bad, and the scary. *Flightradar24*, <https://www.flightradar24.com/blog/inside-flightradar24/types-of-gps-jamming/> spletna stran. Pridobljeno 4. 1. 2026
- Mellor, T. (2025) Jamming and spoofing of GNSS and AIS signals. *Admiralty.com*, <https://www.admiralty.co.uk/news/jamming-and-spoofing>, spletna stran. Pridobljeno 4. 1. 2026.
- Pavlovčič-Prešeren, P.; Dimc. F.; Bažec, M. (2021). A comparative analysis of the response of GNSS receivers under vertical and horizontal L1/E1 chirp jamming. *Sensors*, 21, 1-24, doi:10.3390/s21041446.
- Pullen, S. (2025). GNSS spoofing and jamming in Eastern Europe. *Inside GNSS*, <https://insidegnss.com/gnss-spoofing-and-jamming-in-eastern-europe/>, spletna stran. Pridobljeno 5. 1. 2026.
- Wills, S. (2023). Kaliningrad: Impregnable Fortress or 'Russian Alamo'?, CNS indepth, Blog, spletna stran, <https://www.cna.org/our-media/indepth/2023/05/kaliningrad-impregnable-fortress-or-russian-alamo>. Pridobljeno 31. 12. 2025.

Seizmični odtis (nadzorovane) razstrelitve bombe iz druge svetovne vojne v Tržaškem zalivu na slovenskih potresnih opazovalnicah

Izidor Tasič*, Jurij Pahor*, Tamara Jesenko*

Povzetek

Nadzorovana detonacija neeksplodirane bombe iz druge svetovne vojne v Tržaškem zalivu 18. 10. 2025 je bila zaznana na večini potresnih opazovalnic v Sloveniji. Študija seizmičnih zapisov na bližnjih opazovalnicah je pokazala, da se je seizmični odtis detonacije nahajal na frekvenčnem območju med 0,75 Hz in 20 Hz in, da je zapis okvirno sestavljen iz treh različnih frekvenčnih območij. Povečana energija v nizkofrekvenčnem območju (med 0,75 Hz in 2 Hz) je posledica površinskih valov. V frekvenčnem pasu med okvirno 2 Hz in 7 Hz so zanimivi izraziti lokalni minimumi v spektru, ki so bili enako zaznani na različnih potresnih opazovalnicah ne glede na njihovo oddaljenost in azimut glede na vir. Tretje območje zajema višje frekvence, nad 7 Hz, in odraža direktne telesne valove, predvsem P valove.

Ključne besede: plitvomorska eksplozija, resonanca sedimentov, seizmični spektri, Scholtejevi valovi.

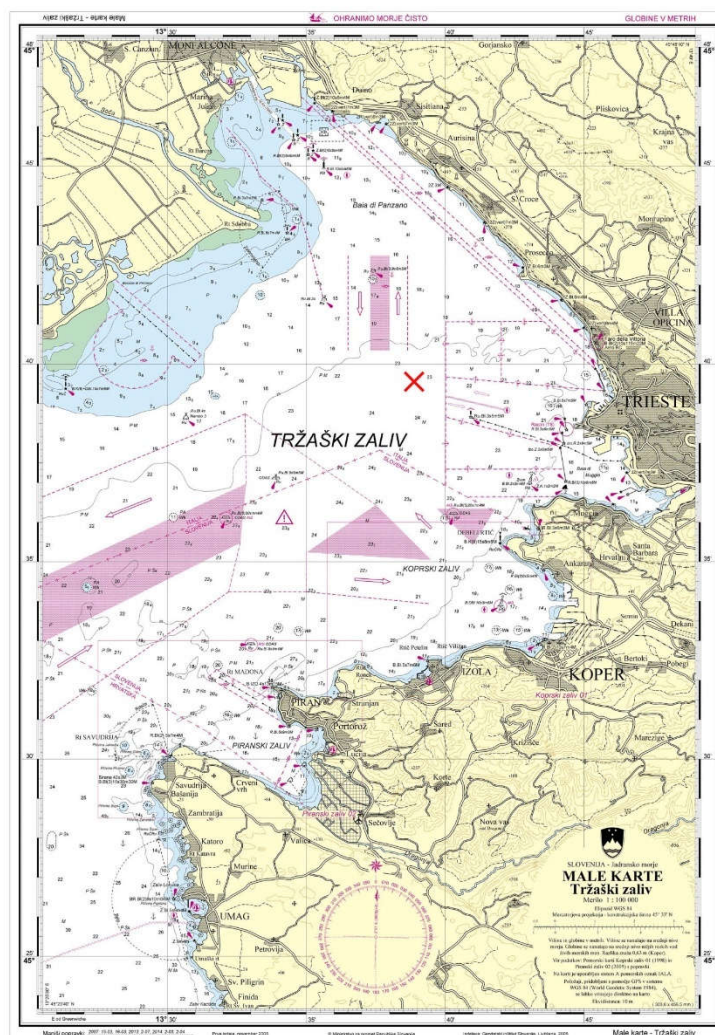
Uvod

18. oktobra 2025 je bila v Trstu izvedena nadzorovana nevtralizacija in detonacija neeksplodirane bombe iz druge svetovne vojne.

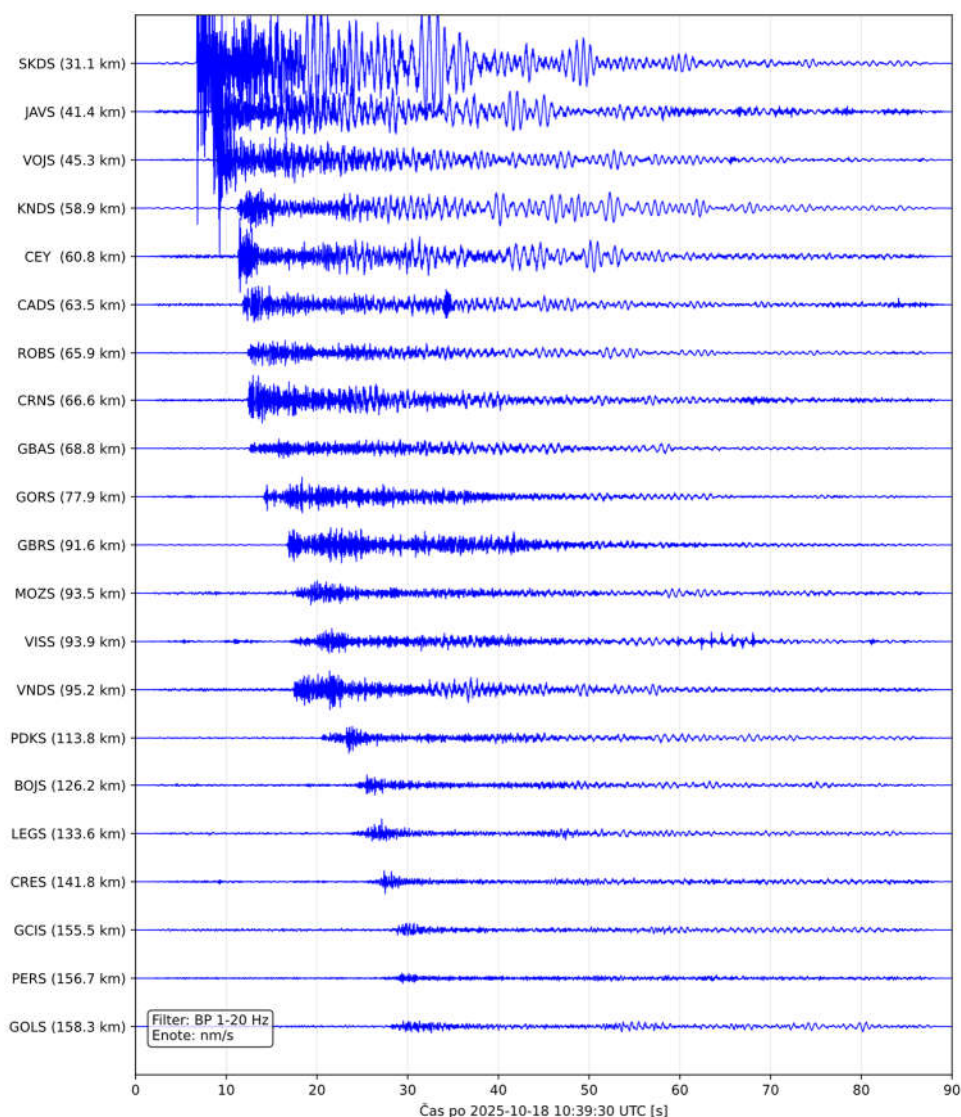
Med drugo svetovno vojno, med letoma 1943 in 1945, je bilo na mesto Trst in njegovo pristanišče odvrženih na tisoče bomb. Velik delež, po ocenah do 20 %, zaradi mehanskih okvar ali mehkih tal ni eksplodiral. Številne izmeh teh so po vojni ostale zakopane v zemlji ali potopljene v pristanišču. Ob gradbenih delih, predvsem ob poglobljanju pristanišča in drugih infrastrukturnih delih, še danes naletijo na kakšno izmed njih. Tako so med gradbenimi deli za širitev železniške infrastrukture v pristaniškem območju Porto Nuovo, blizu železniške postaje Porto, odkrili neeksplodirano ameriško letalsko bombo AN-M64A1, težko približno 226 kg, napolnjeno z 119,75 kg TNT. Imela je dve vžigalni napravi (Comune di Trieste, 2025).

Nevtralizacija in uničenje bombe je bila določena za 18. oktobra 2025. Tega dne so v jutranjih urah najprej evakuirali kakih 1.000 prebivalcev iz območja približno 500 m okoli mesta najdene bombe. Po odstranitvi vžigalnikov ob 8.40, ko se je bomba še nahajala znotraj zaščitne jeklene konstrukcije, so se lahko prebivalci vrnili na svoje domove. Bombo so nato prepeljali do obale, italijanska mornarica pa jo je odpeljala na odprto morje približno 7 km od obale in jo potopila v globino 6 metrov (slika 1). Ob 12.39 po lokalnem času so bombo razstrelili. Eksplozija je bila dovolj močna, da so jo zabeležile vse širokopasovne potresne opazovalnice slovenske mreže (slika 2).

* Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana



Slika 1: Položaj detonacije bombe v Tržaškem zalivu je označen s simbolom X.



Slika 2: Zapis eksplozije na izbranih širokopasovnih potresnih opazovalnicah slovenske mreže. Čas na abscisi je v sekundah po času detonacije. V oklepajih so izpisane oddaljenosti opazovalnic od mesta detonacije.

Eksplोजija v morju

Ob detonacijah eksplozivnih naprav na zemeljski površini oziroma v zemeljski notranjosti je zapis seizmičnega signala na bližnjih potresnih opazovalnicah relativno preprost. Nevešč opazovalec ga lahko celo zamenja za potres. Drugače pa je z eksplozijami v morju. Bombe lahko v morju eksplodirajo v različnih globinah. Ko se eksplozivna snov detonira v globoki vodi (> 200 m), nastane zelo vroča plinska zmes, ki ima izjemno visok tlak v primerjavi z okoliško vodo (Wielandt, 1975). Ker je tlak znotraj eksplozivnega oblaka mnogo večji od tlaka okolice, začne plinska masa hitro širiti vodo okoli sebe. Voda je skoraj nestisljiva, zato se energija prenese v obliki udarnega vala, ki ga potresne opazovalnice zaznajo kot impulz. Zaradi velike globine se udarni val na površini morja komaj pozna. Hkrati z udarnim valom nastane na mestu eksplozije votlina (mehur), napolnjena s plini. Ko se mehur razširi, se njegov notranji tlak zmanjša, medtem ko zunanji

tlak vode ostane visok. To povzroči, da se mehurček začne krčiti, nato pa spet širiti – nastane oscilacija. Ta pojav se imenuje Rayleigh–Plessetova oscilacija in lahko traja več ciklov, dokler se energija ne porazdeli. V globoki vodi je mehurček sferičen in ni bistveno omejen z bližino prostih površin ali trdnih mej. Če je eksplozija bližje površju, a še vedno v globoki vodi, se zaradi nižjega tlaka plinski mehurč bolj razširi. Zato je več oscilacij, kar povzroči tudi močne sekundarne udarne valove (Wielandt, 1975, Heyburn in dr, 2018) . Več energije se sprosti tudi v obliki vodnega curka in dviga vode nad površino. Če pa je eksplozija na dnu plitkega morja, nastali mehurček ne more biti simetričen, ker ga omejuje morsko dno, ampak je usmerjen proti površini (He in dr., 2023). Posledica je velik vodni curek (vodni stolp). Tako tudi ni oscilacije mehurčka. Udarni val pa se širi predvsem horizontalno po vodi kot tlačni oziroma kompresijski valovi in skozi morsko dno, kjer se razširjajo kot P (vzdolžni) in S (prečni) valovi. Na meji med vodo in morskim dnem nastanejo še elastični valovi, ki so ujeti na meji med trdno snovjo (dnom) in vodo ter se gibljejo vzdolž površine morskega dna. To so Scholtejevi valovi (Scholte, 1947), katerih hitrost je manjša kot je hitrost zvoka v vodi. Na seizmogramih bližnjih potresnih opazovalnic bi tako zapis detonacije na dnu plitkega morja lahko razdelili na tri frekvenčna območja. Začetek detonacije dominira v visokofrekvenčnem delu spektra. Območje z nekoliko nižjimi frekvencami naj bi bile posledice nihanja mehurja (bubble oscilation), nizkofrekvenčni del spektra pa pripada površinskim valovom.

Seizmični odtis razstreljevanja v Tržaškem zalivu

V obravnavanem primeru se je detonacija bombe zgodila na globini nekaj metrov v delu morja, ki ima, sodeč po pomorski karti, globino dna 23 m. Potresna opazovalnica SKDS je lokaciji detonacije najbližje, oddaljena je 31 km. Spektrogram seizmičnega valovanja je za vse tri komponente (EW - vzhod-zahod, NS - sever-jug, Z - navpična) podoben in razkriva tri območja frekvenc, ki pripadajo različnim valovanjem (slika 3). S polnimi črtami so prikazani spektri zapisa detonacije, s črkanimi pa spektri enako dolgega zapisa seizmičnega šuma eno uro pred detonacijo. Iz tega razberemo, da se seizmični odtis detonacije na potresni opazovalnici SKDS nahaja v frekvenčnem območju med 0,75 Hz in 20 Hz in ga lahko razdelimo na tri frekvenčne pasove, s katerimi je tudi filtriran zapis valovanja Z komponente SKDS (slika 4).

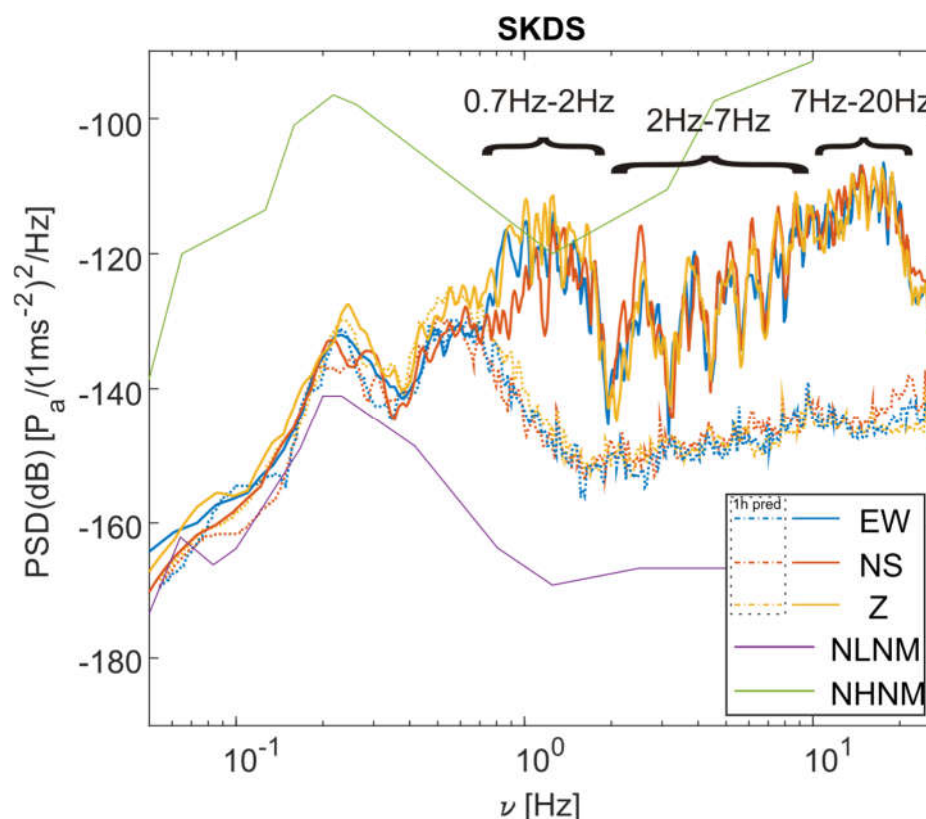
Območje med 7 Hz in 20 Hz vsebuje spekter telesnih valov, predvsem vzdolžnih (P). Večkratno nihanje plinskega mehurja (harmoniki mehurčka) zaradi plitke globine eksplozije ni nastalo. Nad 20 Hz so na tej razdalji signali iz lokacije detonacije že močno zadušeni.

Območje med 0,75 Hz in 2 Hz je dolgo-periodni del spektra detonacije, ki je v veliki meri kombinacija površinskih Rayleighevih valov, ki so posledica pretvorbe tako Scholtejevih valov, kot prostorskih valov in reflektiranih prostorskih valov. V spektrogramu je to območje brez izrazitih dolin. Eksplozija v plitki vodi učinkovito generira Scholtejeve valove na meji voda–sediment, ki se nato širijo vzdolž morskega dna in se delno pretvarjajo v Rayleigheve površinske valove ter v vodeno valovanje znotraj sedimentnega sloja. Mehanizem vodi do selektivnega ojačenja energije v pasu približno 0,5–2 Hz, kar je skladno z opazovanim povečanim spektrom v tem frekvenčnem območju. Določen del signala na tem območju lahko prispeva tudi T faza, ki je posledica pretvorbe akustičnega valovanja, ki potuje v morju, v seizmičnega, najverjetneje na strmejših obalah Devinskega območja, a je to fazo težko izolirati od ostalih.

Območje med 2 Hz in 7 Hz je zelo zanimivo, saj tam v spektrogramu zasledimo več frekvenčnih pasov, ki jih ločujejo izraziti minimumi. Za boljše razumevanje tega pojava

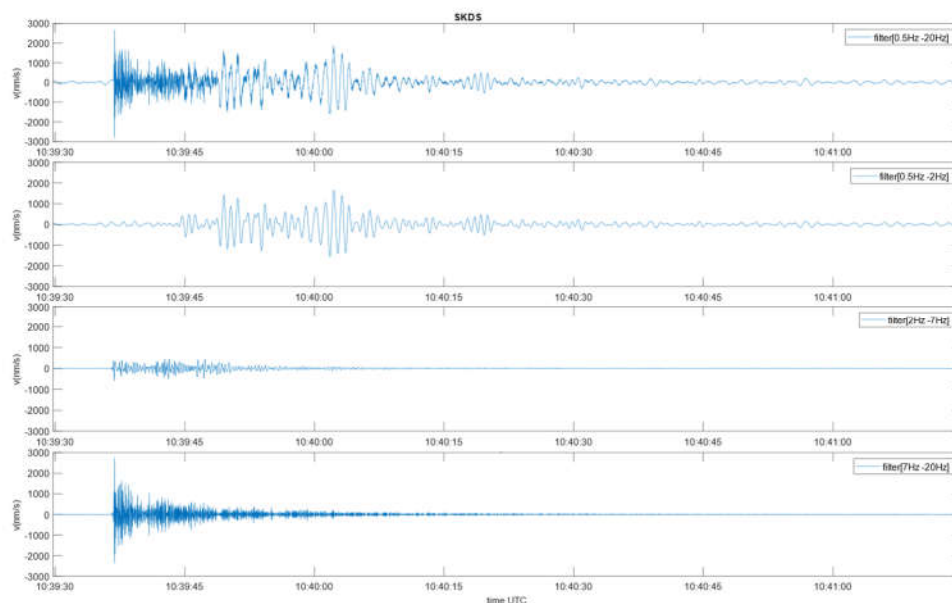
smo združili spektre navpičnih komponent opazovalnic SKDS, JAVS in VOJS na isti graf (slika 5). V obravnavanem frekvenčnem območju opazimo veliko podobnost med njimi, predvsem pa, da so minimumi na istih mestih. Glede na to, da se valovanje do teh opazovalnic širi v različnih smereh (slika 6), sklepamo, da je izvor teh minimumov v neposredni bližini detonacije in je lahko posledica resonance v sedimentih. To pomeni, da obstaja tanka sedimentna plast pod lokacijo detonacije, pod katero je plast z izrazito drugačno seizmično impendanco, kar potrjujejo tudi raziskave (Trobeć in dr., 2018).

Analiza seizmičnega dogodka z znano točno lokacijo je hkrati dober preizkus modelov razširjanja potresnega valovanja. S programsko opremo za analizo seizmogramov smo odčitali vstopne čase P valov ter s hitrostnim modelom, ki ga uporabljamo tudi za redno analizo seizmične aktivnosti, določili lokacijo in čas dogodka. Tako določena lokacija je premaknjena za 380 m od lokacije, ki so jo sporočile italjanske pomorske oblasti, kar štejemo za zelo dobro ujemanje.

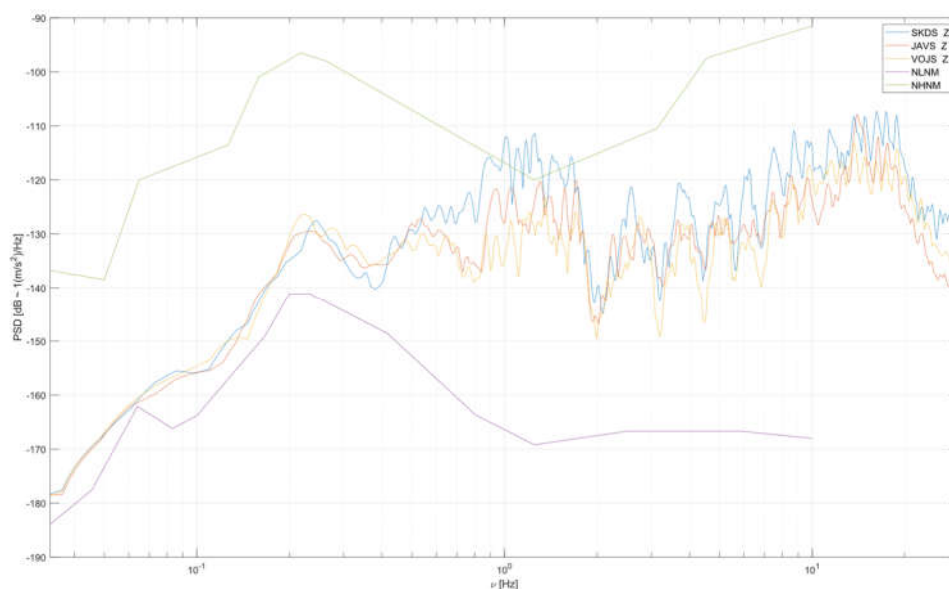


Slika 3: Spektri dveh tri-komponentnih seizmičnih zapisov na potresni opazovalnici SKDS (EW - modra, NS - rdeča, Z - rumena). S polno črto so prikazani spektri zapisa detonačije bombe, s črtkano pa spektri enako dolgega seizmičnega zapisa eno uro pred detonacijo.

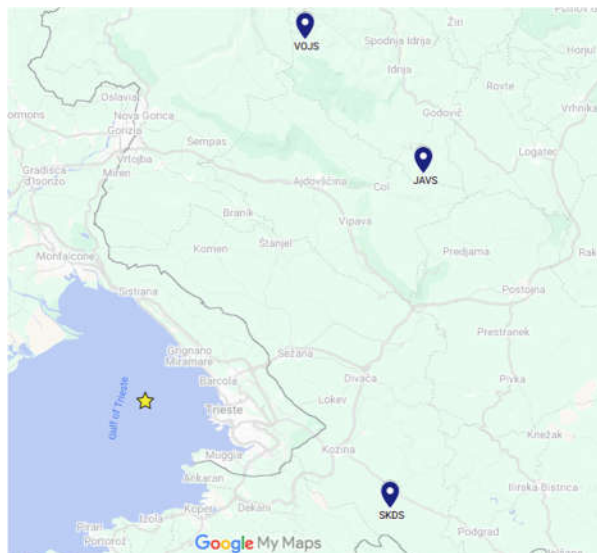
Zelena in vijolična črta označuje spodnjo in zgornjo mejo modela seizmičnega šuma.



Slika 4: Seizmični zapis detonacije (zgornja slika), ter filtrirani zapisi v različnih frekvenčnih območjih: med 0,5 Hz in 2 Hz (druga z vrha), med 2 Hz in 5 Hz (tretja z vrha) in med 5 Hz in 20 Hz. Spodnji zapis predstavlja seizmični odtis detonacije bombe direktnih prostorskih valov.



Slika 5: Spekter zapisa detonacije navpične komponente na potresnih opazovalnici SKDS, JAVS in VOJS. Izstopa frekvenčno območje 2–7 Hz z izrazitimi minimumi, ki sovpadajo na vseh zapisih.



Slika 6: Položaji najbližjih potresnih opazovalnic Državne mreže potresnih opazovalnic. Potresna opazovalnica SKDS je od mesta detonacije, ki je označeno z rumeno zvezdo, oddaljena 31 km, potresna opazovalnica JAVS 41 km in potresna opazovalnica VOJS 45 km.

Zaključek

Seizmični zapis kontrolirane detonacije letalske bombe v plitki vodi severnega Tržaškega zaliva se razlikuje od podobnih zapisov, ko je izvor na kopnem in je bistveno bolj zapleten. Ta zapis je tudi enkratna priložnost za študij prehoda seizmičnih valov do potresnih opazovalnic, saj natančno poznamo lokacijo seizmičnega izvora.

Primerjava spektrov (PSD-jev) tri-komponentnih seizmičnih zapisov detonacije iz potresnih opazovalnic SKDS, JAVS in VOJS razkriva stabilne in podobne spektralne značilnosti, zlasti lokalne minimume v frekvenčnem pasu med približno 2 in 7 Hz. Ključna ugotovitev je, da se ti spektralni minimumi pojavljajo na istih frekvencah na vseh lokacijah, kljub različni oddaljenosti in azimutni legi glede na vir, kar potrjuje razlago, da gre za lokalne učinke v bližini izvora.

Opazovana spektralna struktura je skladna z geološko zgradbo Tržaškega zaliva, kjer karbonatno podlago prekriva več deset metrov debeli kvartarni sediment z nizkimi hitrostmi strižnih valov.

Literatura

- Comune di Trieste, 2025. Bomba inesplosa in porto, l'ordinanza di evacuazione della popolazione per sabato 18 ottobre 2025. <https://www.comune.trieste.it/it/novita-227102/comunicati-227104/bomba-inesplosa-in-porto-lordinanza-di-evacuazione-della-popolazione-per-sabato-18-ottobre-2025-312440> (20. 10. 2025)
- He, M., Zhang, S., Wang, S., Jin Z., Sagar H., 2023: A refined numerical investigation of a large equivalent shallow-depth underwater explosion. AIP Advances 1 July 2023; 13 (7): 075016. <https://doi.org/10.1063/5.0156558>

- Heyburn R., Nippess. E. J. S., BowersD.: Seismic and Hydroacoustic Observations from Underwater Explosions off the East Coast of Florida, BSSA (2018) 108 (6): 3612–3624.
- Scholte, J.G., 1947: "The range and existence of Rayleigh and Stoneley waves". *Geophysical Journal International*. 5: 120–126. Bibcode:1947GeoJ....5..120S. doi:10.1111/j.1365-246X.1947.tb00347.x.
- Trobec, A., Busetti, M., Zgur, F., Baradello, L., Babich, A., Cova, A., Gordini, E., Romeo, R., Tomini, I., Poglajen, S., Diviacco, P., and Vrabec, M., 2018: Thickness of marine Holocene sediment in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea), *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1077–1092, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1077-2018> Dostopno na <https://essd.copernicus.org/articles/10/1077/2018/essd-10-1077-2018.html>
- Wielandt, E., 1975: Generation of Seismic Waves by Underwater Explosions, *Geophysical Journal International*, Volume 40, Issue 3, March 1975, Pages 421–439, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb04140.x>

Vzpostavitev geokinematskega modela Slovenije

Bojan Stopar¹, Klemen Ritlop¹, Polona Pavlovčič Prešeren¹, Marko Vrabec², Oskar Sterle¹

Povzetek

Državni koordinatni sistem mora biti dovolj visoke kakovosti, da zagotavlja kakovostno in nemoteno delovanje vseh družbenih sistemov, tudi tistih z najvišjimi zahtevami glede kakovosti pozicioniranja v prostoru. Državni prostorski koordinatni sistem Republike Slovenije je realizacija evropskega prostorskega referenčnega sistema ESRS (European Spatial Reference System) na ozemlju Slovenije. Sestavljata ga horizontalna sestavina z oznako D96-17 in višinska sestavina z oznako SVS2010/Koper. Na horizontalno sestavino je vezan državni ravninski koordinatni sistem z oznako D96-17/TM.

Dejavnik, ki v Sloveniji bistveno vpliva na kakovost državnega koordinatnega sistema, je precej aktivna geotektonika. Nekateri deli države se, relativno glede na druge, premikajo s hitrostjo do okoli štiri milimetre na leto. Izpolnitev zahteve po visoki točnosti pozicioniranja v takšnih razmerah ni mogoča statičnim koordinatnimi sistemi, temveč le s t.i. polkinematičnimi ali kinematičnimi koordinatnimi sistemi, pri katerih je zagotavljanje kakovosti koordinatnega sistema na dolgi rok, mogoče le ob poznavanju in upoštevanju geokinematike državnega ozemlja. Glede na poznavanje geokinematike slovenskega ozemlja in preteklih raziskovalnih aktivnosti poteka v okviru mehanizma Načrt za okrevanje in odpornost, na razvojnem področju Digitalna preobrazba v okviru projekta Zeleni slovenski lokacijski okvir (SLO4D) vzpostavitev idejne zasnove bodočega novega državnega koordinatnega sistema, ki bo vključeval časovno sestavino, ki jo bo predstavljal državni geokinetmatski model. V prispevku predstavljamo vzpostavitev trirazsežnega geokinematskega modela, ki bo predstavljal sestavni del državnega koordinatnega sistema Republike Slovenije. Predstavljamo postopke, ki so vodili do vzpostavitve prostorskega geokinematskega modela, na osnovi podatkov meritev stalno delujočih postaj GNSS v državnih omrežjih postaj GNSS. Geokinetmatski model Slovenije je izdelan v obliki trirazsežnega zveznega vektorskega polja, ki ga sestavljata dva ločena modela – horizontalni in vertikalni, v obliki hitrosti premikov v horizontalni in vertikalni smeri v celični mreži, z velikostjo celice 10 km. Za določitev obeh geokinetmatskih modelov smo uporabili kolokacijo po metodi najmanjših kvadratov.

Ključne besede: državni koordinatni sistem, geokinetmatski model, omrežje postaj GNSS

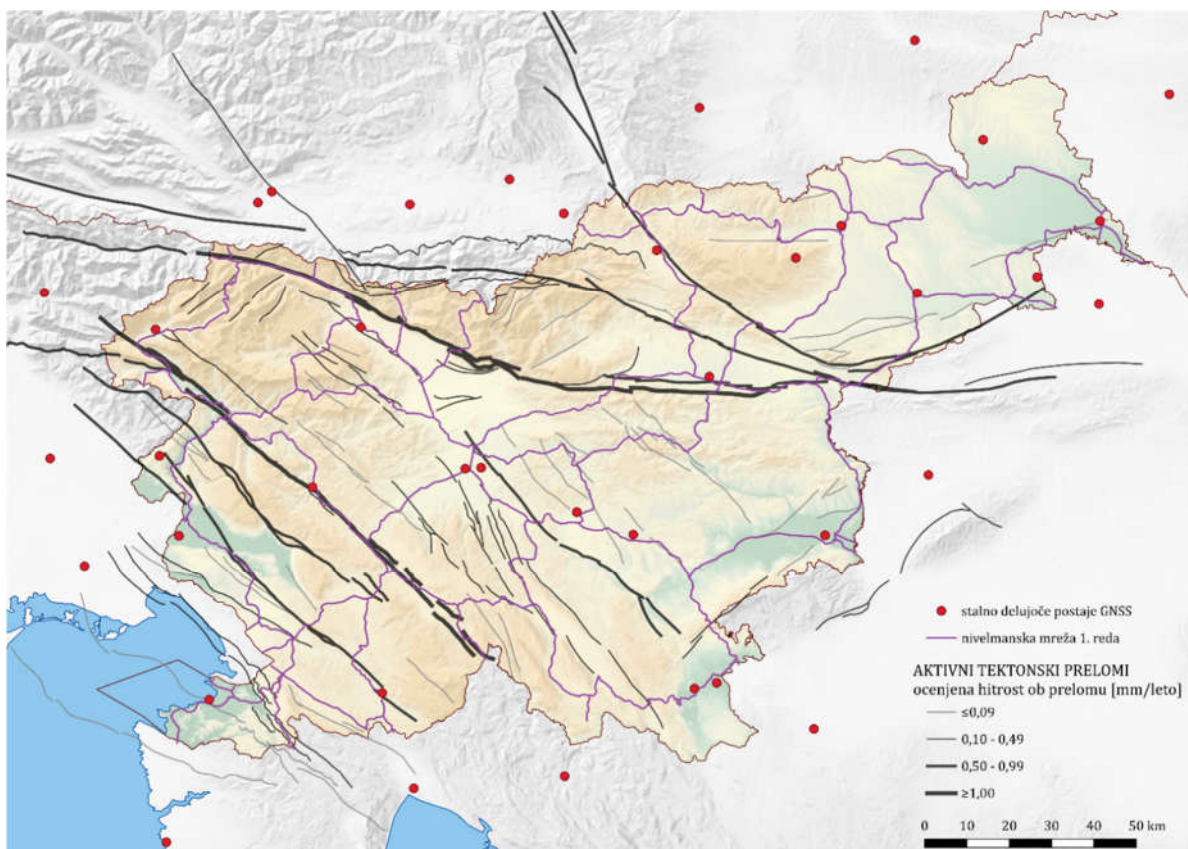
Kratek pregled raziskav geodinamike na območju Slovenije

Eden ključnih dejavnikov geodinamike na območju Slovenije je premikanje Jadranske mikroplošče. Pretekle študije so poskušale določiti njeno gibanje glede na Evrazijo, vendar so bile pridobljene ocene precej nezanesljive zaradi omejene razpoložljivosti kakovostnih podatkov. Z vključitvijo GNSS-opazovanj s širšega območja Slovenije in Istre je bilo ugotovljeno gibanje mikroplošče v smeri S–SZ proti J–JV s hitrostjo 2–4 mm/leto (Weber et al., 2010). V geodinamske raziskave v Alpah so bile vključene tudi geodetske meritve (Serpelloni et al., 2013; Serpelloni et al., 2016), vendar pomanjkanje podatkov omejuje boljše razumevanje mehanizmov, ki povzročajo aktivne deformacije na območju Slovenije. Značilni horizontalni premiki so bili zabeleženi vzdolž Periadriatskega prelomnega sistema (Métois et al., 2015) in v osrednji Sloveniji, kjer so bile neotektonske deformacije potrjene v območju Posavskih gub (Placer, 1998; Tomljenović in Csontos, 2001). Medtem ko odsotnost zaznanih

¹ UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

² UL, Naravoslovno tehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, Ljubljana

recentnih tektonskih premikov vzdolž Idrijskega preloma kaže na to, da je prelom verjetno trenutno zaklenjen in prihaja do premikov vzdolž preloma predvsem ob potresih (Vičič et al., 2019), je ob Savskem prelomu izkazano stalno horizontalno premikanje s hitrostjo približno 1 mm/leto (Jamšek Rupnik et al., 2012).



Slika 1 - Karta aktivnih tektonskih prelomov z ocenjenimi horizontalnimi hitrostmi ob prelomih

Zgodovinske nivelmanske izmere iz obdobja Avstro-Ogrske so omogočile določitev vertikalnih premikov na območju Slovenije, pri čemer se ocenjene hitrosti gibajo med 0,5 in 2 mm/leto (Rožič et al., 2011). Koler in sodelavci (Koler et al., 2006) so na podlagi ponovljenih nivelmanskih meritev preučili vertikalne premike in hitrosti vzdolž nivelmanskih poligonov državne nivelmanske mreže, ki se pogosto ujemajo z lokacijami tektonskih prelomov. Rezultati potrjujejo tektonsko pogojene deformacije v višinskem smislu (Rižnar et al., 2005).

Dosedanje raziskave aktivne tektonike na območju Slovenije so predstavljene na karti aktivnih tektonskih prelomov z ocenjenimi horizontalnimi hitrostmi premikov vzdolž prelomov, ki jo prikazujemo na sliki 1. Karta je prirejena po gradivih partnerjev na projektu SLOKIN-geokinematski model ozemlja Slovenije (Stopar et al. 2021). Na sliki 1 vidimo, da so hitrosti horizontalnih premikov ob prelomih velikosti do pribl. 1 mm/leto.

Geodetski razlogi za vzpostavitev geokinematskega modela države

Aktivni tektonski procesi na območju Slovenije povzročajo zaznavne deformacije površja. Ti premiki niso enakomerno porazdeljeni v prostoru, saj so pogojeni z lego, orientacijo in geometrijo posameznih tektonskih struktur.

Hitrosti deformacij so na območju Slovenije dovolj velike, da jih je mogoče zanesljivo zaznati s sodobnimi geodetskimi metodami in opazovalnimi tehnikami. Hkrati so ti premiki tako veliki, da vplivajo na prostorsko-časovno stabilnost realizacije državnega geodetskega koordinatnega sistema. Zato jih je potrebno poznati ter na njihovi podlagi vzpostaviti geokinematski model, ki bo omogočal dolgoročno točno in stabilno realizacijo koordinatnega sistema. Geokinematski model je matematični in geodetski model, namenjen opisu in napovedovanju časovnih sprememb položajev točk na Zemeljski površini kot posledice aktivnih tektonskih premikov. Z geodetskega vidika predstavlja geokinematski model enega ključnih gradnikov sodobnega, natančnega in prostorsko-časovno stabilnega državnega referenčnega koordinatnega sistema.

Podatki za določitev geokinematskega modela na območju Slovenije

Za vzpostavitev geokinematskega modela smo uporabili opazovanja 44 stalno delujočih postaj GNSS na območju Slovenije in njene neposredne okolice, ki so vključene v omrežje SIGNAL in državno kombinirano geodetsko mrežo 0. reda. Na osnovni dolgoletnih opazovanj GNSS smo določili dnevne koordinate, vzpostavili časovne vrste koordinat ter določili vektorje hitrosti stalno delujočih postaj GNSS. V državno kombinirano geodetsko mrežo je vključenih 5 točk, na katerih je skupaj 9 postaj GNSS, v državno omrežje SIGNAL je vključenih 33 postaj z območja Republike Slovenije in sosednjih držav: 16 postaj z ozemlja Slovenije, 3 postaje z ozemlja Republike Italije, 7 postaj z ozemlja Republike Avstrije, 1 postaja z ozemlja Republike Madžarske in 6 postaj z ozemlja Republike Hrvaške. Dodatno smo uporabili tudi podatke postaje GNSS na stavbi UL FGG, na kateri se nahaja ena postaja GNSS z dvema sprejemnikoma GNSS, ki obdelujeta signale ene antene GNSS.

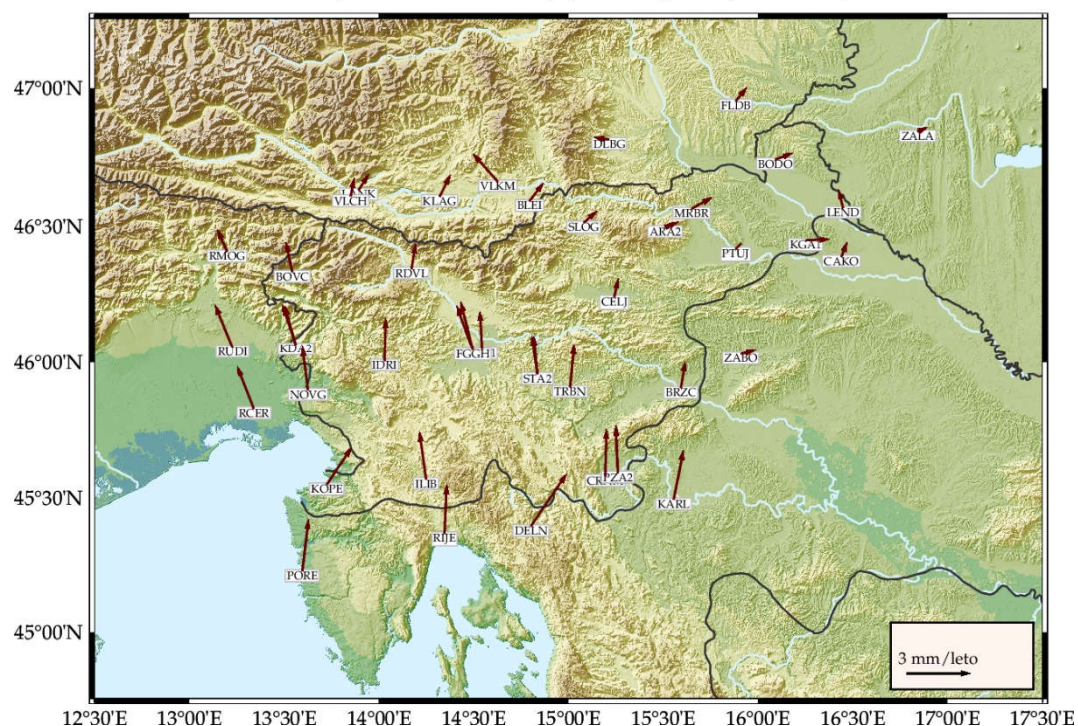
Določitev dnevnih koordinat je potekala po priporočilih analiznih centrov EPN in IGS, geodetski datum je bil zagotovljen z vključitvijo številnih stalnih postaj GNSS omrežja EPN, za katere imamo dane kakovostno določene koordinate in vektorje hitrosti (Legrand 2022), (EPN DISC, 2022). Po določitvi koordinat postaj GNSS na dnevni osnovi in vzpostavitvi časovnih vrst koordinat smo za vsako postajo GNSS določili nezveznosti v časovnih vrstah ter iz časovnih vrst koordinat odstranili periodične signale z letno in polletno periodo. Na osnovi tako »urejenih« časovnih vrst smo določili koordinate in hitrosti sprememb koordinat 44 postaj GNSS v terestričnem referenčnem sestavu ETRF2000 za epoho 2016.75 s pripadajočimi informacijami o natančnosti. Na sliki 2 prikazujemo horizontalne vektorje hitrosti in na sliki 3 horizontalne vektorje hitrosti v ETRF2000.

Podatki za določitev geokinematskega modela Republike Slovenije

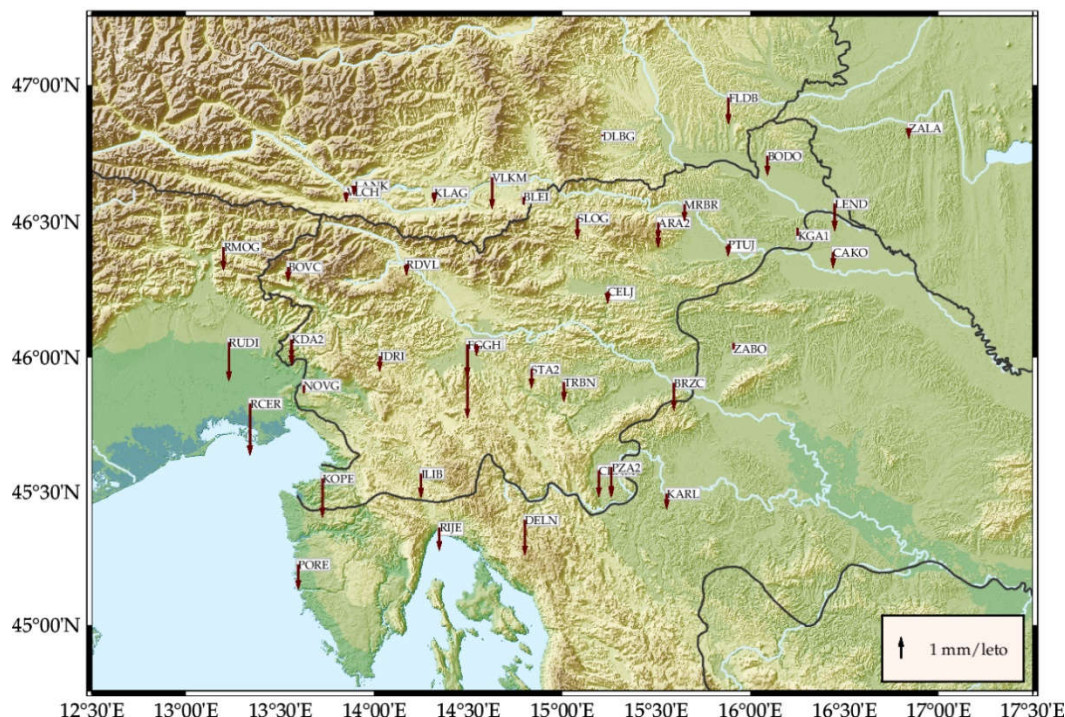
Za določitev geokinematskega modela smo uporabili geodetske koordinate $(\varphi, \lambda, h)_{ETRF2000(2016.75)(GRS-80)}$ in pripadajoče vektorje hitrosti $(v_\varphi, v_\lambda, v_h)_{ETRF2000(GRS-80)}$ postaj GNSS v referenčnem sestavu ETRF2000, v referenčni epohi 2016,75. Glede na to, da je velikost (površina) ozemlja/območja, za katero vzpostavljamo geokinematski model, razmeroma majhna, smo, brez izgube kakovosti, vzpostavili horizontalni geokinematski model na osnovi ravninskih koordinat in njim pripadajočih hitrosti v ravninskem koordinatnem sistemu prečne Mercatorjeve projekcije TM. Geodetske koordinate $(\varphi, \lambda)_{ETRF2000(2016.75)(GRS-80)}$ in pripadajoče hitrosti $(v_\varphi, v_\lambda)_{ETRF2000(GRS-80)}$ smo tako

preračunali v ravninske koordinate $(n, e)_{ETRF2000-TM(GRS-80)}$ in vektorje hitrosti v ravnini projekcije $(v_n, v_e)_{ETRF2000-TM(GRS-80)}$. Za določitev vertikalnega geokinematskega modela smo uporabili elipsoidne višine $(v_h)_{ETRF2000(GRS-80)}$ in pripadajoče vertikalne hitrosti elipsoidnih višin $(v_h)_{ETRF2000(GRS-80)}$ postaj GNSS, skupaj s kovariančnimi matrikami koordinat in hitrosti.

Analiza delovanja GNSS omrežij (stalne postaje GNSS) / ETRF2000



Slika 2 - Vektorji hitrosti stalno delujočih postaj GNSS niza Vektorji-2024 v ETRF2000 (horizontalna komponenta)



Slika 3 - Vektorji hitrosti stalno delujočih postaj GNSS niza Vektorji-2024 v ETRF2000 (višinska komponenta)

Srednje vrednosti hitrosti sprememb koordinat 44 postaj GNSS znašajo $\mu_{vn} = 1.3427$ mm/leto, $\mu_{ve} = 0.1123$ mm/leto in $\mu_{vh} = 0.9618$ mm/leto, standardni odkloni hitrosti pa $\sigma_{vn} = 0.7881$ mm/leto, $\sigma_{ve} = 0.5942$ mm/leto in $\sigma_{vh} = 0.6711$ mm/leto.

Formalni standardni odkloni hitrosti koordinat za vseh 44 postaj GNSS, določeni na osnovi časovnih vrst so za vse hitrosti (zaokroženi na dve decimalni mesti milimetra na leto), enaki nič. Glede na ničelne standardne odklone hitrosti sprememb koordinat smo morali oceniti dejansko natančnost (standardne odklone) hitrosti sprememb koordinat. Avtorji (Steffen et al. 2025, 2022) navajajo dejanske standardne odklone hitrosti horizontalnih koordinat in višin, določene na osnovi dnevnih koordinat in časovnih vrst koordinat, za obe horizontalni komponenti hitrosti $0.1 \text{ mm/leto} \leq (v_\phi, v_\lambda) \leq 0.2 \text{ mm/leto}$ in za vertikalne hitrosti

$0.3 \text{ mm/leto} \leq (v_h) \leq 0.4 \text{ mm/leto}$.

Z upoštevanjem navedene informacije ter na osnovi lastnih izkušenj z določitvijo dnevnih koordinat postaj GNSS, vzpostavitev časovnih vrst koordinat, postopkov določitve hitrosti koordinat, dolžine časovnih vrst koordinat ter na osnovi dejanske natančnosti določitve hitrosti za vsako izmed 44 postaj GNSS smo določili empirične standardne odklone horizontalnih/ravninskih koordinat in višin. Na osnovi subjektivne ocene, vendar z upoštevanjem navedenega, smo tako določili standardne odklone hitrosti ravninskih koordinat postaj GNSS v območju $0.15 \text{ mm/leto} \leq \sigma_{ve} = \sigma_{vn} \leq 0.5 \text{ mm/leto}$ in $0.3 \text{ mm/leto} \leq \sigma_{vh} \leq 1.0 \text{ mm/leto}$ za višine.

Pri kolokaciji po metodi najmanjših kvadratov obravnavamo opazovanja (vektorje hitrosti) kakor, da sestavljena iz signala in slučajnega šuma. Navedeni standardni odkloni hitrosti sprememb koordinat predstavljajo podatek o velikosti slučajnega šuma, ki ga potrebujemo za

sestavo kovariančne matrike slučajnega šuma. Kovariančne matrike signala določimo na osnovi kovariančne funkcije posameznih komponent hitrosti, ki predstavljajo odvisnost hitrosti od medsebojne oddaljenost točk. Kovariančne funkcije signala določimo empirično, na osnovi danih podatkov.

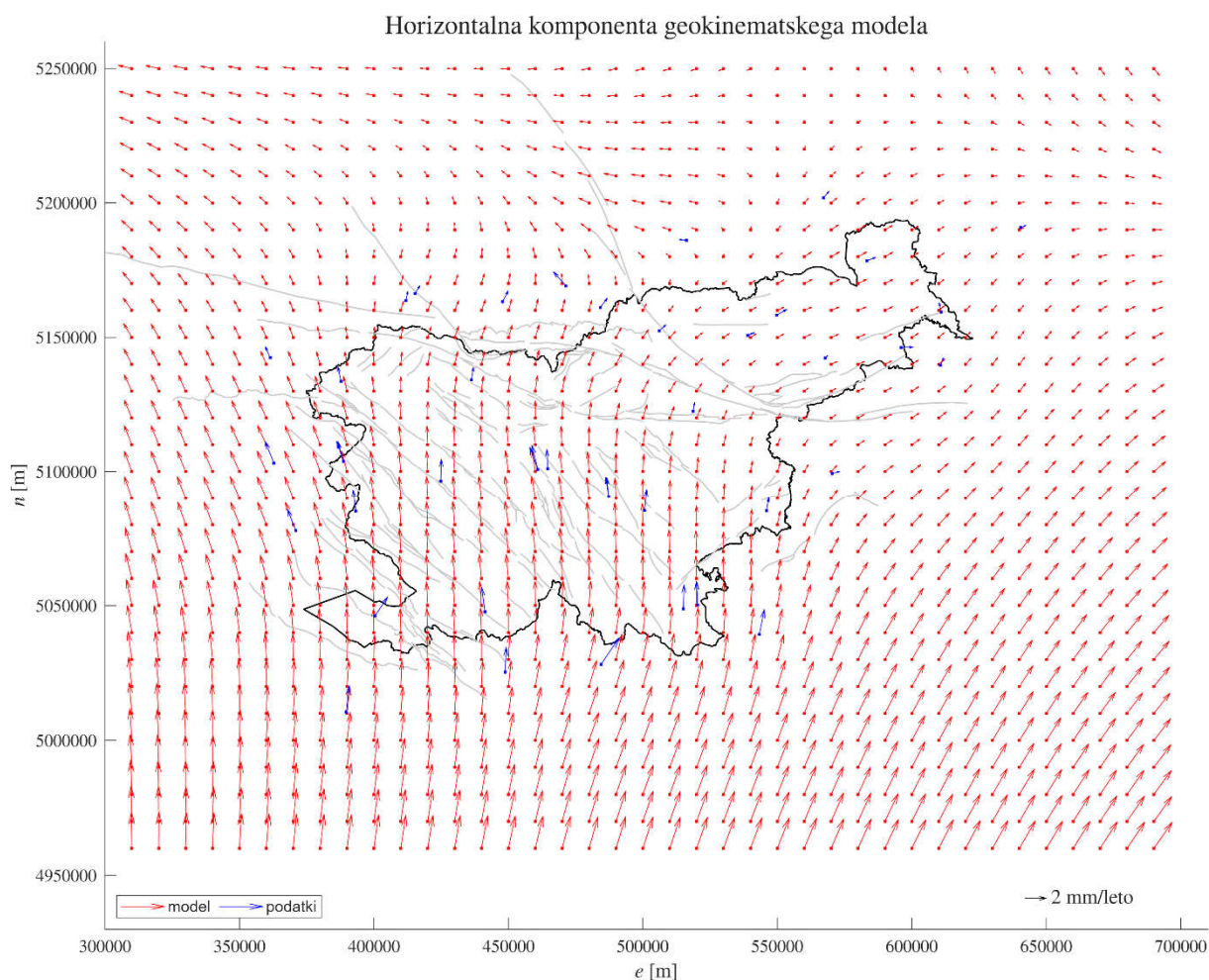
Pri določitvi obeh geokinematskih modelov smo uporabili kovariančno funkcijo

$KF = e^{-\frac{d^2}{(kd)^2}}$, kjer je d medsebojna oddaljenost točk in (kd) karakteristična razdalja. Za vrednost karakteristične razdalje smo za obe komponenti horizontalnih in tudi vertikalnih hitrosti uporabili dolžino $(kd) = 50$ km.

Določitev horizontalnega geokinematskega modela

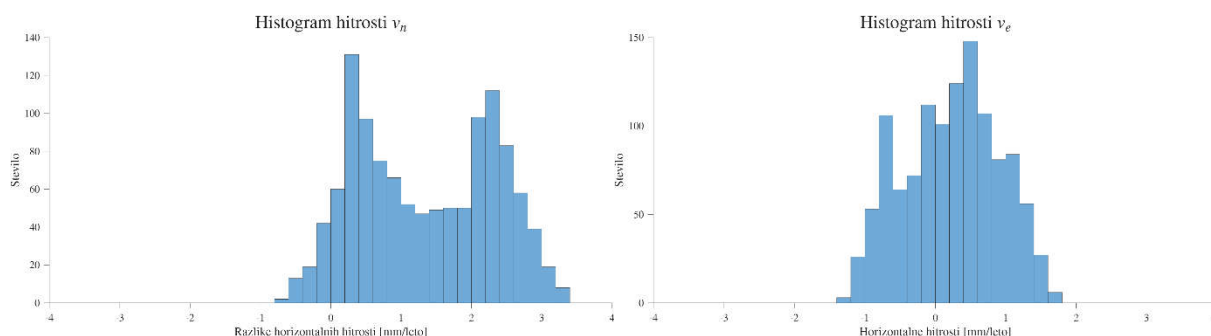
Horizontalni geokinematski model smo določili pod predpostavko nekoreliranosti obeh komponent horizontalnih hitrosti. Tako smo se določili, ker smo geokinematski model ozemlja Slovenije in sosednjih območij vzpostavljali prvič ter glede na to, da smo za vzpostavitev geokinematskega modela izdelali lastno programsko opremo, v katero še nismo implementirali koreliranosti horizontalnih komponent hitrosti postaj GNSS.

Horizontalni geokinematski model predstavljajo s postopkom kolokacije določene velikosti obeh komponent horizontalnih hitrosti koordinat točk v pravilni celični mreži, z velikostjo celice 10 km, ki ga prikazujemo na sliki 4. Ugotovimo lahko, da izračunani model dobro sledi vektorjem hitrosti v odvisnosti od velikosti (stopnje) danim vektorjem hitrosti točk (v lokacijah postaj GNSS) pripisanega šuma. Približa se oz. sovpada z vektorji hitrosti tistih točk, ki imajo nižji šum, bolj se oddalji od vektorjev hitrosti tistih točk, ki imajo večji šum. Iz grafične predstavitve horizontalnega geokinematskega modela lahko npr. vidimo, se vektorji hitrosti v celični mreži v bližini postaje GNSS KOPE prilagodijo generalnemu poteku vektorskega polja hitrosti, saj se le-to se v okolici omenjene postaje »obnaša«, kakor da postaja ne obstaja.

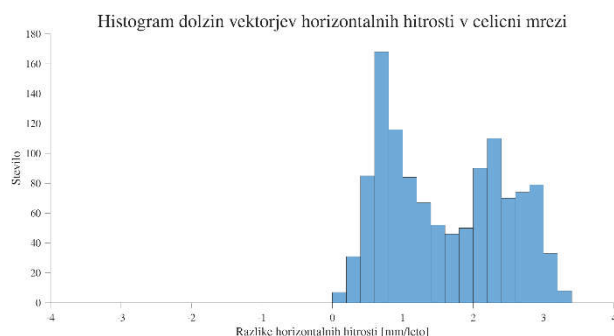


Slika 4 - Horizontalni geokinematski model ozemlja Slovenije in bližnje okolice

Histograma obeh komponent horizontalnih hitrosti v celični mreži, prikazujemo na sliki 5, histogram dolžin vektorjev hitrosti pa na sliki 6. V horizontalnem geokinematskem modelu ležijo izračunane hitrosti v_n v točkah celične mreže na intervalu $-0.6438[\text{mm/leto}] \leq v_n(\text{mod}) \leq 3.3565[\text{mm/leto}]$, srednja vrednost hitrosti v_n je $\mu_{v_n}(\text{mod}) = 1.3560[\text{mm/leto}]$, standardni odklon hitrosti v_n na novih točkah (razumemo, ga kot mero razpršenosti komponente hitrosti v_n) je $\sigma_n(\text{mod}) = 0.9794[\text{mm/leto}]$. Izračunane hitrosti v_e ležijo na intervalu $-1.2507[\text{mm/leto}] \leq v_e(\text{mod}) \leq 1.7096[\text{mm/leto}]$, srednja vrednost hitrosti v_e je $\mu_{v_e}(\text{mod}) = 0.2284[\text{mm/leto}]$, standardni odklon izračunanih hitrosti v_e v točkah celične mreže je $\sigma_{v_e}(\text{mod}) = 0.6751[\text{mm/leto}]$. Dolžina vektorja hitrosti (absolutna hitrost) točk celične mreže leži na intervalu $0.0404[\text{mm/leto}] \leq v_d(\text{mod}) \leq 3.3568[\text{mm/leto}]$, standardni odklon velikosti hitrosti je $\sigma_{v_d}(\text{mod}) = 0.8492[\text{mm/leto}]$.



Slika 5: Histograma izračunanih hitrosti v_n in v_e v celični mreži



Slika 6 - Histograma izračunanih dolžin vektorjev horizontalnih hitrosti v celični mreži

Na osnovi gornjih vrednosti lahko ugotovimo, da je v horizontalnem geokinematskem modelu izračunano polje hitrosti usmerjeno dokaj očitno proti severu – srednja vrednost hitrosti v_n znaša $\mu_{v_n}(\text{mod}) = 1.3560 [\text{mm/leto}]$, medtem, ko srednja vrednost hitrosti v_e znaša $\mu_{v_e}(\text{mod}) = 0.2284 [\text{mm/leto}]$, vendar z izrazitim zmanjševanjem dolžine vektorjev hitrosti proti severni meji območja izračuna.

Poleg tega je s slike 4 razvidno, da se polje horizontalnih hitrosti v osrednji Sloveniji razdeli na dva dela: v zahodnem delu Slovenije poteka v smeri proti severozahodu, na severovzhodnem delu pa se že od vzhodnega roba Ljubljanske kotline začne obračati v smer proti severovzhodu. V severovzhodnem delu Slovenije prihaja nato do vse bolj izrazitega obračanja vektorjev hitrosti proti vzhodu-severovzhodu in hkrati do krajšanja njihovih dolžin oz. velikosti. Generalno lahko rečemo, da se ozemlje Slovenije krči v smeri sever-jug in v nekoliko manjši meri od krčenja tudi razteguje v smeri vzhod-zahod.

Pri podrobnejšem ogledu polja hitrosti lahko tudi opazimo, da vektorji hitrosti ob prehodu večjih tektonskih prelomnic nekoliko spremenijo smer in velikost. Dokaj opazna je sprememba smeri in velikosti vektorjev hitrosti pri prehodu preko Savskega preloma. Sprememba velikosti in smeri hitrosti je sicer nekoliko manjša, še vedno pa dokaj izrazito opazna, glede na Idrijski, Šoštanjski in Labotski prelom. Zelo opazna je tudi kumulativna sprememba dolžine in smeri vektorjev horizontalnih hitrosti po prehodu vseh treh večjih tektonskih prelomov med osrednjo Slovenijo in skrajnim severovzhodom Slovenije, kjer se tako pri prehodu preko Savskega, Šoštanjskega in Labotskega preloma vektorji hitrosti izrazito skrajšajo in usmerijo proti vzhodu-severovzhodu.

Zaradi dokaj velikih hitrosti premikov vzdolž Idrijskega preloma, bi, pri prehodu preko Idrijskega preloma, pričakovali znatne zasuke in spremembe dolžin vektorjev hitrosti, kar je v geokinematskem modelu sicer vidno, vendar le v manjši meri. Morda je za takšno ugotovitev, poleg dejstva, da je Idrijski prelom verjetno »zaklenjen«, deloma odgovorna tudi nekoliko

redkejša mreža stalno delujočih postaj GNSS na območju južno in jugozahodno od Idrijskega preloma oziroma na širšem območju vzdolž Idrijskega preloma.

Natančnost geokinematskega modela razumemo kot formalno-računsko natančnost določitve hitrosti v poljubni točki modela in jo predstavlja standardni odklon hitrosti vektorja horizontalne hitrosti $\sigma_{v_{2D}}$ ki je določen na osnovi varianc $\sigma_{v_e}^2$ in $\sigma_{v_n}^2$ obeh komponent vektorja hitrosti, ki določata vektor horizontalne hitrosti. Standardni odkloni $\sigma_n(\text{mod})$ izračunanih hitrosti v_n v točkah celične mreže ležijo na intervalu $0.0863[\text{mm/leto}] \leq \sigma_n(\text{mod}) \leq 0.6937[\text{mm/leto}]$, standardni odkloni $\sigma_e(\text{mod})$ hitrosti v_e na intervalu $0.0888[\text{mm/leto}] \leq \sigma_e(\text{mod}) \leq 0.9718[\text{mm/leto}]$, standardni odkloni $\sigma_{2D}(\text{mod})$ izračunanih hitrosti v ravnini TM projekcije $v_{2D}(\text{mod})$ pa na intervalu $0.1236[\text{mm/leto}] \leq \sigma_{2D}(\text{mod}) \leq 1.1940[\text{mm/leto}]$.

Ugotovimo lahko, da je natančnost določitve horizontalnega geokinematskega modela najvišja (standardni odklon $\sigma_{v_{2D}}$ je najmanjši) v točkah, za katere imamo na voljo horizontalne hitrosti ter hkrati najnižja na območjih, ki so bolj oddaljena od danih točk ter v točkah, za katere smo predpostavili večjo stopnjo šuma v podatkih, kot je veljalo na primer za postajo GNSS KOPE.

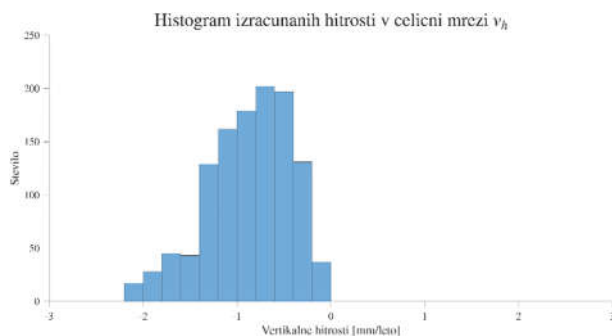
Glede prostorskih značilnosti natančnosti izračunanega geokinematskega modela lahko ugotovimo, da je ta znotraj območja, ki ga omejuje zaključeni poligon po zunanjih postajah GNSS, najslabša na jugozahodnem, južnem in osrednjem delu države, vzhodno od Ljubljane. Nižja natančnost je posledica nižje gostote točk na območju južno in vzhodno od Ljubljane, na skrajnem jugozahodnem delu pa je posledica težav s stabilnostjo postaje GNSS KOPE in z njo povezano natančnostjo določitve hitrosti.

Določitev vertikalnega geokinematskega modela

Tudi za določitev vertikalnega geokinematskega modela smo uporabili podatke o hitrostih vseh 44 stalno delujočih postaj GNSS z območja Slovenije in sosednjih območij ter ga določili s kolokacijo po metodi najmanjših kvadratov. Podatki za določitev vertikalnega geokinematskega modela so ravninske pravokotne koordinate $(e, n)_{D96/TM}$ postaj GNSS, postajam pripadajoče vertikalne hitrosti $(v_h)_{ETRF2000(GRS-80)}$ ter vertikalnim hitrostim dodeljen šum, določen na osnovi empirično določenih standardnih odklonov vertikalnih hitrosti.

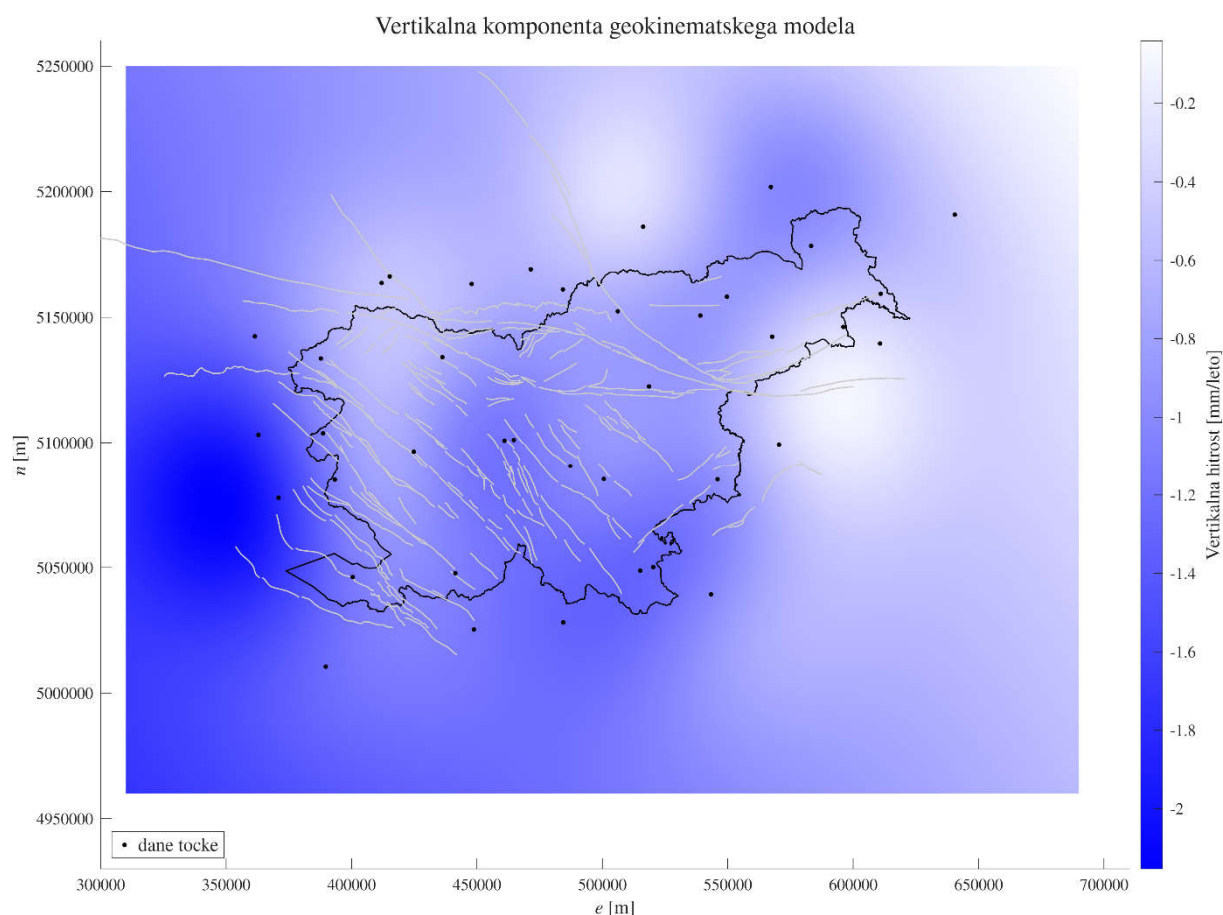
Vertikalni geokinematski model je tudi določen v celični mreži z velikostjo celice 10 km, v kateri smo na enak način kot za komponenti horizontalnih hitrosti izračunali vertikalne hitrosti. Rezultat je skalarno polje vertikalnih hitrosti v celični mreži. Kot smo tudi že omenili, vplivata na rezultate kolokacije tudi kovariančna funkcija in karakteristična razdalja (kd). Tudi v primeru določitve vertikalnega geokinematskega modela, določenega na osnovi podatkov GNSS, smo uporabili isto kovariančno funkcijo in isto karakteristično razdaljo (kd) kot pri določitvi horizontalnega geokinematskega modela. Histogram vertikalnih hitrosti, izračunanih v celični mreži, prikazujemo na sliki 6. Izračunane vertikalne hitrosti v geokinematskem modelu so na celotnem območju negativne in ležijo za v območju $-2.1362 \text{ mm/leto} \leq v_h(\text{mod}) \leq -0.0331 \text{ mm/leto}$. Standardni odklon izračunanih vertikalnih hitrosti v celični mreži (merilo razgibanosti vertikalnega geokinematskega modela) je

$\sigma_{vh}(\text{mod}) = 0.4300 \text{ [mm/leto]}$. Vertikalni geokinematski model oz. polje vertikalnih hitrosti prikazujemo na sliki 7.



Slika 6 - Histogram vertikalnih hitrosti v_h , izračunanih v celicni mreži

Iz grafičnega prikaza izračunanih vertikalnih hitrosti je razvidno, da se največje negativne vrednosti hitrosti pojavljajo v Furlanski nižini, v osrednji in jugovzhodni Sloveniji ter na skrajnem severovzhodu države. Najmanjše negativne vertikalne hitrosti se, dokaj pričakovano, pojavljajo na območju Julijskih Alp. Po absolutnih vrednostih najmanjše negativne hitrosti pa se, tudi dokaj pričakovano, pojavljajo na skrajnem vzhodu Slovenije.



Slika 7 - Vertikalni geokinematski model

Opazimo lahko tudi, da v nasprotju s poljem horizontalnih hitrosti in tudi v nasprotju s pričakovanji, ob prehodu preko aktivnih tektonskih prelomnic ne prihaja do izrazite spremembe gradienta vertikalnih hitrosti. Opazno je tudi, da se, kar je tudi nekoliko nepričakovano, največji gradienti vertikalnih hitrosti pojavljajo vzdolž poteka tektonskih prelomnic, kar velja za Idrijski, Savski, Šoštanjski in Labotski prelom. Podobna ugotovitev sicer velja za celotno območje izračunanega vertikalnega geokinematskega modela. Ta ugotovitev je dokaj nepričakovana in bo v prihodnosti zahtevala nekaj dodanih raziskav. Natančnost vertikalnega geokinematskega modela smo zopet določili v obliki formalne-računske natančnosti, kakor jo določa standardni odklon vertikalne hitrosti σ_{vh} , izračunan v vsaki točki celične mreže. Standardni odkloni izračunanih vertikalnih hitrosti v celični mreži ležijo za $(kd) = 50\text{km}$ v območju $0.1691 \text{ [mm/leto]} \leq \sigma_{vh} (\text{mod}) \leq 1.1768 \text{ [mm/leto]}$.

Ugotovimo lahko, da je natančnost vertikalnega geokinematskega modela najvišja v okolici točk, za katere imamo na voljo podatke meritev. Hkrati pa ugotovimo, da je natančnost geokinematskega modela najnižja na območjih, ki so bolj oddaljena od danih točk ter v točkah, za katere smo predpostavili večjo stopnjo šuma v podatkih.

Glede prostorske razporeditve formalnih natančnosti izračuna vertikalnega geokinematskega modela lahko zaključimo podobno, kot za horizontalni geokinematski model. Natančnost je tudi tokrat najslabša na jugozahodnem delu Slovenije, na območju Julijskih Alp in na območjih južno, severno in vzhodno od Ljubljane. Ugotovimo, da je nižja natančnost na območjih južno in severovzhodno od Ljubljane posledica nizke gostote točk, na skrajnem jugozahodnem delu pa je posledica težav s postajo KOPE in z njimi povezano kakovostjo določitve hitrosti te postaje.

Zaključek

V prispevku smo predstavili določitev prve različice državnega horizontalnega in vertikalnega geokinematskega modela Republike Slovenije. Oba sta določena na osnovi vektorjev hitrosti sprememb koordinat postaj v državnih omrežjih GNSS. Vzpostavljeni geokinematski modeli dajejo vpogled v vektorsko polje sprememb lege točk na območju Slovenije, kakor ga določajo hitrosti spremembe koordinat 44 postaj GNSS. Prvi geokinematski model bo v bodoče nadgrajevan z novimi podatki, tudi v nekoliko bolj gosti mreži postaj GNSS, saj v kratkem lahko pričakujemo začetek obratovanja dveh novih in ene že dalj časa delujoče postaje GNSS na zahodu Slovenije.

Pričakujemo lahko, da se bo kakovost geokinematskih modelov s časom izboljševala in po kakovosti dosegala zahteve, ki jih mora izpolniti geokinematski model kot sestavni del državnega geodetskega referenčnega sistema.

Že od prvih različic geokinematskih modelov pa pričakujemo, da bosta izpolnili svojo nalogo in ponudile razmislek o smereh razvoja osnovnega državnega referenčnega sistema v bodoče.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru dejavnosti v raziskovalnih programov P2-0227 Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije in P1-0419 Dinamična Zemlja, raziskovalnega projekta J2-2489 SLOKIN-geokinematski model ozemlja Slovenije, ki jih je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna, rednih dejavnosti Geodetske uprave Republike Slovenije in v okviru mehanizma

Načrt za okrevanje in odpornost, na razvojnem področju Digitalna preobrazba v okviru projekta Zeleni slovenski lokacijski okvir (SLO4D).

Literatura

EPN DISC. 2020. EPN DISC. 2020.

https://epncb.oma.be/ftp/product/referenceframe/latest/EPN_discontinuities.snx.

Jamšek Rupnik, P., Benedetti, L., Bavec, M., Vrabec, M., 2012. Geomorfni Indikatorji Kvartarne Aktivnosti Savskega Preloma Med Golnikom in Preddvorom Geomorphic Indicators of Quaternary Activity of the Sava Fault between Golnik and Preddvor 59 (2): 299–313.

Koler, B., Kuhar, M., Medved, K., 2006. Testne gravimetrične meritve za potrebe projekta nove gravimetrične mreže slovenije. Raziskave s področja geodezije in geofizike, zbornik del, SZGG, http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2006/SZGG2006_Koler_et_al.pdf.

Légrand, J. 2022. EPN Multi-Year Position and Velocity Solutions. 2022. <https://epncb.oma.be/productsservices/coordinates/#>.

Métrois, M., D'Agostino, N., Avallone, A., Chamot-Rooke, N., Rabaute, A., Duni, L., Kuka, N., Koci, R., and Georgiev, I., 2015. Insights on Continental Collisional Processes from GPS Data: Dynamics of the Peri-Adriatic Belts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120 (12): 8701–19. <https://doi.org/10.1002/2015JB012023>.

Placer, L., 1998. Contribution to the Macrotectonic Subdivision of the Border Region between Southern Alps and External Dinarides. *Geologija* 41 (1998): 223–55. <https://doi.org/10.5474/geologija.1998.013>.

Rižnar, I., Koler, B., Bavec, M., 2005. Identification of Potentially Active Structures along the Sava River Using Topographic, and Leveling Line Data. *Geologija* 48 (1): 107–16. <https://doi.org/10.5474/geologija.2005.010>.

Rožić, N., Razumović, I., Nazifovski, I., 2011. Modelling of the Recent Crustal Movements at the Territory of Croatia, Slovenia and Bosnia and Herzegovina. *Geofizika* 28 (1): 183–213.

Serpelloni, E., Faccenna, C., Spada, G., Dong, D., and Williams, S. D. P., 2013. Vertical GPS Ground Motion Rates in the Euro-Mediterranean Region: New Evidence of Velocity Gradients at Different Spatial Scales along the Nubia-Eurasia Plate Boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (11): 6003–24. <https://doi.org/10.1002/2013JB010102>.

Serpelloni, E., G. Vannucci, L. Anderlini, and R. A. Bennett., 2016. Kinematics, Seismotectonics and Seismic Potential of the Eastern Sector of the European Alps from GPS and Seismic Deformation Data. *Tectonophysics* 688: 157–81. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.09.026>.

Steffen, R., Légrand, J., Ågren, J., Steffen, H., Lidberg, M., 2022. HV-LSC-Ex2: Velocity Field Interpolation Using Extended Least-Squares Collocation. *Journal of Geodesy* 96 (3): 15. <https://doi.org/10.1007/s00190-022-01601-4>.

Steffen, R., Steffen, H., Kenyeres, A., Nilsson, T., Lidberg, M., 2025. EuVeM2022—a European Three-Dimensional GNSS Velocity Model Based on Least-Squares Collocation. *Geophysical Journal International* 241 (1): 437–53. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf052>.

Stopar, B., Sterle, O., Ritlop, K., Pavlovčič-Prešeren, P., Koler, B., Triglav Čekada, M., Radovan, D., Fabiani, N., Jamšek Rupnik, P., Atanackov, J., Bavec, M., Vrabec, M., 2021. Projekt SLOKIN – Geokinematski Model Ozemlja Slovenije.” In Raziskave s področja geodezije in geofizike, zbornik del, SZGG, https://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2021/SZGG_Zbornik_2021_E_publikacija.pdf

Tomljenović, B., Csontos, L., 2001. Neogene-Quaternary Structures in the Border Zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko Zgorje and Karlovac Basins, Croatia). *International Journal of Earth Sciences* 90 (3): 560–78. <https://doi.org/10.1007/s005310000176>.

Vičič, B., Aoudia, A., Javed, F., Foroutan, M., and Costa, G., 2019. Geometry and Mechanics of the Active Fault System in Western Slovenia. *Geophysical Journal International* 217 (3): 1755–66. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz118>.

Weber, J., Vrabec M., Pavlovčič-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B., 2010. GPS-Derived Motion of the Adriatic Microplate from Istria Peninsula and Po Plain Sites, and Geodynamic Implications. *Tectonophysics* 483 (3–4): 214–22. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.001>.

Trigonometri, mejniki in zgodbe

Mihaela Triglav Čekada^{1,2}, Bojan Stopar², Katja Hrobat Virloget³

V okviru aplikativnega raziskovalnega projekta L2-50095 »*Geodetska znamenja kot materialni pričevalci razvoja geodetskih mrež na Slovenskem*« izvajamo intervjuje z lokalnimi poznavalci prostora ter tudi strokovnjaki. Na osnovi analize tako pridobljenih indicov o ohranjenih starejših geodetskih znamenjih ter raziskave literature in arhivskih virov smo izdelali študije posameznih primerov, ki smo jih predstavili tudi lokalni publiki. Poleg tega smo izdelali tudi knjižice namenjene lokalni publiki imenovane Geodetski utrinki, ki so na voljo na planinskih kočah ali v lokalnih muzejih ter na spletu. Zgodbe, ki povezujejo stara geodetska znamenja z lokalnim prostorom pa vključujejo tako različne vrste preteklih geodetskih izmer, upravnih razdelitev in tudi lokalne mite.

Ključne besede: trigonometri, mejniki, meje katastrskih občin, nekdanje meje okrajev, miti povezani z mejami

Key words: trigonometric points, boundary marks, cadastral municipality boundaries, former districts boundaries, mythical narratives connected with borders

Uvod

Z izvedbo franciscejske zemljiškokatastrske izmere, ki so jo na ozemlju današnje Slovenije pričeli izvajati leta 1818, smo prešli v obdobje rednih geodetskih merjenj našega postora. Najprej so vzpostavili trigonometrično mrežo geodetskih točk, ki je služila kot osnova za vse nadaljnje meritve od mej parcel do kartiranja našega prostora. Za potrebe izvedbe različnih merjenj, tako trigonometričnih mrež kot tudi zemljiškega katastra, so geodeti vseskozi stabilizirali v prostoru različne geodetske točke. Te imajo različno obliko od klesanih kamnov do zidanih stebrov in večinoma že njihova oblika pove v katero obdobje sistematičnih geodetskih izmer in vrsto mreže jih lahko umestimo. V našem projektu smo se iskanja zanimivih starejših geodetskih znamenj lotili s vključitvijo lokalne publike in lokalnih poznavalcev prostora (slika 1). Te smo spoznali na predavanjih, ki smo jih izvedli za lokalno publiko. Na predavanjih smo predstavili lokalno zanimive zgodbe o zgodovini geodezije, upravne razdelitve določenega območja ter o lokalnih mitih, ki so povezani z mejami na tem področju. V sproščeni izmenjavi mnenj, ki je sledilo takemu predavanju, pa smo identificirali še dodatne lokalne informatorje, ki so nam povedali kaj o starih geodetskih točkah s tega območja za katere sami še nismo vedeli. Z informatorji smo kasneje opravili individualne terenske preglede z njihove strani izpostavljenih geodetskih znamenj. Po analizi literature in arhivskih virov smo taka znamenja postavili v geodetski in zgodovinski kontekst.

Tako smo do sedaj preučili: mejnike iz franciscejske zemljiškokatastrske in reambulančne izmere na mejah katastrskih občin okoli Socerba (Triglav Čekada, Bratož – Ježek, 2024), posebne mejnike imenovane muše na današnjih mejah katastrskih občin, ki so nekdanj predstavljalale mejo Beneške republike (Triglav Čekada, Bratož – Ježek, 2025), mejnike na današnjih mejah katastrskih občin v gozdovih Hrušice nad Postojno,

¹ Geodetski inštitut Slovenije, Jamova c. 2, Ljubljana

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

³ UP, Fakulteta za humanistične študije, Titov trg 5, Koper

ki so nekdanj predstavljal meje gospostva Predjama (Triglav Čekada, Kozorog, Premrl, 2025), trigonometrične točke in mejnike na Nanosu, Sv. Lovrencu, Vremščici, Ajdovščini in Križen drevu, ki so dokumentirano že pred petsto leti predstavljal mejnike gospostev in jih povezuje tudi mitološko izročilo v krajini (Triglav Čekada, Hrobat Virloget, 2026), trigonometrično bazo iz leta 1860 in njeno bazno mrežo v Mariboru (Oven, 2025a, 2025b, 2023), nekdanji tromejnik gospostev in današnjo gravimetrično točko 1. reda Kozinski pil (Triglav Čekada, 2025) ter druge teme.



Slika 1: Koncept izvajanja raziskave.

Geodetski utrinki

Da bi te teme približali ne samo strokovni publiki ampak tudi laični publiki, ki največ lahko naredi za ohranjanje starih geodetskih znamenj v njihovem lokalnem prostoru, smo izdelali tudi več poljudnih knjižic imenovanih Geodetski utrinki (slika 2). Te knjižice tematsko predstavljajo določeno vrsto geodetskih znamenj iz lokalnega okolja ter tudi povezavo tega geodetskega znamenja z geodetsko mrežo kateri pripada. Knjižice so v tiskani obliki na voljo tako v slovenskem kot tudi angleškem jeziku na planinskih kočah ali v lokalnih muzejih, vse nove pa pošiljamo tudi vsem v projektu identificiranim informatorjem. Knjižice razdeljujemo tudi na predavanjih namenjenih lokalni javnosti. Knjižice so na voljo tudi v spletni obliki, ki pa ima zaradi zakonitosti spleta manjšo ločljivost slik. Povprečno ima knjižica okoli 20 strani.

Do oddaje prispevka smo v okviru aplikativnega raziskovalnega projekta izdali naslednje knjižice:

- Geodetske točke na Menini planini
- Mariborska triangulacijska baza iz leta 1860
- Mejniki kartuzije Bistra iz leta 1726
- Mejniki gospostev severne Primorske
- Geodetske točke v okolici Črnomlja
- Kozinski pil.

Kot primer omenimo knjižico Mejniki kartuzije Bistra, kjer smo na kratko predstavili mejnike kartuzije Bistra in gospodov Engelshaus iz Iga iz leta 1726 in je nastala na osnovi predhodnjega članka (Triglav Čekada, 2023). Ta tema je povzročila, da smo izvedeli za

mejniki nekdanje kartuzije Bistra in gospostva Haasberg iz leta 1726 ter hkrati kasnejši trigonometer na Veliki Slivnici (slika 3). Stili izpisa letnice so identični. Rezultat tega odkritja bo knjižica: Geodetske točke na Veliki Slivnici.



Slika 2: Geodetski utrinki izdelani v okviru projekta
(vir: <https://gis.si/geodetski-utrinki/>).



Slika 3: Dva mejnika nekdanje kartuzije Bistra z isto letnico 1726: a) klesan mejnik na sedlu Vrh Jamnika pod Krimom, b) v naravno vršno skalo vklesana letnica in križ na Veliki Slivnici (foto: M. Triglav Čekada).

Sklep

V letu 2026 nadaljujemo s projektom, kar pomeni, da bomo izdelali še nekaj knjižic Geodetski utrinki, izvedli tudi nekaj predavanj za splošno lokalno publiko ter raziskali podrobno zgodovino še več identificiranih izjemnih starih geodetskih znamenj. S strokovno in poljudno promocijo ne samo, da odstiramo zgodbe, ki se vežejo na ohranjena stara geodetska znamenja ampak tudi promoviramo geodetsko stroko preko povezav z drugimi strokami.

Zahvala

Najlepše se zahvaljujemo vsem informatorjem, ki so nam podali informacije o v naravi še vedno ohranjenih starih geodetskih znamenjih.

Delo je nastalo v okviru aplikativnega raziskovalnega projekta L2-50090: »*Geodetska znamenja kot materialni pričevalci razvoja geodetskih mrež na Slovenskem*«, ki ga financirata Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) in Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS).

Literatura

- Oven, K. (2025b). Trigonometrična točka I. reda št. 215 – Žigartov vrh. *Geodetski vestnik*, 69 (4), 615–621.
- Oven, K. (2025). Mariborska triangulacijska baza z bazno mrežo skozi čas. *Geodetski vestnik*, 69:1, 75–84.
- Oven, K. (2023). Mariborska triangulacijska baza razglašena za kulturno dediščino. *Geodetski*, 67(4), 513–520.

- Triglav Čekada, M., Hrobat Virloget, K. (2026). Old boundary locations preserved from the former estate boundaries and their mythical symbolism: the example of southwest Slovenia. *Geoheritage*.
- Triglav Čekada, M., Bratož-Ježek, B. (2025). Ostanke beneške meje na mejah katastrskih občin na Kraškem robu okoli Črnotič. *Geodetski vestnik*, 69 (4), 457–499.
- Triglav Čekada, M., Kozorog, E., Premrl, B. (2025). Mejniki gospostva Jama (Luegg) v gozdovih Hrušice, *Geodetski vestnik*, 69(2), 180–204.
- Triglav Čekada, M. (2025). Kozinski pil – od katastrskega mejnika do gravimetrične točke. *Geodetski vestnik*, 69:1, 69-74.
- Triglav Čekada, M., Bratož-Ježek, B. (2024). Mejna jama in drugi zanimivi mejniki okoli Socerba in doline Glinščice. *Geodetski vestnik*, 86:1, 11–39.
- Triglav Čekada, M. (2023). Meje katastrskih občin pod Krimom: po sledih meje med Bistro in Engelshausi iz leta 1726. *Geodetski vestnik*, 67 (3), 325–342.

Drugi del: razširjeni povzetki

Approximating the universal thermal climate index using sparse regression with orthogonal polynomials

Sabin Roman¹, Gregor Skok², Ljupčo Todorovski^{2,1}, Sašo Džeroski¹

Abstract

The Universal Thermal Climate Index (UTCI) is a measure of thermal comfort that quantifies how humans experience environmental conditions. Due to its robustness and versatility as a bioclimatic indicator, it has been extensively employed across a wide range of studies in bioclimatology and is increasingly used as an operational measure of outdoor thermal comfort. At the same time, calculating the UTCI value from the relevant environmental parameters is nominally not straightforward, which is why using a 6th-degree polynomial approximation has become the standard way to calculate UTCI values. At the same time, although it is computationally efficient, the error of this polynomial approximation can be substantial. The goal of this study was to develop an improved version of the polynomial approximation -- one that retains comparable computational efficiency but is more robust in terms of numerical stability and substantially more accurate, particularly in reducing the frequency of larger errors. This goal was successfully achieved using sparse orthogonal regression, namely sparse regression with an orthogonal polynomial basis, which not only substantially reduces the average errors (i.e., the mean error, the mean absolute error, and the root mean square error) but also drastically reduces the frequency of large errors. By leveraging Legendre polynomial bases, approximation models could be constructed that efficiently populate a Pareto front of accuracy versus complexity and exhibit stable, hierarchical coefficient structures across varying model capacities. Training the new approximation models over only 20 % of the data, with the testing performed over the remaining 80 %, highlights successful generalization, with the results also being robust under bootstrapping. The decomposition effectively approximates the UTCI as a Fourier-like expansion in an orthogonal basis, yielding results near the theoretical optimum in the L_2 (least squares) sense.

Keywords: Universal Thermal Climate Index, Sparse regression, Orthogonal polynomials

Aproksimacija univerzalnega toplotnega klimatskega indeksa z redko regresijo in ortogonalnimi polinomi

Povzetek

Univerzalni toplotni klimatski indeks (UTCI) je merilo toplotnega ugodja, ki kvantificira, kako ljudje doživljajo okoljske razmere. Zaradi svoje robustnosti in vsestranskosti kot bioklimatski kazalnik se široko uporablja v številnih bioklimatoloških študijah in vse

¹ Odsek za tehnologije znanja, Institut Jožef Stefan, Jamova cesta 39, Ljubljana

² UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, jadranska ulica 19, Ljubljana

pogosteje tudi kot operativno merilo zunanjega toplotnega ugodja. Hkrati pa izračun vrednosti UTCI iz ustreznih okoljskih parametrov ni trivialen, zato je uporaba polinomske aproksimacije 6. stopnje postala standardni način za izračun vrednosti UTCI. Čeprav je ta pristop računsko učinkovit, je lahko napaka omenjene aproksimacije precejšnja. Cilj te študije je bil razviti izboljšano različico polinomske aproksimacije – takšno, ki ohranja primerljivo računsko učinkovitost, a je bolj robustna glede numerične stabilnosti in bistveno natančnejša, zlasti pri zmanjšanju pogostosti večjih napak. Ta cilj je bil uspešno dosežen z uporabo redke ortogonalne regresije, tj. redke regresije z ortogonalno bazo polinomov, ki ne le bistveno zmanjša povprečne napake (tj. povprečno napako, povprečno absolutno napako in koren povprečne kvadratne napake), temveč tudi drastično zmanjša pogostost velikih napak. Z uporabo Legendrejevih polinomov je bilo mogoče zgraditi aproksimacijske modele, ki učinkovito zapolnijo Paretovo optimalno množico natančnosti in kompleksnosti ter izkazujejo stabilne, hierarhične strukture koeficientov pri različnih kapacitetah modela. Učenje novih aproksimacijskih modelov na le 20 % podatkov, pri čemer je testiranje potekalo na preostalih 80 %, je pokazalo uspešno posploševanje. Robustnost teh rezultatov je potrdila tudi metoda zankanja. Model učinkovito aproksimira UTCI kot razširitev v ortogonalni bazi polinomov podobni Fourierovi vrsti, kar daje rezultate blizu teoretičnega optimuma v smislu norme L_2 (metode najmanjših kvadratov).

Ključne besede: univerzalni toplotni klimatski indeks, redka regresija, ortogonalni polinomi

Severna Hadleyjeva celica je v radiosondažah močnejša kot v reanalizah, z dolgoročnim trendom slabljenja

Matic Pikovnik* in Žiga Zaplotnik**

Hadleyjeva cirkulacija, bistvena komponenta Zemljine atmosferske cirkulacije, je ključna za prerezporeditev toplote in gibalne količine med ekvatorjem in srednjimi zemljepisnimi širinami. Razumevanje sprememb v njeni intenzivnosti in strukturi je bistveno za razlago trenutne podnebne dinamike in izboljšanje napovedi prihodnjih podnebnih sprememb.

Kljub svojemu pomenu dolgoročni trend intenzivnosti severne Hadleyjeve celice (NHC), podobno kot dejanska intenzivnost NHC, ostaja negotov, saj kaže na nedoslednost med klimatskimi modeli in reanalizami, rekonstrukcijami preteklega vremena. Medtem ko večina reanaliz kaže na krepitev NHC v zadnjih desetletjih, simulacije klimatskih modelov prikazujejo oslabitev v istem zgodovinskem obdobju. To neskladje vnaša negotovost v naše razumevanje odziva atmosferske cirkulacije na podnebne spremembe in prihodnjega vpliva Hadleyjeve cirkulacije na tropske in subtropske vzorce padavin.

V študiji raziskujemo in analiziramo povprečen meridionalni veter ter njegov dolgoročni trend znotraj NHC. Pri tem uporabimo podatkovne nize vodilnih reanaliz (ERA5, JRA-3Q, JRA-55, MERRA-2, NOAA 20CRv3) ter jih primerjamo z mesečnimi povprečji radiosondažnih opazovanj iz podatkovnega niza IGRav2. Primarno analiziramo obdobje 1980-2024, ob tem pa tudi obdobje 1980-2015, saj podatkovni niz reanalize NOAA 20CRv3 kot edini ne zajema kasnejšega obdobja.

Za ovrednotenje povprečnega meridionalnega vetra ter intenzivnosti NHC v podatkovnih nizih reanaliz v primerjavi z radiosondažnimi opazovanji smo razvili maskirani avtoenkoder z grafovsko nevronske mrežo. Ta metoda učinkovito rekonstruira globalna polja meridionalnega vetra, ki so nujna za ovrednotenje Hadleyjeve cirkulacije, tudi kadar so na voljo le redke radiosondažne meritve.

Naše ugotovitve razkrivajo dosledno neskladje v vertikalni strukturi NHC med reanalizami in radiosondažnimi opazovanji. Reanalize namreč sistematično podcenjujejo intenzivnost NHC. Do tega pride, ker reanalize v primerjavi z radiosondažnimi opazovanji praviloma podcenjujejo povprečni pretok proti polu v zgornji troposferi. Po drugi strani pa precenjujejo pretok proti ekvatorju v spodnji troposferi oz. na spodnjem robu domene (pri 1000 hPa).

Nadaljnja analiza prirastkov analize (popravki v procesu asimilacije podatkov) v ERA5 to potrjuje in kaže, da globalni opazovalni sistem popravlja sistematično negativno pristranskost intenzivnosti NHC znotraj modela napovedi. Model namreč podcenjuje intenzivnost NHC, prirastki analize pa premikajo prvotno stanje k močnejši meridionalni cirkulaciji, bližje dejanskim opazovanjem, ki jih asimiliramo v procesu asimilacije.

Prvič poročamo o nedavno zaznanem trendu oslabitve NHC v zadnjih štirih desetletjih v reanalizi ERA5. To oslabitev potrjuje tudi statistično značilen trend oslabitve v radiosondažnih opazovanjih. Ta študija zagotavlja doslej najbolj trdne opazovalne dokaze in nedvoumno razrešuje razpravo o trendih intenzivnosti NHC: severna Hadleyjeva celica dejansko slabi kot odziv na podnebne spremembe, kar je skladno z zgodovinskimi projekcijami podnebnih modelov.

* UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana, Slovenija

** Evropski center za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF), Robert-Schuman-Platz 3, 53175 Bonn, Nemčija

Ocenitev jasnega neba iz pirgeometričnih meritev na Krvavcu

Grega Zrim¹, Boris Orel², Jože Rakovec³

Ključne besede: radiacijsko hlajenje, pirgeometer, faktor oblačnosti neba, indeks jasnosti neba

Key words: radiative cooling, pyrgeometer, cloud factor (CLF), clear sky index (CSI)

Razširjen povzetek

Pričujoče delo predstavlja nadaljevanje slovenskih raziskav, ki so se pričele v 80-ih letih 20. st. na področju sprejemnikov za pridobivanje sončne toplote, fotovoltaike, nizko energetskih stavb ter ugotavljanju jakosti in porazdelitvi sončnega sevanja, ki je Sloveniji na razpolago (Hočevár & Rakovec, 1977). Eden od prvih rezultatov teh raziskav je tudi objava članka, ki so ga objavili Orel s sodelavci (Orel et al., 1993), kjer so avtorji pokazali na povečano sposobnost radiacijskega hlajenja premazov z dodanim BaSO₄. To so pripisali izrazito močni absorpciji sulfatnih skupin pri 9.1 μm , ki sovpadajo z atmosferskim oknom pri 8-14 μm , kar zagotavlja za 2-4 °C močnejše hlajenje v nočnem času. Prednosti BaSO₄ je pozneje potrdil Xiangyu Li (Li et al., 2021) s premazom, ki omogoča hlajenje v dnevnem času tudi ob sorazmerno močnem sončnem obsevanju (700-758 W/m²), temperaturni padec pod okolišnjo temperaturo (za 4-5 °C) in visoko hladilno močjo (117 W/m²). Kljub eksperimentalni potrditvi sposobnosti hlajenja premazov z dodanim BaSO₄, določitvi spektralne selektivnosti po Granqvistu (Granqvist & Hjortsberg, 1981) ter izračunu maksimalnih padcev temperature ter hladilne moči izbranih radiatorjev, opredelitev hladilne moči na podlagi pirgeometričnih meritev obsevanosti tedaj ni bila mogoča, saj se te meritve pri nas takrat niso izvajale.

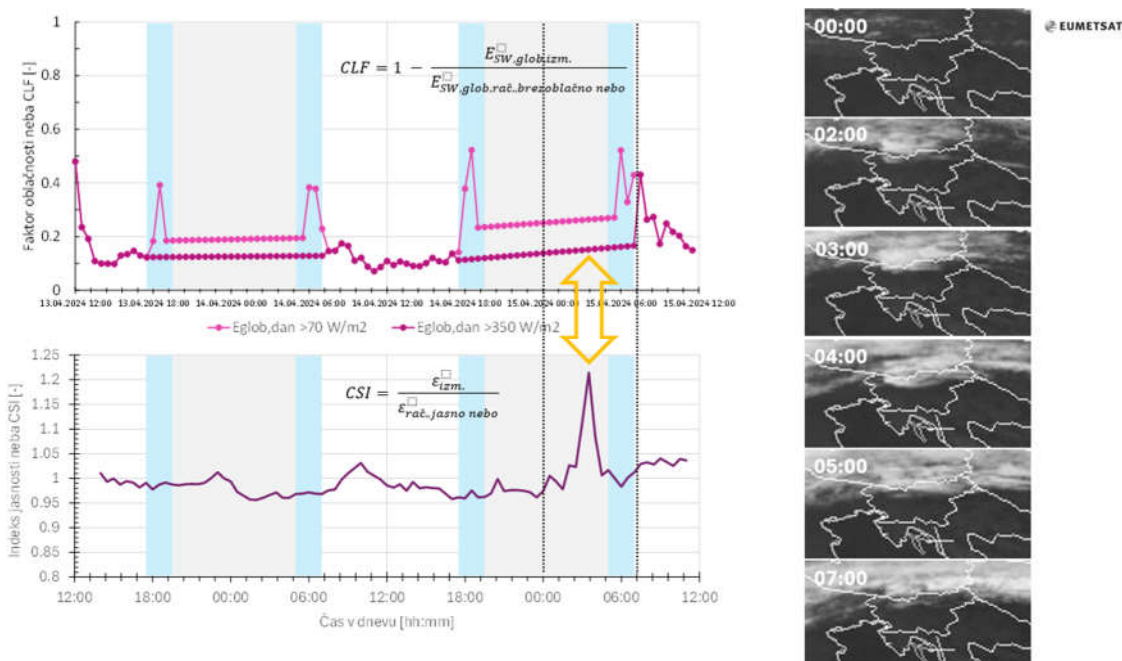
Od leta 2017 Agencija Republike Slovenije za Okolje tudi pri nas na šestih srednje- in visokogorskih vremenskih postajah (Kanin, Vršič, Vogel, Zelenica, Krvavec, Rogla) izvaja pirgeometrične meritve obsevanosti z infrardečim sevanjem. Rezultati teh meritev so nam omogočili prilagoditev modelov za izračun efektivne emisivnosti neba na vremenske razmere na geografskem področju Slovenije in nadaljevanje preučevanja radiacijskega hlajenja pasivnih radiatorjev (Kladnik et al., 1988) tudi v omenjenem okolju. V pričujočem delu so predstavljene posamezne ugotovitve pri izvedbi ekstrapolacije (Gubler et al., 2012, Juszak & Pellicciotti, 2013) faktorja oblačnosti neba (ang. »cloud factor«, kratko CLF, Crawford & Duchon, 1999), ugotovljenega preko dneva, na nočni čas in s tem vpogled na omejitve ocenjevanja oblačnosti v nočnem času na podlagi piranometričnih meritev sončne obsevanosti podnevi. Podan je še rezultat ocene indeksa jasnosti neba (ang. »clear sky index«, kratko CSI, Marty & Philipona, 2000) s pomočjo podatkov o dolgovalovnem (IR) sevanju iz ozračja po zgledu nekoliko starejših ameriških (Duchon & O'Malley, 1997), švicarskih (Marty & Philipona, 2000) ter nedavnih kitajskih (Liu et al., 2020) raziskav.

¹ Inštitut BAM d. o. o., Industrijska ulica 9, 2310 Slovenska Bistrica

² zaslužni raziskovalec na Kemijskem inštitutu, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana, redni član Inženirske akademije Slovenije (IAS)

³ zaslužni profesor UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana

Hladilno moč radiatorja v splošnem izračunamo kot vsoto radiacijskih in ostalih toplotnih tokov, pri našem delu pa smo se osredotočili na prve, ki jih lahko določimo le ob poznavanju toplotnih in optičnih lastnosti radiatorja ter, kadar neposredne meritve vpadnega infrardečega sevanja iz atmosfere niso na voljo, efektivne emisivnosti neba (Li et al., 2017). Modeli efektivne emisivnosti jasnega neba so empirični, zveze med eksperimentalni izmerjenimi obsevanostmi s pirgeometri, s pri površju Zemlje izmerjenimi vremenskimi dejavniki - v našem primeru s temperaturo zraka in parnim tlakom - pa smo pridobili z regresijo po metodi najmanjših kvadratov. Pri pripravi niza izmerjenih podatkov za regresijo je potrebno paziti, da ti podatki res pripadajo razmeram, ko je nebo jasno. V našem primeru smo najprej uporabili postopek ekstrapolacije vrednosti CLF na nočni čas, saj drugih podatkov o pokritosti neba z oblaki nismo imeli na razpolago oziroma ti niso več obstoječi (na primer klasično opazovanje pokritosti neba z oblaki se na mnogih vremenskih postajah ne izvaja več). Vrednosti CLF izračunamo tako, da od ena odštejemo razmerje med izmerjeno globalno osončenostjo in teoretično vrednostjo osončenosti pri brezoblačnem nebu, ki smo jo izračunali po Iqbalovem modelu C (Iqbal, 1983). Pokazalo se je, da se v časovnem poteku vrednosti CLF (Slika 1 levo zgoraj prikazuje dve zaporedni aprilski noči leta 2024) ob zori in ob zarji oziroma v času somraka pojavijo izrazite konice. Zgodaj zjutraj in pozno zvečer namreč piranometri sicer zaznajo vpadno sončno sevanje, vendar le difuzno komponento, saj je ta enaka globalni osončenosti, medtem ko izračunana vrednost po modelu daje tudi direktno komponento, ki ob vse manjših zenitnih kotih sonca strmo narašča (vpadni kot na tla in krajša pot skozi ozračje). Če bi preko noči interpolirali vrednosti med dvema (nerealnima) konicama, bi preko vse noči dobili previsoke vrednosti. Temu se izognemo tako, da zvečer proglasimo, da je dneva konec že prej - ne, ko osončenost pade pod 70 W/m^2 (kot je to pri nekaterih avtorjih), ampak prej. Po nekaj poskušanjih smo izbrali kriterij 350 W/m^2 . In podobno zjutraj. Tako smo vpliv konic kar precej (ne pa povsem) omilili.



Slika 1 – Časovni potek CLF med 13. 4. 2024 in 15. 4. 2025 za dve mejni vrednosti osončenosti, s katerima opredelimo nočni čas (levo zgoraj), časovni potek CSI za isto obdobje (levo spodaj) in pripadajoči EUMETSAT-ovi satelitski posnetki Zemlje (desno).

Da bi lahko pripravo nizov podatkov za opisano regresijo opravili z bolj neposredno metodo in eksperimentalno izmerjenimi vrednostmi, smo napravili še oceno CSI (Slika 1 levo spodaj). Za dve zaporedni aprilski noči v letu 2024 smo najprej po zgledu raziskave Liuja s sodelavci (Liu et al., 2020) s statistično obdelavo časovnega poteka izmerjene obsevanosti prepoznali prisotnost oblakov na nebu v noči s 14. na 15. april 2024, nato pa smo to potrdili še s satelitskimi posnetki Zemlje (Slika 1 desno), ki jih je napravil EUMETSAT (povzeto iz Wetterzentrale). Izračunali smo CSI, ki je definiran kot razmerje med izmerjeno emisivnostjo neba (izmerjena obsevanost normirana s sevanjem črnega telesa pri temperaturi, ki je enaka temperaturi zraka pri tleh) in modelsko vrednostjo efektivne emisivnosti jasnega neba. Vrednost CSI, večja od 1 kaže na oblačno nebo. Na Sliki 1 levo spodaj je dobro opazna konica, ki časovno sovпада s prehodom oblakov preko Krvavca tiste noči, s čimer je za ta primer potrjena uporabnost metode za prepoznavanje jasnega neba na podlagi vrednosti pirgeometričnih meritev infrardeče obsevanosti.

Zahvala

Grega Zrim in Boris Orel bi se rada zahvalila Kemijskemu Inštitutu za finančno podporo.

Literatura

- Crawford, T. M., & Duchon, C. E. (1999). An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. *Journal of Applied Meteorology*, 38(4), 474-480.
- Duchon, C. E., & O'Malley, M. S. (1999). Estimating cloud type from pyranometer observations. *Journal of Applied Meteorology*, 38(1), 132-141.
- Granqvist, C. G., & Hjortsberg, A. (1981). Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films. *Journal of Applied Physics*, 52(6), 4205-4220.
- Gubler, S., Gruber, S., & Purves, R. S. (2012). Uncertainties of parameterized surface downward clear-sky shortwave and all-sky longwave radiation. *Atmospheric chemistry and physics*, 12(11), 5077-5098.
- Hočevár, A., & Rakovec, J. (1977). General models of circum-global and quasi-global radiation on Hills of simple geometrical shapes: Part I: Theoretical consideration. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 25(2), 151-164.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction To Solar Radiation*. Elsevier Science.
- Juszk, I., & Pellicciotti, F. (2013). A comparison of parameterizations of incoming longwave radiation over melting glaciers: model robustness and seasonal variability. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 118(8), 3066-3084.
- Kladnik, R., Krainer, A., Klanjšek Gunde, M., Orel, B. (1988). Vpliv radiacijskega hlajenja strehe na toplotni odziv zgradbe, *Gradbeni vestnik* 37, 45-51.
- Li, M., Jiang, Y., & Coimbra, C. F. (2017). On the determination of atmospheric longwave irradiance under all-sky conditions. *Solar Energy*, 144, 40-48.
- Li, X., Peoples, J., Yao, P., & Ruan, X. (2021). Ultrawhite BaSO₄ paints and films for remarkable daytime subambient radiative cooling. *ACS applied materials & interfaces*, 13(18), 21733-21739.
- Liu, M., Zheng, X., Zhang, J., & Xia, X. (2020). A revisiting of the parametrization of downward longwave radiation in summer over the Tibetan Plateau based on high-temporal-resolution measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(7), 4415-4426.
- Orel, B., Gunde, M. K., & Krainer, A. (1993). Radiative cooling efficiency of white pigmented paints. *Solar energy*, 50(6), 477-482.
- Wetterzentrale, <https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?map=1&model=sat&var=44> (povzeto 6.12.2025)

In memoriam Charles Fierz

Polona Vreča*

Decembra 2025 je v 67 letu umrl Charles Fierz, znanstvenik iz Davosa v Švici, ki se je posvečal raziskavam na področju fizike snega. Charles je bil pomemben član IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) in je sodeloval pri ustanovitvi IACS (International Association of Cryospheric Sciences), kjer je opravljal različne funkcije. Pri IACS je vodil Sekcijo za sneg in plazove in bil tudi predsednik. Na skupščinah IUGG in IACS je uvedel dogodek »Festa Cryospherica« za praznovanje IACS. Njegova predanost delu in raziskavam na področju znanosti o snegu in ledu je bila nagrajena leta 2023 z imenovanjem za častnega člana IACS.

Charles je bil zaposlen na WSL Institute for Snow and Avalanche Research v Davosu v Švici, kjer je s svojim znanjem pomembno prispeval k razvoju odprtokodnega modela SNOWPACK (<https://snowpack.slf.ch/>), ki predstavlja pomembno orodje za modeliranje snežne odeje na osnovi meteoroloških parametrov. Zelo pomembno je bilo njegovo delo na področju klasifikacije sezonskega snega, kjer je pod njegovim vodstvom nastala v letu 2009 pri UNESCO izdana Mednarodna klasifikacije sezonskega snega na tleh (International Classification for Seasonal Snow, Slika 1), prevedena v francoščino, španščino, ruščino in nemščino. Pomemben je bil tudi njegov prispevek v projektu Global Cryosphere Watch (GCW), ki se izvaja v okviru Svetovne meteorološke organizacije (WMO).



Slika 1: Mednarodna klasifikacije sezonskega snega na tleh (Fierz et al., 2009)

Charles je vztrajno spodbujal raziskovalce k pridružitvi IACS in je pomembno prispeval s svojo podporo k nastanku Sekcije za kriosfero pri Slovenskem združenju za geodezijo in geofiziko (SZGG). Prva pobuda za nastanek Sekcije za kriosfero je nastala 2012 na letnem srečanju SZGG. Charlesa sem nato istega leta spoznala na letni skupščini »European

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

Geosciences Union« (EGU), kjer sem se udeležila sestanka IACS. Kljub temu, da se je z raziskavami snega v Sloveniji ukvarjalo veliko različnih strokovnjakov, Slovenija v IACS ni bila vključena. Charles nas je zato na EGU srečanju dodatno spodbudil in v nadaljevanju tekom srečanj v Davosu pomagal pri urejanju formalnosti, da je Slovenija leta 2013 postala formalna članica IACS.

Druženje s Charlesom je bilo zelo posebno, mirno, natančno, zanesljivo in vsako srečanje je prineslo nekaj novega in zanimivega, predvsem pa spodbudo, da je vredno vztrajati. Podrobneje me je seznanil z Mednarodno klasifikacijo sezonskega snega in mi tudi na praktičnih primerih tekom izpopolnjevanja v Davosu pomagal identificirati lastnosti snežne odeje. Žal po letu 2014 z raziskavami izotopske sestave snežne odeje nismo nadaljevali, zato ostaja vprašanje povezanosti med fizikalnimi lastnostmi snežne odeje, morfologijo snežnih in ledenih kristalov ter njihovo izotopsko sestavo izziv za prihodnost, sploh v okoljih kot je Slovenija, kjer se metamorfoza snežne odeje zaradi temperaturnih nihanj prične zelo hitro. Nazadnje sem Charlesa srečala na skupščini IUGG v Berlinu leta 2023, kjer mi je povedal, da svojo kariero na WSL zaključuje. Žal bo na prihodnjih skupščinah IUGG ostal le spomin na zelo posebnega raziskovalca kriosfere.

Naj Charles Fierz ostane s svojim pomembnim prispevkom k ustanovitvi Sekcije za kriosfero in velikim vplivom na mednarodni razvoj na področju znanosti o snegu in ledu v trajnem spominu tudi pri Slovenskem združenju za geodezijo in geofiziko. Naj počiva v miru.