

Vetrnica



ISSN 1855-7457

*glasilo Slovenskega
meteorološkega društva*

WWW.METE0-DRUSTVO.SI

15/23

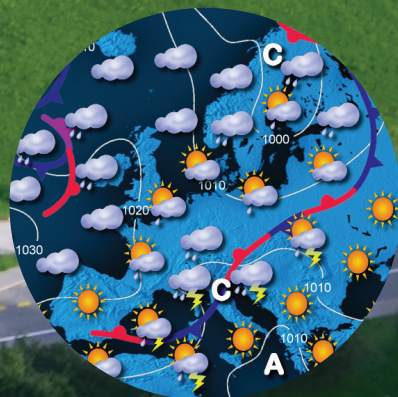
POPLAVE AVGUSTA 2023

Razprave:

Homogenizacija
časovnih nizov

Vrednotenje
reanaliz ERA5

Umrljivost v času
vročinskih valov



VSEBINA:

UVODNIK

3 UVODNIK

V SPOMIN

4 JANKO PRISTOV

ZANIMIVOSTI

5 DELAVNICA O UČINKOVITEM POSREDOVANJU METEOROLOŠKIH INFORMACIJ

7 UTRINKI Z LETNE KONFERENCE EVROPSKE METEOROLOŠKE ZVEZE 2023 V BRATISLAVI OD 3. DO 9. SEPTEMBRA

POD DROBNOGLEDOM

13 IZJEMNO OBILNO DEŽEVJE OD VEČERA 3. DO JUTRA 4. AVGUSTA 2023

20 SISTEMI ZA NAPOVED NAMAKANJA V SLOVENIJI

IZ ŽIVLJENJA DRUŠTVA

25 IZLET ČLANOV SLOVENSKEGA METEOROLOŠKEGA DRUŠTVA 2022

ŠTUDENTSKI KOTIČEK

27 POLARNI VRTINEC V STRATOSFERI POD VPLIVOM RAZLIČNIH PODNEBNIH SCENARIJEV

28 ANALIZA SPREMEMB INTENZIVNOSTI HADLEYJEVE CIRKULACIJE

RAZPRAVE

32 SPREMLJANJE POVEČANEGA/ZMANJŠANEGA ŠTEVILA UMRLIH V ČASU VROČINSKIH VALOV ZA UPRAVNO ENOTO LJUBLJANA V LETIH 2013 DO 2020

44 PRIMERJAVA MESEČNIH MREŽNIH PODATKOV ARSO O TEMPERATURI ZRAKA IN VIŠINI PADAVIN V SLOVENIJI Z REANALIZAMI ERA5 V OBDOBJU 1950 – 2020

54 HOMOGENIZACIJA IN DOPOLNITEV ČASOVNIH NIZOV PODATKOV TEMPERATURE ZRAKA

UVODNIK

Dobrodošli v najnovejši izdaji revije našega glasila, Vetrnica. V uredništvu se trudimo, da bi bil to vaš vir najnovejših dogajanj in spoznanj s področja meteorologije in podnebnih znanosti v Sloveniji, pa tudi vir informacij o dogajanju v društvu. Navdušeni smo, da vam tudi tokrat lahko ponudimo veliko zanimivih prispevkov naših društvenih kolegov in strokovnjakov.

Čeprav ta številka nima vodilne teme, je povsem jasno, da je podnebje rdeča nit tokratnih strokovnih prispevkov. Slovenija se tako kot številne regije po svetu v zadnjih nekaj letih spopada z vse hujšimi posledicami podnebnih sprememb. Od vročinskih valov in suše brez primere leta 2022 do uničujočih poplav leta 2023, naša država ni bila imuna na uničujoče sile spreminjajočega se podnebja.

V rubriki Pod drobnogledom boste našli prispevek o inovativnem sistemu za podporo namakanju, ki je ključna strategija prilagajanja kmetijstva v vedno bolj zaostrenih sušnih razmerah. V isti rubriki boste našli tudi analizo meteorološke situacije ob katastrofalnih poplavah avgusta 2023, ki so posledica spreminjajočega se podnebja.

Vročinski valovi, še ena zlovešča posledica podnebnih sprememb, so postali pereča grožnja javnemu zdravju in varnosti. V enem od člankov v razdelku Razprave je pojasnjena nevarna povezava med vročinskimi valovi in povečano stopnjo umrljivosti, kar osvetljuje nujnost učinkovitih strategij za obvladovanje vročinskih valov.

Reanalize so postale nepogrešljivo orodje za preučevanje spremenljivosti in sprememb podnebja. Vendar se je, kot je poudarjeno v obsežnem prispevku Razprav, treba zavedati njihovih omejitev, zlasti pri analizi spremenljivosti in sprememb tako raznolikega podnebja, kot ga imamo v Sloveniji.

Ko gre za analize podnebja in njegovega spreminjanja, so klimatologi zelo zahtevni glede podatkov. Na ARSO so se v zadnjih letih intenzivno ukvarjali s homogenizacijo podnebnih podatkov, ki omogočajo verodostojen pogled na spremenljivost in spremembe podnebja v Sloveniji v zadnjih desetletjih. Podroben pregledni članek ponuja vpogled v ta postopek in zagotavlja sledljivost za prihodnje podnebne analize.

Dogajanje v društvu v zadnjih dveh letih je bilo zelo živahno. Poleg številnih predavanj in posvetov smo si na strokovni ekskurziji ogledali oceanografsko bojo in obiskali Upravo za pomorstvo ter Luko Koper. Nekaj utrinkov te zelo zanimive ekskurzije boste našli v rubriki Iz življenja društva.

Tudi Študentski kotiček je bogat in prinaša pregled dela naših najmlajših kolegov.

V času od izida zadnje številke nas je žal zapustil ustanovni član našega društva, ki je v slovenski meteorologiji pustil pomemben pečat. Njegovemu bogatemu življenju in delu namenimo rubriko "V spomin" številke, ki je pred vami.

Zahvaljujemo se vsem avtorjem, ki so prispevali k nastanku glasila. Vetrnico oblikujemo skupaj, zato ponovno vabimo vse člane, da izkoristite ta prostor za svoje prispevke. Če želite karkoli podeliti s svojim stanovskimi kolegi ali pa tudi s širšo javnostjo, napišite prispevek. Lahko gre za profesionalni uspeh, izziv, nov pristop ali metodologijo, za prijetno izkušnjo iz profesionalnega življenja ali reportažo iz društvenega dogodka. Različnih rubrik v Vetrnici je veliko in verjamemo da so vaše znanje, izkušnje in doživljaji zanimivi za kolege. Najpomembneje pa je, da so aktivnosti, ki se odvijajo, in znanje, ki se razvija v slovenski meteorološki stroki, ostanejo zabeleženi tudi za zanamce.



Fotografija na naslovnici:

Nejc POGAČNIK

Izdaja:

Slovensko meteorološko društvo
Vojkova 1b,
SI - 1000, Ljubljana
<http://www.meteo-drustvo.si>

Glavna urednica: Mojca DOLINAR

Uredniški odbor: Jože RAKOVEC, Jožef ROŠKAR,

Iztok SINJUR, Gregor VERTAČNIK

Tehnično urejanje: Jožef ROŠKAR

Oblikovna zasnova: Sabina KOŠAK, Solos, d.o.o.

Ljubljana, APRIL 2024

ISSN 1855-7457



**Slovensko
meteorološko
društvo**
Od 1954

Naslov uredništva:

Vojkova 1b
SI-1000, Ljubljana
vetrnica.smd@gmail.com



JANKO PRISTOV **1929 – 2022**

Janko Pristov je postavljaj temelje sodobne slovenske meteorologije. Po maturi leta 1949 se je vpisal na študij matematike in fizike v Ljubljani ter se po tem, ko je bil ustanovljen študij meteorologije na matematično-fizikalnih načelih, prepisal na ta študij in ga jeseni 1953 končal kot prvi diplomant meteorologije pri nas. Še pred diplomo se je na Hidrometeorološkem zavodu zaposlil kot tehnik - pripravnik, takoj po diplomi pa kot meteorolog. Leta 1957 je postal vodja oddelka za aerologijo in leta 1970 načelnik oddelka za napoved vremena oziroma sinoptiko. Leta 1975 je napredoval v pomočnika direktorja, 8 let kasneje v namestnika direktorja, direktor Hidrometeorološkega zavoda pa je bil od leta 1988 do upokojitve leta 1993.

V 50. letih prejšnjega stoletja se je izpopolnjeval pri vodilnih meteoroloških prognostikih, kot sta bila Tora Bergeron pri Nemški meteorološki službi in Richard Scherhag na Svobodni univerzi v Berlinu. Na osnovi tako pridobljenih izkušenj in znanja je v Slovenijo uvedel sodoben pristop k napovedovanju vremena.

Pod njegovim vodstvom se je HMZ strokovno osamosvojil in razširil in v ta namen je bila zgrajena dodatna stavba na Vojkovi v Ljubljani, saj je bila prvotna že odločno premajhna. Neprestano si je prizadeval za razvoj stroke, najprej predvsem napovedovanja vremena, kasneje pa tudi klimatologije in agrometeorologije. Skrbel je tudi za razvoj hidrološke službe in za posodabljanje merilne oz. opazovalne mreže.

Janko Pristov je odigral pomembno vlogo pri osamosvajanju Slovenije. V času, ko si je naša država še prizadevala za mednarodno priznanje, me je imenoval za Svetovalca za mednarodne stike in v tej funkciji sem pod njegovim vodstvom in v njegovem imenu poslal direktorjem meteoroloških služb evropskih in drugih držav množico pisem s prošnjo za podporo novi državi.

Ko nam je bil zaprt dotok mednarodnih vremenskih podatkov, ki smo jih do takrat dobivali preko Beograda in so nujno potrebni za vsakodnevne vremenske napovedi, je ob sodelovanju še nekaterih svojih kolegov meteorologov izposloval pri avstrijski meteorološki službi, da nam je začela v zelo kratkem času redno pošiljati vse potrebne podatke iz svetovne

izmenjave, kar je bilo za Slovenijo v tistih težkih časih izjemnega pomena. Po mednarodnem priznanju in vključitvi Slovenije v razne mednarodne organizacije, med njimi v Svetovno meteorološko organizacijo, je vzpostavil stike in sodelovanje z meteorološkimi in hidrološkimi službami vrste držav Srednje in Zahodne Evrope.

Napisal je več strokovnih in znanstvenih člankov ter elaboratov. Svoje dolgoletno preučevanje padavin sta skupaj s soavtorjem Markom Kolbeznom strnila v knjigi Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije, ki je bila izdana leta 1998, ob 50-letnici Hidrometeorološkega zavoda Republike Slovenije.

Leta 1954 je s kolegi ustanovil Slovensko meteorološko društvo, ki je tudi pod njegovim vodstvom odigralo ključno vlogo pri razvoju sodobne meteorologije v Sloveniji. V letih 1973 do 1985 je bil glavni in odgovorni urednik strokovnega časopisa društva Razprave—Papers.

Sodelavci smo ga spoštovali zaradi njegove predanosti delu in stroki, vodstvenih sposobnosti in pripravljenosti reševati probleme. Mlade meteorologe je spodbujal k podiplomskemu študiju in mednarodnemu sodelovanju. Brez njega slovenska meteorologija ne bi dosegala rezultatov, kot jih je, saj je prav on postavil temelje, na katerih se še danes uspešno razvija.

Spominjamo se ga tudi s čisto človeške plati: markantnega, odločnega, a kljub temu prijaznega in pripravljenega razumeti sodelavce in jim pomagati bodisi z nasveti ali kako drugače.

V svojem dolgoletnem strokovnem delovanju je Janko Pristov prejel več nagrad. Kot študent je prejel študentsko Prešernovo nagrado za svoje delovanje na področju meteorologije, kasneje pa je bil še večkrat nagrajen oz. odlikovan; v njegovi zbirki odlikovanj so tako: Red dela z zlatim vencem, Medalja Instituta Jožef Stefan, Zlata značka civilne zaščite. Od leta 2004 je bil častni član Slovenskega meteorološkega društva.

Hvala ti za vse, dragi Janko, in počivaj v miru.

Mag. Andrej Kranjc

Delavnica o učinkovitem posredovanju agrometeoroloških informacij

Tanja Cegnar, Agencija RS za okolje

Motiv za izvedbo delavnice

Leta 2016 je Fundacija Tromp s partnerji WMO, FAO in ARSO organizirala tridnevno delavnico »Agrometeorologij za kmete v bolj vroči, suhi in mokri prihodnosti«. Delavnica v Ljubljani se je osredotočala na Sredozemlje in Evropo s ciljem povezati agrometeorologe in pospešiti izmenjavo informacij o razpoložljivih agrometeoroloških storitvah, ki jih zagotavljajo državne meteorološke službe, raziskovalne ustanove in zasebna podjetja. Med cilji je bila okrepitev povezav med strokovnjaki in določitev učinkovitih načinov za prilagajanje informacij končnim uporabnikom. Ugotovili smo, da obstaja bogat nabor informacij, ki jih je mogoče uporabiti vsakodnevno, težje pa je zagotoviti uporabne informacije o prihodnjem podnebnju. Že na tej delavnici smo se odločili, da po nekaj letih organiziramo podoben dogodek, saj sta agrometeorološka teorija in praksa tesno povezani z nekaterimi največjimi izzivi 21. stoletja, ki so prehranska varnost, prilagajanje podnebnim spremembam, širjenje bolezni, ki jih prenašajo žuželke, in potreba po bolj zelenih mestih z okrepljenim urbanim kmetijstvom.

Delavnica v Bonnu

Prvotno je bila druga delavnica načrtovana za leto 2020 kot spremljevalni dogodek na letni konferenci Evropskega meteorološkega društva (EMS) v Bratislavi. Na žalost je bila konferenca odpovedana zaradi pandemije Covid-19. Leta 2021 je bilo letno srečanje EMS virtualno in odločili smo se, da delavnico prestavimo. Končno je bila leta 2022 delavnica izvedena v Bonnu kot hibridni dogodek vzporedno z letnim srečanjem EMS, ki se ga je udeležilo 815 udeležencev iz 48 držav, od tega jih je bilo v Bonnu prisotnih 671, 144 pa prek spletne povezave. Zaradi strogih omejitev, ki jih je postavil gostitelj (obvezna nošnja mask in omejitev števila udeležencev v dvoranah), je na naši delavnici fizično lahko prisostvovalo le 20 udeležencev, prav toliko pa jih je sodelovalo tudi prek spletne povezave. Kotizacijo za udeležence delavnice je zagotovila nizozemska Fundacija Solco W. Tromp.

Tokrat je bil poudarek na komuniciranju, kot je razvidno iz naslova delavnice »Učinkovito komuniciranje agrometeoroloških storitev«. Tudi tokrat je bil namen delavnice okrepiti mreženje, vzpodbuditi izmenjavo izkušenj in znanja, pregledati razpoložljive podatke in njihovo kakovost ter izpostaviti pomen učinkovitega komuniciranja. Programski vodji delavnice sta bili skupaj z dr. Klaro Finkele



Klara Finkele
(osebni arhiv)



Tanja Cegnar
(osebni arhiv)

iz Irske meteorološke službe (Met Eireann). K sodelovanju sta pritegnili agrometeorologe iz državnih meteoroloških služb, univerz, raziskovalnih inštitutov ter privatnih podjetij. Izvedbo delavnice je podpiralo šest partnerjev: Fundacija Sloco W. Tromp, Evropska meteorološka zveza, Irska meteorološka služba, Agencija RS za okolje, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo. Na delavnici so predavatelji predstavili pregled agrometeoroloških storitev, izpostavili primere dobrih praks pri posredovanju storitev in tudi pomanjkljivosti, ki zavirajo razvoj novih izdelkov in njihovo učinkovito uporabo.

Predavanja

Delavnico so sestavljala vabljenja predavanja. Gerald Fleming, ki deluje kot svetovalec pri Svetovni banki, je uvodoma podal osnove učinkovite komunikacije in posredovanja storitev uporabnikom. Zahteve, s katerimi se sooča sektor kmetijstva, je predstavil dr. Keith Lambkin, vodja skupine za podnebne storitve Irske meteorološke službe, vključen je bil tudi v pisanje IPCC poročila. Poudaril je, da je kmetijstvo pod stresom bolj kot kdaj koli prej, na eni strani je povpraševanje po vedno več hrane, na drugi strani

pa je sektor pod pritiskom zmanjšanja uporabe gnojil in zmanjšanja izpustov toplogrednih plinov. Dr. Branislava Lalić iz Univerze v Novem Sadu je izpostavila pomen izobraževanja. Kenneth R. Irons, bivši predsedujoči Agritech iz Nove Zelandije in svetovalec mnogim mednarodnim organizacijam, med drugim tudi Evropski komisiji, je poudaril spremembe v kmetijskem sektorju in potrebo po prilagajanju. Prizadevanja v WMO Regiji VI za sistematično podporo kmetijstvu, je izpostavila dr. Elena Mateescu, ki vzpostavlja regijski agrometeorološki center v Romuniji.

Hendik Boogaard z Univerze Wageningen se je osredotočil na podatke, potrebne za razvoj modelov, ki opisujejo vpliv okolja na razvoj rastlin. Izpostavil je potrebo po metapodatkih in homogenizaciji različnih baz podatkov, kar je eden izmed projektov skupine, v kateri deluje. Dr. Klara Finkle je prispevala pregled agrometeoroloških storitev, ki jih ponuja Irska meteorološka služba. Pogled na razmere v Afriki je orisal Vieri Tarchiani, raziskovalec na Inštitutu za bioekonomijo v okviru Italijanskega državnega raziskovalnega sveta. Poudaril je pomen poznavanja potreb in načina delovanja uporabnikov agrometeoroloških storitev. Kljub hitremu razvoju sodobnih komunikacijskih kanalov, je radio v nekaterih skupnostih še vedno najbolj učinkovit medij za posredovanje informacij.



Jean Pierre Ceron
(osebni arhiv)



Keith Lambkin
(osebni arhiv)

Sledili sta dve predavanji s predstavitvijo ponudbe državnih meteoroloških služb, najprej je Saskia Lifka orisala ponudbo storitev Nemške meteorološke službe, Monika Lakatos pa je predstavila uvajanje novih tehnologij in vrst podatkov v operativno delo Madžarske meteorološke službe. Drugačen pogled na posredovanje storitev je podal vodja Signpost programa dr. Tom O'Dwyer. Na primerih programa je pokazal, da je najbolj učinkovit način izobraževanja in seznanjanja kmetovalcev s sodobnimi storitvi preko vzorčnih kmetij. Za učinkovito posredovanje informacij je potreben posrednik, ki storitve približa uporabnikom in jih pretvori v razumljivo in uporabno obliko. Kmetovalci najbolj zaupajo drugim kmetovalcem in se najlažje učijo od svojih kolegov.

Robert Stefanski je sodeloval v imenu Svetovne meteorološke organizacije (WMO), orisal je vlogo in mesto agrometeorologije v okviru WMO. Jean & Pierre Ceron je v imenu skupine WMO za sezonske napovedi izpostavil verjetnostni značaj sezonskih napovedi in načine kako opolnomočiti uporabnike, da bodo lahko uporabljali sezonske napovedi.

Dr. Andreja Sušnik je predstavila ponudbo agrometeoroloških storitev ARSO in razvoj komunikacijskih kanalov. Na voljo so novi viri podatkov in sodobne komunikacije, vzpostavljene so sušne opazovalnice, merilniki suše in vse boljše agrometeorološke napovedi. Izpostavila je tudi delovanje Sušnega centra za jugovzhodno Evropo in ponudbo izdelkov na spletu. Pregled agrometeoroloških informacij v Združenem kraljestvu je povzela Joanna Raymond iz Univerze vzhodne Anglije. Moj prispevek je bil omejen na potrebo po vključevanju in povezovanju informacij o vplivu vremena na storilnost in počutje ljudi med informacije za kmetovalce, saj veliko dela v kmetijskem sektorju še vedno poteka na prostem.

Zaključki

Na osnovi predstavitev in komentarjev smo oblikovali zaključke. Živimo v času komunikacijske revolucije, sredstva za širjenje informacij so se povečala in pomnožila. Toda ali komuniciramo bolj učinkovito? Kako si prizadevamo, da bi to učinkoviteje izvajali? Ni dovolj le ponuditi storitev, potrebno jo je tudi skomunicirati na način, da lahko uporabniki izkoristijo ponujene informacije.

Predstavitve predavateljev in njihovih tem je dosegljiva na YouTube kanalu EMS na spletnem naslovu:
<https://www.youtube.com/watch?v=YFiNrLOpnDw>

Predavanja v obliki pdf datotek so dosegljiva na spletni strani:
EMS 2022 – AGMET

Članek z ugotovitvami in priporočili na osnovi delavnice pa smo objavili v prosto dostopni znanstveni reviji ASR:
<https://asr.copernicus.org/articles/20/9/2023/>



Andreja Sušnik
(osebni arhiv)



Monika Lakatos
(osebni arhiv)

Utrinki z letne konference Evropske meteorološke zveze 2023 v Bratislavi od 3. do 9. septembra 2023

Tanja Cegnar, Agencija RS za okolje

Tako kot septembra 2022 je tudi tokrat letno srečanje Evropske meteorološke zveze (EMS) potekalo kot hibridna konferenca. Tokratna tema konference je bila „Evropa in suše: hidrometeorološki procesi, napovedovanje in pripravljenost“. Konferenca je ponudila obilico priložnosti za spoznavanje novih ljudi, pridobivanje svežih idej in razpravljanje. Čeprav je bilo udeležencev nekaj manj kot leto poprej, je udeležba dosegla povprečne številke pred korono, saj je bilo v Bratislavi prisotnih 523 udeležencev, 110 pa jih je sodelovalo prek spletne povezave. Udeleženci so prišli iz 43 držav, kar 45 % se jih je letne konference EMS udeležilo prvič, 67 % jih je bilo mlajših od 45 let, 1,5 % pa je bilo mlajših od 25 let. Tradicionalno je najšibkeje zastopan privatni sektor, le 5 % udeležencev je zaposlenih v privatnem sektorju, iz leta v leto se krepi delež univerzitetnih udeležencev, tokrat je dosegel 37 %, 29 % jih je bilo iz državnih hidrometeoroloških služb, petina pa iz javnih ali državnih raziskovalnih

Vsak od teh treh sklopov vsebuje večje število sekcij. Sklop »sodelovanje z družbo« koordinirava z Geraldom Flemingom. Vsak sklop je imel na razpolago po eno plenarno predavanje, vodilna tema konference pa je



Slika 1. Vhod v stavbo, kjer je potekala konferenca. (foto: Tanja Cegnar)

ustanov. Posnetki plenarnih zasedanj, naložene predstavitve in več informacij o srečanju je na voljo na spletni strani konference ems2023.eu. Tako kot v preteklih letih je konferenca potekala v treh sklopih sekcij, ki so:

- sodelovanje z družbo;
- operacijski sistemi in aplikacije;
- razumevanje vremenskih in podnebnih procesov.



Slika 2. Livia Labudova med plenarnim predavanjem sekcije za »sodelovanje z družbo«. (foto: Tanja Cegnar)

bila predstavljena s predavanjem na otvoritvenem delu konference. Posamezna predavanja so objavljena na konferenčni spletni strani <https://meetingorganizer.copernicus.org/ems2023/presentations>.

Sestanek Sveta EMS in letna skupščina EMS

Že pred začetkom konference je prek spleta potekal sestanek Sveta EMS, ki sem se ga udeležila kot predstavnica Slovenskega meteorološkega društva (SMD), ki ima zastopnika v Svetu še do septembra 2024. V Svetu pa sodelujem tudi kot predstavnica nizozemske Solco W. Tromp fundacije in kot vodja EMS Odbora za medije in komunikacijo. Določili smo nov

organizacijski odbor foto natečaja Europhotometeo EPM2024. Zbiranje fotografij se je začelo 15. novembra 2023. Odobrili smo novega člana v odboru za nagrade EMS, ki je dr. Benjamin Strajnar iz ARSO. Stekla je pobuda za razvoj večjezičnega besedišča meteoroloških izrazov in začetek serije spletnih seminarjev z raznoliko vsebino, kot so predstavitve knjig, rezultati fotografskega natečaja, razprave o vročih temah itd.

V nedeljo, 2. septembra, je pred začetkom konference potekala letna skupščina EMS. Na njej sem zastopala SMD. Začeli smo s pripravami na obeležitev 25 letnice EMS. Največ je bilo govora o doseganju ogljične nevtralnosti konference. Največji prispevek k izpustom toplogrednih plinov je potovanje udeležencev na kraj konference. Cenimo dodano vrednost, ki jo nudi fizično srečanje in druženje strokovnjakov, vendar je pomembno, da si prizadevamo, da bi s potovanjem povzročili čim manjše izpuste. Kar 245 od 523 udeležencev je na konferenco v Bratislavo pripotovalo z vlakom. Kolega Rasmus Benestad je za spletno stran EMS opisal svoje 28 urno potovanje z vlakom iz Osla v Bratislavo, z njim sta potovala kolega Ketil Tunheim and Reidun Gangstø.

Odobrili smo načrt za ustanovitev revije Journal of the EMS (JEMS) in zadolžil urad EMS, da sklene pogodbo z založnikom za začetek izhajanja JEMS januarja 2024; urednika bosta Johannes Schmetz in bivši predsednik EMS Bert Holtslag. Skupščina je z letom 2023 za triletni mandat izvolila tudi dva nova člana sveta EMS, in sicer bo Hrvaško meteorološko društvo (HMD) zastopala Vesna Đuričić, Ciprsko meteorološko društvo (CY.MET.A.) pa Anastasia Christou.

Podpora mladim biometeorologom

Fundacija Solco W. Tromp je tokrat omogočila sodelovanje na konferenci šestim mladim strokovnjakom s kritjem kotizacije in potnih stroškov.



Slika 3. Pam Emch je moderirala predstavitev kandidatov za nagrado Harry Otten. (foto: Daniel Zachar)

Kratko predstavitev simpatičnih mladih strokovnjakov s področja biometeorologije in uvodni nagovor predsednika fundacije si lahko ogledate v video kompilaciji na YouTube kanalu EMS (https://www.youtube.com/watch?v=TJDFt7bDO_8).

Nagrada Harry Otten fundacije za najbolj inovativno idejo

Na konferenci so bili predstavljeni trije finalisti natečaja za 25.000 EUR za najbolj inovativno idejo s področja meteorologije, ki jo podeljuje fundacija Harry Otten Prize (<https://www.harry-otten-prize.org/>). Predstavitve je vodila predsedujoča fundaciji Pamela Emch, podelitev glavne in dveh dodatnih nagrad pa je vodil ustanovitelj fundacije Harry Otten, ki je v meteorološki skupnosti poznan kot prvi uspešen evropski privatni podjetnik na področju meteorologije. Ob prodaji svojega podjetja je polovico svojega imetja



Slika 4. Harry Otten je predal simbolični ček zmagovalcu natečaja za najboljšo inovacijo v meteorologiji. (Foto: Daniel Zachar)



Slika 5. Skupinska slika nagrajencev. (foto: Daniel Zachar)

namenil fundaciji. Nagrade se podeljujejo vsako drugo leto, v letu 2023 že šestič. Tokrat je nagrado 25.000,00 EUR prejel Hamish Pritchard iz British Antarctic Survey (Združeno kraljestvo). Njegova zamisel »Jezera kot senzorji sneženja« rešuje problem spremljanja padavin v gorski kriosferi s pomočjo jezer. S standardnimi senzorji vodnega tlaka, potopljenimi na jezersko dno, je mogoče zapisati maso zimskih snežnih padavin, ko ta doseže gladino jezera.



Najboljši poster

Vsako leto na konferenci podelijo tudi nagrado za najboljši poster, komisijo vodi Marie Doutriaux-Boucher iz EUMETSAT-a. Letos smo udeleženci



Slika 6. Razglasitev najboljšega posterja na konferenci, avtor posterja Theo Economou in predsednica strokovne žirije Marie Doutriaux-Boucher. (foto: Heinke Schlünzen)

prvič imeli možnost, da poleg strokovne komisije sodelujemo s svojimi glasovi. Tokrat je nagrado prejel Theo Economou iz Centra za raziskave podnebja in ozračja (CARE-C) s Cipra za poster z naslovom »Kvantificiranje sinergije okoljskih stresorjev na človeško umrljivost«. Nagradni certifikat bo podeljen na EMS2024 v Barceloni.



Slika 7. Zornitsa Spasova. (foto: Daniel Zachar)

Novinarska nagrada EMS za Zornitso Spasovo in Oleja Mathismoena

Dva nagrajenca, izbrana za novinarsko nagrado EMS 2023, prikazujeta dva različna pogleda na podnebne spremembe, eden, upoštevajoč širšo mednarodno sliko, drugi pa se zelo omeji na lokalne in osebne perspektive.

Zornitsa Spasova, Bolgarija, je bila nagrajena za tri članke o podnebnih spremembah in zdravju žensk,

o globalnem segrevanju in delovnih razmerah ter o podnebnih spremembah in kozmetični industriji. Avtorica ponuja poglobljen in temeljit pregled, analizo globalnega segrevanja in družbenih vplivov, s posebnim poudarkom na delovnih razmerah po vsem svetu in zdravju žensk v Indiji. Njeno poročanje pojasnjuje, kaj podnebne spremembe pomenijo za družbo, in s tem poudarja pomen meteorologije/klimatologije za ljudi.

Zornitsa Spasova je raziskovalka na področju podnebnih sprememb in javnega zdravja ter samostojna novinarka. Zaposlena je v Državnem centru za javno zdravje in analize v Sofiji in sodeluje pri raziskovalnih projektih na področju medicinske geografije, biometeorologije in javnega zdravja. Ukvarja se s projekti, kot so: Meteorološke razmere in prometna varnost; Ekstremni vremenski dogodki



Slika 8. Ole Mathisoen. (foto: Daniel Zachar)

v Bolgariji in javnozdravstveni odzivi; Otroški travmatizem – mednarodna primerjava; Vročinski valovi ter srčno-žilna obolevnost in umrljivost; Vpliv podnebnih sprememb na parazitske bolezni; Proučevanje javnega mnenja o podnebnih spremembah in njihovih vplivih na zdravje ljudi; Vreme, podnebje in duševno zdravje. Sodelovanje pri pripravi Nacionalne strategije in akcijskega načrta prilagajanja podnebnim spremembam in COST Action CA19101 DE-PASS Determinante fizičnih dejavnosti v nastavitvah.

Ole Mathismoen iz Norveške je prejel nagrado za dva članka, v katerih ponazarja zamišljeno prihodnost svojega sina, da bi prikazal možne podnebne razmere v prihodnosti v Oslu. V člankih poskuša "humanizirati" problem podnebnih sprememb na način, s katerim se lahko poveže veliko ljudi. Oba članka orišeta podnebno prihodnost v Oslu, kakor jo bo videl njegov sin Ole Mathismoen Syver. Članka se začneta s sliko Syverja in opisom trenutnega podnebja za izbrani letni čas. Da bi bila zgodba res osebna in v podnebnem kontekstu, je vključen opis podnebja v času Olejevega otroštva. Syver si ogleda podnebne razmere leta 2052 star 35 let, leta 2082 v starosti 65 let in ob

koncu stoletja. Syversov razvoj od 5-letnega dečka je bil predstavljen z risbami Syverja s svinčnikom v starosti 5, 35 in 65 let, risbe in grafe je izdelal Torstein Ringnes.

Članki so bili predstavljeni v dveh oblikah: v tiskani obliki in v elektronski obliki za branje na spletu. Oba formata sta bila dobro sprejeta, vendar je slednji dal bolj interaktiven občutek z možnostmi, ki jih nudi splet. Podnebni indeksi v obeh člankih so kombinacija indeksov, kot so povprečna temperatura in sezonski specifični indeksi.

Ole Mathismoen je izkušen novinar v Aftenpostnu, glavnem časopisu v širši regiji Osla z dosegom na Norveškem, ki se je specializiral za podnebno in okoljsko novinarstvo. Mathismoen ima dolg seznam člankov s področja podnebja, okolja in energije. Kot avtor ali soavtor je izdal 12 knjig s področja okolja in podnebja.

Mateusz Taszarek je prejel nagrado EMS Young Scientist Award 2023

Nagrada EMS za mladega znanstvenika 2023 je prejel Mateusz Taszarek iz Univerze Adama Mickiewicza, Poznań, Poljska, za pomemben prispevek k razumevanju nevarnosti močnih konvektivnih neviht, njihovega spremljajočega atmosferskega okolja in odnosov do segrevanja podnebja v Evropi in Združenih državah Amerike. Nominiran je bil zaradi publikacije: »Differing Trends in United States and European Severe Thunderstorm Environments in a Warming Climate«, Mateusz Taszarek, John T. Allen, Harold E. Brooks, Natalia Pilgus in Bartosz Czernecki, Bull. Amer. Meteor. Soc., 102, E296–E322, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0004.1>.

Srebrno medaljo EMS 2023 je prejela Sarah Jones

Evropsko meteorološko društvo je izbralo Sarah Jones iz Nemčije za prejemnico srebrne medalje EMS 2023.



Slika 9. Sarah Jones prejema priznanje iz rok Berta Holtslaga. (foto: Daniel Zachar)

Sarah Jones je članica izvršnega odbora Nemške vremenske službe (DWD) od leta 2011 in je vodja poslovnega področja raziskav in razvoja. Evropski meteorološki skupnosti je služila zlasti s svojimi vodilnimi prispevki k mednarodnim raziskovalnim programom, kot so THORPEX, PANDOWAE (predvidljivost in dinamika vremenskih sistemov v atlantsko-evropskem sektorju) in multidisciplinarno analizo afriškega monsuna (AMMA). Kot predsednica znanstvenega usmerjevalnega odbora programa za raziskave svetovnega vremena (WWRP) je bila tesno vpeta v projekt HIWeather, ki je bil prvi projekt znotraj WMO, ki je uspešno povezal fizikalne in družboslovne znanosti na smiseln način. Prav tako je v okviru Centra Hans-Ertel za vremenske raziskave privedla do učinkovitejših napovedi in opozoril za kritične deležnike. Ta nagrada priznava njen pomemben prispevek k razumevanju in modeliranju tropskih sistemov in zunajtropskih prehodov, njene izjemne vodstvene zasluge v korist evropske in mednarodne skupnosti ter njeno tesno sodelovanje s skupnostjo



Slika 10. Sarah Jones med predavanjem. (foto: Daniel Zachar)

Young Earth System Science.

Sarah Jones je priznanje prejela na posebni plenarni seji, ob prejemu medalje in plakete je povedala: »Vesela in počaščena sem, da sem prejela srebrno medaljo EMS. Zelo posebno je biti prepoznan po ustvarjanju sprememb na našem področju s kombinacijo znanosti, vodenja, mednarodnega sodelovanja in sodelovanja z znanstveniki na začetku kariere. Toda ta nagrada prav tako pripada kolegom, s katerimi sem imela privilegij delati, in znanstvenikom na začetku kariere, od katerih sem se veliko naučila.« Sledilo je njeno predavanje z naslovom »Znanstveniki na začetku kariere poti in kako oblikujejo naš svet.«

Nova predsednica EMS

Prof. Liz Bentley je ob koncu letne konference EMS v Bratislavi prevzela predsedovanje EMS za naslednja tri leta in je prva predsednica EMS. Kariero v meteorologiji je začela pred tridesetimi leti v meteorološki službi kot raziskovalka po opravljenem doktoratu iz matematike. Želela je razumeti uporabo



znanosti, zato se je usposobila za operativnega meteorologa. Leta 1997 je začela z delom na Met



Slika 11. Liz Bentley je sodelovala pri podeljevanju EMS nagrad. (foto: Daniel Zachar)

Office College kot inštruktorica in sčasoma postala glavna inštruktorica. Karierna pot jo je vodila v BBC TV Center v Londonu, kjer je kot vodja BBC vremenskega centra usmerjala ekipo 30 televizijskih meteorologov. Leta 2006 se je zaposlila na Ministrstvu za obrambo, kjer je skrbela za okoljski raziskovalni program. Kraljevi meteorološki družbi se je pridružila leta 2008 in leta 2013 postala glavni izvršni direktor RMetS, julija 2014 je prejela naziv profesor na Univerzi v Readingu. Ustanovila je »Weather Club« za spodbujanje spoštovanja in razumevanja vremena pri ljudeh iz vseh družbenih slojev in leta 2011 za to pobudo prejela nagrado EMS Outreach & Communications Award. Zadnjih 10 let je Liz Bentley zastopala EMS v Svetu mednarodnega foruma meteoroloških društev.

O Kraljevem meteorološkem društvu

Kraljevo meteorološko društvo (RMetS) je izobraževalno in strokovno društvo za vreme in podnebje v Združenem kraljestvu. Poslanstvo RmetS je izboljšati razumevanje vremena in podnebja v korist vseh. RMetS ima široko pristojnost, ki podpira razumevanje, zanimanje in navdušenje ljudi glede vremena in podnebja, ne glede na to, ali so raziskovalci, navdušenci, praktiki, študenti, učitelji ali člani splošne javnosti. Podpira tudi razvoj visokokakovostne znanosti, naslednjo generacijo znanstvenikov in operativnih meteorologov, poklicni razvoj posameznikov, akreditira programe nadaljnega in visokošolskega izobraževanja, obvešča politiko in podpira učenje o vremenu in podnebjem z izobraževanjem in dejavnostmi ozaveščanja. RMetS je stalni član Sveta EMS že od ustanovitve leta 1999.

Nagrada EMS za izjemen prispevek

Carola Detring iz Nemčije je prejela nagrado EMS za izjemen prispevek 2023. Že v zgodnji fazi svoje

kariere je s svojimi pobudami in povezovanjem z ustreznimi partnerskimi omrežji prispevala k delovanju EMS. Leta 2018 je postala prva predsednica skupine nemških mladih znanstvenikov v okviru German Met Society (DGM), katerega ustanovna članica je bila. Od leta 2020 je članica Odbora EMS za konference. Kot odgovorna organizatorica se je zavzemala za vzpostavitev MeteoXchange, kot odprte platforme



Slika 12. Carola Detring sprejema nagrado za izjemen prispevek delovanju EMS. (foto: Daniel Zachar)

za mlade znanstvenike s področja meteorologije in klimatologije za izmenjavo izkušenj, razpravo o znanstvenih in kariernih vprašanjih. V tem okviru organizira redne dogodke (MeteoMeet), na katere so vabljeni starejši raziskovalci, da spregovorijo o specifičnih področjih raziskovanja, priložnostih v svojih institucijah in primerih razvoja raziskovalnih področij. Pomemben projekt so tudi letne konference MeteoXchange ECS, ki so ekskluzivne virtualne konference za znanstvenike na začetku poklicne poti na področju atmosferskih znanosti in sorodnih disciplin. Caroline izkušnje kot mlade znanstvenice so v Odboru EMS za konference pomagale uvesti platforme za spletne dogodke in letno srečanje. Zastopala je EMS na letnem srečanju AMS 2022, kjer je predstavila dejavnosti MeteoXchange in EMS za znanstvenike na začetku kariere in vzpostavila prve povezave z odborom AMS za strokovnjake na začetku kariere.

Nagrada EMS za tehnološke dosežke 2023

Nagrado EMS Technology Achievement Award 2023 je prejela storitev napovedovanja vremena, ki jo je razvila Norveška meteorološka služba. Nagrado so prejeli za načine, na katere vremenske informacije nudijo širokemu občinstvu po vsem svetu: izstopa po funkciji napovedovanja trenutnega stanja, ki uporablja podatke prebivalcev v nordijski regiji, in možnosti pogleda neba, ki prikazuje prihodnje vreme na zelo pregleden način.

Spletno platformo uporabljajo za omogočanje dostopa uporabnikov do podatkov opazovanj in vremenskih napovedi, vizualiziranih na različne načine. Uporabnikom so na voljo zemljevidi, tabelarni



Slika 13. Norveška meteorološka služba pogosto izstopa s svojimi dosežki, tudi na konferenci EMS 2023 je prejela eno od prestižnih nagrad. (foto: Daniel Zachar)

in grafični prikazi različnih vrst vremenskih podatkov, saj je znano, da imajo različni ljudje raje različne vizualizacije. Enake ambicije veljajo za izvirne aplikacije, ki so enostavnejša različica spletnega mesta.



Slika 14. Liz Bentley in Stella Kafka sta podpisali obnovljen sporazum o sodelovanju med EMS in AMS. (foto: Daniel Zachar)



Slika 15. Liz Bentley in Tanja Cegnar s petimi nagrajenci Salco W Tromp fundacije. (foto: Daniel Zachar)

Izdelek je plod sodelovanja med Norveško radiodifuzno korporacijo (NRK) in Norveškim meteorološkim inštitutom (MET Norveška). Iz množice spletnih mest in aplikacij izstopajo po uporabi opazovanj Netatmo, v nordijski regiji, ki omogočajo izboljšanje napovedi na zelo lokalni ravni in izboljšanje trenutne napovedi. Ta pristop je velik tehnološki izziv. Amaterski podatki so izjemno nehomogeni in spremenljive kakovosti. Preverjanje kakovosti je zato zahtevno in lahko delujejo le ob uporabi posebne tehnike umetne inteligence. Možnost "skyview" je zanimiva, saj prevaja vreme, kot ga vidimo od zgoraj v perspektivo uporabnika.

EMS in AMS sta obnovila pogodbo o sodelovanju

Stella Kafka, izvršna direktorica Ameriškega meteorološkega društva (AMS), se je udeležila letnega srečanja EMS v Bratislavi in številnih dogodkov ob konferenci; ob tej priložnosti sta podaljšanje sporazuma podpisali Liz Bentley, nova predsednica EMS, in Stella Kafka.

AMS in EMS sta kot organizaciji s skupnimi cilji podpore ustvarjanju in širjenju znanja o ozračju in sorodnih znanostih obnovili svojo zavezo za vzajemno koristno sodelovanje, ki vključuje usklajevanje datumov srečanj, zastopanje na letnih srečanjih, ko-sponsorstvo srečanj, brezplačne institucionalne naročnine na članske publikacije in nižjo kotizacijo na konferencah.

Delavnica za komunikatorje Državnih hidrometeoroloških služb

ECMWF, EUMETSAT, WMO in EMS Odbor za medije in komunikacijo smo kot vzporeden dogodek na konferenci izpeljali hibridno delavnico namenjeno komunikatorjem državnih hidrometeoroloških služb. Glavnina prvega dneva delavnice je bila namenjena razpravi o možnostih in tveganjih, ki jih prinaša ki jih prinaša umetna inteligenca. Na delavnici sem predstavila delovanje Odbora EMS za medije in komunikacijo, izpostavila sem komunikaciji namenjene sekcije na EMS konferenci ter tri medijske nagrade, ki so lahko zanimive tudi za zaposlene v državnih meteoroloških in hidroloških službah. Sekcija za medije in komunikaciji je bila sestavni del delavnice.

Na svidenje v Barceloni

Poudarek naslednje letne konference od 2. do 6. septembra 2024 v Barceloni bo na raziskovanju vloge vremenskih in podnebnih raziskav pri doseganju podnebno nevtralne Evrope.

Izjemno obilno deževje od večera 3. do jutra 4. avgusta 2023

Gregor Vertačnik, Agencija RS za okolje, gregor.vertacnik@gov.si

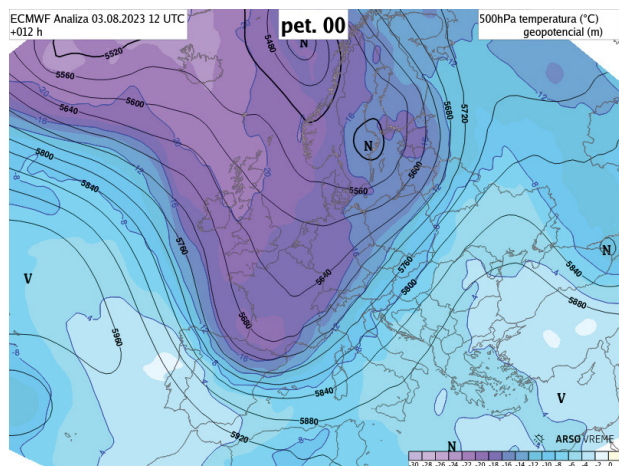
Uvod

V noči s 3. na 4. avgust 2023 so del zahodne in severne Slovenije zajele močne padavine, ki so povzročile katastrofalne poplave v porečjih Save, Sore, Kamniške Bistrice, Savinje, Meže in še na nekaterih drugih območjih. V prispevku na podlagi spletnega poročila Agencije Republike Slovenije za okolje (Nalivi in obilne padavine od 3. do 6. avgusta 2023), ki je bilo objavljeno 29. septembra, in dodatnih meteoroloških podatkov obravnavamo vremensko stanje, izdana opozorila, razvoj vremena v Sloveniji in padavinsko statistiko omenjenega vremenskega dogodka.

Vremenska slika nad Evropo

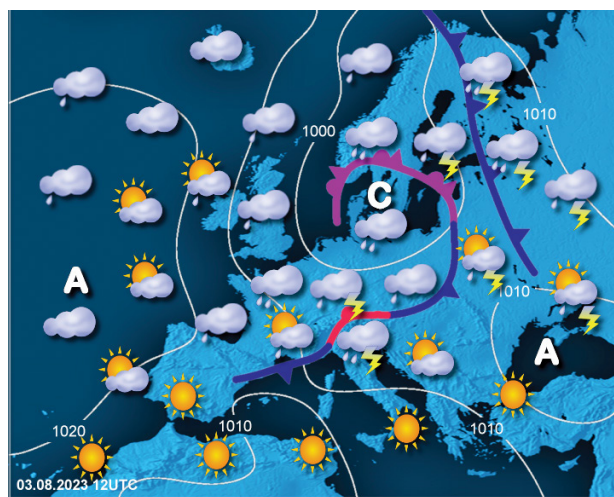
Splošna vremenska slika nad Evropo je bila 3. in 4. avgusta izrazito nenavadna za sredino meteorološkega poletja. Izrazita višinska dolina se je 3. avgusta iznad zahodne Evrope pomaknila proti jugu nad zahodno Sredozemlje in naslednji dan zajela tudi severno in osrednje Sredozemlje (slika 1). Ob tem je nad severnim Sredozemljem nastalo plitvo ciklonsko območje, kar je upočasnilo napredovanje vremenske fronte (sliki 2 in 3). Ta se je nad Slovenijo zadrževala od noči s 3. na 4. avgust do 5. avgusta dopoldne.

V noči s 3. na 4. avgust je zračna masa nad Slovenijo dotekala iznad zmernih geografskih širin severnega

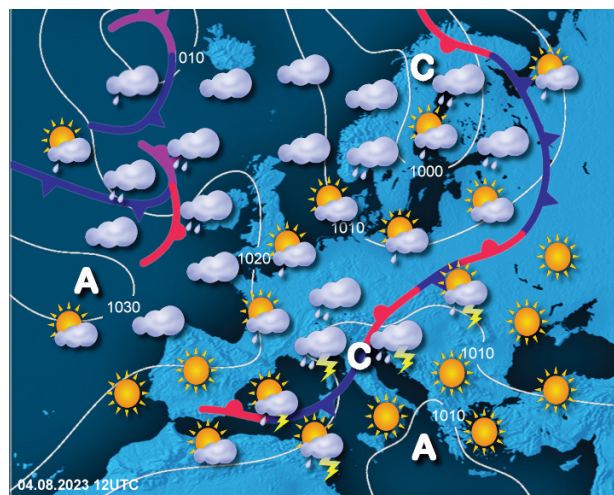


Slika 1. Temperatura zraka (barvna lestvica) in geopotencialna (približno nadmorska) višina pritiskove ploskve 500 hPa nad Evropo in okolico 4. avgusta ob 2. uri. Vira: ECMWF in ARSO

Atlantika prek jugozahodne Evrope in Sredozemskega morja (slika 4). Takrat je bilo površje morja na teh območjih povečini toplejše kot običajno, kar je prispevalo k povečani vlažnosti zračne mase, ki je dotekala nad Slovenijo.



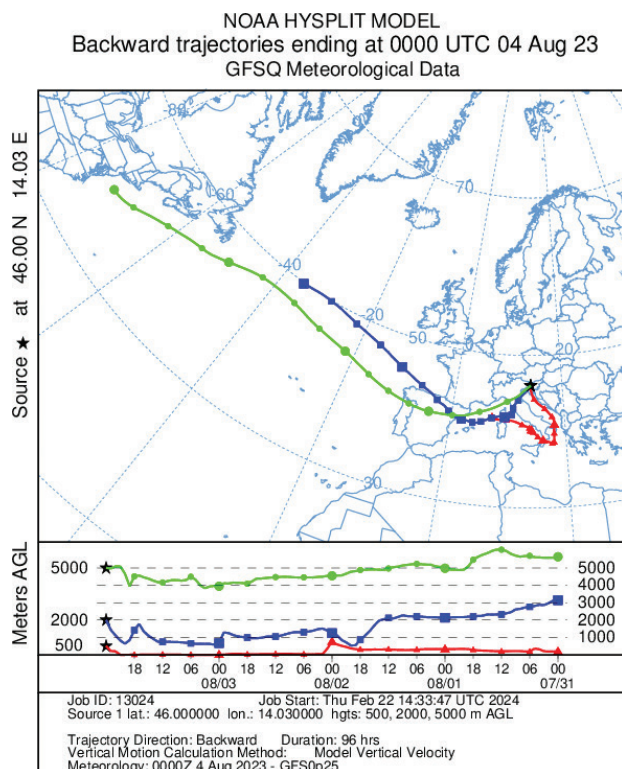
Slika 2. Vremenska slika nad Evropo 3. avgusta ob 14. uri



Slika 3. Vremenska slika nad Evropo 4. avgusta ob 14. uri

Izdana vremenska opozorila Agencije RS za okolje

Meteorološki modeli, zlasti regionalni, so pred dogodkom kazali na povečano možnost močnih nalivov, zlasti v noči s 3. na 4. avgust (slika 5).



Slika 4. Napovedana 96-urna pot zračne mase do Idrije od 2. ure 31. julija do 2. ure 4. avgusta. Rdeča, modra in zelena krivulja prikazuje pot zračne mase do končne višine 500, 2000 in 5000 metrov nad tlemi. Spodnji del slike prikazuje časovni potek (od desne proti levi) višine zračne mase nad tlemi. Vir: NOAA Air Resources Laboratory (ARL), HYSPLIT transport and dispersion model: <https://www.ready.noaa.gov>

Največja negotovost je bila glede padavinskega maksimuma, saj so nekateri izračuni ta maksimum kazali v Beli krajini, drugi v Zasavju, tretji v alpskem svetu itd.

Meteorološka prognostična služba Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) je skladno z modelskimi izračuni 3. avgusta ob 9. uri izdala prvo opozorilo pred nalivi in obilnimi padavinami:

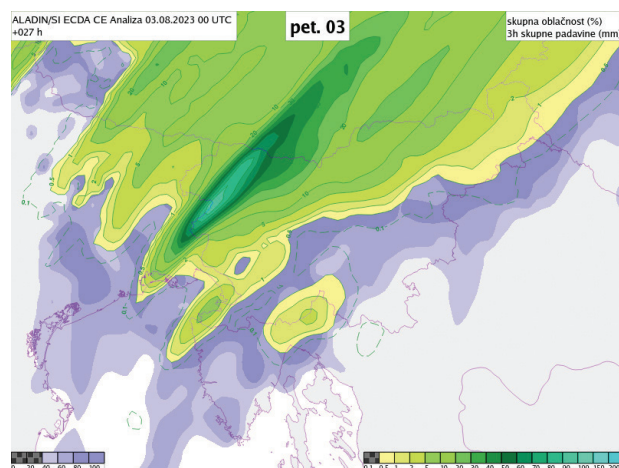
Od danes nekje od sredine popoldneva do sobote zjutraj bodo krajevno možni močnejši in tudi dolgotrajni nalivi. Tudi v soboto bodo padavine kar izrazite, ne bo pa več nevihtno.

V nedeljo bodo ponovno plohe in nevihte, a ne tako intenzivne in tudi količina padavin bo manjša.

Opozorilo je bilo v naslednjih dneh osveženo, saj so bile obilne padavine napovedane do popoldneva 5. avgusta.

Sprva je bilo za obdobje od 3. avgusta pozno popoldne do 5. avgusta dopoldne izdana druga najvišja (oranžna) stopnja vremenskega opozorila za vse regije. Zaradi resnosti vremenske situacije in pričakovane zaostritve opozorila (v najvišjo,

rdečo stopnjo) je ARSO že 3. avgusta ob 13. uri v sodelovanju z Ministrstvom za obrambo, Direkcijo Republike Slovenije za vode in Geološkim zavodom sklical novinarsko konferenco in javnost seznanil z napovedanim nevarnim vremenskim dogajanjem. Naslednje jutro je ARSO zgodaj zjutraj (ob 5.30) stopnjo vremenske ogroženosti za obe severni regiji in osrednjo Slovenijo dvignil na najvišjo (rdečo) stopnjo, ob 9. uri pa tudi za jugovzhodni del Slovenije.

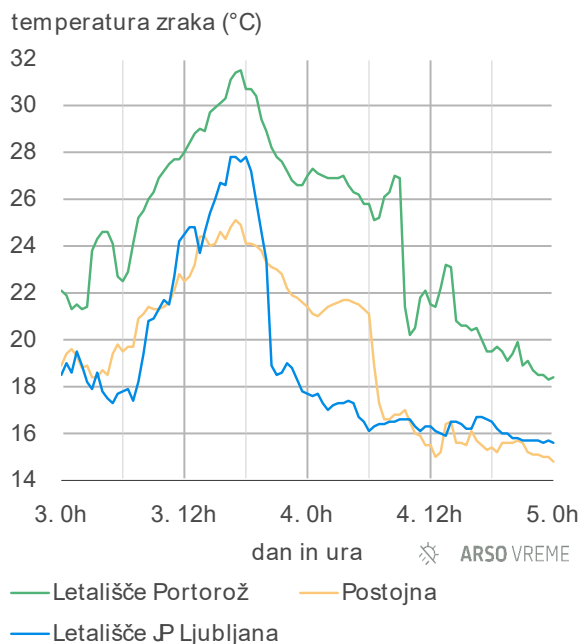


Slika 5. Napoved triurne višine padavin meteorološkega modela ALADIN do 5. ure 4. avgusta za območje Slovenije in bližnje okolice. Začetno vremensko stanje je 3. avgusta ob 2. uri. Vira: ECMWF in ARSO

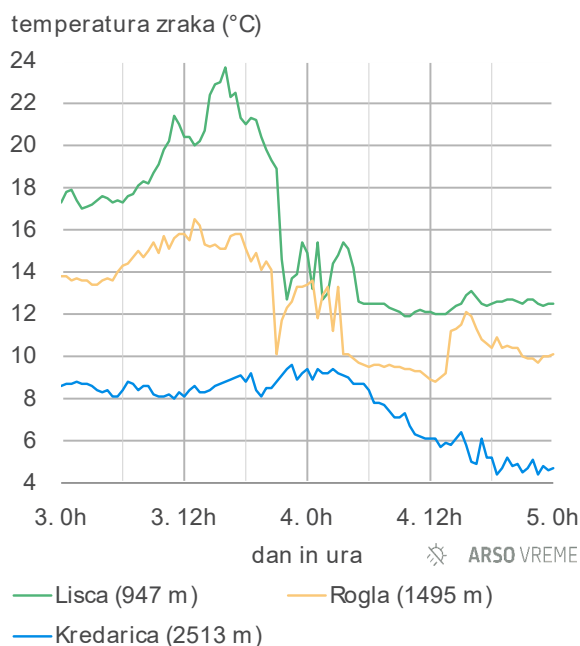
Razvoj vremena nad Slovenijo

Tretji avgust se je začel s toplim jutrom, saj je bila najnižja temperatura zraka po nižinah med 15 in 19 °C, na Primorskem okoli 20 °C. Čez dan je bilo deloma sončno, le na alpsko-dinarski pregradi zaradi vlažnega jugozahodnika ter nastanja ploh in neviht sončnega vremena ni bilo veliko oziroma ga sploh ni bilo. Najvišja temperatura je bila na severu države ter kotlinah in dolinah na alpsko-dinarski gorski pregradi med 24 in 28 °C, drugod od 26 do 32 °C (slika 6). V noči na 4. avgust je v notranjosti Slovenije od severovzhoda pri tleh začel dotekal občutno hladnejši zrak, na Primorskem in v Furlaniji-Juljski krajini pa še vedno tople in zelo vlažne zrak (slika 6). Ostra temperaturna meja je vztrajala do dopoldneva 4. avgusta, nato se je tudi na Primorskem in v višinah ohladilo (sliki 6 in 7).

Prve plohe so v vlažnem in močnem jugozahodnem zračnem toku na alpsko-dinarski pregradi nastajale že v drugi polovici noči z 2. na 3. avgust, a padavine do dopoldneva še niso bile obilne. Nato se je pozno dopoldne za dobro uro vzpostavil pas obnavljajočih se padavin, ki je segal od kobariškega območja proti Jesenicam. To je bil uvod v izjemno vremensko dogajanje naslednjih 36 ur. Le malo kasneje se je naslednji, bolj izrazit in daljši padavinski pas vzpostavil nad skrajno severovzhodno Italijo proti Beljaku. Proti



Slika 6. Časovni potek temperature zraka 3. in 4. avgusta na treh nižinskih merilnih mestih v zahodni polovici Slovenije

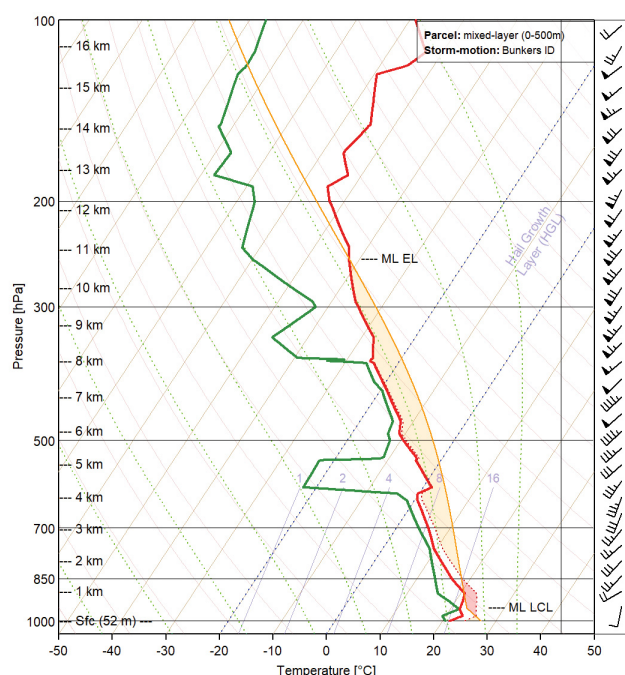


Slika 7. Časovni potek temperature zraka 3. in 4. avgusta na treh višinskih merilnih mestih

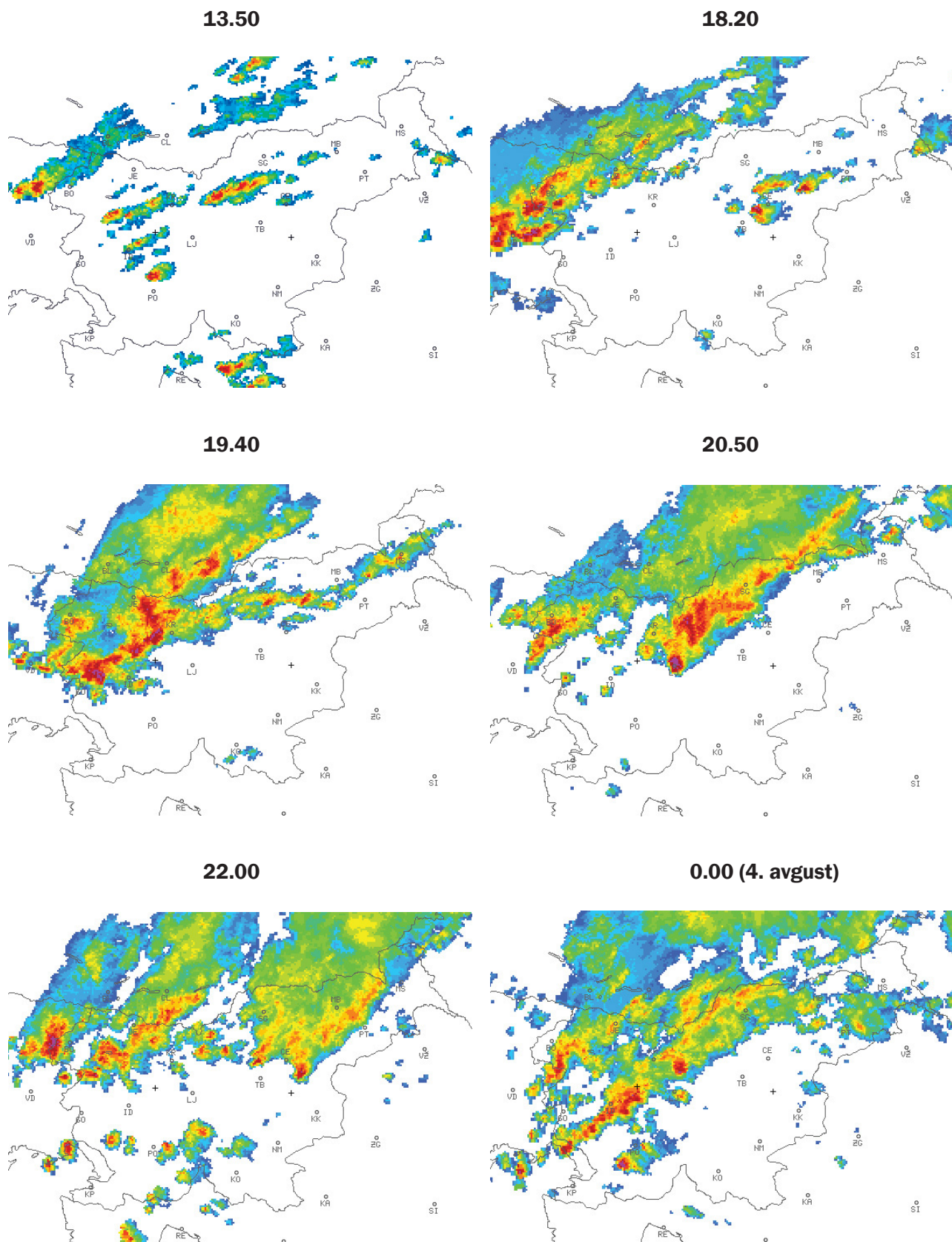
večeru so se padavine na severozahodu Slovenije okrepile, izrazit padavinski pas z nalivi je med 19. in 22. uro prešel severno polovico Slovenije (slika 9). Nastajale so nevihte, ki so jih ponekod spremljali močnejši sunki vetra (Volče pri Tolminu 23 m/s, Letališče Lesce 18 m/s, Letališče JP Ljubljana 16 m/s).

Ozračje nad Slovenijo je bilo vso noč s 3. na 4. avgust zelo ugodno za nastajanje ploh in neviht (slika 8). Nad

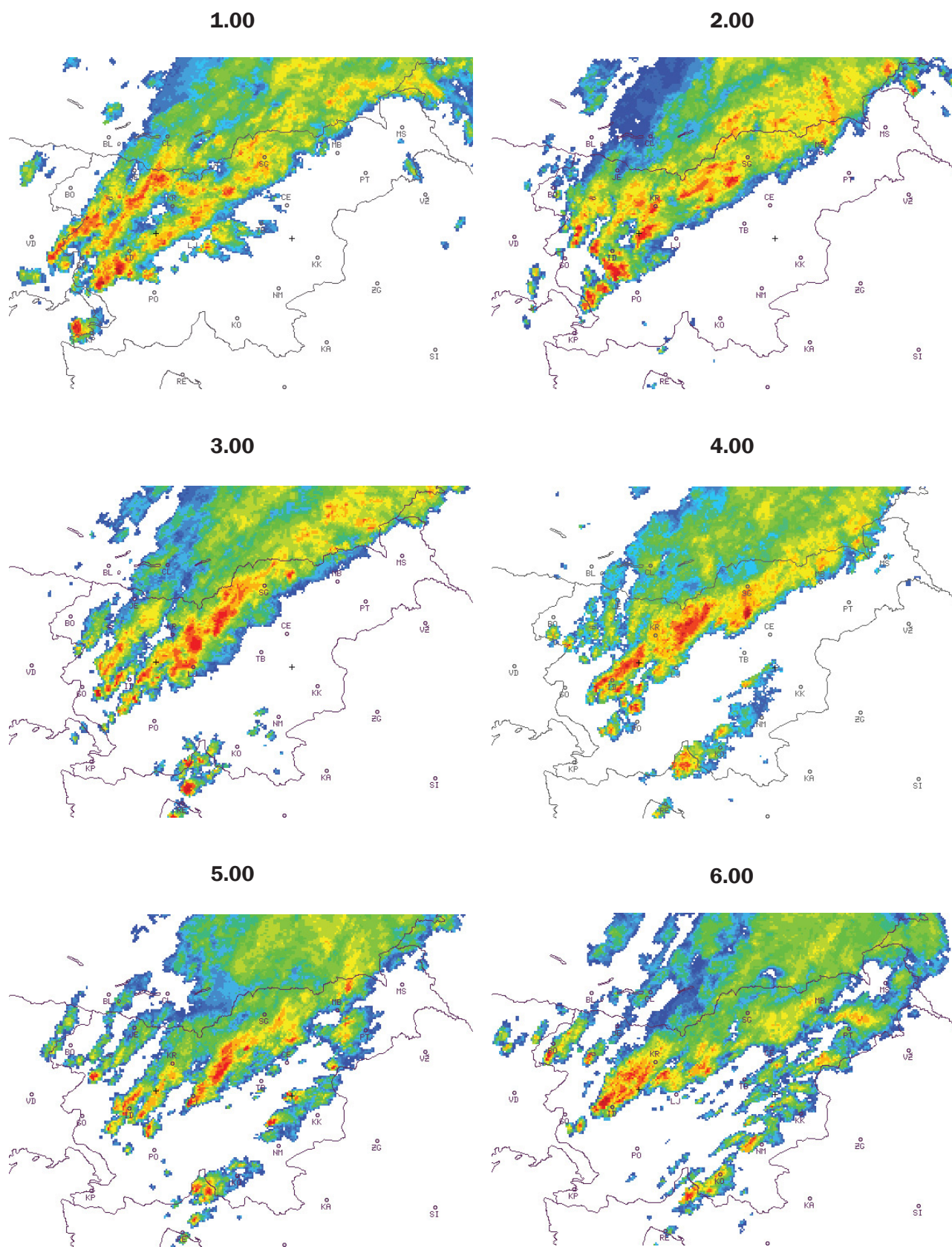
alpsko-dinarsko pregrado se je vzpostavilo dolgotrajno proženje nevihtnih oblakov in se sredi noči zgostilo na območju od Trnovskega gozda prek Gorenjske proti Kamniško-Savinjskim Alpam (sliki 9 in 10). Tu so se nalive obnavljali več ur zapored in se pomikali naprej proti Koroški, severu Štajerske in jugovzhodnemu delu Avstrije. Šele okoli 7. ure zjutraj 4. avgusta se je burno vremensko dogajanje začelo umirjati, težišče padavin in nalivev se je dopoldne selilo v jugozahodni in južni del Slovenije. Občasne padavine, sprva tako v obliki krajevnih nalivev kot večjih padavinskih območij, kasneje pa v obliki enakomernega dežja, so bile po Sloveniji tudi v drugem delu 4. avgusta in del 5. avgusta.



Slika 8. Navpični presek ozračja nad italijanskim Vidmom sredi noči s 3. na 4. avgust do nadmorske višine 16 km. Rdeča krivulja prikazuje temperaturo zraka, zelena temperaturo rosišča. Na desnem robu grafičnega prikaza so s puščicami prikazane vetrne razmere; kratek repek označuje hitrost 5 vozlov (9 km/h), dolg repek 10 vozlov (19 km/h) in trikotnik 50 vozlov (93 km/h). Ozračje je bilo toplo in zelo vlažno (vodni stolpec je znašal kar 47 mm), nestabilnost zmerno velika. Striženje jugozahodnega vetra z višino je bilo zelo močno, saj je bil veter pri tleh šibak, na treh kilometrih je dosegel hitrost okoli 13 m/s, šest kilometrov nad tlemi okoli 26 m/s in na vrhu troposfere okoli 35 m/s. Kombinacija nestabilnega ozračja in zelo močnega dotoka vodne pare na alpsko-dinarsko pregrado je povzročila močne in dolgotrajne nalive. Vir: thunderR, http://www.rawinsonde.com/thunder_app/



Slika 9. Največja radarska odbojnost padavin ob izbranih časih od 3. avgusta popoldne do sredine noči na 4. avgust. Šibke padavine so predstavljene z modrimi, zmerne z zelenimi in rumenimi odtenki, močne z oranžnimi, rdečimi in vijoličnimi odtenki.



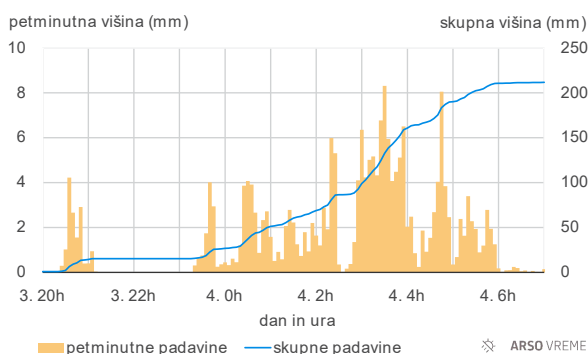
Slika 10. Največja radarska odbojnost padavin ob izbranih časih 4. avgusta v drugem delu noči in zgodaj zjutraj. Šibke padavine so predstavljene z modrimi, zmerne z zelenimi in rumenimi odtenki, močne z oranžnimi, rdečimi in vijoličnimi odtenki.

Višina padavin

Manjše padavine so se sicer na alpsko-dinarski pregradi pojavljale že v noči z 2. na 3. avgust in 3. avgusta zjutraj, a je le krajevno padlo nekaj milimetrov dežja. Čez dan se je konvektivna dejavnost krepila in proti večeru so bile padavine v zahodnem delu Slovenije vse močnejše in pogostejše. Glavnina padavin je bila zvečer in v noči na 4. avgust, ko je v obnavljajočih se nalivih od zahodne Slovenije proti Koroški in severu Štajerske padlo ogromno dežja (slika 11 in 12). Do 8. ure 4. avgusta smo v 24 urah na posameznih merilnih mestih izmerili več kot 200 mm dežja in skoraj povsod v pasu od Zgornjega Posočja in območja Idrije proti vzhodu-severovzhodu, do Dravske doline, več kot 100 mm dežja (slika 13). V večjem delu Štajerske in Prekmurja je bilo padavin manj, ob meji s Hrvaško pod 30 mm. Zelo malo ali nič padavin pa je bilo od Slovenske Istre in Krasa prek večine južne polovice Slovenije.

Na območjih najobilnejših padavin v zahodnem in severnem delu Slovenije je bila višina padavin praviloma statistično najbolj izjemna za 6–12 urni časovni interval (preglednica 1). Še posebej izjemna

Suha



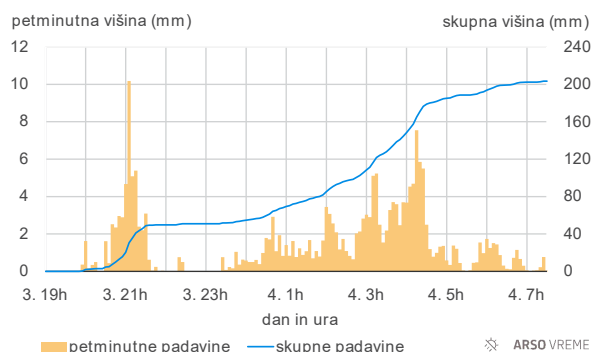
Slika 11. Časovni potek petminutne in skupne višine padavin v Suhi pri Škofji Loki od 20. ure 3. avgusta do 7. ure 4. avgusta

Preglednica 1. Najmočnejši izmerjeni nalivi oziroma obdobja padavin dolžine 1–24 ur od 3. do 4. avgusta zjutraj po povratni dobi. Navedeni so višina padavin (mm), dolžina intervala (ure), dan in ura konca intervala ter ocenjena povratna doba v letih. Navedena višina padavin je izračunana iz petminutnih vrednosti. Na merilnih postajah Boršt pri Gorenji vasi in Gornji Grad manjka večina meritev za 4. avgust, zato je bila tam verjetno največja povratna doba še večja od navedene. Vrednost > 100 pri povratni dobi pomeni, da je srednja ocena vsaj 160 let, vendar pa zaradi velike negotovosti ne navajamo podrobnejše vrednosti.

merilna postaja	višina padavin	dolžina intervala	konec intervala	povratna doba
Pasja ravan	213	9,50	4. 5:35	> 100
Letališče JP Ljubljana	198	10,08	4. 6:25	> 100
Luče	196	9,92	4. 6:20	> 100
Kamniška Bistrica	196	9,75	4. 6:10	> 100
Suha	194	6,50	4. 5:55	> 100
Kranj	184	24,00	4. 20:10	> 100
Boršt pri Gorenji vasi	173	10,17	4. 6:15	> 100
Idrija	171	7,58	4. 6:20	> 100
Krvavec	165	11,00	4. 6:50	> 100
Zavodnje	160	10,25	4. 7:00	> 100

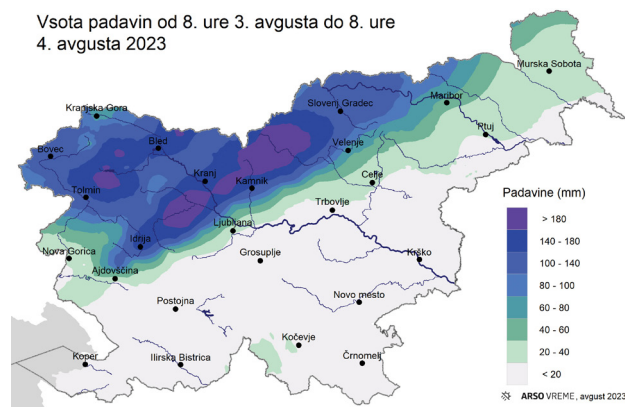
je bila višina padavin na merilnih mestih Pasja ravan, Suha pri Škofji Loki, Letališče JP Ljubljana, Kamniška Bistrica, Luče in Zavodnje. Tu je bila izmerjena višina padavin celo daleč nad srednjo oceno za 250-letni povratni nivo. Na številnih merilnih mestih smo na območju najobilnejših padavin 4. avgusta izmerili rekordno ali skoraj rekordno dnevno višino padavin (preglednica 2).

Luče



Slika 12. Časovni potek petminutne in skupne višine padavin v Lučah od 19. ure 3. avgusta do 7.30 4. avgusta

Vsota padavin od 8. ure 3. avgusta do 8. ure 4. avgusta 2023



Slika 13. Zemljevid dnevne (24-urne) višine padavin do 8. ure 4. avgusta na podlagi meritev meteoroloških postaj

Žiri	158	9,92	4. 6:10	> 100
Zelenica	157	8,50	4. 4:15	> 100
Logarska Dolina	155	8,50	4. 4:30	> 100
Ravne na Koroškem	150	18,25	4. 14:30	> 100
Mežica	148	18,08	4. 14:20	> 100
Uršlja gora	146	11,00	4. 7:10	> 100
Radegunda	136	8,92	4. 5:40	> 100
Letališče Lesce	141	8,83	4. 4:30	100
Šmartno pri Slovenj Gradcu	139	18,67	4. 14:35	100
Zgornja Kapla	134	24,00	4. 20:10	100
Gornji Grad	119	8,33	4. 5:00	100
Muta	107	9,67	4. 5:55	100
Vogel	89	2,00	4. 2:25	100
Kanin	60	1,58	3. 23:40	100
Osilnica	172	24,00	5. 3:55	50
Pavličevo sedlo	129	11,75	4. 7:45	50
Zgornja Sorica	93	3,00	4. 3:55	50
Jezersko	19	0,17	3. 20:30	50

Preglednica 2. Dnevna (24-urna) višina padavin (mm), izmerjena 4. avgusta ob 8. uri zjutraj na izbranih merilnih mestih. Za primerjavo je pri večini merilnih mest podana rekordna vrednost obdobja 1950–2022 in datum njenega nastopa v homogeniziranih in dopolnjenih časovnih nizih. Nove rekordne dnevne vrednosti za obdobje 1950–2023 so označene z rdečo.

merilna postaja	4. avgust	dnevni rekord	datum
Pasja ravan	222		
Poljane nad Škofjo Loko	218	162	19. 9. 2007
Luče	215	176	9. 10. 1980
Solčava	205	177	19. 10. 1961
Letališče JP Ljubljana	201	227	19. 9. 2007
Kamniška Bistrica	200	218	9. 10. 1980
Ambrož pod Krvavcem	196	219	19. 9. 2007
Zelenica	192		
Žiri	191	236	16. 9. 2022
Boršt pri Gorenji vasi	185		
Idrija	183	250	16. 9. 2022
Logarska Dolina	183	232	9. 10. 1980
Rudno polje	183	239	19. 9. 2007
Bele Vode	178	149	12. 10. 1983
Zavodnje	171		
Podpeca	168	126	9. 10. 1980
Gornji Grad	168	181	5. 11. 1998
Radegunda	161	123	9. 10. 1980
Črnivec	161	154	19. 9. 2007
Kranj	156	146	19. 9. 2007
Šentjošt nad Horjulom	155	242	16. 9. 2022
Breg (Žirovnica)	152	173	2. 9. 1965
Letališče Lesce	151	161	19. 9. 2007
Uršlja gora	147	130	9. 10. 1980
Podljubelj	143	146	19. 9. 2007
Ravne na Koroškem	127	96	9. 10. 1980
Ribnica na Pohorju	125	123	5. 11. 1998
Sv. Primož nad Muto	124	151	25. 8. 2019
Šmartno pri Slovenj Gradcu	115	131	9. 10. 1980

Sistemi za napoved namakanja v Sloveniji

Luka Honzak, BO-MO d.o.o., luka@bo-mo.si

Luka Žvokelj, Rozalija Cvejič, Marina Pintar, Univerza v Ljubljani, Biotehnična fakulteta

Uvod

Namakanje je eden izmed agrotehničnih ukrepov, s katerim lahko odpravimo ali vsaj omilimo posledice suše v kmetijstvu. Kmetijstvo je velik porabnik vode, zato je, tudi v luči podnebnih sprememb, smotrna raba vodnih virov zelo pomembna.

Raziskave in pretekli projekti v Sloveniji so pokazali, da kmetovalci v Sloveniji pogosto namakajo zgolj po občutku in na podlagi preteklih izkušenj. Tako se namakanje izvede prezgodaj ali prepozno, preredko ali prepogosto in v premajhnih ali prevelikih namakalnih obrokih (Cvejič in sod., 2020). Zaradi tega rastline skozi rastno dobo niso optimalno preskrbljene z vodo in trpijo zaradi pomanjkanja ali presežka vode, kar ima negativne posledice na zdravstveno stanje rastlin (več bolezni rastlin in večja poraba fitofarmaceutskih sredstev) in na količino, kakovost in obstojnost pridelka, zmanjšuje sprejem hranil v rastlino ter zmanjšuje učinkovitost in slabša razgradnjo fitofarmaceutskih sredstev, povečuje spiranje hranil in ostankov fitofarmaceutskih sredstev v podtalje ter slabša učinkovitost rabe vode. Poleg tega nepravilno izvajanje namakanja po nepotrebnem obremenjuje okolje in ni okoljsko trajno.

Globalno gledano je bilo v zadnjih desetletjih izvedenih več regulativnih in tehničnih ukrepov, ki naj bi povečali učinkovitost rabe vode in energije ter zmanjšali emisije CO₂ pri namakanju. Na primer, namakalne sisteme z odprtimi dovodnimi kanali vode so nadomestili tlačni zaprti sistemi, s čimer so zmanjšali izgube vode zaradi izhlapevanja. Temu so sledili ukrepi namestitve števec porabe vode, bolj redno je postalo tudi vzdrževanje namakalnih sistemov. Namakalni sistemi so bili posodobljeni na način, da več kmetov uporablja bolj učinkovito namakalno opremo (razpršilce so nadomestili kapljični namakalni sistemi). Zahtevano je dovoljenje za odvzem vode (pravica do rabe vode) in določeni so največji vodni odvzemi. A kljub temu slaba praksa vodenja in izvedbe namakanja ostaja velik izziv. Ukrepi, kot so npr. zapiranje odprtih kanalov, ki so bili v državah z dolgo tradicijo namakanja (npr. Španija) zelo učinkoviti in s katerimi so dosegli bistvene prihranke vode, niso aktualni povsod (Cvejič in sod., 2020). Denimo v Sloveniji, kjer zgodovino razvoja

namakanja in namakalnih sistemov beležimo le dobrih 100 let (Cvejič in sod., 2021), odprtih namakalnih sistemov nismo gradili. Zato iz naslova zmanjšane evaporacije vode ne moremo dosegati prihrankov vode. Namesto tega so naša prizadevanja pri dvigovanju ravni namakanja v smislu bolj učinkovite rabe vode usmerjena v izboljšanje prakse vodenja namakanja.

Raziskave kažejo, da vodenje namakanja z uporabo merilcev količine vode v tleh zmanjša potrebe po vodi, hkrati pa izboljša pridelek (Spencer in sod., 2019 in Chappell in sod., 2013). Primeri kažejo, da se lahko celoten obseg potreb po vodi za namakanje z izboljšanjem učinkovitosti obstoječega namakanja (bolj natančen obrok namakanja) zmanjša za 25 %–40 %, ne da bi to zmanjšalo pridelek (Gibson in sod., 2019). Doseganje visoke produktivnosti rabe vode z manj namakanja in boljše ujemanje količine za namakanje s potrebami rastlin po vodi sta združljiva cilja (Gibson in sod., 2019). Hkrati je možno zmanjšati stroške energije za vsaj 15 % (Gibson in sod., 2019) ter pri tem doseči tudi 40 % zmanjšanje emisij CO₂ (Gonzales Perea in sod., 2016). Za to so potrebni sistemi za napoved namakanja, ki nam pomagajo pri optimizaciji porabe vode v pridelavi rastlin. V tem prispevku predstavljamo dva sistema za napoved namakanja, ki upoštevata dejavnike strokovno pravilnega namakanja in sta bila razvita v zadnjih letih ter sta v operativni rabi in na voljo vsem pridelovalcem v Sloveniji.

Obstoječi sistemi za napoved namakanja v Sloveniji

V Sloveniji imamo na področju razvoja nasvetov za namakanje nekaj desetletne izkušnje. Preprostejše nasvete za namakanje, ki temeljijo na izračunu potreb po namakanju na podlagi določitve vsebnosti vode v tleh po gravimetrični metodi (t. j. s tehtanjem vzorca pred in po sušenju do konstantne mase), pripravlja Inštitut za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije in so že nekaj časa v uporabi v Savinjski dolini. Šibka točka tega sistema so rezultati z dnevnim zamikom in veliko ročnega dela zaradi odvzema in sušenja vzorcev. Poleg tega ne vključuje vremenske napovedi, ki lahko močno racionalizira porabo vode. Že dalj časa na ARSO pripravljajo napoved namakanja z vodno-bilančnim modelom IRRFIB (podrobnejši opis

spodaj). Pomanjkljivost tega sistema je, da temelji le na modelirani vodni bilanci in ne vključuje meritev količine vode v tleh.

Strokovno podprto namakanje

Nujno potrebne informacije za strokovno podprto namakanje so:

- vodozadrževalne lastnosti tal, in sicer poljska kapaciteta, t. j. največja količina vode, ki jo tla lahko zadržijo, ter točka venenja, kjer rastline lahko trajno uvenejo,
- trenutna količina vode v tleh, ki jo pridobimo z meritvami količine vode v tleh,
- v kateri rastni fazi se rastlina nahaja (fenofaza), saj se potrebe rastlin po vodi tekom rastne dobe spreminjajo in
- vremenske razmere v prihodnjih dneh, in sicer padavine in evapotranspiracija.

Ob upoštevanju vseh omenjenih podatkov lahko natančno izračunamo obrok namakanja, ki ne sme presegati poljske kapacitete.

Sistem za podporo odločanju o namakanju (SPON) (www.spon.si)

SPON je orodje, ki nam poda priporočeni čas in obrok namakanja tako v količini kot v času trajanja namakanja za 5 dni vnaprej, pri čemer upošteva: a) trenutno količino vode v tleh, b) informacije o vodozadrževalnih lastnostih tal, c) potrebo rastline po vodi glede na razvojno fazo, d) vremensko napoved ter e) tehnologijo namakanja. SPON podaja priporočila za namakanje, ki so nekoliko nižja od potreb za dosežek poljske kapacitete. S tem bolje izkoristimo morebitne padavine, kot če bi namakali do stanja poljske kapacitete.

SPON je bil razvit v okviru projekta LIFE ViVaCCAdapt (2016-2021) za območje Vipavske doline in pozneje nadgrajen v EIP projektu PRO-PRIDELAVA (2018-2021) za območje celotne Slovenije. SPON operativno deluje od leta 2019, od konca leta 2021 je na voljo na ARSO. Osnova računskega dela SPON temelji na izračunu vodne bilance z modelom IRRFIB.

IRRFIB

Vodno-bilančni model IRRFIB so razvili na ARSO v letu 1994 in ga od takrat tudi večkrat nadgradili. Deluje na dnevni časovni skali in izračuna obrok namakanja za določeno kulturo ob uporabi vhodnih podatkov o tleh, fenologiji (koeficient rastline k_c in globina

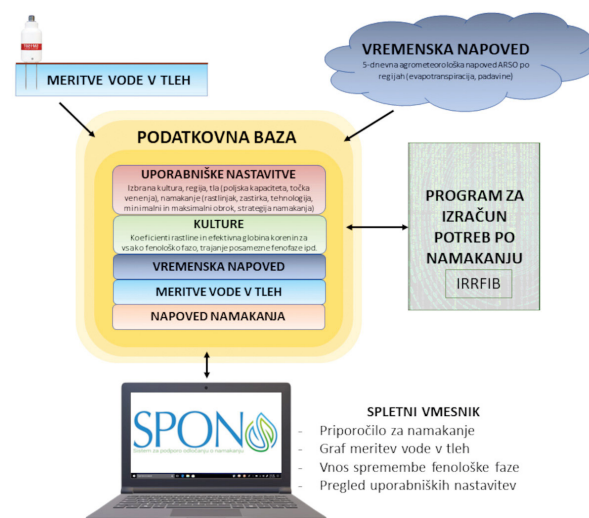
korenin) in načinu namakanja ter večdnevne napovedi potencialne evapotranspiracije in količine padavin. Vodno bilanco (VB) na i -ti dan izračunamo kot

$$VB(i) [\text{mm}] = VB(i-1) [\text{mm}] + \text{padavine}(i) [\text{mm}] - k_c \cdot ETO(i) [\text{mm}] + Vv(N) [\text{mm}],$$

pri čemer je k_c koeficient rastline, ETO referenčna evapotranspiracija in $Vv(N)$ zaloga vode iz preteklih dni, če je zaradi večje količine padavin nastal presežek vode nad vrednostjo pri poljski kapaciteti. IRRFIB je v osnovi mišljen za neprekinjeno delovanje čez celotno rastno sezono, pri čemer na začetku predpostavimo, da je količina vode v tleh enaka poljski kapaciteti. Vnaprej je potrebno podati datume nastopa posameznih fenofaz, ki se jih prilagodi in popravi v času dejanskega nastopa fenofaze. Koeficient rastline k_c za posamezen dan IRRFIB izračuna iz datuma nastopa trenutne fenofaze in predvidenega nastopa naslednje z linearno shemo. Podrobnejši opis modela je dostopen v Sušnik (2014) in Valher (2016).

Tehnični opis SPON

SPON je sestavljen iz podatkovne baze in štirih modulov, kot je prikazano na sliki 1.



Slika 1. Shema sistema za podporo pri odločanju o namakanju (SPON).

V **podatkovni bazi** so shranjeni podatki o (i) uporabniških nastavitvah, (ii) kulturah in s tem povezanih parametrih (koeficienti rastlin, datumi nastopa posameznih fenofaz, ločeni za 4 namakalne regije), (iii) vremenske napovedi za 15 regij, ter (iv) meritve vsebnosti vode v tleh in (v) napovedi namakanja. Najbolj pomembna modula sistema SPON sta:

1. »**Program za izračun potreb po namakanju**«, ki pripravi vhodne datoteke za IRRFIB, ga požene in

na podlagi rezultatov modela izračuna priporočilo za namakanje ter ga vpiše v podatkovno bazo. Izračuni se zaženejo vsak dan med rastno sezono po 9.30 uri zjutraj.

2. »**Spletni vmesnik**«, ki je razdeljen na štiri področja:

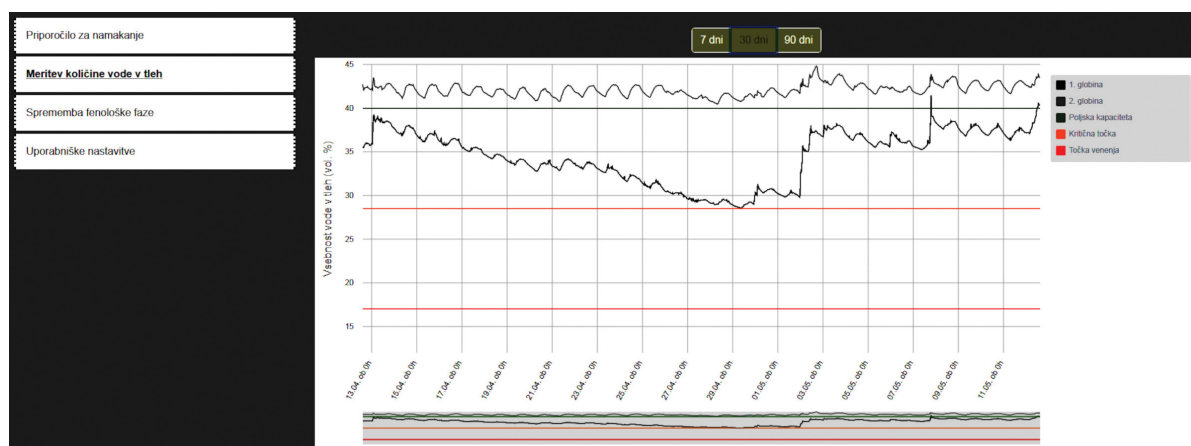
- **Priporočilo za namakanje**, kjer so v tabelarični obliki podane 5-dnevne napovedi potencialne evapotranspiracije, količine padavin ter priporočene količine vode za namakanje v mm in m³ na površino ter trajanje namakanja v urah (slika 2).
- **Graf meritev vsebnosti vode v tleh** pred 7, 30 ali 90 dnevi; na grafu so označene tudi značilne točke tal (Slika 3),
- **Sprememba fenološke faze**, kjer lahko uporabnik vidi trenutno, naslednjo in predhodno fenofazo ter popravi trenutno fenofazo.
- **Uporabniške nastavitve**, kjer lahko uporabnik pregleda svoje nastavitve.

Podrobnejši opis SPON je dostopen v Glavan in sod. (2020).

Priporočilo za namakanje	Datum	Padavine (mm)	Evapotranspiracija (mm)	Količina vode za namakanje (mm oz. L/m ²)
Meritev količine vode v tleh	05.05.	7.3	4.6	5.3
Sprememba fenološke faze	06.05.	4.2	0.4	8.3
Uporabniške nastavitve	07.05.	1.9	4	10.1
	08.05.	2.8	2.7	14.4
	09.05.	6.9	3.4	1

Datum izdanega priporočila 05.05.2021

Slika 2. Prikaz priporočila za namakanje na spletnem vmesniku SPON.



Slika 3. Prikaz grafa meritev vsebnosti vode v tleh na spletnem vmesniku SPON.

Omejitve SPON

SPON ima nekatere tehnične omejitve oz. pomanjkljivosti, in sicer (i) en uporabnik v sistemu upravlja in spremlja samo eno namakalno površino (v primeru, da bi jih želel več, je to nov uporabnik), (ii) namakalna priporočila se izračunajo le enkrat dnevno, in sicer dopoldne, kar pomeni, da namakalni nasvet npr. popoldne ni več nujno aktualen, (iii) pri izračunu nasveta za trenutni dan se upošteva le napoved za ta dan, ne upošteva pa se vremenske napovedi za prihodnje dni, kar pomeni, da lahko SPON poda, v primeru, da

je napovedan večji padavinski dogodek v prihodnjih dneh, namakalni nasvet z večjim obrokom, kot bi bil v resnici potreben, (iv) vremenske napovedi so pripravljene le za 15 regij in ne za prostorsko manjša območja, (v) bolj primeren je za trajne nasade, ker predvideva konstantno dolžino posamezne fenofaze ne glede na to, kdaj se rastna doba začne. Razen omenjenih pomanjkljivosti zasnova sistema omejuje število uporabnikov na do nekaj 100. Za upravljalca sistema je pomanjkljivost tudi odsotnost administratorskega vmesnika, kar pomeni težjo administracijo sistema, kot npr. vnašanje novih uporabnikov, kultur itd.

Izkušnje

Na podlagi večletnega delovanja lahko ocenimo, da sistem SPON deluje zanesljivo, še največ težav je z merilno opremo (mehanske poškodbe, nepravilna ponovna vgradnja, slabo izbrana lokacija itd.). Velika večina kmetovalcev je s SPON zadovoljna. Po pogovoru s kmetovalci opazimo tudi, da sedaj namakajo pogosteje in z manjšimi obroki.

Informacijski sistem za namakanje zelenjave IRRIGEN (www.namakanje.si)

Sistem IRRIGEN smo razvili v okviru EIP projekta Digitalizacija namakanja zelenjave (2019-2022) in je v osnovi podoben SPON, odpravlja pa omejitve oz. pomanjkljivosti SPON ter dodaja še nekaj dodatnih

Preglednica 1. Primerjava sistema Sistem za podporo odločanju o namakanju (SPON) in informacijskega sistema za namakanje zelenjave IRRIGEN.

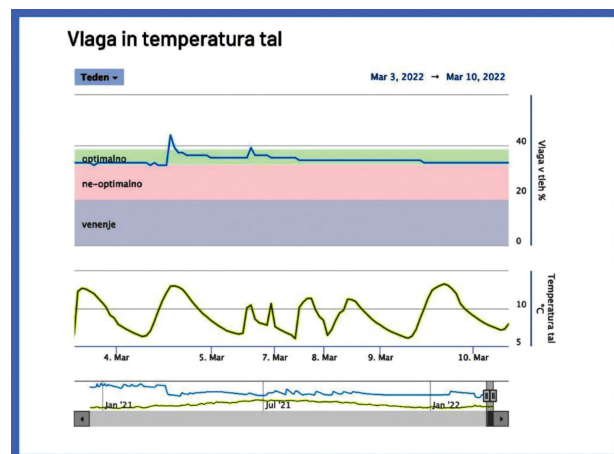
Ime	SPON	IRRIGEN
Kulture - tip - število - slike fenofaz	vse 2 (poljščine), 19 (vrtnine), 14 (trajne) NE	vrtnine >10 DA
En uporabnik več površin	NE	DA
Več kultur na isti površini	NE	DA
Ostale spremenljivke - temperatura tal - ostale	NE NE	DA NE
Maksimalno število uporabnikov	nekaj sto	neomejeno
Administratorski vmesnik	NE	DA
Izračun namakalnega nasveta - časovni korak - upošteva napoved naprej	dnevno (9:30) dan NE	vsaki 2 uri ura DA (2 dni)
Vremenske napovedi - model - prostorska ločljivost - časovni korak - dolžina - padavine	ARSO regija dan 5 dni regija	DWD ICON-D2/ICON-EU 3 km (1 dan), 7 km (1 - 3) ura 3 dni najbližja točka

funkcionalnosti, kar je prikazano v Preglednici 1. Največja razlika je pri izračunu namakalnega nasveta, ki se v IRRIGEN izračuna vsaki dve uri, pri izračunu pa tudi upoštevamo vremensko napoved za 48 ur vnaprej. Omogočamo tudi izračun namakalnega nasveta v primeru več kultur na isti namakalni površini, pri čemer je priporočena količina taka, da nobena od kultur ne trpi sušnega stresa. Razlika je tudi pri izračunu časa trajanja posamezne fenofaze: v SPON je določen glede na namakalno regijo, v IRRIGEN pa ta čas izračunamo kot % rastne dobe, pri čemer pričakovano dolžino rastne dobe kmetovalec vnese na začetku le-te.

Podobno kot pri SPON tudi v IRRIGEN kmetovalec dostopa do sistema preko spletne aplikacije (sliki 4 in 5).



Slika 4. Primer namakalnega nasveta preko spletne aplikacije IRRIGEN.



Slika 5. Prikaz gibanja vsebnosti vode v tleh preko spletne aplikacije IRRIGEN.

Izkušnje

Sistem IRRIGEN operativno deluje od leta 2020. Problemi z opremo so manjši kot pri SPON, podobno kot pri SPON pa tudi tu kmetovalci ugotavljajo, da je potrebno namakati pogosteje in manj obilno, kot so to sami delali prej po občutku. Z uporabo sistema lahko sledijo stanju količine vode v tleh in se informirano

odločajo o tem, kdaj in koliko namakati. Povedo tudi, da ob uporabi sistema rastline niso bile v sušnem stresu, niso bile uvele in da je bil pridelek obilnejši.

Sklepi

Le strokovno podprto namakanje, ki upošteva lastnosti tal, količino vode v tleh, kulturo in vreme, prinese želene učinke namakanja ter hkrati ne povzroča prekomernih negativnih vplivov na okolje. Omogoča visoko produktivno ter ekonomsko učinkovito kmetijsko pridelavo, kar omogočata v prispevku predstavljena sistema SPON in IRRIGEN.

Opažamo, da so kmetovalci zadovoljni z obema sistemoma. Prav tako pri obeh sistemih opažamo, da z uporabo le-teh kmetovalci namakajo pogostejše in z manjšimi obroki. Velik izziv pri vpeljavi takih sistemov je tudi merilna oprema, predvsem njena namestitvev.

Sistem SPON je kmetovalcem brezplačno na voljo na ARSO. Za priklop potrebujejo analizo tal in opremo od ponudnika opreme, ki pripravi podatke v obliki, ki jo podpira SPON. Ob začetku uporabe SPON se lahko kmetje za koriščenje prvih nasvetov o vodenju pridelave ob namakanju obrnejo na kmetijske svetovalce, specializirane za namakanje. Za financiranje delovanja, vzdrževanja in morebitne nadgradnje v smeri sistema IRRIGEN sistemski viri žal niso zagotovljeni.

Tudi za uporabo sistema IRRIGEN je potrebna analiza tal in oprema za merjenje količine vode v tleh.

Zahvala

Pripravo prispevka je omogočil projekt EIP Digitalizacija namakanja zelenjave, ki ga financira Evropski kmetijski sklad za razvoj podeželja (80 %) in Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano – Republika Slovenija (20 %). Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) se zahvaljujemo za pravico do uporabe modela IRRIFIB.

Viri

Chappell, M., Dove, S.K., van Iersel, M.W., Thomas, P.A., Ruter, J. *Implementation of Wireless Sensor Networks for Irrigation Control in Three Container Nurser-*

ies. HortTechnology. 2013, 23 (6), str. 747–753. DOI: 10.21273/HORTTECH.23.6.747

Cvejič, R., Černič-Istenič, M., Honzak, L., Pečan, U., Železnikar, Š., Pintar, M. *Farmers try to improve their irrigation practices by using daily irrigation recommendations - The Vipava Valley case, Slovenia. Agronomy. 2020, 10 (9), str. 1-27. DOI: 10.3390/agronomy10091238.*

Cvejič, R., Pintar, M., Zupanc, V. *Advancing irrigation development in the European Union. Irrigation and drainage : International commission on irrigation and drainage. 2021, 70 (4), str. 887-899. DOI: 10.1002/ird.2585*

Gibson, K.E.B., Gibson, J.P., Grassini, P. *Benchmarking irrigation water use in producer fields in the US central Great Plains Environmental Research Letters. 2019, 14 (5), 054009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab17eb*

Glavan, M., Cvejič, R., Honzak, L., Pečan, U., Železnikar, Š., Pintar, M. *Izboljšanje odziva kmetijstva na podnebne spremembe s sistemom za podporo o odločanju o namakanju. V S. Cerkvenik (Ed.), Vodni dnevi 2020: simpozij z mednarodno udeležbo (str. 123–134). Slovensko društvo za zaščito voda. 2020 Gonzalez Perea, R.; Camacho Poyato, E.; Montesinos, P.; Rodriguez Diaz, J.A. *Optimization of Irrigation Scheduling Using Soil Water Balance and Genetic Algorithms. Water Resources Management. 2016, 30 (8), str. 2815–2830. DOI: 10.1007/s11269-016-1325-7**

Spencer, G.D., Krutz, L.J., Falconer, L.L., Henry, W.B., Henry, C.G., Larson, E.J., Pringle, H.C., III, Bryant, C.J., Atwill, R.L. *Irrigation Water Management Technologies for Furrow-Irrigated Corn that Decrease Water Use and Improve Yield and On-Farm Profitability. Crop, Forage & Turfgrass Management. 2019, 5 (1), str. 1–8. DOI: 10.2134/cftm2018.12.0100*

Sušnik A. *Zasnove kazalcev spremljanja suše na kmetijskih površinah. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo. 2014; 256 str.*

Valher A. *Primerjava modelov za računanje vodne bilance tal. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko. 2016; 81 str.*

Izlet članov Slovenskega meteorološkega društva 2022

Tanja Cegnar

Po treh letih premora smo člani Slovenskega meteorološkega društva ponovno organizirali strokovni izlet. Kraj in temo smo izbrali s pomočjo ankete med člani društva. Dne 24. septembra 2022 smo obiskali Upravo za pomorstvo Republike Slovenije, Luko Koper, z ladjico smo se zapeljali do boje Vida, za konec pa smo si ogledali še mareografsko postajo v Kopru.



Slika 1. Pred vstopom v Upravo za pomorstvo (foto Zorko Vičar).

Zbrali smo se ob 10. uri pred Upravo za pomorstvo in po preverjanju spiska udeležencev nam je varnostnik dovolil vstopiti v stavbo, kjer so nas pričakali s sokom za osvežitev. Nato nam je g. Primož Bajec, ki že dvajset let dela v Upravi za pomorstvo, sicer pa je po izobrazbi kapetan dolge plovbe, predstavil naloge in pristojnosti Uprave Republike Slovenije za pomorstvo. Ogledali smo si tudi nadzorno sobo, kjer nam je še dodatno pojasnil, kako poteka operativno delo. Odgovarjal je tudi na naša številna vprašanja in ura, ki je bila namenjena temu delu ekskurzije, je kar prehitro minila.



Slika 2. Pozorno smo poslušali razlago o Upravi za pomorstvo (foto Zorko Vičar).



Slika 3. Na balkonu Uprave za pomorstvo (foto Tanja Cegnar).



Slika 4. Primož Bajec je po izobrazbi kapetan dolge plovbe (foto Tanja Cegnar).



Slika 5. Vprašanj je bilo več, kot je bilo časa za ogled Uprave za pomorstvo (foto Tanja Cegnar).

Ob 11. uri nas je čakala ladjica, da nas najprej popelje na ogled Luke Koper. Na plovbi po Luki Koper nas je spremljal njen predstavnik g. Jure Barovič. Med plovbo nam je opisal bistvene značilnosti Luke Koper, ki je po površini že večja od mestnega jedra Kopra. Luka je opremljena za varen in zanesljiv pretovor različnih vrst tovarov. Tudi zanj smo imeli veliko vprašanj, na katera nam je rad odgovoril.



Slika 6. Ladjica nas je že čakala na pomolu (foto Tanja Cegnar).



Slika 7. Pred vkrcanjem (foto Zorko Vičar).

Na potniškem pomolu smo odložili g. Baroviča in odpluli proti oceanografski boji Vida. Med plovo proti boji so nam na ladjici postregli s kosilom, ki je zajemalo bakala, sardine in kalamare ter krompirjevo solato. Oblačno vreme nas ni motilo, so pa postajali valovi na poti do boje vse večji in v bližini boje dosegli višino okoli pol metra. Naredili smo krog okoli oceanografske boje in se obrnili nazaj. Z morja smo si ogledali klife.



Slika 8. Razlaga med plovo po pristanišču (foto Tanja Cegnar).



Slika 9. Na ogled Luke Koper nas je spremljal Jure Barovič (foto Tanja Cegnar).



Slika 10. Odpeljali smo se proti oceanografski boji Vida (foto Tanja Cegnar).



Slika 11. Na ladjici so nam postregli kosilo (foto Tanja Cegnar).



Slika 12. Odpluli smo do oceanografske boje Vida (foto Tanja Cegnar).

Po vrnitvi s štiriurne plovbe na pomol v Koper smo postali še pred mareografsko postajo Koper, ki jo je predstavila Maja Jeromel. Opozorila nas je tudi na tablo z oznako najvišje gladine morja, ki je bila zabeležena 25. novembra 1969.



Slika 13. Skupinska slika za zaključek izleta (foto Tanja Cegnar).

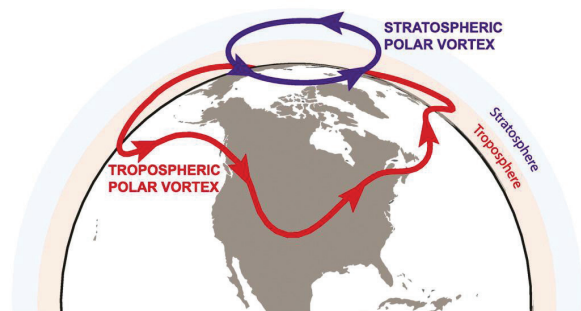
Nekateri smo nato še klepetali ob kavici, nekateri pa so priložnost izkoristili za obisk centra Kopra, kjer so na stojnicah ob dogodku »Sladka Istra« ponujali lokalne specialitete za sladokusce.

Video posnetek z utrinki ekskurzije si lahko ogledate na YouTube kanalu Slovenskega meteorološkega društva na naslovu <https://www.youtube.com/watch?v=CBS4I2v5zUs>

Polarni vrtinec v stratosferi pod vplivom različnih podnebnih scenarijev

Manca Fifnja, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

V magistrski nalogi smo preučevali stratosferski polarni vrtinec pod vplivom različnih podnebnih scenarijev. Izraz polarni vrtinec najpogosteje predstavlja območje hladnega polarnega zraka in nizkega tlaka, ki obdaja pol in ga omejujejo močni zahodni tokovi. V Zemljinem ozračju lahko najdemo dva različna polarna vrtinca, enega v troposferi in drugega v stratosferi. Troposfera je prva in najnižja plast Zemljinega ozračja, ki sega od tal do okrog 13 km v višino. Nad njo se razteza stratosfera, v kateri se nahaja tudi plast ozona, ki je nadvse pomembna zaradi absorpcije UV sevanja. Oba polarna vrtinca sta



Slika 1. Predstavitev troposferskega in stratosferskega polarnega vrtinca (Waugh 2017).

predstavljena na sliki 1.

Medtem, ko troposferski polarni vrtinec obstaja skozi celotno leto, se stratosferski polarni vrtinec pojavi le v zimskih mesecih, kot posledica temperaturnih gradientov med srednjimi zemljepisnimi širinami in polom. Razpad stratosferskega polarnega vrtinca je predstavljen z obratom zonalnih vetrov (vetrov vzporednih ekvatorju) in ga imenujemo dogodek nenadnega segrevanja stratosfere (SSW). Ta je običajno povezan s hitrim segrevanjem polarne stratosfere. Stratosferski polarni vrtinec razpade vsako pomlad, ko sonce ponovno posije na pol in se začnejo temperature dvigati. Včasih pa stratosferski polarni vrtinec razpade že sredi zime, kar imenujemo večji medzimski SSW dogodek.

Čeprav sta si polarna vrtinca med seboj različna in nista neposredno povezana, lahko oba v nekaterih okoliščinah igrata vlogo pri ekstremnih vremenskih dogodkih na površini Zemlje. Približno 40 % vseh vdorov ekstremno hladnega zraka v Evropo naj bi namreč povzročila oslabitev stratosferskega polarnega vrtinca. Zaradi vplivov stratosferskega polarnega vrtinca na vreme in podnebje, je tako raziskovanje njegove spremenljivosti v različnih podnebnih razmerah zelo pomembno.

Dandanes je življenje na zemlji vse bolj pod vplivom globalnega segrevanja, ki predstavlja povišanje povprečne temperature na Zemlji zaradi povišane količine izpustov toplogrednih plinov. Iskanje alternativnih virov energije, ki bi zmanjšali človekovo odvisnost od fosilnih goriv, poteka že nekaj časa, vendar se zdi, da transformacija energetskega sistema napreduje prepočasi, da bi se z njo uspeli izogniti nevarnostim podnebnih sprememb. Zato znanstveniki iščejo tudi načine namernega poseganja v naravne sisteme Zemlje in poskušajo na tak način zmanjšati posledice povišane količine toplogrednih plinov. Ta proces se imenuje geoinženiring.

Obstaja več različnih tehnik geoinženiringa, ena od njih so stratosferski aerosoli. Ta tehnika predstavlja vbrizgavanje mikroskopskih delcev v stratosfero, da odbijejo del sončne svetlobe, preden ta doseže površje Zemlje in s tem zmanjšujejo količino prejetega sončnega sevanja. Takšna tehnika je bila predvidena tudi v numerični simulaciji GLENS, ki sem jo uporabila za analizo stratosferskega polarnega vrtinca v magistrski nalogi.

GLENS simulacija vsebuje dve različni simulaciji. Prva je referenčna ali simulacija RCP8.5, ki uporablja predpisane koncentracije toplogrednih plinov in sicer sledi scenariju visokih antropogenih izpustov. Ta scenarij predstavlja razmere v prihodnosti, če človeštvo ne bo zmanjšalo količine izpustov toplogrednih plinov. Druga simulacija je simulacija z geoinženiringom. Ta je nastavljena na enak način kot simulacija RCP8.5, vendar vsebuje vbrizgavanje SO₂ delcev v stratosfero. Cilj te simulacije je bil zadostno spremeniti stratosfersko porazdelitev aerosolov, da ohranjajo temperaturo pri površini podobno letu 2020.

Globalno segrevanje vpliva na celoten vremenski sistem in s tem tudi na polarna vrtinca. Cilj magistrske naloge je bil tako opazovati stratosferski polarni vrtinec (z rahlim poudarkom na severno poloblo) v treh različnih podnebnih scenarijih. Prvi je predstavljal današnje podnebje, drugi podnebje v prihodnosti, v primeru, da ne zmanjšamo količine izpustov toplogrednih plinov, zadnji pa podnebje z geoinženiringom.

Da bi določili spremembe v stratosferskem polarnem vrtincu smo se najprej odločili opazovati polja povprečne temperature in povprečnega vetra ter polja potencialne vrtinčnosti. Potencialna vrtinčnost

je precej kompleksna količina, ki opisuje rotacijo v plasti zraka, v povezavi z debelino te plasti. Opazovali smo tudi pogostost večjih med zimskih SSW dogodkov in povprečni datum nastopa končnega razpada stratosferskega polarnega vrtnca na severni polobli. Nazadnje smo se osredotočili še na lokacijo središča in roba stratosferskega polarnega vrtnca na severni polobli.

Zanimivo je, da za oba prihodnja podnebna scenarija stratosferski polarni vrtnec na severni polobli postaja močnejši. Posledično smo opazili tudi zmanjšano frekvenco razpadov stratosferskega polarnega vrtnca med zimo, kar namiguje na manjšo možnost

vdorov hladnega zraka proti nižjim zemljepisnih širinam na površju. Opazili smo tudi, da se središče stratosferskega polarnega vrtnca na severni polobli premika bolj proti evrazijski celini.

V naši analizi smo zagotovo našli nekaj sprememb v spremenljivosti stratosferskega polarnega vrtnca v obeh prihodnjih podnebnih scenarijih, vendar je bilo za večino teh sprememb ugotovljeno, da niso statistično značilne. To nam pove, da so spremembe zaradi notranje variabilnosti stratosferskega polarnega vrtnca, dejansko večje od sprememb zaradi povišane količine izpustov toplogrednih plinov ali geoinženiringa.

Analiza sprememb intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije

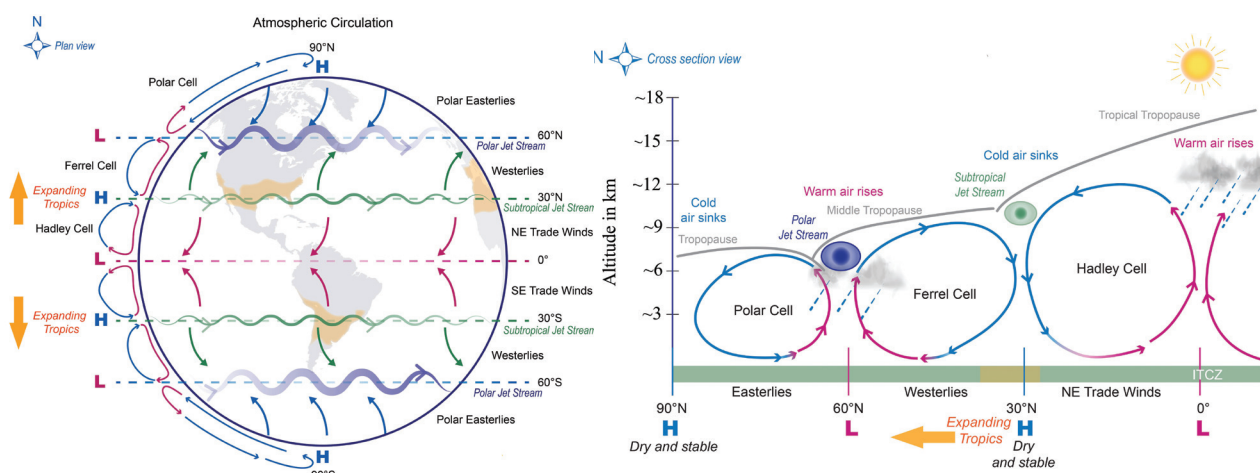
Matic Pikovnik, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Uvod

Na Zemlji zrak stalno kroži. Do kroženja zraka pride zaradi neenakomerne porazdelitve sončnega sevanja po površju Zemlje, ki je glavni vir toplote na Zemlji. Ekvatorialni predeli tako prejmejo največ sončne energije, polarni predeli pa najmanj. Razlike v ogrevanju ozračja med tropskimi in polarnimi predeli privedejo do transporta energije oz. toplote iz tropov proti poloma. Ta transport poteka pretežno s splošno cirkulacijo ozračja, delno pa s tokovi v oceanih. Spremembe v neto količini sevanja in v temperaturi so torej največje v meridionalni smeri, zato splošno cirkulacijo ozračja tipično obravnavamo kot zonalno povprečen tok in jo opišemo kot povprečno meridionalno cirkulacijo, ki jo tvorita zonalno povprečeni meridionalna in vertikalna komponenta hitrosti.

Hadleyjeva cirkulacija

Če Zemlja ne bi bila vrteč se sistem ali pa bi se vrtela zadosti počasi, bi transport toplote v meridionalni smeri od ekvatorja proti poloma potekal direktno – z le eno cirkulacijsko celico na vsaki polobli. Celici bi se stikali ob ekvatorju in bi vključevali dviganje toplega zraka ob ekvatorju, prenos toplote v zgornji troposferi proti polarnim predelom, spuščanje v polarnih predelih in potem stekanje v spodnjih plasteh ozračja nazaj k ekvatorju. Ker pa se Zemlja vrti okoli svoje osi, na njej pravokotno na smer gibanja deluje tudi t. i. Coriolisova sila. Zaradi ohranitve absolutne vrtilne količine se pri gibanju v zgornjih plasteh ozračja, kjer je vpliv trenja zanemarljiv, tok zraka odklanja, na severni polobli v desno, na južni pa v levo glede na smer gibanja. Posledično je meridionalna dimenzija celice omejena. Na Zemlji so tako prisotne po tri celice na vsaki



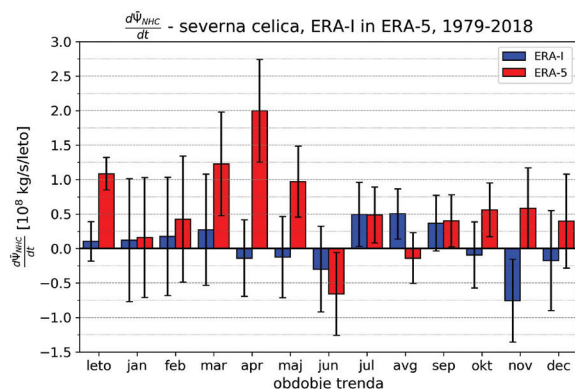
Slika 1. Shematski prikaz Hadleyjeve cirkulacije v okviru splošne cirkulacije ozračja (Wuebbles in sod. 2017).

polobli, Hadleyjeva, Ferrellova in polarna. Shematski prikaz cirkulacije ozračja v omenjenih celicah je na sliki 1. Hadleyjeva celica je poznana kot cirkulacija zraka med ekvatorialnimi predeli in subtropi, torej približno med ekvatorjem in 20° - 35° geografske širine, zato ji pravimo tudi tropska cirkulacija, sicer pa to vrsto cirkulacije imenujemo Hadleyjeva cirkulacija.

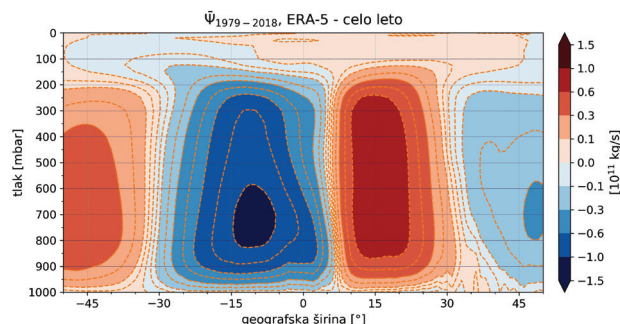
Motivacija in cilj

Na območjih dviganja zraka so značilne pogoste padavine, območja, kjer se zrak spušča, pa so sušna. Hadleyjeva cirkulacija torej bistveno vpliva na razporeditev rastja in poselitvena območja. Morebitne spremembe Hadleyjeve cirkulacije bi lahko imele dolgotrajen in škodljiv vpliv na velik del biosfere. Mnogo študij je na podlagi simulacij klimatskih modelov ter reanaliz (rekonstrukcij vremena za nazaj) že potrdilo, da se severna Hadleyjeva celica nekoliko širi v smeri proti polu. Po drugi strani simulacije klimatskih modelov kažejo na slabitev severne Hadleyjeve celice v 21. stoletju, medtem ko reanalize kažejo na njeno krepitev v zadnjih 40 letih. Kot razlog za nasprotujoče si trende nekatere nedavne študije predvidevajo napake v predstavitvi procesov, ki vodijo do kondenzacijskega gretja v reanalizah, kot glavni razlog za slabitev Hadleyjeve cirkulacije pa je izpostavljena naraščajoča koncentracija toplogrednih plinov zaradi antropogenih izpustov. Najnovejša reanaliza visoke ločljivosti ERA5, ki jo pripravlja Evropski center za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF), kaže trend krepitve Hadleyjeve cirkulacije, kljub temu pa se s padavinskimi podatki dobro sklada, kar poraja dvom v razloge za odstopanje reanaliz in klimatskih modelov, ki so bili predstavljeni v nedavnih študijah.

Namen tega magistrskega dela je bil ugotoviti, kakšni so trendi intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije v reanalizah ERA5 in ERA-Interim, ter raziskati, ali so ti trendi konsistentni s trendi diabatnega gretja in trendi količine padavin.



Slika 3. Trendi intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije za podatke iz reanaliz ERA5 in ERA-Interim v severni in južni celici z uporabo mere povprečne intenzivnosti celice.

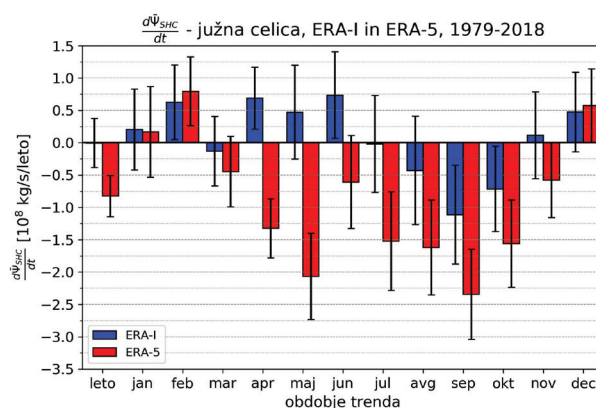


Slika 2. Letno povprečje Hadleyjeve cirkulacije v obdobju 1979 – 2018 za podatke iz reanalize ERA5.

Rezultati

V magistrskem delu smo se ukvarjali s spremembami in z razlogi za spremembe Hadleyjeve cirkulacije. Slednjo opišemo s tokovno funkcijo Ψ na meridionalno-vertikalni ravni. Spremembe Hadleyjeve cirkulacije smo analizirali v 40-letnem obdobju 1979-2018 z dvema modernima reanalizama, ki ju pripravlja Evropski center za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF). Letno povprečje Hadleyjeve cirkulacije v obravnavanem obdobju je prikazano na sliki 2. 'Zimska' celica je najbolj intenzivna in bistveno bolj meridionalno razsežna kot 'poletna' celica, ki je slabše razvita. Največje razlike v intenzivnosti med obema Hadleyjevima celicama so po obeh solsticijah, najbolj simetrični pa sta celici po obeh enakonočjih. Intenzivnost Hadleyjeve cirkulacije smo ovrednotili z različnimi točkovnimi merami, ki temeljijo na maksimumu in minimumu tokovne funkcije Ψ , torej $\Psi_{\max}$ in $\Psi_{\min}$. Ugotovili smo, da je uporaba teh mer, sicer v preteklih študijah pogosto uporabljenih, problematična, saj se trendi med njimi zelo razlikujejo. Preizkusili smo še mero povprečne intenzivnosti celice. Trendi, izračunani na podlagi te mere, so reprezentativni za spremembe intenzivnosti v celotni celici, zato smo jo uporabili pri nadaljnjih izračunih.

Trendi letnih povprečij Hadleyjeve cirkulacije v reanalizi ERA5 med 1979 in 2018 kažejo na značilno



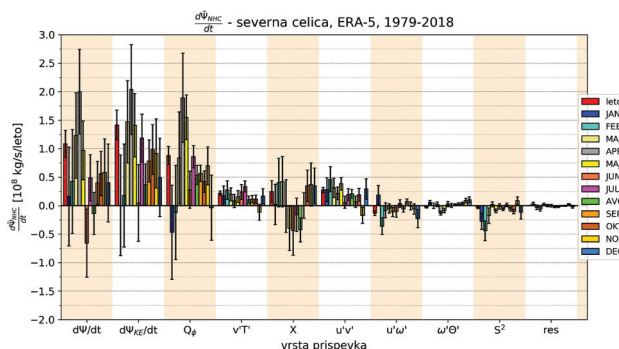
krepitev intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije tako v severni kot južni celici, trendi mesečnih povprečij Hadleyjeve cirkulacije pa kažejo na največjo krepitev intenzivnosti v severni celici aprila, torej ko sta severna in južna celica najbolj simetrični, v južni celici pa septembra in maja, torej ko je južna celica bolj razvita od severne (slika 3). Trendi so najmanjši, povečini celo zanemarljivi, v zimskih in poletnih mesecih, v času najbolj razvite 'zimske' celice na eni ali drugi polobli. Intenzivnost Hadleyjeve cirkulacije

v 'poletni' celici slabi. Po letu 2002 sicer severna celica slabi, južna pa ne spreminja intenzivnosti, kar se sklada s konsenzom v klimatski znanosti o pričakovani dolgoročni slabitvi intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije v severni Hadleyjevi celici v prihodnje. V reanalizi ERA-Interim so trendi v obeh celicah majhni in statistično neznačilni, pa tudi krajevno bolj spreminjajoči. Nekateri deli Hadleyjeve cirkulacije kažejo na njeno krepitev, drugi na slabitev, celokupno pa signifikantnega trenda nismo zaznali.

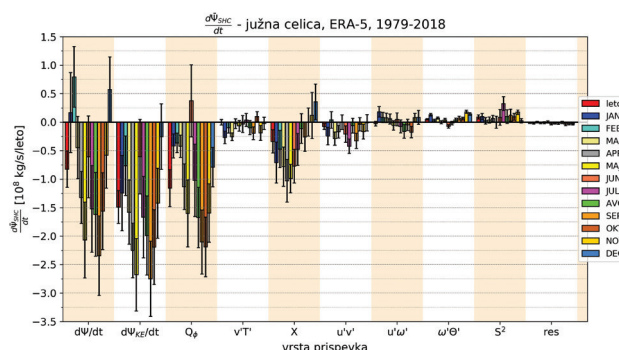
Zapisali smo Kuo-Eliassenovo enačbo za tokovno funkcijo, kot nov prispevek v okviru magistrskega dela pa smo izpeljali razširjeno Kuo-Eliassenovo enačbo, ki ne vsebuje kvazi-geostrofskega približka. Slednja nam dodatno omogoča ovrednotenje prispevka vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine ter toplote z vrtinci k Hadleyjevi cirkulaciji. Magnituda teh procesov v tropih namreč ni zanemarljiva. Obe omenjeni enačbi smo rešili tudi numerično in rezultate primerjali med seboj ter z direktno integralno rešitvijo. Ugotovili smo, da so odstopanja v točkah mreže pri rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe v ERA5 do 35%, v ERA-Interim pa do 48% manjša od odstopanj pri rešitvi navadne Kuo-Eliassenove enačbe. Trendi intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije po rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe $d\Psi_{KE}/dt$ so primerljivi s trendi po integralni rešitvi $d\Psi/dt$, a po absolutni vrednosti povečini nekoliko večji.

Povprečno meridionalno cirkulacijo, ki jo opisuje Ψ , smo zapisali kot vsoto prispevkov različnih fizikalnih procesov: diabatnega gretja, trenja v zonalni smeri ter meridionalnih in vertikalnih pretokov toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci. Diablatno gretje in njegov trend sta največja na območju dviganja zraka in kondenzacije ob ekvatorialni konvergenčni coni (ITCZ). Spremembe v diabatnem gretju so en izmed glavnih vzrokov za spremembe v intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije. Ugotovili smo, da v ERA5 k skupnemu trendu Hadleyjeve cirkulacije največ prispeva diabatno gretje, in sicer največ v času, ko sta celici najbolj simetrični, aprila v severni (slika 4) in oktobra v južni celici (slika 5), medtem pa je v ERA-Interim prispevek signifikanten zgolj v južni celici. Pomemben prispevek ima v obeh reanalizah še trenje v zonalni smeri, ki še posebej vpliva na krepitev intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije v južni

celici. Prispevek preostalih procesov je manjši. Meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci prispeva h krepitvi Hadleyjeve cirkulacije, vertikalni pretok toplote z vrtinci in prispevek S_2 , v katerem so zajeti vplivi statične stabilnosti, Coriolisovega parametra ter meridionalne in vertikalne porazdelitve zonalno povprečenega zonalnega vetra $[u]$ in zonalno povprečene potencialne temperature $[\theta]$, pa prispevata k slabitvi Hadleyjeve cirkulacije. Vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci v obeh celicah prispeva različno.



Slika 4. Trend intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije in prispevkov različnih procesov k skupnemu trendu v severni celici z uporabo mere povprečne intenzivnosti celice za podatke iz reanalize ERA5.



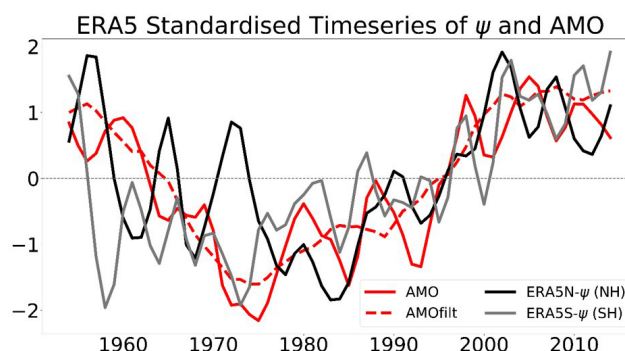
Slika 5. Trend intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije in prispevkov različnih procesov k skupnemu trendu v južni celici z uporabo mere povprečne intenzivnosti celice za podatke iz reanalize ERA5.

Analizirali smo še padavinske podatke, saj nas je zanimalo, ali trendi ocenjene količine padavin sovpadajo s trendi intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije v severni in južni celici. Analiza je pokazala, da je dnevna količina padavin pri dolgoletnih povprečjih največja v pasu geografske širine med 5°S in 10°S , torej ravno ob ITCZ, kjer je dviganje zraka najbolj izrazito in se sprosti tudi največ kondenzacijske toplote. Na istem območju je najbolj značilno naraščajoč trend zonalno povprečene količine padavin, ravno v tem pasu pa se v letnem povprečju stikata tudi severna in južna Hadleyjeva celica. Trend zonalno povprečenih padavin je na omenjenem območju skladen s trendom diabatnega gretja, pri katerem ima vodilno vlogo sproščanje latentne toplote

ob kondenzaciji, kaže pa na krepitev intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije.

V zadnjem delu magistrskega dela smo preverili, ali so trendi intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije v severni in južni Hadleyjevi celici konsistentni s trendi povprečne količine padavin v izbranem tropskem pasu oziroma s trendi meridionalnega gradienta zonalno povprečene količine padavin $d(P)/Rd\Phi$. Ugotovili smo, da obstaja močna korelacija med tokovno funkcijo Ψ oz. prispevkom diabatnega gretja Q_Φ v ERA5 in P_{GPCP} oziroma $d(P)/Rd\Phi$ v GPCP. Pri tem vemo, da so satelitski podatki, ki so uporabljeni za pripravo podatkov GPCP, uporabljeni tudi pri asimilaciji v reanalizah. Postopek vključitve surovih podatkov (satelitski (mikrovalovni in IR) podatki nad kopnim in oceani, meritve z merilnih postaj pri tleh nad kopnim ter sondaže) je različen med GPCP in reanalizama, nekoliko pa se razlikuje tudi med samima reanalizama ERA5 in ERA-Interim. Simulirane in ocenjene količine padavin se slabše skladajo s totalnim diabatnim gretjem v reanalizi ERA-Interim kot v ERA5, kar kaže že korelacija med padavinami v tropskem pasu [$10^\circ J$, $10^\circ S$], ki je med P_{ERA5} in P_{GPCP} enaka 0,76, med $P_{ERA-Interim}$ in P_{GPCP} pa le 0,51.

Slednje kaže na to, da v najmodernejši reanalizi ERA5 najverjetneje ni napačnega trenda kondenzacijskega gretja, saj se trend intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije dobro sklada s padavinskimi podatki. To poraja dvom v razloge za odstopanje reanaliz in klimatskih modelov, ki so bili predstavljeni v nedavnih študijah. S primerjavo časovnih vrst povprečnih intenzivnosti severne in južne celice Ψ_{NHC} in Ψ_{SHC} z različnimi indeksi multidekadne variabilnosti se je izkazalo (Zaplotnik in sod. 2021 – v recenziji), da obstaja močna korelacija med Ψ^{KE} oziroma Q^{KE} v ERA5 in indeksom



Slika 6. Standardizirane časovne vrste letnih povprečij tokovne funkcije v severni in južni Hadleyjevi celici ter Atlantske multidekadne oscilacije (AMO) v obdobju 1950-2018 za podatke iz reanalize ERA5 (Zaplotnik in sod. 2021 – v recenziji)

atlantske multidekadne oscilacije AMO (slika 6). Obstaja torej možnost, da so spremembe Hadleyjeve cirkulacije posledica naravne variabilnosti klimatskega sistema, ki pa je klimatski modeli ne opišejo oziroma ovrednotijo dobro.

Viri

- D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart and T. K. Maycock, *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*, (U. S. Global Change Research Program, 2017). Medmrežje: <https://science2017.globalchange.gov/chapter/5/> [6.5.2021].
- Ž. Zaplotnik, M. Pikovnik, L. Boljka. Recent Hadley circulation strengthening: a trend or multidecadal variability?, 2021 (poslano v *Journal of Climate* – v recenziji).



Sava v zgornjem toku 9. januarja 2022 (Foto: Tanja Cegnar)

Spremljanje povečanega/ zmanjšanega števila umrlih v času vročinskih valov za Upravno enoto Ljubljana v letih od 2013 do 2020

Monitoring of increased/decreased number of deaths during heatwaves for Ljubljana municipality in the years from 2013 to 2020

Simona Perčič¹, Katarina Bitenc¹, Majda Pohar¹, Anka Uršič², Anže Medved³, Vladimira Lampič¹, Ana Hojs¹

1. Nacionalni inštitut za javno zdravje, Center za zdravstveno ekologijo, Zaloška 29, 1000 Ljubljana
2. Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta, Vrazov trg 2, 1000 Ljubljana
3. Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

Korespondenčni avtor:

Simona Perčič, dr. med., spec. javnega zdravja

Nacionalni inštitut za javno zdravje, Center za zdravstveno ekologijo, Zaloška 29,
1000 Ljubljana,

E-pošta: simona.percic@nijz.si

Izvleček

Ozadje: Število umrlih v času vročinskih valov se lahko zaradi različnih vzrokov poveča ali pa zaradi različnih javnozdravstvenih ukrepov in prilagajanja prebivalstva ostane nespremenjeno oziroma se celo zmanjša. Namen naše raziskave je bil oceniti, ali so se v Upravni enoti Ljubljana v opazovanem obdobju od leta 2013 do leta 2020 pojavile kakršnekoli razlike v kratkotrajnem (letnem) številu umrlih v času vročinskih valov.

Metode: Izračunali smo kratkotrajno (letno) časovno povezanost med vročinskimi valovi in preseženo umrljivostjo po diagnozah, spolu in starostnih skupinah kot relativno tveganje (RT) in 95-odstotni interval zaupanja (95 % IZ). Analize smo naredili za Upravno enoto Ljubljana za obdobje od leta 2013 do leta 2020.

Rezultati: Pri analizi povezanosti smo ugotovili statistično značilnost v letu 2013 za oba spola, vsi vzroki smrti, v starostni skupini od 5 do 74 let, ter v letu 2017 za oba spola, vse starostne skupine, vsi vzroki smrti, in v letu 2020 za oba spola, vse starostne skupine, vzrok smrti: bolezni obtočil. Pri ostalih opazovanih skupinah analize niso pokazale statistično značilnega povečanja/zmanjšanja števila umrlih v času vročinskih valov.



Zaključek: V Upravni enoti Ljubljana je stanje glede povečanega števila umrlih v zadnjih osmih letih stabilno. Ker bodo v prihodnosti vročinski valovi pogostejši, daljši in jih bo več, ne vemo, ali se bo število umrlih v času vročinskih valov povečalo, zato moramo nadaljevati javnozdravstvene ukrepe in medresorsko sodelovanje.

Ključne besede: podnebne spremembe, vročinski valovi, povečano/zmanjšano število umrlih

Abstract

Background: Number of deaths due to different causes increases during intense summer heat. However due to different public health measures and adaptation of population it can stagnate or even decrease. Our purpose was to examine whether differences in short-term heat-related deaths, in the period from 2013 to 2020 occurred in the municipality of Ljubljana – the capital of Slovenia.

Methods: We estimated relative mortality risks for the observed diagnoses, sex and age, 95 % confidence intervals and excess deaths associated with heatwaves occurred from 2013 to 2020.

Results: In the analysis, the statistically significant association between heatwaves and the number of deaths were only in 2013 in the subgroup both gender, all causes, age group 5-74 years old, and in 2017 in the subgroup both gender, all age groups, all causes of deaths and in 2020 both gender, all age groups, diseases of the circulatory system. The results of analysis in the remaining analysed subgroups in each year were not statistically significant.

Conclusion: In the municipality of Ljubljana, the number of deaths during heatwaves remained stable during the last observed eight years. Heatwaves will increase in duration, frequency and number in the future, and we do not know whether heat related deaths will increase. Therefore, public health measures and intersectoral cooperation remain as crucial as in previous years.

Keywords: climate change, heatwaves, increased/decreased number of deaths.

Uvod

Ena od posledic podnebnih sprememb so poletni vročinski valovi, ki so povezani s kratkotrajno povečano umrljivostjo in obolevnostjo. Povečana umrljivost v času vročinskih valov tako po svetu kot v Evropi je potrjena v številnih epidemioloških raziskavah (Basu in Samet 2002; Donoghue s sod. 2003; Hajat s sod. 2006; Kinney s sod. 2008; Medina-Ramon s sod. 2006; Naughton s sod. 2002; Semenza s sod. 1999; Vandertorren s sod. 2004). Opredelitev vročinskih valov po svetu ni enotna. Pri nas je bila do pred kratkim v uporabi psevdoekvivalentna temperatura, ki pri obremenitvi s toploto upošteva tudi relativno vlažnost (Vida, 1990). V pričujočem članku pa smo že uporabili novo definicijo (Nairn in Fawcett, 2013) vročinskih valov z uporabo kazalnika EHF (ang. excess heat factor), ki je regionalno natančnejša in mednarodno sprejemljiva. Učinki vročinskih valov na umrljivost se po svetu razlikujejo in so povezani s številnimi dejavniki, vključno z lokalnim podnebjem, socialno-ekonomskimi dejavniki, demografskimi dejavniki, zdravstvenim sistemom, pripravljenostjo skupnosti, da upošteva nasvete zdravstvenih delavcev in odpornostjo prebivalstva v državi (Li s sod. 2015). Za prihodnost sta pomembna dva globalna pojava, ki

bosta vplivala na zdravje populacije v času vročinskih valov in zaslužita posebno pozornost. Prvič, pričakuje se, da bodo v prihodnosti vročinski valovi pogostejši, dolgotrajnejši in intenzivnejši (Meehl in Tebaldi 2004; Donat s sod. 2013). Projekcije podnebnih sprememb so narejene tudi za Slovenijo. Posledice podnebnih sprememb v Sloveniji do konca stoletja bodo:

- Količina padavin se bo verjetno povečala v hladni polovici leta in zmanjšala v topli. Skladno s tem lahko pričakujemo daljša in izrazitejša obdobja poletne vročine in suše.
- Pretoki rek bodo pozimi in spomladi večji, poleti pa manjši. Nekatere reke lahko tudi presahnejo.
- Spremenila se bo vegetacija – prevladovala bodo toploljubne listnate drevesne vrste, v Panonski nižini pa celo zimzelene rastline.
- Gladina morja se bo dvignila.
- Snežna odeja se bo zmanjšala.
- Pogostejši in intenzivnejši bodo ekstremni vremenski pojavi (npr. vročinski valovi, neurja s točo, orkanski veter) in vremensko pogojene naravne nesreče (zemeljski plazovi, poplave) (Umanotera, Projekcije za podnebne spremembe v Sloveniji, b.d.).

Drugi pojav je, da podaljšana življenjska doba spreminja demografsko strukturo prebivalstva. Napovedi potrjujejo staranje prebivalstva v praktično vseh evropskih državah, še posebej v mestnih območjih (Evropska Komisija, *The impact of demographic change in Europe*, b.d.). Do leta 2060 bo populacijska skupina prebivalcev, starih 65 let in več, predstavljala 35 % prebivalcev Slovenije, kar vzbuja skrb, saj so starejši tudi med najbolj ranljivimi za povečano umrljivost v času vročinskih valov (SURs, Populacijska piramida; Kenney in Munce 2003).

Vročinski valovi so še posebej intenzivni v urbanih območjih zaradi (a) zamenjave vegetacije z asfaltom in betonom, ki spremeni tokove sevalne energije in zmanjša površinsko vlago, ki je na voljo za evapotranspiracijo (izhlapevanje vode s površine tal in rastlin v ozračje); (b) sprememb prizemnega zračnega toka zaradi zapletene geometrije ulic in zgradb; (c) proizvodnje antropogene toplote. Te spremembe ustvarjajo temperaturno razliko med mestnim in podeželskim okoljem, kar imenujemo učinek mestnega toplotnega otoka. Ponoči urbana območja počasi sproščajo toploto, absorbirano podnevi, kar preprečuje okrevanje človeškega telesa po dnevni izpostavljenosti visoki vročini (Laaidi s sod. 2012).

Dejavniki tveganja za povečano število umrlih v času vročinskih valov so tako patofiziološki kot socialno-ekonomski. Dejavniki tveganja so starost zaradi fizioloških sprememb, ki nastanejo s staranjem (Kenney in Munce 2003), vse večje število srčno-žilnih bolezni (Bouchama s sod. 2007), obolenja dihal (Conti s sod. 2007; D'Ippoliti s sod. 2010), bolezni ledvic (Conti s sod. 2007; D'Ippoliti s sod. 2010), sladkorna bolezen (Bouchama 2007), duševne bolezni (Hansen s sod. 2008, Kaiser s sod. 2001), debelost (Kilbourne s sod. 1982) in jemanje nekaterih zdravil – še posebej pri starejših (Sommet s sod. 2012). Socialno-ekonomski dejavniki tveganja so slaba dostopnost do zdravstvenih storitev, življenje v samotni, življenje v najvišjih nadstropjih stavb, pomanjkanje klimatskih naprav, sedeči življenjski slog, slab socialno-ekonomski status, delo na prostem in življenje v velikih mestih, ki jih imenujemo tudi toplotni otoki (Kilbourne s sod. 1982; Semenza s sod. 2008; Laaidi s sod. 2012). Nekatere raziskave omenjajo ženski spol kot ranljivo skupino, vendar je to treba še potrditi (Basu s sod. 2008; Hajat in Kosatsky 2010).

Še vedno pa vplivi na zdravje zaradi vročinskih valov v prihodnosti ostajajo nejasni in v svetu obstaja več vprašanj, ali bodo močnejši, šibkejši ali pa bodo ostali večinoma enaki (Linares s sod. 2014). Kar nekaj raziskav je pokazalo, da se učinki vročinskih valov na zdravje s časom spreminjajo in da se v več predelih Evrope in tudi po svetu (Avstralija, Japonska, Združene države Amerike) umrljivost znižuje. Vendar to zmanjšanje umrljivosti nikakor ni enovito in ga ne

moremo posplošiti. V večini držav niso merili trendov, zato so zelo koristne raziskave o značilnosti trendov za velika mesta v Evropi. Večnivojska raziskava v devetih evropskih mestih je pokazala zmanjšanje umrljivosti zaradi vročine v sredozemskih mestih, vendar ne tudi v mestih na severu Evrope. Avtorji to razliko pripisujejo izvajanju preventivnih načrtov na višji ravni, prilagajanju lokalnega prebivalstva in večji ozaveščenosti prebivalstva o izpostavljenosti visokim temperaturam poleti (de'Donato s sod. 2015). Zmanjšano umrljivost zaradi vročinskih valov so opazili na Dunaju in v Atenah (de'Donato s sod. 2015; Muthers s sod. 2010a; Scortichini s sod. 2018), pa tudi v Budimpešti in Stockholmu (de'Donato s sod. 2015), vendar pa Scortichini s sodelavci (2018) v poznejši raziskavi ni ugotovil pomembnega trenda umrljivosti zaradi vročine v obeh omenjenih mestih (Budimpešta in Stockholm), razen najvišje ugotovljene umrljivosti zaradi vročine leta 2007 v Budimpešti (de'Donato s sod. 2015; Scortichini s sod. 2018). Podobno de'Donato in sodelavci niso našli povečanja umrljivosti zaradi vročine v Helsinkih, tudi Scortichini in sodelavci niso ugotovili nobenega trenda – razen vrhunca v umrljivosti v Helsinkih leta 2010 (de'Donato s sod. 2015; Scortichini s sod. 2018). Nedavna raziskava ni odkrila nobenih trendov (torej niti povečane niti zmanjšane umrljivosti) med letoma 2013 in 2017 v Istanbulu (Can s sod. 2019). Podobno v zadnjem času ni bilo opaziti pomembnega trenda umrljivosti zaradi vročine v Lizboni (Alcoforado s sod. 2015). Nekatere raziskave kažejo, da se je umrljivost zaradi vročine zmanjšala v Frankfurtu, in sicer od leta 2003 dalje (Heudorf in Shade, 2014; Steul s sod. 2018). Tudi znotraj opaženega zmanjšanja vpliva na umrljivost je mogoče opaziti notranjo spremenljivost. V nekaterih primerih so opazili zmanjšanje za oba vzroka smrti, zaradi srčno-žilnih bolezni in bolezni dihal; pri drugih samo zaradi srčno-žilnih bolezni (Muthers s sod. 2010b; Bobb s sod. 2014; Ng s sod. 2016; Miron s sod. 2015). Geografska porazdelitev umrljivosti zaradi vročinskih valov sledi zapletenim vzorcem. V splošnem znanstvena literatura o vročinskih valovih in zdravju dosledno ugotavlja, da se razmerje med vročinskimi valovi in umrljivostjo razlikuje glede na zemljepisno širino (kot približek za prevladujoče podnebje), tako da južna območja kažejo manjše učinke vročinskih valov, vendar znatne učinke mraza, medtem ko severna območja kažejo obratno (WHO, 2021). Z drugimi besedami, v Evropi so mesta z visokimi temperaturami poleti manj občutljiva za umrljivost med vročinskimi valovi kot tista z bolj zmernim podnebjem (WHO, 2021). Do sedaj je malo znanega o dejavnikih, ki vplivajo na znižanje umrljivosti zaradi vročinskih valov. V raziskavah je navedenih nekaj ukrepov: splošno izboljšanje zdravstvenih storitev in izvajanje preventivnih ukrepov, kot sta uporaba klimatskih naprav in zgodnji sistem obveščanja (Bobb s sod. 2014; Ng s sod. 2016).



Na NIJZ smo že zgodaj po katastrofalno vročem poletju leta 2003 začeli intenzivne javnozdravstvene kampanje za ozaveščanje prebivalcev o škodljivih vplivih vročinskih valov, ki smo jih po letu 2016 okrepili.

(1) Povečano ozaveščenost prebivalcev smo dosegli prek nacionalnega sistema obveščanja o pojavu vročinskih valov, ki je bil vzpostavljen na ARSO leta 2011 in nadgrajen leta 2016, s posebno pozornostjo za ranljive skupine.

(2) Tudi zdravstveni domovi po Sloveniji so vse bolj ozaveščeni o problemih, ki jih prinašajo vročinski valovi, in njihovih posledicah ter ljudem priporočajo ustrezno ukrepanje (zadostno pitje vode, pravilna uporaba zdravil, skrb za starejše ...).

(3) Z medsektorskim sodelovanjem (NIJZ, UKC Ljubljana, ARSO in drugimi deležniki) smo pripravili gradiva za množične medije o tem, kako ravnati v času vročinskih valov, ter intenzivno promovirali ukrepe na nacionalnih in lokalnih postajah televizije in radia, v časopisih in po spletu. Prednost Slovenije je, da je majhna, in tako lažje dosežemo ranljive populacijske skupine. Opolnomočili smo starejše ljudi s kratkimi sporočili, kako doseči fiziološko prilagajanje (pravilno vedenje, pogosto pitje, pazljivo jemanje zdravil) in socialno prilagajanje (preventivni ukrepi, da vsi poskrbimo za starejše in osamljene, poskrbimo za klimatizacijo, starejše premestimo v hladnejše okolje, spremljamo zdravstveno stanje starejših ...).

V letu 2021 je NIJZ v sodelovanju z ARSO za merjenje povečanega/zmanjšane štveila umrlih v času vročinskih valov vpeljal novo definicijo vročinskih valov v Sloveniji, ki je regionalno natančnejša in sprejemljiva tudi mednarodno. Prej je NIJZ v Sloveniji kratkotrajno umrljivost v času vročinskih valov ocenjeval na podlagi definicije vročinskega vala po Vidi (Vida 1990), ki vročinski val opisuje kot dneve s psevdoekvivalentno temperaturo, ki preseže 56,0 °C. Psevdoekvivalentno temperaturo izračunamo kot seštevek maksimalne dnevne temperature in zmnožek 1,5-kratne relativne vlažnosti zraka (Vida 1990). Objavljene raziskave so potrdile, da je bila celotna Slovenija do leta 2015 v času vročinskih valov obremenjena s povečanim številom umrlih za vsemi vzroki in zaradi srčno-žilnih bolezni, predvsem pri starejši populaciji (Perčič s sod. 2018). Po letu 2016 je umrljivost v Sloveniji upadla in ni bilo ugotovljeno statistično značilnega povečanja/zmanjšanja štveila umrlih v času vročinskih valov (Grašič in Perčič. 2022).

Namen članka je širši strokovni javnosti pokazati, ali je tudi v Sloveniji zaradi naraščajočega problema podnebnih sprememb kratkotrajno (letno) povečano štveilo umrlih v času vročinskih valov velik izziv, še posebej v Upravni enoti (UE) Ljubljana, ki jo razvrščamo v mestno okolje in deluje kot toplotni otok. Zanimalo nas je, ali se je štveilo umrlih v času vročinskih valov v opazovanih letih spreminjalo zaradi

vse večje obremenitve s toploto poleti in po drugi strani zaradi intenzivnejših javnozdravstvenih ukrepov.

Metode

Območje raziskave

Republika Slovenija meri 20.271 km² in leži v južni Srednji Evropi ter je na stiku treh večjih podnebnih tipov, in sicer sredozemskega, celinskega in alpskega/gorskega podnebja. UE Ljubljana meri 903,8 km² in leži v kotlini v osrednji Sloveniji. V letu 2013 je imela 352.349 prebivalcev, v letu 2020 pa 370.727 (SURS). UE Ljubljana leži v zmernem geografskem pasu in jo uvrščamo v omiljeno celinsko podnebje, za katero je značilno, da so padavine dokaj enakomerno razporejene skozi leto z viškom padavin v jesenskem času. Razpon povprečnih temperatur med hladno in toplo polovico leta je kar velik, tudi večji kot 20 °C. V poletnem času so mogoča daljša obdobja stabilnega in vročega vremena, kar lahko privede do sušnih razmer površinskega sloja tal. V takšnih razmerah so mogoče zelo visoke dnevne temperature, in sicer tudi nad 40 °C. V hladni polovici leta pa je za to območje zelo značilen obrat temperature ali inverzija, ko je na dnu kotline ujet hladnejši zrak z meglo ali nizko oblačnostjo.

Vir podatkov o številu umrlih

Podatke o številu umrlih za UE Ljubljana po diagnozah, starostnih skupinah in spolu od začetka maja do konca septembra za leta 2013 do leta 2020 smo na Nacionalnem inštitutu za javno zdravje (NIJZ) pridobili iz podatkovne baze – baze umrlih (NIJZ, Zbirka podatkov o umrlih osebah b.d.), v kateri so kodirani podatki po mednarodni statistični klasifikaciji bolezni in sorodnih zdravstvenih problemov za statistične namene desete revizije (MKB-10). Zaradi agregiranih podatkov pri analizah ni opredeljenega časa in kraja smrti, posameznikov ni mogoče prepoznati, zato raziskave nismo prijavili Komisiji Republike Slovenije za medicinsko etiko.

Definicija vročinskih valov

Enotne definicije vročinskega vala ni, saj se ljudje na vročino odzovejo različno. Tako dnevne temperature nad 30 °C ljudje v Grčiji občutijo drugače kot ljudje na severu Nemčije. Ravno zaradi tega obstaja veliko kazalnikov vročine, ki uporabljajo različne metode za izračune. Dokaj enotna definicija vročinskega vala je predstavljena s kazalnikom vročine EHF (ang. excess heat factor), ki so ga definirali na Avstralskem meteorološkem zavodu (Nairn in Fawcett, 2013) in smo ga uporabili v tem članku. Podrobneje je predstavljen v nadaljevanju besedila.

Velika toplotna obremenitev se pojavi v dneh, ko je vroče čez dan in tudi nadpovprečno toplo ponoči. Ugotovili so, da ranljivi del prebivalstva postane občutljiv za vročino po treh dneh izpostavljenosti velikemu toplotnemu presežku (Nairn in Fawcett, 2013). Toplotno obremenitev tako lahko določimo s primerjavo povprečnih temperatur treh zaporednih dni z referenčno vrednostjo. Za mejo velike toplotne obremenitve je bila določena vrednost pri 95. centilu izmerjenih dnevnih povprečnih temperatur (PDT) v daljšem obdobju meritev:

$$PDT = \frac{T_{maks} + T_{min}}{2}, \quad (1)$$

kjer T_{maks} pomeni dnevno najvišjo temperaturo in T_{min} dnevno najnižjo. Izračunali smo povprečje po treh zaporednih dneh in odstopanje od mejne vrednosti:

$$EHI_{sig} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2}}{3} - T_{95}, \quad (2)$$

kjer je T_i dnevna povprečna temperatura (PDT) i-tega dneva v °C in T_{95} vrednost 95. centila dnevnih povprečnih temperatur v daljšem obdobju, prav tako v °C. Izračunali smo kazalnik presežka EHI_{sig} (angl. excess heat index), ki izraža temperaturno anomalijo. Pozitivna odstopanja od referenčne vrednosti pomenijo precejšen toplotni presežek oziroma vročinski val (Ključevšek, 2016).

Poleg zgoraj omenjenega kazalnika presežka poznamo še kazalnik vročine, ki upošteva privajanje (ang. excess heat index – acclimatization, EHI_{aki}), ki ga v literaturi najdemo pod imenom toplotna obremenitev (ang. heat stress). Izvira iz opažanj, da so bolj obremenilni dnevi, ki so toplejši od nedavne preteklosti (predhodnih trideset dni). Tudi tukaj dnevne povprečne temperature treh zaporednih dni primerjamo z dnevno povprečno temperaturo predhodnih trideset dni. S tem kazalnikom izračunamo časovni odklon temperature v krajšem obdobju in upoštevamo morebitno hitro privajanje na vročino. Izračun kazalnika je naslednji:

$$EHI_{aki} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2}}{3} - \frac{T_{i-1} + T_{i-2} + \dots + T_{i-30}}{30}, \quad (3)$$

Dobljena vrednost nam pove stopnjo toplotne obremenitve, ki je predstavljena kot temperaturni odklon v primerjavi s povprečjem predhodnih trideset dni in je izražena v °C.

Najnovejši je kazalnik vročine EHF (ang. excess heat factor). Ta združuje oba zgoraj omenjena kazalnika

EHI_{sig} in EHI_{aki} . Združuje jakost, trajanje in toplotno obremenitev v času vročinskega vala. Določen je kot:

$$EHF = EHI_{sig} * \max(1, EHI_{aki}), \quad (4)$$

pri čemer je

$$\max(1, EHI_{aki}) = \begin{cases} 1^\circ\text{C}, EHI_{aki} \leq 1^\circ\text{C} \\ EHI_{aki}, EHI_{aki} \geq 1^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

Enota kazalnika je °C, saj imata oba kazalnika, ki jih uporabimo v izračunu, enoto °C. Vročinski valovi, ki so šibki, povzročijo majhno jakost dogodkov EHF. Ko se kazalnika EHI_{sig} in EHI_{aki} hkrati povečujeta, se njun produkt povečuje kvadratično. Kazalnik vročine je pozitiven, če je EHI_{sig} pozitiven (obravnavano tridnevje je vroče glede na referenčno vrednost T_{95}), poleg tega je EHF velik, ko je povprečno tridnevno obdobje toplejše od predhodnih trideset dni. Če vročinski val traja več kot tri dni, potem določimo t. i. vročinski napor kot vsoto pozitivnih vrednosti EHF. Na podlagi teh vsot in produkta lahko primerjamo različne vročinske valove po svojem trajanju in jakosti.

Oprelitev števila umrlih v UE Ljubljana v času vročinskih valov in v referenčnem času

Obdobja vročinskih valov, ki smo jih vključili v raziskavo, so obsegala čas od 1. maja do 30. septembra v letih od 2013 do 2020. Vključeni so bili vsi vročinski valovi, ki so se pojavili v teh obdobjih v UE Ljubljana. Število umrlih v obdobju vročinskih valov in v obdobju brez vročinskih valov (referenčnem obdobju) smo opredelili kot katerokoli smrt po MKB-10 v izbranem obdobju.

Obdobje brez vročinskih valov (referenčno obdobje) smo opredelili kot v prejšnjih raziskavah (Perčič s sod. 2018; Joe s sod. 2016). Opredelili smo trajanje referenčnega obdobja, ki je enako številu dni vročinskih valov za posamezno opazovano leto v obdobju od maja do septembra.

Obdobje brez vročinskih valov (referenčno obdobje) smo opredelili kot v prejšnjih raziskavah (Perčič s sod. 2018; Joe s sod. 2016). Opredelili smo trajanje referenčnega obdobja, ki je enako številu dni vročinskih valov za posamezno opazovano leto v obdobju od maja do septembra.

Oprelitev podskupin preiskovancev

Za raziskavo tveganja, povezanega z vzroki smrti, smo izračunali relativna tveganja (RT) za naslednje diagnoze: umrli zaradi vseh vzrokov smrti brez zunanjih vzrokov (MKB-10, A00–T98) in umrli zaradi bolezni obtočil (MKB-10, I00–I99). Za umrle zaradi vseh vzrokov smrti smo naredili še analize po spolu in

starostnih skupinah. Pri izbiri starostnih skupin smo sledili že objavljeni znanstveni literaturi na področju zdravja in podnebnih sprememb (Perčič s sod. 2018). Ker je UE Ljubljana majhna in je opazovanih dogodkov (smrti oz. umrlih) malo, smo se odločili za analize umrljivosti v starostni skupini 5–74 let in v starostni skupini 75 let ali več (Perčič s sod. 2018). Za bolezni obtočil smo se odločili samo za starostno skupino 75 in več let, ker je bilo v starostni skupini 5–74 let opazovanih dogodkov (smrti oz. umrlih) zelo malo. Starostne skupine 0–4 let v raziskavo nismo vključili, ker je v opazovanem obdobju število opazovanih dogodkov (smrti oz. umrlih) prav tako zelo majhno in je statistična analiza težavna.

Celotna statistična analiza je bila opravljena s programom Microsoft Excel, različica 2010. Kot v prejšnjih raziskavah (Perčič s sod. 2018; Joe s sod. 2016) smo uporabili pristop z izračunanjem relativnega tveganja (RT, ang. RR); primerjali smo število umrlih v UE Ljubljana v času vročinskih valov s številom umrlih v referenčnem obdobju v UE Ljubljana, za vsako leto posebej. Predpostavili smo, da populacija v UE Ljubljana v opazovanem obdobju (2013–2020) ostaja nespremenjena. Izračunali smo RT za oceno učinka vročinskih valov z deljenjem števila umrlih med vročinskimi valovi (A_1) s številom umrlih v referenčnem obdobju (A_0) (enačba 7):

$$RT = \frac{A_1}{A_0} \quad (7)$$

Za izračunana RT smo 95-odstotni interval zaupanja izračunali kot pri predhodnih raziskavah (Joe s sod. 2016) (enačba 8):

$$95\% \text{ IZ} = e^{(\ln(RT) \pm 1,96\sqrt{1/A_1 + 1/A_0})} \quad (8)$$

Statistično značilno povečano število umrlih v UE Ljubljana v času vročinskih valov je bilo takrat, ko je bila spodnja vrednost 95-odstotnega intervala zaupanja večja ali enaka 1. Za oceno povečanega/zmanjšanega števila umrlih v UE Ljubljana smo zapisali še delež, ki se prebere iz RT.

Rezultati

Rezultati povečanega števila umrlih v času vročinskih valov zaradi vseh vzrokov so bili statistično značilni samo leta 2017, ko je v UE Ljubljana umrlo 30 % več ljudi od pričakovanega. Za preostala opazovana leta se je pokazalo nekaj več umrlih od pričakovanega števila, vendar v vseh opazovanih letih ni bilo statistično značilne povezanosti med vročinskimi valovi in številom umrlih zaradi vseh vzrokov. Leta 2013 je bilo nekaj več umrlih v času brez vročinskih valov, toda spet statistično neznačilno. V letu 2013

je bilo v starostni skupini 5–74 let statistično značilno zmanjšanje števila umrlih v času vročinskih valov. Statističnih razlik med spoloma nismo dokazali.

Pri boleznih obtočil v UE Ljubljana nismo ugotovili nikakršnega trenda, niti povečanja števila umrlih niti zmanjšanja števila umrlih. V letih 2013 in 2017 se je pojavilo nekaj več umrlih zaradi bolezni obtočil v času vročinskih valov v primerjavi s časom brez vročinskih valov, vendar statistično neznačilno. V letih od 2014 do 2019 se je slika spremenila; bilo je namreč nekaj manj umrlih v času vročinskih valov kot v času brez vročinskih valov, vendar spet statistično neznačilno. V letu 2020 je število umrlih v času vročinskih valov zaradi bolezni obtočil statistično značilno padlo (preglednica 1).

V letih 2013 in 2014 so bili trije vročinski valovi, v letu 2014 trije, v letu 2015 šest, v letu 2016 pet, v letu 2017 sedem, v letu 2018 trije, v letu 2019 dvanajst in v letu 2020 trije vročinski valovi, ki so bili opredeljeni z meteorološko analizo (slika 1). V letu 2013 je celotno obdobje vročinskih valov trajalo 23 dni, v letu 2014 8 dni, v letu 2015 38 dni, v letu 2016 19 dni, v letu 2017 32 dni, v letu 2018 22 dni, v letu 2019 32 dni in v letu 2020 13 dni (slika 2).

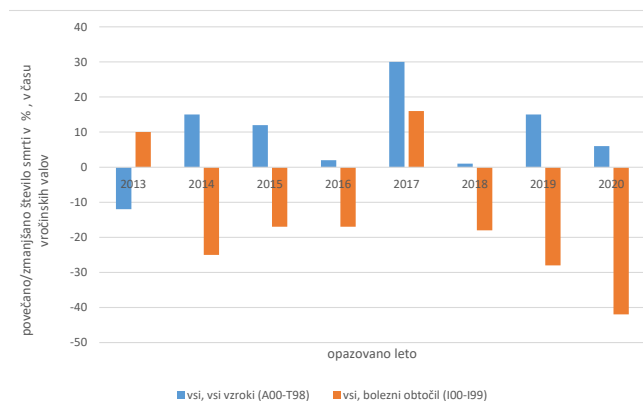
Preglednica 1. Relativna tveganja (RT) za število umrlih v UE Ljubljana v času vročinskih valov, 95-odstotni intervali zaupanja (IZ) in povečano/zmanjšano število umrlih v UE Ljubljana po opazovanih diagnozah, spolu in starostnih skupinah za opazovana leta (2013–2020)

Table 1. Relative risks (RT) for the number of deaths in the administrative unit (UE) Ljubljana during heat waves, 95% intervals confidence intervals (IZ) and increased/decreased number of deaths in UE Ljubljana by observed diagnoses, sex and age groups for the observed years (2013–2020)

Vzrok/diagnoza smrti (koda MKB-10)	RT (95-% IZ)	povečano/zmanjšano št. umrlih v %
2013		
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	0,88 (0,70–1,1)	–12
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	0,85 (0,61–1,2)	–15
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	0,90 (0,66–1,23)	–10
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	0,65 (0,45–0,94)	–35
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	1,06 (0,79–1,42)	6
VSI, bolezni obtočil (I00–I99)	1,1 (0,73–1,64)	10
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	1,12 (0,72–1,73)	12
2014		
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	1,15 (0,79–1,69)	15
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	0,97 (0,57–1,65)	–3

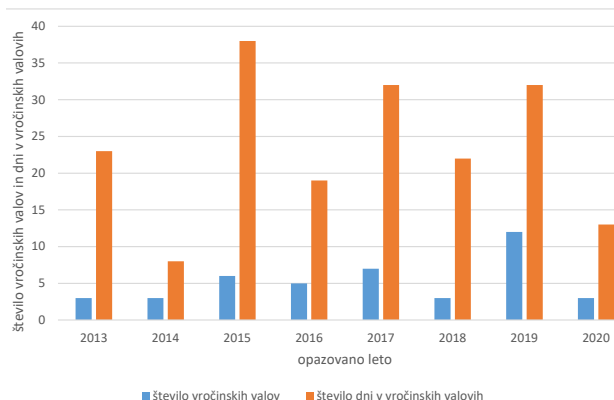
Vzrok/diagnoza smrti (koda MKB-10)	RT (95-% IZ)	povečano/ zmanjšano št. umrlih v %
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	1,38 (0,79–2,4)	38
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	1,4 (0,67–2,97)	40
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	0,89 (0,56–1,41)	–11
VSI, bolezní obtočil (I00–I99)	0,75 (0,43–1,32)	10
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	1,22 (0,6–2,47)	12
	2015	
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	1,12 (0,93–1,36)	12
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	1,17 (0,9–1,54)	17
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	1,07 (0,82–1,419)	7
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	1,22 (0,87–1,70)	12
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	1,08 (0,85–1,36)	8
VSI, bolezní obtočil (I00–I99)	0,83 (0,59–1,15)	–17
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	0,82 (0,57–1,19)	–18
	2016	
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	1,02 (0,78–1,32)	2
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	1,05 (0,71–1,53)	5
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	1 (0,69–1,43)	0
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	1,22 (0,78–1,91)	22
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	0,93 (0,67–1,28)	–7
VSI, bolezní obtočil (I00–I99)	0,83 (0,53–1,30)	–17
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	0,75 (0,45–1,23)	–25
	2017	
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	1,3 (1,05–1,61)	30
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	1,27 (0,93–1,73)	27
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	1,33 (0,98–1,79)	33
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	1,36 (0,92–1,99)	36
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	1,27 (0,98–1,65)	27
VSI, bolezní obtočil (I00–I99)	1,16 (0,78–1,72)	16
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	1,07 (0,71–1,60)	7

Vzrok/diagnoza smrti (koda MKB-10)	RT (95-% IZ)	povečano/ zmanjšano št. umrlih v %
	2018	
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	1,01 (0,79–1,29)	1
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	0,92 (0,65–1,29)	–8
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	1,12 (0,78–1,6)	12
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	0,85 (0,56–1,32)	–15
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	1,12 (0,83–1,52)	12
VSI, bolezní obtočil (I00–I99)	0,82 (0,53–1,28)	–18
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	0,94 (0,58–1,52)	–6
	2019	
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	1,15 (0,95–1,39)	15
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	1,18 (0,89–1,55)	18
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	1,22 (0,94–1,59)	22
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	1,1 (0,79–1,51)	10
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	1,18 (0,94–1,49)	18
VSI, bolezní obtočil (I00–I99)	0,78 (0,56–1,08)	–28
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	0,86 (0,6–1,23)	–14
	2020	
VSI, vsi vzroki (A00–T98)	1,06 (0,79–1,43)	6
MOŠKI, vsi vzroki (A00–T98)	0,88 (0,57–1,37)	–12
ŽENSKE, vsi vzroki (A00–T98)	1,22 (0,82–1,81)	22
VSI, starostna skupina 5–74 let (A00–T98)	1,14 (0,64–2,02)	14
VSI, starostna skupina 75+ let (A00–T98)	1,04 (0,74–1,46)	4
VSI, bolezní obtočil (I00–I99)	0,58 (0,33–0,99)	–42
VSI, starostna skupina 75+ let (I00–I99)	0,63 (0,36–1,11)	–37
Legenda	statistično značilno povečanje št. umrlih	statistično značilno



Slika 1. Povečano/zmanjšano število umrlih v UE Ljubljana v času vročinskih valov v odstotkih zaradi vseh vzrokov in zaradi bolezni obtočil od leta 2013 do leta 2020.

Figure 1. Increased/decreased number of deaths in the Ljubljana administrative unit (UE) during heat waves as a percentage of all-cause and circulatory diseases from 2013 to 2020.



Slika 2. Število vročinskih valov in število dni v vročinskih valovih (od maja do septembra) v obdobju od leta 2013 do leta 2020 v UE Ljubljana.

Figure 2. Number of heatwaves and number of days in heatwaves (May to September) from 2013 to 2020 in the Ljubljana Administrative Unit (UE).

Razprava

Preden interpretiramo rezultate, moramo nujno poudariti, da analize števila umrlih v času vročinskih valov v UE Ljubljana temeljijo na zelo majhnem številu opazovanih enot (smrti) in da je bila analiza za druge bolezni (razen bolezni obtočil) težavna, zato je v posameznem letu analiziranih le malo spremenljivk.

Prejšnje raziskave o povečanem številu umrlih zaradi vročinskih valov v Sloveniji kažejo, da so posamezniki iz ranljivih skupin, ki so najverjetneje umrli zaradi posledic toplotne obremenitve, starejši prebivalci in tisti, ki umirajo zaradi bolezni obtočil. V celotni Sloveniji se je umrljivost leta 2015 v primerjavi z letom 2003 povečala (Perčič s sod. 2018). Pri primerjavi umrljivosti med letoma 2014 in 2018 pa se je umrljivost leta 2018 stabilizirala in ni bilo presežka

umrljivosti (Grašič in Perčič 2022).

V pričujoči raziskavi smo opazili, da v UE Ljubljana skoraj v nobenem opazovanem letu ni bilo statistično značilnega povečanja/zmanjšanja števila umrlih v času vročinskih valov zaradi vseh vzrokov smrti. Izjema je leto 2017, ko je bila povezanost med vročinskimi valovi in številom umrlih statistično značilna in pozitivna. Prav tako ni bilo statistično pomembnih razlik v številu umrlih zaradi bolezni obtočil v času vročinskih valov, le v letu 2020 je bilo v UE Ljubljana statistično značilno nekaj manj umrlih zaradi bolezni obtočil v času vročinskih valov. Vendar pa je tudi to dober podatek, saj so izzivi na področju vročinskih valov in potencialno povečanim številom umrlih veliki in se glede na napovedi lahko poslabšajo. Ker smo po katastrofalno vročem poletju 2003 začeli javnozdravstvene ukrepe, ta padec v umrljivosti nekako ni nepričakovan. Tudi v drugih evropskih državah je v opazovanih mestih umrljivost po izvajanju ukrepov padla in je skladna s številnimi raziskavami na začetku 21. stoletja (Basu in Samet 2002; CDC 2003; Hajat s sod. 2006; Kinney s sod. 2008; Medina – Ramon s sod. 2006).

Starost je dobro znan dejavnik tveganja za povečano umrljivost v času vročinskih valov (Åström s sod. 2011; Kenney in Munce 2003; Gamble s sod. 2013). Ker se prebivalstvo stara in narašča število oseb s kroničnimi nenalezljivimi boleznimi, bo problem vse bolj pereč (NIJZ, 2021). Starejši odrasli so v času vročinskih valov ranljivejši zaradi patofizioloških in socialno-ekonomskih dejavnikov tveganja (življenje v samoti, izguba dohodka, številne kronične bolezni, omejen dostop do zdravstvenih storitev, slabe bivanjske razmere (neizolirane stavbe, višja nadstropja) in pomanjkanje klimatskih naprav). V literaturi navajajo domneve, da številni starejši odrasli (starejši od 75 let) umrejo zaradi dejavnikov, kot so izoliranost, pomanjkanje dostopa do takojšnje oskrbe in nezavedanje, da so v nevarnosti (tudi ob prisotnosti več sočasnih bolezni). (Grynspan 2003; Valleron in Boumendil 2004; Abrahamson s sod. 2009). Pri staranju pride do nekaterih fizioloških sprememb, vendar pa se lahko med vročinskimi valovi, ko so prisotne ekstremne zunanje temperature, nekatera stanja bolj izrazijo (npr. vpliv na porazdelitev krvi, šibkejša potenje med izpostavljenostjo ekstremnim temperaturam, odziv pljuč med ekstremno vročino na prostem) (Kenney in Munce 2003; Gamble s sod. 2013).

Za bolezni obtočil smo v raziskavi dokazali, da se v UE Ljubljana ni pokazal noben trend, niti povečanje niti zmanjšanje števila smrti, edino v letu 2020 je število umrlih v času vročinskih valov zaradi bolezni obtočil statistično značilno upadlo. Kljub temu velja, da imajo srčno-žilni bolniki običajno nizko toleranco za vročino. Poleg s starostjo povezanih sprememb v termoregulaciji se tudi srčno-žilna zmogljivost

človeškega telesa s starostjo naravno zmanjšuje (Achebak s sod. 2019). Med izpostavljenostjo vročini se srčno-žilni bolniki na splošno odzovejo z oslabiljenim izločanjem žlez znojnic, zmanjšanim pretokom krvi v kožo, manjšim povečanjem minutnega volumna srca in povečano prerazporeditvijo krvi iz notranjih organov (Fleg in Starid 2012). Poleg tega imajo ljudje, stari 65 let in več, več bolezni kot mlajši ljudje (npr. hipertenzija, sladkorna bolezen, hiperlipidemija in bolezen koronarnih arterij) in s tem povezano večjo uporabo zdravil, kar bi lahko pojasnilo tudi opaženo povečano tveganje izidov srčno-žilnih bolezni kot odziv na vročino (Vu s sod. 2019). Skupni učinek hemokoncentracije zaradi dehidracije in vnetja pljuč, večinoma zaradi izpostavljenosti ozonu, vodi do akutnega koronarnega sindroma in možganske kapi (Lavallée s sod. 2002). Kar zadeva akutne resne zdravstvene posledice, vključno s toplotno sinkopo, toplotno izčrpanostjo, vročinskimi krči in toplotno kapjo (Knochel 1989), je dobro znano, da ko temperatura jedra preseže 40 °C in telo ne more svoje temperature znižati z vazodilatacijo in znojenjem, to vodi do sindroma večorganske odpovedi (Bouchama in Knochel 2002; Glazer 2005). Te težave so še posebej pomembne za fizično aktivne delavce, ki delajo na prostem.

Dojenčki in otroci so zaradi večjega razmerja med površino in prostornino telesa v času vročinskih valov ranljivejši kot zdravi odrasli. Otroci so tudi telesno aktivnejši in ne znajo dovolj poskrbeti zase, zato morajo za zaščito skrbeti starši (npr. zadostno uživanje tekočin, primerna oblačila). Otroci imajo zaradi še potekajočega razvoja manj učinkovito sposobnost prilagajanja na toploto kot odrasli s prilagoditvenimi termoregulacijskimi mehanizmi. (WHO, 2021).

Statističnih razlik med spoloma v času vročinskih valov v naši raziskavi nismo dokazali, kljub temu pa je v nekaterih raziskavah toplotni učinek v času vročinskih valov dokazano izrazitejši pri ženskah kot pri moških, kar so raziskovalci pripisali večji socialni izključenosti in revščini žensk. Fiziološki dejavniki, ki lahko vplivajo na to, so manjša sposobnost znojenja in sproščanja toplote zaradi nižje telesne pripravljenosti, višji odstotek telesne maščobe, slabša sposobnost aklimatizacije in drugačna prevodnost kože pri ženskah (Kenny 1985).

V svoji raziskavi zaradi majhnega števila dogodkov (smrti) nismo posebej analizirali povečanega/zmanjšane števila umrlih zaradi bolezni dihal, sladkorne bolezni, debelosti in duševnih bolezni ter bolezni ledvic. V nadaljevanju navajamo dokazane vplive vročinskih valov na posamezne bolezni.

Ko se staramo, so naša pljuča podvržena fiziološkim spremembam, ki lahko poslabšajo dihanje, tudi brez bolezni, te spremembe pa spremlja oslabiljen imunski

sistem (Wang et al. 210). Najpomembnejši dejavnik za okvaro pljuč poleti je povišana koncentracija prizemnega ozona, ki ga spremlja lokalno vnetje, ki se sistemsko širi (Bélanger s sod. 2008). Poleg tega so starejši posamezniki občutljivejši za okužbe (Wang s sod. 2010).

Sladkorna bolezen je močno povezana s toplotnim stresom v času vročinskih valov. Kronične zdravstvene spremembe pri bolnikih s sladkorno boleznijo povzročajo zmanjšano sposobnost odvajanja toplote, zato so pogosti dehidracija in druga tekočinska neravnovesja (Kenny s sod. 2016).

Debelost v državah z visokim dohodkom, med katere spada tudi Slovenija, hitro narašča (Zdravje v Sloveniji 2021). Starejši odrasli imajo drugačno razmerje med telesno maščobo (večjo) in mišično maso (manjšo) v primerjavi z mlajšimi odraslimi. Debeli posamezniki imajo zmanjšano toleranco za vročino in zmanjšano aktivacijo odzivov na izgubo toplote pri pretoku krvi in znojenju kože. Debeli ljudje imajo manjše razmerje med telesno površino in maso, imajo več maščobnega tkiva, ki ima toplotno kapaciteto, ki je nižja od toplotne kapacitete mase brez maščobe (Kenny s sod. 2016).

Duševne bolezni pomembno prispevajo k bremenu smrti in bolezni med vročinskimi valovi. Ocenjuje se, da imajo socialno-ekonomski status in demografski dejavniki, kot so poroka, ločitev in migracije, pomembno vlogo pri številu smrti zaradi bolezni duševnega in živčnega sistema (Hansen s sod. 2008). K vplivu vročinskih valov na človeka pa prispeva tudi uporaba nekaterih psihotropnih zdravil (Löhms 2018).

Toplotni stres je povezan s prerazporeditvijo krvi iz notranjih organov na periferijo, kar vpliva na ledvični krvni pretok in povzroča ledvične okvare (Fleg in Straid 2012). Starostniki imajo tudi druge kronične nenalezljive bolezni, ki stanje poslabšujejo.

Prednosti in slabosti raziskave

Prednosti naše raziskave so v tem, da rezultati posredno kažejo, da lahko z javnozdravstvenimi ukrepi in medsektorskim sodelovanjem izboljšamo ozaveščenost ljudi in jim pomagamo k varnejšemu vedenju v vročih dneh. Za boljšo oceno javnozdravstvenih ukrepov so potrebne nadaljnje študije vpliva vsakega posameznega ukrepa.

Poleg majhnega števila smrti na dan je omejitev naše raziskave tudi ta, da pri analizi nismo upoštevali motečih dejavnikov, ki so povezani s povečano umrljivostjo poleti: poletni oksidacijski smog, druga onesnaževala zunanjega zraka in izboljšane življenjske razmere v zaprtih prostorih.

Zaključek

Vročinski valovi so samo ena od posledic podnebnih sprememb, vendar za neposreden vpliv na zdravje ljudi najpomembnejša. Na zdravje ljudi prav tako vplivajo drugi ekstremni vremenski dogodki, ki so posledica podnebnih sprememb (npr. neurja, toča, veter, obilno deževje, suša). Projekcije kažejo, da bodo vročinski valovi daljši, intenzivnejši in pogostejši, zato moramo skrbno ocenjevati njihove vplive na zdravje ljudi, da lahko pripravimo javnozdravstvene in medsektorske ukrepe. Pred nami je dolga in pomembna pot prilagajanja in blaženja podnebnih sprememb, odgovornost pa je tako na vsakem posamezniku kot na odločevalcih po vsem svetu. Potrebno je hitro in trajnostno ukrepanje.

Viri

Abrahamson V, Wolf J, Lorenzoni I, Fenn B, Kovats S, Wilkinson P, Adger WN, Raine R. 2009. Perceptions of heatwave risks to health: interview-based study of older people in London and Norwich, UK. *31(1):119-26*.

Achebak H, Devolder D, Ballester J. 2019. Trends in temperaturerelated agespecific and sexspecific mortality from cardiovascular diseases in Spain: a national timeseries analysis. *Lancet Planet Health 3: e297-306*.

Alcoforado MJ, Marques D, Garcia RAC, et al. 2015. Weather and climate versus mortality in Lisbon (Portugal) since the 19th century. *Applied Geog; 57: 133-41*.

Anderson BG, Bell ML. 2009. Weather-Related mortality: How heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States. *Epidemiology. 20, 205-213*.

Åström DO, Forsberg B, Rocklöv J. 2011. Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. *Maturitas. 69, 99-105*.

Bao J, Wang Z, Yu C, Li X. 2016. The influence of temperature on mortality and its Lag effect: A study in four Chinese cities with different latitudes. *BMC Public Health. 16, 375-382*.

Baccini M, Kosatsky T, Analitis A, Anderson HR, D'Ovidio M, Menne B, Michelozzi P, Biggeri A. 2011. The PHEWE Collaborative Group. Impact of heat on mortality in 15 European cities: Attributable deaths under different weather scenarios. *Epidemiol. Community Healt. 65, 64-70*.

Basu R., & Samet, J. M. 2002. Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic reviews, 24(2), 190-202*.

Basu R, Feng WY, Ostro BD. 2008. Characterizing temperature and mortality in nine California counties. *Epidemiology. 19, 138-145*.

Bélanger D, Berry P, Bouchet V, Charron D, Clarke KL, Doyon B, Fleury M, Furgal C, Gosselin P, Lamy S, et al. 2008. Human Health in a Changing Climate: A Canadian Assessment of Vulnerabilities and Adaptive Capacity; Séguin J, Ed.; Health Canada: Ottawa, ON, Canada.

Bobb JF, Peng RD, Bell ML, et al. 2014. Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environ Health Perspect. 122 (8): 811-6*.

Bouchama A, Dehbi M, Mohamed G, Matthies F, Matthies F, Shoukri M, Menne B. 2007. Prognostic Factors in heat wave related deaths: A meta-analysis. *Arch. Intern. Med. 167, 2170-2176*.

Bouchama A, Knochel JP. 2002. Heat stroke. *N. Engl. J. Med. 346, 1978-1988*.

Can G, Şahin U, Sayılı U, et al. Excess mortality in Istanbul during extreme heat waves between 2013 and 2017. 2019. *Int J Environ Res Public Health; 16 (22): 4348*.

Centers for Disease Control and Prevention. Heat-related deaths – Chicago, Illinois, 1996-2001, and United States, 1979-1999. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep. 2003; 52: 610-3*.

Conti S, Masocco M, Meki P, Minelli G, Palummeri E, Solimini R, Toccaceli V, Vichi M. 2007. General and specific mortality among the elderly during the 2003 heatwave in Genoa (Italy). *Environ. Res. 103, 267-274*.

D'Ippoliti D, Micelozzi P, Marino C, De'Donato F, Menne B, Katsouyanni K, Kirchmayer U, Analitis A, Medina-Ramón M, Paldy A. et al. 2010. The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: Results of the EuroHEAT project. *Environ. Health. 9, 37*.

de'Donato F, Leone M, Scortichini M, et al. 2015. Changes in the effect of heat on mortality in the last 20 years in nine European cities. Results from the PHASE project. *Int J Environ Res Public Health. 12 (12): 15567-83*.

Donat MG, Alexander LV, Yang H, et al. 2013. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes. *Bull Amer Meteor Soc.* 94 (7): 997–1006.

Donoghue ER, Nelson M, Rudis G, Sabogal RI, Watson JT, Huhn G, et al. 2003. Heat-related deaths—Chicago, Illinois, 1996–2001, and United States, 1979–1999. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 52:610–613.

European Commission. The impact of demographic change in Europe. *Medmrežje* (10.11.2023): https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/new-push-european-democracy/impact-demographic-change-europe_en#europes-ageing-population.

Fleg JL, Strait J. 2012. Age-associated changes in cardiovascular structure and function: a fertile milieu for future disease. *Heart Fail Rev.* 17: 545–54.

Gamble JL, Hurlea BJ, Shultz BA, Jaglom WS, Krishnan N, Harris M. 2013. Climate Change and Older Americans: State of the Science. *Environ. Health Perspect.* 121, 15–22.

Glazer JL. 2005. Management of heatstroke and heat exhaustion. *Am Fam Physician.* 71: 2133–2140.

Grašič M, Perčič S. 2022. Število umrlih v času vročinskih valov po diagnozah, spolu, starostnih skupinah ter mestnem in podeželskem okolju, za Slovenijo, primerjava med letoma 2014 in 2018. *Med Razg.* 61 (3): 437–56.

Grynszpan D. 2003. Lessons from the French heatwave. *Lancet.* 11; 362(9391):1169–70.
Hajat S, Armstrong B, Bacini M, Biggeri A, Bisanti L, Russo A, et al. 2006. Impact of high temperature on mortality: is there an added heat wave effect? *Epidemiology* 17:632–638.

Hajat S, Kosatky T. 2010. Heat related mortality: A review and exploration of heterogeneity. *J. Epidemiol. Community Health.* 64, 753–760.

Hansen A, Bi P, Nithschke M, Ryan P, Pisaniello D, Tucker G. 2008. The effect of heat waves on mental health in temperate Australian cities. *Environ. Health Perspect.* 116, 1369–1375.

Heudorf U, Schade M. 2014. Heat waves and mortality in Frankfurt am Main, Germany, 2003–2013: What effect do heat-health action plans and the heat warning system have? *Z Gerontol Geriatr.* 47 (6): 475–82.

Joe L, Hoshiko S, Dobraca D, Jackson R, Smorodinsky S, Smith D, Harnly M. 2016. Mortality during a large-scale Heat wave by place, demographic group, internal

and external causes of death, and building climate zone. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 13, 299.

Kaiser R, Rubin CH, Henderson AK, Wolfe MI, Kieszak S, Parrott CL, Adcock M. 2001. Heat-related death and mental illness during the 1999 Cincinnati heat wave. *Am. J. Forensic Med. Pathol.* 22, 303–307.

Kenney W. L. 1985. A review of comparative responses of men and women to heat stress. *Environmental research*, 37(1), 1–11.

Kenney WL, Munce TA. 2003. Invited review: Ageing and human temperature regulation. *J. Appl. Physiol.* 95, 2598–2603.

Kenny, G. P., Sigal, R. J., & McGinn, R. 2016. Body temperature regulation in diabetes. *Temperature (Austin, Tex.)*, 3(1), 119–145.

Kilbourne EM, Choi K, Jones TS, Thacker SB. 1982. Risk factors for heatstroke: A case-control study. *JAMA.* 247, 3332–3336.

Kinney PL, O'Neill MS, Bell ML, Schwartz J. 2008. Approaches for estimating effects of climate change on heat-related deaths: challenges and opportunities. *Environ Sci Policy* 11:87–96.

Ključevšek, N. (2016). Detekcija in vpliv vročinskih valov v Sloveniji. Magistrsko delo.

Laaïdi K, Zeghnoun D, Dousset A, Bretin P, Vandentorren S, Giraudet E, Beaudeau P. 2012. The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. *Environ. Health Perspect.* 120, 254–259.

Lavallée, P., Perchaud, V., Gautier-Bertrand, M., Grabli, D., & Amarenco, P. 2002. Association between influenza vaccination and reduced risk of brain infarction. *Stroke*, 33(2),

Linares C, Montero JC, Mirón JJ, Criado-Álvarez JJ, Tobías A, Díaz J. 2014. The time trend temperature-mortality as a factor of uncertainty analysis of impacts of future heat waves. *Environ. Health Perspect.* 122(5):A118.

Li M, Gu S, Bi P, et al. 2015. Heat waves and morbidity: Current knowledge and further direction – A comprehensive literature review. *Int J Environ Res Public Health.* 12 (5): 5256–83.

Löhmus M. 2018. Possible Biological Mechanisms Linking Mental Health and Heat-A Contemplative Review. *International journal of environmental research and public health*, 15(7), 1515.

Meehl GA, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 305:994–997.

Medina-Ramon M, Zanobetti A, Cavanagh DP, Schwartz J. 2006. Extreme temperatures and mortality: assessing effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a multi-city case only analysis. *Environ Health Perspect* 114:1331–1336.

Miron JJ, Linares C, Montero JC, et al. 2015. Changes in cause-specific mortality during heat waves in central Spain, 1975–2008. *Int J Biometeorol.* 59 (9): 1213–22.

Muthers S, Matzarakis A, Koch E. 2010a. Summer climate and mortality in Vienna – A human-biometeorological approach of heat-related mortality during the heat waves in 2003. *Wien Klin Wochenschr*; 122 (17–18): 525–31.

Muthers S, Matzarakis A, Koch E. 2010b. Climate change and mortality in Vienna – A human-biometeorological analysis based on regional climate modeling. *Int J Environ Res Public Health.* 7 (7): 2965–77.

Nairn, J., Fawcett, R. (2013). Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia.

Kent Town, South Australia: The Centre for Australian Weather and Climate Research.

Naughton MP, Henderson A, Mirabelli MC, Kaiser R, Wilhelm JL, Kieszak SM, et al. 2002. Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago. *Am J Prev Med* 22:221–227.

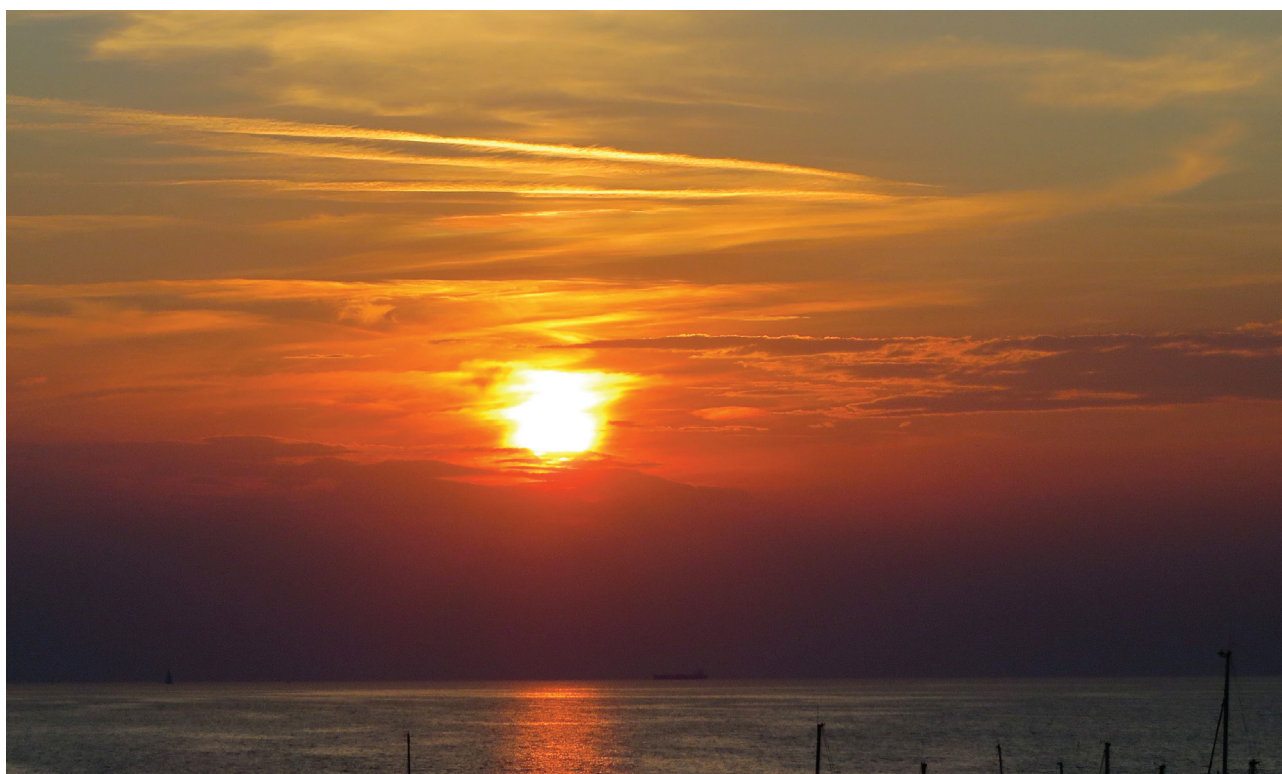
Ng CFS, Boeckmann M, Ueda K, et al. 2014. Heat-related mortality: Effect modification and adaptation in Japan from 1972 to 2010. *Glob Environ Change.* 9: 234–43.

NIJZ. Zdravje v Sloveniji. Medmrežje: <https://nijz.si/publikacije/zdravje-v-sloveniji/> (10.2.2023)
NIJZ. Zbirka podatkov o umrlih osebah..Medmrežje: <https://nijz.si/podatki/podatkovne-zbirke-in-raziskave/zbirka-podatkov-o-umrlih-osebah/> (15.11.2023).

Perčič S, Kukec A, Cegnar T, et al. 2018. Number of heat wave deaths by diagnosis, sex, age groups, and area, in Slovenia, 2015 vs. 2003. *Int J Environ Res Public Health.* 15 (1): 173.

Statistični Urad Republike Slovenije. Ppulacijska piramida. Medmrežje: <https://www.stat.si/PopPiramida/Piramida2.asp> (2.2.2023).

Statistični Urad Republike Slovenije. Prebivalstvo Slovenije. Medmrežje: <https://www.google.com/>.



Sončni zahod v vročem poletju (Foto: Tanja Cegnar)

Primerjava mesečnih mrežnih podatkov ARSO o temperaturi zraka in višini padavin v Sloveniji z reanalizami ERA5 v obdobju 1950–2020

Comparison of ARSO's monthly gridded temperature and precipitation data for Slovenia with ERA5 reanalysis in the period 1950–2020

Gregor Vertačnik, Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova cesta 1b, 1000 Ljubljana, gregor.vertacnik@gov.si

Povzetek

Reanalize stanja ozračja, ki jih z vnosom velike količine meritev izračunajo prognozični meteorološki modeli, postajajo vse pomembnejši vir podatkov za proučevanje tekočih podnebnih razmer in podnebnih sprememb v zadnjih desetletjih. Odlikuje jih popolna prostorsko-časovna pokritost s podatki, a so njihovi časovni nizi obremenjeni z nehomogenostmi. Slednje lahko pomembno vplivajo na analizo podnebnih sprememb. V tem prispevku analiziramo kakovost reanaliz ERA5 v obdobju 1950–2020 za del Slovenije, in sicer na mesečnih podatkih. Povprečna temperatura zraka dva metra nad tlemi večinoma ne odstopa pomembno od mrežnih vrednosti, izračunanih iz homogeniziranih nizov temperaturnih meritev. Le dolgoletni linearni trend temperature pozimi je med obema podatkovnima nizoma bistveno različen. Večje so razlike pri višini padavin, tako pri letnem povprečju in sezonskem režimu kot pri linearnem trendu skozi celotno obdobje. Glede na omenjene ugotovitve moramo biti zlasti pri uporabi padavinskih podatkov ERA5 za podnebne analize na območju Slovenije pazljivi, saj lahko pripeljejo do napačnih zaključkov.

Ključne besede: temperatura zraka, višina padavin, podnebne spremembe, reanalize ERA5, Slovenija

Abstract

Reanalysis of the state of atmosphere, based on the assimilation of huge volume of measured data into forecast, are becoming more and more important source for studies of current climate state and climate change in last decades. On the positive side, they are characterised by their complete spatio-temporal coverage, while on negative side their time series are inhomogeneous. The latter can significantly influence an analysis of climate change. This article analyse the quality of monthly data of ERA5 reanalysis in the period 1950–2020 for a part of Slovenia. Mean air temperature two metres above ground mostly does not deviate



significantly from gridded data, based on homogenised time series of measured temperature. Only the long-term linear trend of temperature in winter differs significantly between the two datasets. Larger differences are found for precipitation amount, both in annual means and seasonal cycle as well as linear trend throughout the period. Based on these findings one needs to be particularly cautious when using ERA5 precipitation data for climate analysis in Slovenia, as they may lead to erroneous conclusions.

Keywords: air temperature, precipitation sum, climate change, ERA5 reanalysis, Slovenia

Uvod

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) je v večletnem projektu Homogenizacija in dopolnitev slovenskih podnebnih nizov v obdobju 1950–2020 (v nadaljevanju HDS) preverila, homogenizirala, dopolnila in analizirala podnebne nize v obdobju 1950–2020 (Vertačnik, 2023). Za pet spremenljivk temperature zraka in za višino padavin smo najprej pripravili 98 oziroma 268 časovnih nizov mesečnih podatkov meteoroloških postaj in jih nato homogenizirali s programskim orodjem HOMER. Iz mesečnih popravkov smo izračunali popravljene dnevne vrednosti, manjkajoče vrednosti pa smo nadomestili s prostorsko interpoliranimi vrednostmi. Iz teh podatkov smo pripravili statistične preglede za posamezna merilna mesta in mrežne podatke v ločljivosti 100 oziroma 1000 metrov.

Meteorološke reanalize so po meteorološkem slovarju Ameriškega meteorološkega društva analize stanja ozračja, ki se ne izdelujejo v tekočem času, temveč jih za celotno obdobje izračuna enaka različica prognostičnega meteorološkega modela. Z uporabo enotne različice meteorološkega modela skozi celotno obdobje reanaliz se izognemo nehomogenostim v časovnem nizu podatkov, ki so posledica razvoja meteorološkega modela skozi čas, na primer izboljšane ločljivosti. V zadnjih letih postajajo reanalize vse pomembnejši vir podatkov za analizo podnebnih sprememb in spremljanje tekočih podnebnih razmer. V Evropi so najbolj znan primer slednje uporabe mesečna, sezonska in letna poročila, ki jih tudi na podlagi podatkov reanaliz ERA5 Evropskega središča za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF) pripravlja Copernicus Climate Change Service (podnebne storitve programa Copernicus, <https://climate.copernicus.eu/>).

ERA5 je peta generacija reanaliz ECMWF in je nadaljevanje projekta ERA-Interim, a v mnogo boljši časovni in prostorski ločljivosti (31 namesto 80 km, urni namesto tri- ali šesturni podatki). ERA5 zajema obdobje od leta 1940 do skoraj tekočega dne in vključuje oceno negotovosti prek izračuna desetih članov ansambla (Hersbach in sod., 2020). Osnovo ERA predstavljajo izračuni srednjeročnega vremenskega modela Integrated System Forecast, cikla 41r2, iz leta 2016. Reanalize niso izračunane

v enem kosu, od začetnega do končnega datuma, temveč v večletnih kosih, ki se nekoliko prekrivajo. Zaradi s časom močno spremenjene količine in kakovosti vhodnih meritev se v časovnem nizu podatkov ERA5 pri nekaterih spremenljivkah kažejo očitne nehomogenosti, kar lahko znatno vpliva na statistično analizo in iz nje izhajajoče ugotovitve.

Izmerjeni in prostorsko obdelani podatki (na primer projekta HDS) kot podatki reanaliz (na primer ERA5) imajo očitne prednosti in slabosti. Pri homogeniziranih časovnih nizih, ki temeljijo na kakovostnih meritvah, je dolgoletni trend praviloma bližje dejanskemu kot pri reanalizah, po drugi strani pa pri reanalizah razpolagamo s prostorsko in časovno popolnimi podatki. To je še zlasti pomembno na območjih s pomanjkanjem meritev, recimo na Arktiki ali nad oceani, saj lahko prostorsko nepopolni podatki pomembno vplivajo na analizo podnebnih sprememb (Cowtan in Way, 2014).

V zadnjih letih so raziskovalci z različnih vidikov proučili kakovost podatkov ERA5 ali jih uporabili za analizo podnebnih sprememb na območjih s pomanjkljivimi meritvami. V nadaljevanju predstavljamo nekaj takšnih primerov.

Simmons in sod. (2021) so v obsežni primerjavi temperature in vlažnosti zraka v ERA5 z drugimi podatkovnimi zbirkami podrobneje ocenili tudi kakovost ERA5 za območje Evrope. Časovni potek letne povprečne temperature je po podatkih zbirk E-OBS in ERA5 v pravilni mreži v obdobju 1950–2020 zelo podoben, ujema se tudi povprečna vrednost obdobja 1981–2010 (8,09 °C za ERA in 7,98 °C za E-OBS). Še boljše je ujemanje z E-OBS, če je v ERA5 izračunano dnevno povprečje temperature iz aritmetične sredine najvišje in najnižje od urnih vrednosti posameznega dne. Bistvena razlika med E-OBS in ERA5 pa se pokaže pri dnevni amplitudi temperature, kjer E-OBS ne kaže dolgoletnega trenda, ERA5 pa izrazito povečevanje. To je lahko posledica povečevanja vnosa meritev v ERA5 in s tem vpliva na korekcijo prognostičnih polj. Vpliv prizemnih meritev na prognostična polja temperature v postopku asimilacije je lepo viden na treh izbranih mesecih, kjer v večjem delu sveta asimilirane meritve močno zmanjšajo odstopanje od polja temperature, ki temelji zgolj na meritvah.

Velikou in sod. (2022) so za Evropo in del Sredozemlja primerjali dnevno povprečno temperaturo v ERA5 z E-OBS in 196 postajnimi časovnimi nizi iz podatkovne zbirke ECA&D. V obdobju 1981–2010 je večji del leta temperatura v pasu osrednjih Alp v ERA5 do nekaj stopinj Celzija nižja kot v E-OBS. Veliko razhajanje med podatkovnima zbirkami je tudi marsikje drugje v razgibanem terenu in na morski obali. V večjem delu Evrope pa je pristranskost ERA5 glede E-OBS majhna; za večji del Slovenije ima ERA5 v povprečju malenkost višjo temperaturo od E-OBS. Pri ekstremnih vrednostih povprečne temperature je prostorska slika nad Evropo različna. Peti centil dnevne povprečne temperature je v ERA5 glede na E-OBS mnogo višji v notranjosti Fenoskandije, a nižji na tamkajšnji obali. Nasprotno 95. centil v ERA5 najbolj in pozitivno izstopa na severu Alžirije in v delu Turčije. Drugod po Evropi in Sredozemlju so odstopanja ERA5 večinoma precej manjša.

Lavers in sod. (2022) so ocenili kakovost padavinskih podatkov ERA5 na svetovni ravni. Mrežne podatke ERA5 so primerjali s podatki 24-urne višine padavin na 5637 dežemerskih postajah v obdobju 2001–2020. V večjem delu Evrope je povprečna višina padavin po ERA5 skozi vse leto večja od izmerjenih vrednosti. Spearmanov rangirni korelacijski koeficient za odklon v sezonski višini padavin je za skoraj vse evropske postaje nad 0,7, le poleti je v delu južne polovice Evrope med 0,5 in 0,7.

Hassler in Lauer (2021) sta za različna območja na Zemlji analizirala mesečne padavinske podatke obdobja 1983–2016 za šest podatkovnih zbirk meteoroloških reanaliz in pet podatkovnih zbirk izmerjenih padavin. Obravnavala sta povprečne vrednosti, sezonski cikel in časovni potek v mrežnih vrednostih v ločljivosti 2,5° po obeh geografskih koordinatah. Za kopensko območje srednje Evrope (med geografskima širinama 42° in 53° N ter geografskima dolžinama 0° in 20° E) je dnevno povprečje višine padavin v ERA5 glede na interpolirane dežemerske meritve GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) oziroma sklop dežemerskih in satelitskih meritev GPCP-SG (Global Precipitation Climatology Project) po povprečni vrednosti podobno (2,59 proti 2,40 oziroma 2,76 mm/dan), prostorski korelacijski koeficient med ERA5 in GPCP-SG pa znaša 0,862. Slednja vrednost je znatno boljše od reanaliz ERA-Interim, JRA-55 in MERRA-2. Časovni potek prostorskega povprečja območja je skozi celotno obdobje pri ERA5 zelo podoben kot pri GPCC in GPCP-SG. Povprečni sezonski cikel kaže glavni minimum padavin pri ERA5 in GPCP-SG marca, pri GPCC pa februarja. V posameznih mesecih leta je povprečna razlika med ERA5 in GPCC velika, več kot 20 %.

Bandhauer in sod. (2021) so za tri območja v Evropi (širše območje Alp, širše območje Karpatov in Fenoskandijo) primerjali kakovost padavinskih podatkov ERA5 in E-OBS (v19.0e) z visokoločljivimi regionalnimi podatkovnimi zbirkami (na primer APGD v Alpah, ki temelji na meritvah 8500 dežemerskih postaj). Glavne klimatološke značilnosti padavin se v obeh podatkovnih nizih dobro ujemajo, pri čemer pa je višina padavin v ERA5 večja na vseh območjih, kar je povezano z večjim številom dni z vsaj 1 mm padavin. Na območju gostih dežemerskih meritev so bolj kakovostni podatki E-OBS, kjer pa so meritve redke, je kakovost obeh podatkovnih nizov primerljiva. Dejanska prostorska ločljivost padavin je pri obeh podatkovnih nizih slabša od podatkovne ločljivosti, kar se kaže v zglaženem polju višine padavin in pre nizkih vrednostih visokih centilov glede na povprečne vrednosti padavin.

Chiaravallotti in sod. (2022) so se zaradi težav z meritvami in njihovimi razlikami med italijanskimi regijami pri analizi trenda višine padavin v Italiji v obdobju 1950–2020 naslonili na reanalize ERA5-Land. V tej podatkovni zbirki so padavinski podatki ERA5 preračunani iz prvotne 31-kilometrsko v 9-kilometrsko mrežo. Na podlagi reanaliznih podatkov v 3125 geografskih točkah, ki zajemajo celotno Italijo, so omenjeni raziskovalci izračunali prostorsko sliko linearne trenda skozi 71-letno obdobje, in sicer za mesece, letne čase in celotno leto. Izračunani padavinski trend večinoma ni statistično značilen, na letni ravni pa je na nekaterih alpskih območjih in majhnem delu juga Italije trend statistično značilen in pozitiven, v večini Sardinije pa statistično značilno negativen.

V Sloveniji imamo na voljo glede na večino evropskih, še bolj pa drugih držav po svetu, sorazmerno gosto mrežo merilnih postaj in kakovostne dolgoletne nize meritev. To nam omogoča kakovostno ovrednotenje nekaterih podatkov ERA5. To je tudi osnovni namen tega prispevka, kjer analiziramo nekatere klimatološke značilnosti mesečnih podatkov temperature zraka in višine padavin v ERA5 glede na HDS. Najprej na kratko opišemo uporabljene podatke obeh podatkovnih virov, ki mu sledi opis primerjalnih metod. V tretjem poglavju analiziramo rezultate primerjave, zlasti z vidika časovnega poteka. Sledi razprava, prispevek pa zaključimo z nekaj sklepnimi misli.

Podatki in metode dela

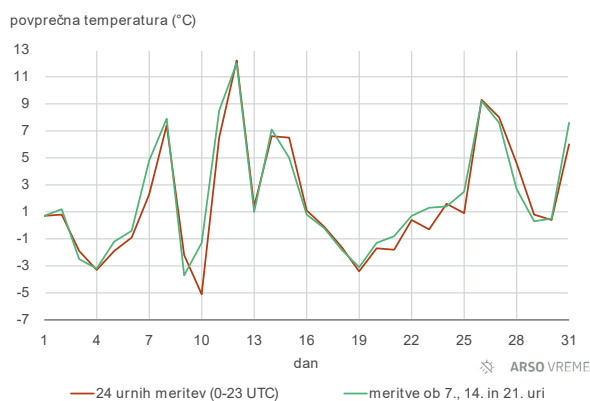
Podatki

Postajne (točkovne) vrednosti HDS smo najprej preračunali v pravilno geografsko mrežo državnega koordinatnega sistema, in sicer v ločljivosti 100 m, glajeno s filtrom na kilometrski ravni. Uporabili smo univerzalni kriging z vsemi tremi koordinatami

kot pojasnjevalnimi spremenljivkami. Nato smo izračunane mrežne vrednosti najprej preračunali v ločljivost 1 kilometer in nato v še redkejšo mrežo, ki ustreza podatkom ERA5.

Podatke reanaliz ERA5 smo pridobili na spletni strani Climate Reanalyzer, Inštituta za podnebne spremembe Univerze v Mainu (medmrežje 1). Tam so na voljo podatkovni nizi številnih reanaliz, vključno z ERA5. Podatki za ERA5 so na voljo v polstopinjski geografski mreži in so preračuni iz prostorsko dvakrat gostejših podatkov Copernicusovega Climate Data Store (medmrežje 2). Na zgoraj omenjeni spletni strani Climate Reanalyzer smo izbrali reanalize ECMWF ERA5, območje »Specify point« in spremenljivko »2m Temperature« oziroma »Total Precipitation« ter podatke shranili v datoteko s končnico »csv«.

Med podatkovnima nizoma HDS in ERA5 je nekaj razlik v samih spremenljivkah, ki pa verjetno ne vplivajo na končne ugotovitve. Dnevno povprečje temperature je v HDS izračunano kot vsota četrtine vrednosti ob 7. in 14. uri ter polovice ob 21. uri po sončnem času, medtem ko je pri ERA5 to povprečje 24 urnih vrednosti temperature za dan po UTC. V posameznih dneh in na krajevni ravni je lahko med obema vrednostima tudi nekaj stopinj Celzija razlike, na mesečni ravni in v obravnavani prostorski ločljivosti



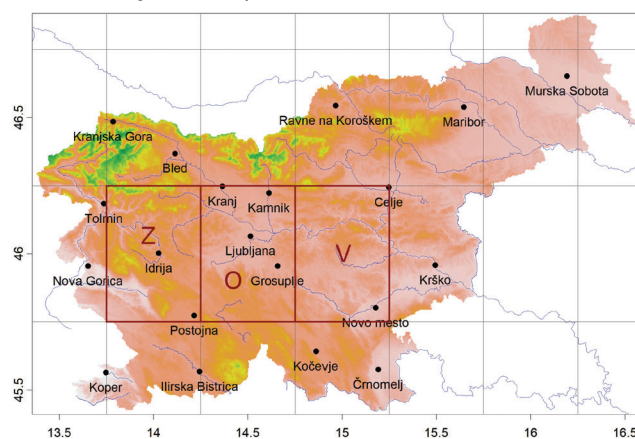
Slika 1. Časovni potek dnevne povprečne temperature zraka decembra 2017 v Celju, izračunane na dva načina: aritmetična sredina 24 urnih vrednosti od 0 do 23 UTC (od 1. do 24. ure po srednjeevropskem času, rdeča krivulja) in kot vsota četrtine vrednosti ob 7. in 14. ter polovice vrednosti temperature ob 21. uri po lokalnem času (zelena krivulja). V večini dni je razlika med obema metodama manj kot 1 °C, 10. decembra pa znaša kar 3,8 °C. Razlika na mesečni ravni je 0,3 °C.

Figure 1. Time series of daily mean air temperature in December 2017 in Celje, calculated by two methods: as an arithmetic mean of 24 hourly values from 0 to 23 UTC (from 1 to 24 CET, red curve), and as a sum of one quarter of the values at 7 and 14 a.m., and a half of the value at 9 p.m. local time (green curve). On most days the mean temperature difference does not exceed 1 °C, while it reaches as much as 3.8 °C on December 10. The monthly difference amounts to 0.3 °C.

pa je razlika verjetno zanemarljiva. Dnevna višina padavin je po HDS 24-urna vsota padavin do 7. ure po srednjeevropskem času in je pripisana dnevu začetka časovnega intervala. Glede na ERA5 to predstavlja časovni zamik 6 ur, kar pa lahko le izjemoma na mesečni ravni privede do znatne razlike v višini padavin.

Metode primerjave

Podatke HDS in ERA5 smo analizirali za polstopinjska območja, ki v celoti ležijo v Sloveniji (Slika 2). Ta območja so velika okoli 2150 km² imajo središče na geografski širini 46,0° N in geografskih dolžinah 14,0° E, 14,5° E in 15,0° E (slika 1). V nadaljevanju jih imenujemo zahodno (središče območja je pri Idriji), osrednje (središče na Ljubljanskem barju) in vzhodno območje (središče med Litijo in Mirno na Dolenjskem). Geografsko in podnebno so ta območja precej različna, zlasti zahodno izstopa po višji nadmorski višini in večji količini padavin.



Slika 2. Reliefni zemljevid Slovenije z analiziranimi polstopinjskimi območji ERA5: Z – zahodno območje, O – osrednje območje, V – vzhodno območje.

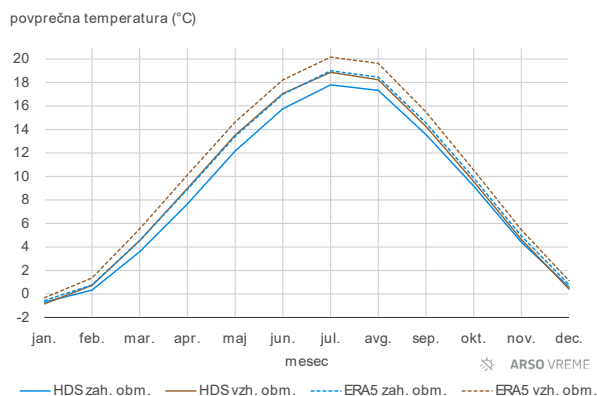
Figure 2. Terrain map of Slovenia with the analysed half-degree regions of ERA5: Z – western region, O – central region, V – eastern region

Na izbranih območjih smo podatkovni zbirki HDS in ERA5 za mesečno povprečno temperaturo zraka in mesečno višino padavin najprej primerjali po povprečnem medletnem poteku in medletni spremenljivosti. Statistično značilnost razlik smo izračunali bodisi s parnim t-testom (povprečna temperatura po mesecih) bodisi z Wilcoxonovim testom predznačenih rangov (povprečna višina padavin). Primerjalno analizo smo nadaljevali z izračunom linearnega trenda po metodi Theila in Sena, in sicer skozi celotno skupno obdobje (1950–2020, za zimo 1950/1951–2019/2020). Statistično značilnost trendov smo določili z Mann-Kendallovim testom. Pri višini padavin smo analizirali tudi statistično povezanost sezonskih in letnih vrednosti po obeh podatkovnih nizih. V vseh navedenih primerih smo pri določanju statistične značilnosti za stopnjo značilnosti vzeli vrednost 5 %.

Rezultati

Temperatura zraka

Medletni potek povprečne temperature za celotno obdobje je v HDS in ERA5 podoben, a je opazna tudi sistematična razlika (slika 3). Ta razlika je statistično značilna v vseh mesecih, razen januarja v zahodnem območju (razlika 0,13 °C, $p = 0,12$). Na letni ravni je temperatura v ERA5 po območjih povprečno za 0,6–1,0 °C višja kot v HDS, pri čemer je v zahodnem in vzhodnem območju znatno sezonsko nihanje te razlike. V zahodni (vzhodni) regiji temperaturna razlika od aprila do avgusta (od marca do septembra) preseže 1 °C. Nasprotno je v zahodni regiji decembra in januarja razlika le 0,2 oziroma 0,1 °C. Zanimivo, a naključno, je zelo dobro ujemanje med medletnimi potekoma ERA5 v zahodnem in HDS v vzhodnem območju.



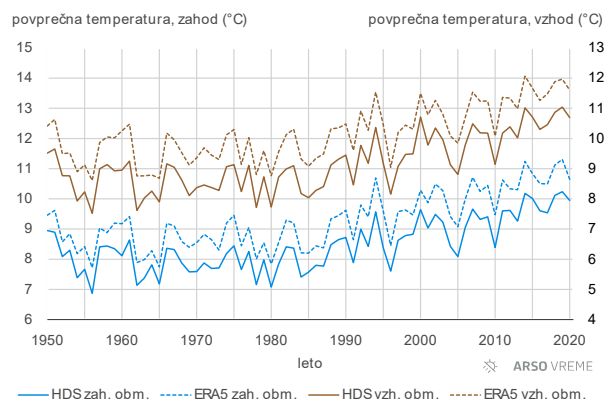
Slika 3. Medletni potek povprečne temperature zraka po območjih za celotno obdobje (1950–2020) v podatkovnih nizih HDS in ERA5

Figure 3. Mean seasonal variation of mean air temperature in the analysed regions for the entire period (1950–2020) in the HDS and ERA5 datasets

Najbolj opazna razlika med podatkovnima nizoma v časovnem poteku letne povprečne temperature je pristranskost (slika 4), saj je medletna spremenljivost zelo podobna. Večina vrednosti letnega odklona temperature je, upoštevajoč nekoliko različen dolgoletni trend, znotraj intervala od –0,2 °C do 0,2 °C. Ujemanje se kaže tudi v zelo visokem korelacijskem koeficientu časovnih nizov, ki znaša od 0,97 do 0,98. Pri tem je pomembno dodati, da je omenjena zelo visoka vrednost deloma tudi posledica izrazitega dolgoletnega trenda temperature.

Velikost linearnega temperaturnega trenda je po sezonah od pomladi do jeseni precej podobna, razlika je manjša ali enaka 0,05 °C/desetletje (v 71 letih to znese manj kot 0,4 °C), kar je nekajkrat manj od temperaturnega trenda (preglednica 1). Tudi statistična negotovost trenda (polovica širine 95-odstotnega intervala zaupanja) je precej večja od

omenjene razlike, saj znaša okoli 0,11 °C/desetletje. Kljub sorazmerno majhni razliki v trendu je ta razlika deloma statistično značilna, saj je časovni potek temperature v HDS in ERA5 zelo podoben. Podobne ugotovitve veljajo tudi za letne vrednosti trenda. Drugače je pozimi, kjer je zlasti v zahodnem in osrednjem območju razlika velika in že blizu statistični negotovosti trenda (okoli 0,20 °C/desetletje). Pozimi je v vseh treh območjih razlika v trendu med HDS in ERA5 statistično značilna.



Slika 4. Časovni potek letne povprečne temperature zraka v zahodnem (modro) in vzhodnem (rjavo) območju za podatkovna niza HDS in ERA5. Zaradi boljše preglednosti so vrednosti za vsako od območij predstavljene na svoji navpični osi.

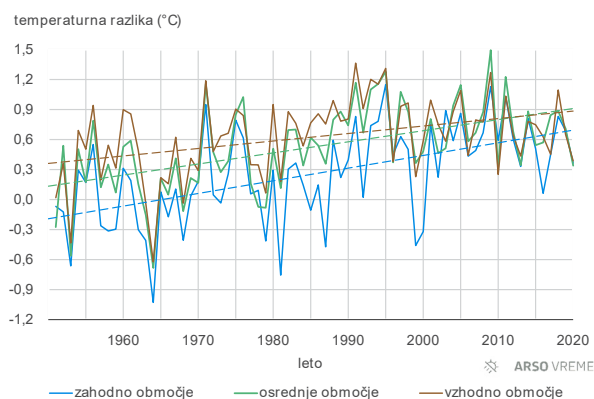
Figure 4. Time series of annual mean air temperature in the western (blue) and the eastern (brown) region for the HDS and ERA5 datasets. For each region, the data are plotted on a separate vertical axis for better graphical representation.

Preglednica 1. Linearni trend temperature zraka (°C/desetletje) v obdobju 1950–2020 (1950/51–2019/20 za zimo) po metodi Theila in Sena, po območjih in sezonah za oba podatkovna niza (HDS / ERA5). Pari statistično značilno različnih vrednosti trenda (Mann-Kendallov test) so označeni s krepkim tiskom.

Table 1. Linear trend of air temperature (°C/10 years) in 1950–2020 (1950/51–2019/20 for winter) using Theil-Sen method, for each region, season and both datasets (HDS / ERA5). Pairs of statistically different trend values (Mann-Kendall test) are indicated in bold.

sezona (season) \ območje (region)	zahodno (western)	osrednje (central)	vzhodno (eastern)
pomlad (spring)	0,32 / 0,36	0,34 / 0,37	0,35 / 0,36
poletje (summer)	0,40 / 0,36	0,41 / 0,39	0,41 / 0,37
jesen (autumn)	0,18 / 0,23	0,20 / 0,23	0,20 / 0,20
zima (winter)	0,22 / 0,37	0,22 / 0,36	0,26 / 0,34
leto (year)	0,31 / 0,35	0,33 / 0,35	0,33 / 0,34

Vprašamo se lahko o izvoru občutne razlike v zimskem temperaturnem trendu. V začetnem obdobju so vrednosti HDS in ERA5 v zahodnem območju primerljive, zlasti v drugi polovici obravnavnega obdobja pa so pri ERA5 večinoma večje kot v HDS (slika 5). Vsaj na prvi pogled se zdi, da naraščanje



Slika 5. Časovni potek razlike v povprečni temperaturi meteorološke zime med ERA5 in HDS v treh izbranih območjih. Črčkane črte prikazujejo linearni trend po metodi najmanjših kvadratov.

Figure 5. Time series of the difference in meteorological winter mean temperature between the ERA5 and HDS data-sets, for the three regions. Dash lines represent linear trend using the least-square method.

razlike ni enakomerno, temveč gre deloma za prelom okoli leta 1987. Povprečna temperaturna razlika je v obdobju 1950–1987 0,00 °C, kasneje pa znaša 0,54 °C. Linearni trend (po metodi najmanjših kvadratov) skozi celotno obdobje kaže spremembo celo za 0,9 °C. Izrazita razlika je tudi pri ostalih dveh območjih, le da je tu najbolj izstopajoče obdobje 1991–1995. Vzrok za omenjeni časovni potek razlik je nejasen, primerjava z zimsko višino padavin pa ne kaže statistične povezanosti temperaturne razlike z višino padavin.

Višina padavin

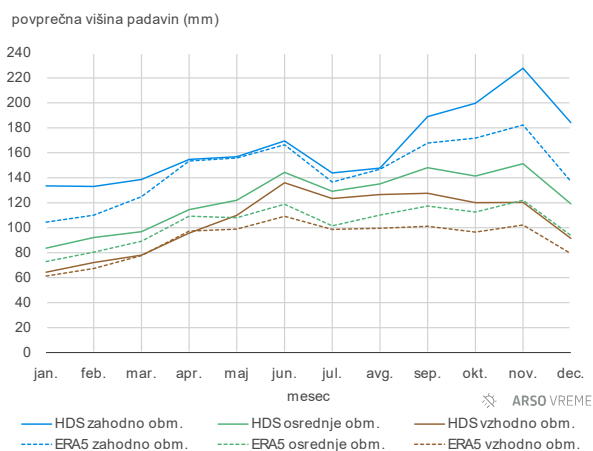
Bolj opazne kot pri temperaturi zraka so razlike med obema podatkovnima nizoma v višini padavin. Že na letni ravni je opazna manjša povprečna višina padavin v ERA5 kot v HDS; od zahodnega proti vzhodnemu območju znaša razlika –11 %, –16 % in –14 %. Tudi povprečni medletni potek se zlasti v zahodnem območju bistveno razlikuje med HDS in ERA5 (slika 6). Jesenski višek je v HDS mnogo bolj izrazit, medtem ko je od aprila do avgusta razlika med HDS in ERA5 zelo majhna. V osrednjem območju je po ERA5 mnogo manj padavin kot po HDS, od junija do decembra celo za okoli petino manj. Tudi v vzhodnem območju so vrednosti ERA5 nižje od HDS, le da so tu meseci od

Preglednica 2. Relativna razlika v povprečni mesečni višini padavin v obdobju 1950–2020 po mesecih in območjih. Razlika je odklon povprečja v ERA5 glede na HDS (v %). Statistična značilnost razlike je podana z vrednostjo p po Wilxonovem testu predznačenih rangov. Temno rdeče odebeljene vrednosti predstavljajo statistično različne vrednosti median višine padavin med HDS in ERA5. Uporabljena stopnja značilnosti je 5 %.

Table 2. Relative difference in mean monthly precipitation sum in the period 1950–2020 by month and region. The difference is calculated as a deviation of ERA5 from HDS (%). Statistical significance of the difference is presented by p -value according to the Wilcoxon signed-ranks test. Dark red bold values represent statistically significant difference in median of monthly precipitation between HDS and ERA5. Level of significance is set to 5 %.

	zahodno območje (western region)		osrednje območje (central region)		vzhodno območje (eastern region)	
mesec / month	relativna razlika (relative difference)	p	relativna razlika (relative difference)	p	relativna razlika (relative difference)	p
januar	–22	< 0.00001	–13	0.00016	–5	0.33204
februar	–17	< 0.00001	–13	< 0.00001	–7	0.01468
marec	–10	0.00758	–8	0.06288	0	0.50926
april	–1	0.88076	–5	0.05876	2	0.51570
maj	–1	0.83366	–11	< 0.00001	–10	0.00012
junij	–2	0.54850	–18	< 0.00001	–20	< 0.00001
julij	–5	0.19706	–21	< 0.00001	–20	< 0.00001
avgust	–1	0.79486	–18	< 0.00001	–21	< 0.00001
september	–11	0.00014	–21	< 0.00001	–21	< 0.00001
oktober	–14	< 0.00001	–20	< 0.00001	–20	< 0.00001
november	–20	< 0.00001	–19	< 0.00001	–15	< 0.00001
december	–26	< 0.00001	–21	< 0.00001	–13	< 0.00001

januarja do aprila praktično izenačeni.



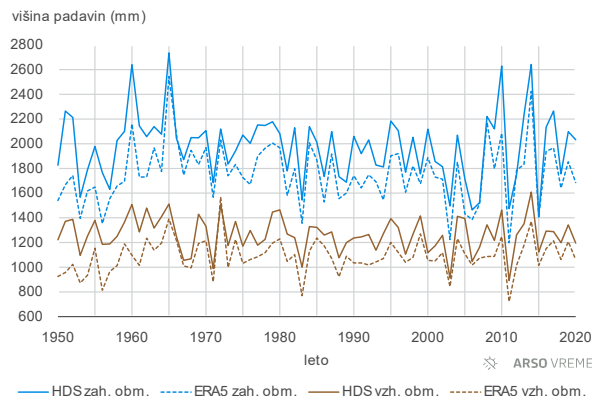
Slika 6. Medletni potek povprečne mesečne višine padavin po območjih za celotno obdobje (1950–2020) v podatkovnih nizih HDS in ERA5.

Figure 6. Seasonal variation of mean monthly precipitation sum in the regions for the entire period (1950–2020) in the datasets of HDS and ERA5.

V osrednjem in vzhodnem območju relativna razlika povprečne višine padavin v večini mesecev med podatkovnima zbirkama znaša več kot 10 %, razlika v mediani višine padavin je statistično značilna (preglednica 2). Precej drugačen sezonski potek razlike je v zahodnem območju, kjer je odklon ERA5 od HDS najmanjši od aprila do avgusta in znaša največ 5 %; v teh mesecih se mediani ne razlikujeta statistično značilno (preglednica 1).

Medletna spremenljivost padavin je v obeh podatkovnih nizih v vseh območjih podobna, a posamezna leta pomembno izstopajo (slika 6). Leto 2010 je v zahodnem območju po HDS zelo namočeno (2630 mm, kazalnik glede na celotno obdobje 133 %), po ERA5 pa le zmerno nadpovprečno namočeno (2085 mm, 119 %). Dve leti kasneje HDS kaže na dokaj sušno leto (1750 mm, 88 %), ERA5 pa na povprečno namočeno (1785 mm, 102 %). Standardni odklon kazalnika višine padavin v zahodnem območju je pri obeh podatkovnih nizih praktično enak in znaša 13,9 odstotne točke.

Kljub podobni spremenljivosti višine padavin pa opazimo nekaj razlik v trendu višine padavin (preglednica 3). Poleti je trend po ERA5 ničelen ali pozitiven in statistično različen od negativnega trenda po HDS. Tudi jeseni je trend padavin po ERA5 bolj pozitiven kot pri HDS, a je razlika v trendu statistično neznatna. Pozimi se negativni trend po HDS od zahoda proti vzhodu stopnjuje, po ERA5 je obratno, a razlike v posameznih območjih niso statistično značilne. Na letni ravni razlika v trendu med ERA5 in HDS od zahoda proti vzhodu narašča; zlasti v



Slika 7. Časovni potek letne višine padavin v zahodnem (modro) in vzhodnem (rjavo) območju za podatkovna niza HDS in ERA5.

Figure 7. Time series of annual precipitation sum in the western (blue) and the eastern (brown) region for the HDS and ERA5 datasets.

vzhodnem območju podatki HDS kažejo na, sicer statistično neznatno, rahlo upadanje višine padavin, po ERA5 pa na rahlo naraščanje. Ker pa je med obema podatkovnima nizoma na letni ravni visoka stopnja korelacije, je razlika trenda na letni ravni v vzhodnem območju statistično značilna.

Preglednica 3. Linearni trend višine padavin (%/10 let) v obdobju 1950–2020 (HDS / ERA5), po območjih in sezonah. Statistično značilna razlika v trendu po Mann-Kendallovem testu s stopnjo značilnosti 5 % je označena z odebeljeno pisavo.

Table 3. Linear trend in precipitation sum (%/10 years) in the period 1950–2020 (HDS / ERA5) by region and season. Statistically significant trend differences by Mann-Kendall test are indicated in bold.

sezona (season) / območje (region)	zahodno (western)	osrednje (central)	vzhodno (eastern)
pomlad (spring)	−1,5 / −1,7	−1,6 / −2,0	−2,4 / −2,2
poletje (summer)	−2,6 / 0,0	−1,1 / 0,6	−1,0 / 1,3
jesen (autumn)	1,3 / 2,1	1,3 / 2,4	1,0 / 2,8
zima (winter)	−1,8 / −2,6	−2,8 / −2,2	−3,2 / −0,9
leto (year)	−0,5 / 0,3	−0,5 / 0,5	−0,6 / 0,9

Statistična povezanost sezonske višine padavin med podatkovnima nizoma je splošno, jeseni in pozimi močna, saj je determinacijski koeficient, R^2 , nad 0,8 (preglednica 3). To pomeni, da s podatki ERA5 pojasnimo več kot 80 % variance v podatkih HDS. Drugače je poleti, ko je determinacijski koeficient le od 0,50 do 0,64. Morda je to posledica prevladujočih konvektivnih padavin poleti, ki jih globalni meteorološki modeli ne napovedujejo neposredno, temveč posredno, prek parametrizacije. Nasprotno je pozimi ujemanje med HDS in ERA5 odlično,

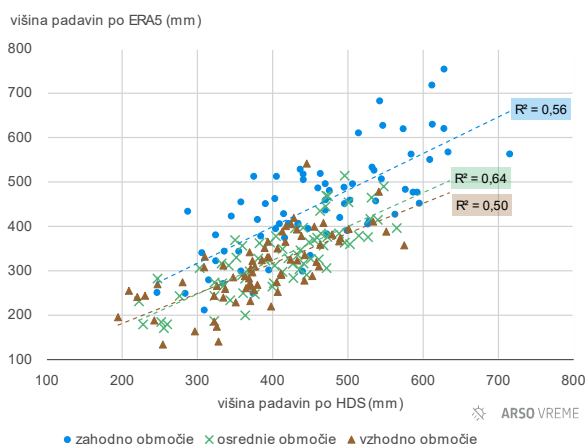
najverjetneje zaradi prevladujočih stratiformnih padavin, ki so mnogo manjši zalogaj za meteorološke modele kot konvektivne padavine. Zanimivo pa je, da je na letni ravni koeficient determinacije nižji od treh sezon, kar je nemara posledica sorazmerno nizke poletne vrednosti.

Preglednica 4. Koeficient determinacije (R^2) med sezonsko višino padavin v ERA5 in HDS, za celotno obdobje 1950–2020 (pozimi 1950/51–2019/20) in vsa tri območja.

Table 4. Coefficient of determination (R^2) between seasonal precipitation sum in the ERA5 and HDS datasets for the entire period (1950–2020, 1950/51–2019/20 in winter) and for all three regions.

sezona (season) / območje (region)	zahodno (western)	osrednje (central)	vzhodno (eastern)
pomlad (spring)	0,86	0,83	0,81
poletje (summer)	0,56	0,64	0,50
jesen (autumn)	0,87	0,83	0,79
zima (winter)	0,94	0,93	0,90
leto (year)	0,78	0,77	0,78

Sorazmerno majhen delež pojasnjene variance poleti se močno pozna tudi pri razvrstitvi najbolj namočenih in suhih poletij (slika 8 in preglednica 5). V vzhodnem območju sta med petimi najbolj namočenimi poletji le dve skupni obema podatkovnima nizoma, pri petih najbolj suhih poletjih pa sta seznama popolnoma različna (nobeno od najbolj suhih poletij po podatkovni zbirki HDS ni na lestevici najbolj suhih po podatkovni zbirki ERA5 in obratno). Glede na grafični prikaz na sliki 8 je poletje 1972 v vzhodnem območju še



Slika 8. Razsewni grafikon poletne višine padavin v ERA5 v odvisnosti od HDS, za vsa tri območja in celotno obdobje, 1950–2020. S črtno črto je prikazan linearni trend, zraven je naveden koeficient determinacije.

Figure 8. Scatterplot of summer precipitation sum in ERA5 vs. HDS, for all three regions and the entire period (1950–2020). Dash line represents a linear trend with a coefficient of determination labelled by the end of line.

posebej izstopajoče (najviše ležeči trikotnik); kazalnik padavin (glede na celotno obdobje) je po HDS 115 % (15. najbolj namočeno poletje), po ERA5 pa kar 176 % (daleč najbolj namočeno poletje).

Preglednica 5. Seznam petih najbolj mokrih in suhih poletij po HDS in ERA5 v vzhodnem območju.

Table 5. List of the five wettest and driest summers in the eastern region according to the HDS and ERA5 datasets.

rang poletja (summer rank)	HDS	ERA5
najbolj mokro (wettest)	1969 (575 mm)	1972 (542 mm)
2.	2005	1989
3.	1989	1966
4.	2008	2008
5. najbolj mokro	1986	1959
...		
5. najbolj suho	2017	1983
4.	1967	1951
3.	2001	1992
2.	2003	1952
najbolj suho (driest)	2013 (195 mm)	1950 (134 mm)

Razprava

Dobro ujemanje temperature zraka v osnovnih podnebnih značilnosti ERA5 in kartiranih meritev meteoroloških postaj se ujema z ugotovitvami študije Velikou in sod. (2022), kjer Slovenija ne sodi med »problematična« območja v Evropi. Pri tem je potrebno poudariti, da gre za primerjavo v dokaj velikih mrežnih celicah, znotraj katerih so na območju Slovenije velike reliefne razlike. Obravnavano zahodno območje obsega pester podnebni nabor, od submediteranskega v Vipavski dolini do alpskega na vencu Spodnjih Bohinjskih gora. Drugi dve območji sta sicer manj geografsko in podnebno razgibani, vseeno pa segata od dolin in kotlin do posameznih vršacev z nadmorsko višino prek tisoč metrov. Iz mrežnih podatkov ERA5 v polstopinjski ločljivosti sicer dobimo splošno temperaturno sliko območja velikosti malo nad 2000 km², vendar so takšni podatki za večji del Slovenije neprimerni za neposredno uporabo na manjših geografskih območjih, kaj šele na krajevni ravni. Za ta namen so mnogo bolj primerni podatki reprezentativnih meteoroloških postaj ali mrežni podatki v dovolj visoki ločljivosti (1 km ali celo 100 metrov). Krajevni vidik je manj pomemben pri oceni dolgoletnega temperaturnega trenda, a se podatki ERA5 za zimo pomembno razlikujejo od podatkov HDS, kar lahko pripelje do napačnih zaključkov.

Še bolj očitna je prednost podatkov goste mreže merilnih postaj pred ERA5 pri višini padavin, kar, med drugim, omenja tudi Bandhauer s sod.

(2021) pri analizi višine padavin v širšem alpskem prostoru. Pri primerjavi ERA5 s HDS se pokažejo številne pomanjkljivosti podatkov ERA5: letna višina padavin je znatno manjša, jesenski višek v zahodnem območju je medel, zlasti na letni in poletni ravni opazimo statistično značilno različen trend, koeficient determinacije pa je poleti sorazmerno nizek (kar je skladno z Lavers in sod. (2022)). Zanimivo, da namesto pozitivne pristranskosti višine padavin v ERA5 (glede na prizemne meritve) v večini Evrope oziroma v srednji Evropi, o kateri pišejo Lavers s sod. (2022) oziroma Hassler in Lauer (2021), v obravnavanih območjih Slovenije opazimo znatno negativno pristranskost, od -16 do -11 %. Ta pristranskost bi bila še nekoliko večja, če bi izmerjeno višino padavin korigirali glede na vpliv vetra, omočenosti dežemera idr. Glede na deloma različne večdesetletne trende v višini padavin, tako po velikosti kot predznaku, je tako vprašljiva oziroma manj zanesljiva uporabnost ERA5 za tovrstne analize. Prav tako smo v prikazani analizi ugotovili, da se posamezne sezonske vrednosti višine padavin med ERA5 in HDS lahko močno razlikujejo, kar je zlasti pomembno pri obravnavi ekstremnih podnebnih razmer.

Sklepne misli

Analiza mesečnih podatkov temperature zraka in višine padavin, ki temeljijo na gosti mreži prizemnih meritev (HDS) oziroma globalnih meteoroloških reanalizah (ERA5), v polstopinjski geografski mreži za izbrana tri območja v Sloveniji kaže na splošno dobro kakovost temperaturnih podatkov in manjšo kakovost padavinskih podatkov ERA5. Pri temperaturi zraka smo najpomembnejše odstopanje opazili pri 71-letnem trendu zimskega povprečja temperature, pri višini padavin pa pri različnih statističnih vidikih, a po območjih in letnih časih različno izrazito. Podatki ERA5 s popolnim naborom podatkov na svetovni ravni in skozi daljše obdobje (trenutno 1940–2023) predstavljajo priročen vir vremenskih in podnebnih podatkov, a moramo biti pri njihovi rabi pazljivi. V posamezni študiji moramo upoštevati zlasti morebitne vplive reliefa na reprezentativnost mrežnih podatkov ERA5 in imeti v mislih, da nas nehomogenosti v časovnih nizih lahko pripeljejo do napačnih zaključkov. Gosta mreža kakovostnih meteoroloških merilnih postaj, s katerimi nadaljujemo dolgoletno tradicijo prizemnih meritev, tako marsikje po svetu in tudi v Sloveniji še ostaja temeljni podatkovni steber spremljanja podnebnih sprememb in tekočih podnebnih razmer.

Viri

Bandhauer, M., Isotta, F., Lakatos, M., Lussana, C., Båserud, L., Izsák, B., Szentes, O., Tveito, O. E., Frei, C., 2022. Evaluation of daily precipitation analyses in E-OBS (v19.0e) and ERA5 by comparison to regional high-resolution datasets in European regions. *International Journal of Climatology*, 42 (2), 727–747, <https://doi.org/10.1002/joc.7269>

Chiaravalloti, F., Caloiero, T., in Coscarelli, R., 2022. The Long-Term ERA5 Data Series for Trend Analysis of Rainfall in Italy. *Hydrology* 9, no. 2: 18, <https://doi.org/10.3390/hydrology9020018>

Cowan, K., Way, R.G., 2014. Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140: 1935–1944, <https://doi.org/10.1002/qj.2297>

Hassler, B., Lauer, A., 2021. Comparison of Reanalysis and Observational Precipitation Datasets Including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere* 12, no. 11: 1462, <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P. in sod., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Lavers, D. A., Simmons, A., Vamborg, F., Rodwell, M. J., 2022. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148 (748), 3124–3137, <https://doi.org/10.1002/qj.4351>

Medmrežje 1: https://climateresearcher.org/research_tools/monthly_tseries/ (20. 9. 2023)

Medmrežje 2: ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview> (20. 9. 2023)

Simmons, A., Hersbach, H., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Vamborg, F., Berrisford, P., de Rosnay, P., Willett, K., Woollen, J., 2021. Low frequency variability and trends in surface air temperature and humidity from ERA5 and other datasets, ECMWF Technical Memoranda 881. European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 97. str. [dx.doi.org/10.21957/ly5vbtbfdf](https://doi.org/10.21957/ly5vbtbfdf)

Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K., Anagnostopoulou, C., 2022. Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe. *Water* 14, no. 4: 543, <https://doi.org/10.3390/w14040543>

Vertačnik, G, 2024. *Homogenizacija in dopolnitev časovnih nizov temperature zraka in višine padavin slovenskih meteoroloških postaj v obdobju 1950–2020. Vetrnica 15/23, str. 54 – 78*

Zahvala

Renatu Bertalaniču z oddelka za podnebne analize in storitve ARSO se zahvaljujem za pripravo

mrežnih podatkov HDS, ki so služili za primerjavo z reanalizami ERA5, in podlago za sliko 1. Za izračun mnogih statistik se zahvaljujem Anžetu Medvedu, za lekturo angleških napisov k slikam in preglednicam pa Živi Vlahovič z istega oddelka. Renatu Bertalaniču, Damijani Gartner, Anžetu Medvedu in neimenovanemu recenzentu se zahvaljujem za pregled besedila, odkrite napake in koristne pripombe, ki so pripomogli k izboljšanju besedila.



Brdo pri Kranju 4. maja 2023 (Foto: Tanja Cegnar)

Homogenizacija in dopolnitev časovnih nizov podatkov temperature zraka in višine padavin slovenskih meteoroloških postaj v obdobju 1950–2020

Homogenisation and interpolation of temperature and precipitation time series from Slovenian meteorological stations in the period 1950–2020

Gregor Vertačnik, Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova cesta 1b, 1000 Ljubljana, gregor.vertacnik@gov.si

Povzetek

Na ARSO smo v zadnjih letih posodobili homogenizacijo in interpolacijo podnebnih nizov projekta Podnebna spremenljivost v Sloveniji. Preverili smo kakovost izmerjenih vrednosti temperature, padavin in nekaterih ostalih spremenljivk na meteoroloških postajah za obdobje 1950–2020. Za pet spremenljivk temperature zraka in za višino padavin smo pripravili 98 oziroma 268 časovnih nizov mesečnih podatkov in jih homogenizirali s programskim orodjem HOMER. Iz popravkov mesečnih homogeniziranih vrednosti smo izračunali dnevne vrednosti, manjkajoče podatke smo nadomestili s prostorsko interpoliranimi vrednostmi. Tako dobljeni podatki kažejo na statistično značilen linearni trend temperature zraka v Sloveniji okoli 0,3 °C na desetletje. Trend višine padavin je statistično značilen in padajoč le poleti na posameznih območjih južne in zahodne Slovenije. Glavne značilnosti homogeniziranih in dopolnjenih nizov se dobro ujemajo s podatkovnimi zbirkami projektov PSS, HISTALP in Berkeley Earth. Zbirka predstavljenih homogeniziranih in dopolnjenih dnevniških podatkov predstavlja temelj za izračun podnebnih normal novega referenčnega obdobja 1991–2020 in analiz podnebnih sprememb v Sloveniji v zadnjih desetletjih.

Ključne besede: temperatura zraka, višina padavin, podnebne spremembe, homogenizacija, prostorska interpolacija

Abstract

Slovenian Environment Agency has recently renewed and upgraded homogenisation and interpolation of climate series of project Podnebna spremenljivost v Sloveniji (henceforth PSS, »Climate variability in Slovenia«), which focused on the period 1961–2011. Starting point of the project »Homogenizacija in dopolnitev slovenskih podnebnih nizov v obdobju 1950–2020« (henceforth HDS, »Homogenisation and data imputation of Slovenian climate series in the period 1950–2020«) was the existing quality controlled dataset of PSS of air temperature, precipitation sum and some other variables. To lengthen the PSS time frame of 1961–2011 we added and



thoroughly checked the data of periods 1950–1960 and 2012–2020 as well. Data spanning the period 2008–2011 have been quality controlled again. The other noteworthy upgrade to the HDS dataset was an inclusion of many additional automatic weather stations' time series.

This article focuses on homogenisation and data imputation of time series of five air temperature variables (instant values at 7, 14 and 21 local/solar time, minimum (T_n) and maximum temperature (T_x)) and precipitation sum. Based on the data availability and their quality, monthly time series of 98 temperature and 268 precipitation sites data have been prepared and homogenised using HOMER software tool. Resulting monthly corrections were applied to daily data, whereas missing daily data have been spatially interpolated using advanced methods.

Homogenised and interpolated temperature time series show statistically significant warming trend of about 0.3 °C per decade. The trend is slightly larger for T_x and T_{14} (0.37 °C and 0.36 °C per decade on annual level) than for other variables, especially T_7 (0.27 °C per decade on annual level). On monthly level, the trend is statistically significant in all variables in January and from March through August, insignificant in February and partly significant in other months. On the other hand, the precipitation trend is significant and negative only in summer in some parts of southern and western Slovenia. Linear trends of homogenised time series of temperature and precipitation variables agree well with the homogenised time series of PSS project for the common period (1961–2011) and station selection. Moreover, the HDS mean temperature trend also aligns well with the state-of-the art international datasets of HISTALP and Berkeley Earth for the common period of 1950–2008.

The dataset of homogenised and interpolated daily values may serve as a basis for calculation of climate normals of the latest climate period (1991–2020) and analysis of climate change in Slovenia in last decades as well. However, one must be aware of the dataset deficiencies when using it for extreme value analysis. Remaining inhomogeneities in the variability of some time series may significantly affect the analysis of trends, leading to erroneous conclusions.

Keywords: air temperature, precipitation sum, climate change, homogenisation, spatial interpolation

Uvod

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) je leta 2008 pričela z izvajanjem večletnega projekta Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011 (v nadaljevanju PSS, Vertačnik in sod., 2015b). Daljše časovne nize meteoroloških meritev smo preverili s sodobnimi metodami kontrole podatkov, zbrali in uredili smo obširno zbirko metapodatkov o merilnih postajah. Kontrolirane in popravljene izmerke smo združili v nize mesečnih vrednosti, ki smo jih homogenizirali, manjkajoče vrednosti pa zapolnili s prostorsko interpoliranimi. Tako dobljene časovne nize smo uporabili za pripravo do takrat najpopolnejše ocene podnebnih sprememb in podnebne spremenljivosti v Sloveniji v obdobju 1961–2011.

Ocena podnebnih sprememb v projektu PSS je temeljila skoraj izključno na meritvah opazovalcev. Do leta 2011 je le peščica samodejnih merilnih postaj delovala daljši čas, poleg tega so bile tovrstne meritve zlasti v devetdesetih letih prejšnjega stoletja nemalokrat manjkajoče ali neuporabne. V okviru projekta Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji (kratica BOBER) je ARSO vzpostavil obsežno mrežo samodejnih meteoroloških in hidroloških postaj. S tem smo za večkratnik povečali količino podatkov o trenutnih vremenskih razmerah in izboljšali

pokritost z meritvami v hribovitih predelih Slovenije (Roškar, 2015). Izrazita razširitev in prenova mreže samodejnih meteoroloških postaj sta omogočili tudi podrobnejše spremljanje podnebnih razmer. Poleg tega marsikatera samodejna postaja nadomešča ukinjeno klasično postajo in s tem nadaljuje obstoječi niz meritev.

Po zaslugi omenjenih izboljšav smo se v večletnem projektu kontrole, homogenizacije, dopolnitve in analize podnebnih nizov v obdobju 1950–2020 (v nadaljevanju HDS kot kratica za Homogenizacijo in Dopolnitev Slovenskih podnebnih nizov v obdobju 1950–2020) mnogo bolj oprli na samodejne meritve kot v projektu PSS.

V tem prispevku predstavljamo del omenjenega projekta – homogenizacijo in dopolnitev časovnih nizov temperature zraka in višine padavin v Sloveniji in bližnji okolici v obdobju 1950–2020. V razdelku Podatki in metode opišemo kontrolo dnevnih meritev, pripravo časovnih nizov za homogenizacijo, postopek homogenizacije in dopolnitev časovnih nizov s prostorsko interpolacijo. V razdelku Razprave se osredotočamo na medsebojno primerjavo homogeniziranih časovnih nizov in primerjavo z rezultati projekta PSS. Prispevek zaključujemo s

sklepnimi mislimi o projektu, ki strokovni javnosti omogoča izboljšano rabo meteoroloških meritev za kakovostne analize podnebja in podnebnih sprememb v Sloveniji.

Podatki in metode dela

Osnovni podatki

Temelj dolgoletnega spremljanja vremena in podnebnih razmer na območju današnje Slovenije je bil do konca 20. stoletja mreža padavinskih, podnebnih in glavnih meteoroloških postaj z opazovalcem. Konec 20. stoletja je Hidrometeorološki zavod RS postavil prve samodejne meteorološke postaje, njihovo število pa se je do leta 2014 povečevalo le počasi. Z obsežnim projektom BOBER, del katerega je bila postavitve in modernizacija množice samodejnih meteoroloških postaj, se je delež samodejnih postaj v merilni mreži močno povečal, najbolj v hribovitem svetu. Samodejne postaje v zadnjih letih za večino meteoroloških spremenljivk tako že predstavljajo jedro merilne mreže meteoroloških postaj.

Meritve temperature zraka so se v Sloveniji na opazovalnih postajah že od samega začetka izvajale trikrat dnevno, v 20. stoletju praviloma ob 7., 14. in 21. uri po sončnem času, kar skoraj točno ustreza srednjeevropskemu času, ki se uporablja na samodejnih postajah. Poleg trenutne temperature zraka so opazovalci ob večernem terminu zabeležili najvišjo in najnižjo vrednost temperature v preteklem 24-urnem časovnem intervalu. Na prvotnih samodejnih merilnih postajah (postavljenih do leta 2013) smo temperaturne podatke sicer merili vsako minuto, a jih shranjevali v polurnih časovnih intervalih. Na novejših merilnih postajah (mreže projekta BOBER) temperaturo zraka merimo vsakih deset sekund, časovni interval shranjevanja podatkov pa je skrajšan na deset minut. Shranjeni polurni oziroma desetminutni podatki so temperatura zraka ob koncu časovnega intervala, polurno oziroma desetminutno povprečje, najvišja in najnižja vrednost znotraj intervala in standardni odklon izmerjenih vrednosti.

V projektu HDS smo združili časovne nize ročnih meritev temperature zraka in meritve samodejnih postaj. Zaradi majhne časovne razlike med sončnim in srednjeevropskim časom smo ročno izmerjene vrednosti ob sončnem času spojili z izmerki samodejnih merilnih postaj ob polnih urah uradnega časa (zadnji izmerek znotraj časovnega intervala). Bistvena razlika med ročnimi meritvami in meritvami postaj merilne mreže BOBER je poleg različne merilne naprave (tekočinski termometer, uporovno temperaturno tipalo) različen temperaturni zaklon (slika 1).

Višino padavin smo v projektu HDS obravnavali drugače kot temperaturo, saj se je izkazalo, da so ročne meritve padavin na daljši časovni ravni zanesljivejše od samodejnih. Samodejne meritve padavin so zaradi načina merjenja bolj občutljive na zunanje dejavnike od ročnih meritev, zato so praviloma manj točne od njih. Zlasti ob sneženju z močnejšim vetrom je izmerjena višina padavin na samodejnih postajah pogosto bistveno manjša kakor na opazovalnih postajah. V analizo smo tako pri večini merilnih mest zajeli zgolj ročne meritve.



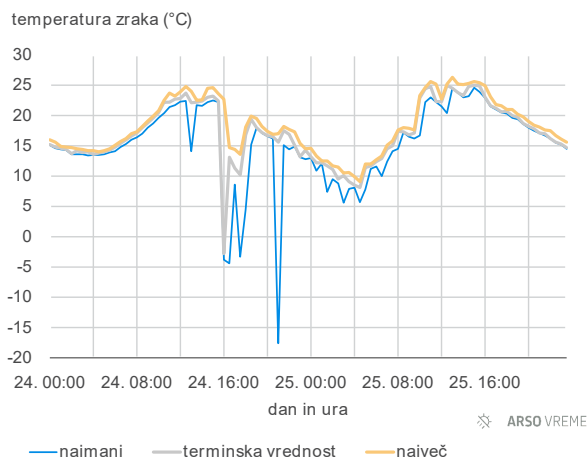
Slika 1. Termometerska hišica za ročne meritve oziroma meritve starejših samodejnih postaj (leva in desna hišica) in novejši tip hišice, v kateri se izvajajo samodejne meritve merilne mreže BOBER (v sredini) na meteorološki postaji Ljubljana Bežigrad

Figure 1. Thermometer screen for manual measurements and older type of automatic measurements (the left and the right screen) and a newer type of thermometer screen with automatic measurements of the BOBER station network (in the middle) at Ljubljana Bežigrad weather station

Kontrola meritev

Podatkovno jedro projekta HDS predstavljajo kontrolirani dnevni podatki projekta PSS. Ker smo s projektom HDS zajeli daljše časovno obdobje, smo dodatno preverili podatke v obdobjih 1950–1960 in 2008–2020, in sicer na podoben način kot v projektu PSS (Vertačnik in sod., 2015b). Računalniško ustvarjen seznam najbolj izstopajočih in sumljivih vrednosti smo ročno preverili z uporabo različnih računalniških orodij in z meteorološkimi poročili. Prostorsko kontrolo klasičnih meritev (ročne meritve opazovalca) smo dopolnili z meritvami samodejnih merilnih postaj in zapisovalnikov temperature ter hkrati preverili tudi kakovost teh meritev. Na merilnih postajah s sočasnimi ročnimi in samodejnimi meritvami smo preverili medsebojno skladnost izmerkov. Podrobneje smo preverili še naslednje podatkovne posebnosti: enake vrednosti v treh zaporednih dneh in nenadne kratkotrajne temperaturne skoke na samodejnih postajah. Odkrili smo tako osamljene napačne vrednosti kot večurna

do večletna obdobja meritev slabe kakovosti (primer na sliki 2). Popravljenе in manjkajoče vrednosti smo vnesli v ločeno podatkovno tabelo in tako postavili temelj za pripravo časovnih nizov mesečnih podatkov, ki smo jih potrebovali pri homogenizaciji.



Slika 2. Nestabilne meritve temperature zraka na merilni postaji Brinje pri Ljubljani 24. in 25. maja 2018. Zlasti izstopajoče so polurne najnižje vrednosti, ki nekajkrat padejo za več kot 5 °C pod najvišjo vrednost v istem časovnem intervalu.

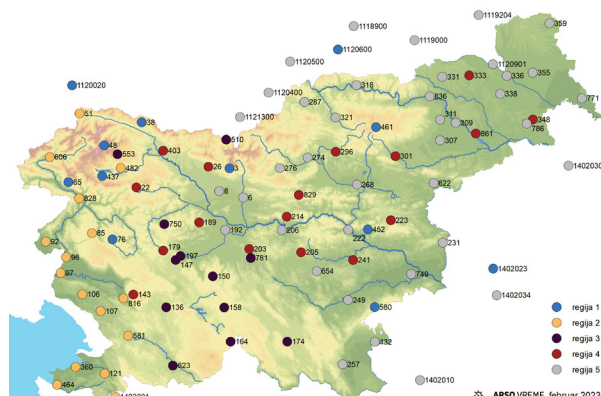
Figure 2. Unstable air temperature measurements at Brinje pri Ljubljani measurement station on May 24 and 25, 2018. The minimum half-hourly values stand out in particular, as they sometimes drop by more than 5 °C below the corresponding maximum value.

Priprava in izbor časovnih nizov za homogenizacijo

Sodobne metode homogenizacije podatkov večinoma temeljijo na medsebojni primerjavi dolgoletnih časovnih nizov na območju z enakim podnebjem oziroma (skoraj) enakim podnebnim signalom. Za ta postopek tako potrebujemo dovolj dolge nize podatkov, ki jih medsebojno primerjamo in določimo njihovo homogenost oziroma prelome, kjer se pojavi nehomogenost. Pogosto pa so nizi meritev posamezne merilne postaje prekratki, zato smo v projektu HDS spojili nize bližnjih, a podnebno zelo podobnih postaj (na primer Stare Fužine in Bohinjske Češnjice). Enako smo spojili tudi nize različnih vrst meritev na isti postaji. Sestavljen časovni niz za homogenizacijo je tako lahko sprva iz klasičnih meritev, ki se nadaljujejo s samodejnimi meritvami. Kjer je bilo možno, smo pri spojitvi temperaturnih nizov uporabili podatke vzporednih meritev v dolžini treh let oziroma vsaj enega leta, pri padavinskih nizih pa daljše obdobje, tudi prek deset let. Pri obeh spremenljivkah smo upoštevali sezonsko nihanje povprečne razlike, a na različna načina. Pri temperaturi smo sezonski hod sistematične razlike med novejšim in starejšim delom niza izračunali po mesecih leta in ga nato zgladili z metodo LOESS. Pri padavinah smo leto razdelili

na tri sezone: zimsko (december–marec), poletno (junij–september) in vmesno (preostali meseci). Za vsako sezono smo izračunali povprečno razmerje višine padavin med pripadajočima nizoma. Ocenjeno sezonsko razliko (količnik) smo pri temperaturi (padavinah) prišteli (množili s) starejšim meritvam in s tem odpravili večji del nehomogenosti pri spojitvi nizov. Pri sestavljanju nizov smo upoštevali zadostno dolžino nizov, izplen meritev in vrsto merilne naprave oziroma postaje. Najvišje na prioriteten lestvici so bile pri temperaturi zraka merilne postaje mreže BOBER, nato ostale samodejne postaje, klasične postaje z opazovalcem in nazadnje zapisovalniki temperature. Opisano spojitve nizov smo izvedli zlasti pri temperaturi zraka, medtem ko je bilo pri padavinah le šest takšnih primerov.

Na podlagi rezultatov projekta PSS, kakovosti in razpoložljivosti meritev temperature zraka ter omejitev programskega orodja Homer smo za vsako temperaturno spremenljivko sestavili 98 časovnih nizov podatkov – 82 s slovenskih in 16 s tujih merilnih postaj (slika 3). Štiri postaje (Ljubljana, Postojna, Rateče in Villacher Alpe) so imele popolne nize mesečnih podatkov, sedem postaj manj kot leto manjkajočih meritev (povprečje prek petih spremenljivk), večina postaj 40–70 let meritev in sedem postaj zgolj 21–28 let meritev (preglednica 4 v Prilogi). Povprečna dolžina temperaturnih nizov znaša 49 let, pri terminkih spremenljivkah približno leto več kot pri ekstremnih temperaturah.

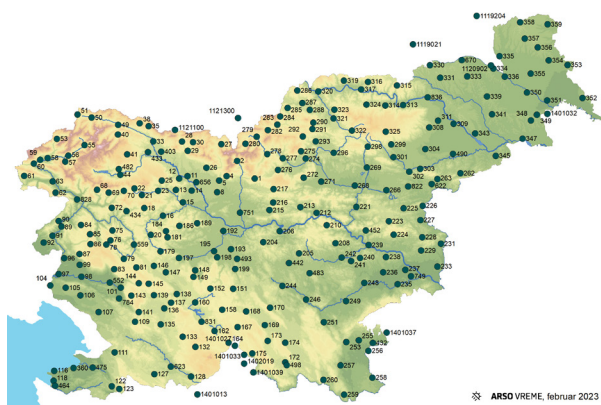


Slika 3. Zemljevid lokacij postaj z meritvami temperature zraka, ki smo jih vključili v homogenizacijo. Predstavljeni sta lokacija in podnebna številka zadnje lokacije postaje. Barva kroga označuje osnovno podnebno regijo posamezne postaje.

Figure 3. Map of stations with air temperature measurements, which were included in the homogenisation. The map shows the location and climate identification number of the last station's location. The circle colour corresponds to the primary climate region of a station.

Mnogo več meritev smo imeli na voljo pri višini padavin. Pripravili smo 268 časovnih nizov, od tega 12 s tujih postaj (slika 4). Tri postaje (Krvavec, Kredarica in Vogel) smo zaradi izrazitega vpliva vetra

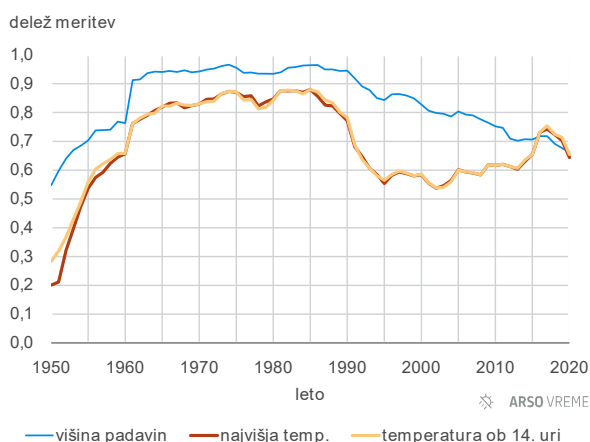
na izmerjeno višino padavin v hladnem delu leta homogenizirali ročno in ločeno od ostalih podatkov. Od 268 je devet časovnih nizov popolnih, 46 jih ima do 11 mesecev manjkajočih podatkov (preglednica 5 v Prilogi). Glavnina nizov je dolžine 40–70 let, 11 nizov pa je dolgih le od 29 do 39 let. Povprečna dolžina niza znaša 59 let.



Slika 4. Zemljevid lokacij postaj z meritvami padavin, ki smo jih zajeli v homogenizacijo. Številke označujejo podnebno številko zadnje lokacije postaje.

Figure 4. Map of stations with precipitation amount measurements, which were included in the homogenisation. The numbers denote the climate identification number of the last station's location.

Glede na razpoložljivost meritev za homogenizacijo časovnih nizov lahko obravnavamo obdobje razdelimo v naslednje odseke: obdobje hitre rasti števila postaj od leta 1950 do 1960, stabilno obdobje velikega števila postaj 1961–1990 in obdobje upadanja oziroma zmanjšane števila postaj 1991–2020 (slika 5). Zaradi vzpostavitve merilne mreže projekta BOBER je v zadnjih letih znova več temperaturnih postaj, medtem ko pri padavinah prevladuje nadaljnji upad števila opazovalnih postaj.

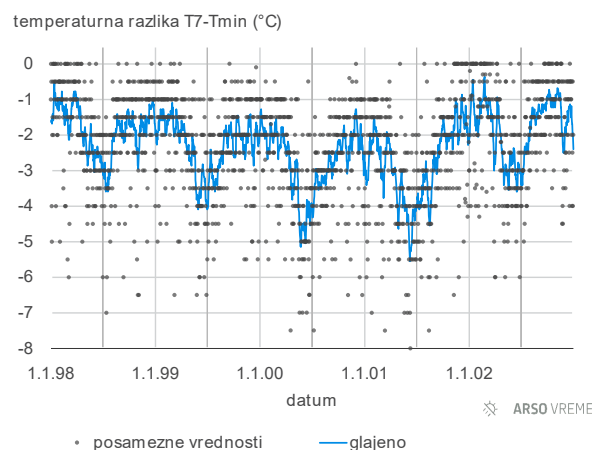


Slika 5. Delež razpoložljivih meritev (mesečnih vrednosti) za homogenizacijo za tri spremenljivke po letih obdobja 1950–2020

Figure 5. Completeness ratio of measured data (monthly values) for homogenisation, separately for the three temperature variables in the period 1950–2020

Sistematični popravki odsekov časovnih nizov

Poleg kontrole posameznih meritev smo pri temperaturi zraka preverjali tudi medsebojno skladnost spremenljivk na mesečni do večletni časovni ravni. Zlasti pri najnižji temperaturi zraka smo odkrili več izstopajočih obdobji zaradi okvare minimalnega termometra. S pomočjo primerjave z drugimi meritvami na postaji, okolico in metapodatki smo karseda točno določili začetek in konec takšnih obdobji. Sistematično napako smo izračunali s pomočjo drugih meritev na postaji (na primer temperature ob 7. uri za dnevno najnižjo temperaturo, slika 6) in podatkov na bližnji postaji (na primer v Biljah za Godnje). Primerjali smo razlike pred, med in po obdobju izstopajočih podatkov, izrisali časovni potek relativnih razlik in se odločili za vrsto popravka (stalni ali časovno spreminjajoč). Časovno spreminjajoč popravek smo izračunali z glajenjem mesečnih vrednosti z metodo LOESS. Dobljene mesečne vrednosti popravkov smo nato prenesli na dnevne podatke. Sistematično popravljene dnevne podatke smo uporabili v nadaljnji pripravi podatkov za homogenizacijo.

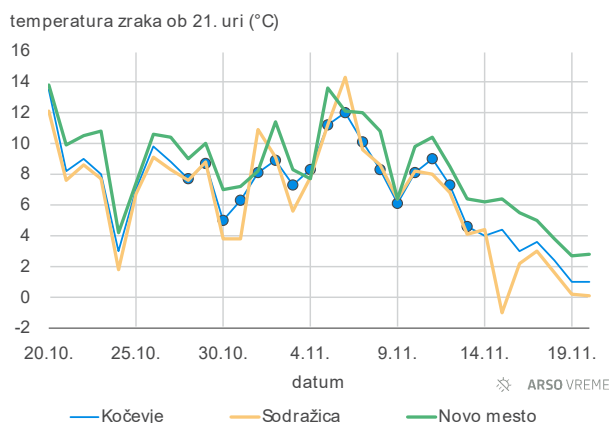


Slika 6. Razlika med temperaturo zraka ob 7. uri zjutraj in dnevno najnižjo temperaturo v Tomaju v letih 1998–2002. Približno od februarja 1999 do oktobra 2001 so vrednosti najnižje temperature prenizke, verjetno zaradi okvare minimalnega termometra. V tem obdobju je le nekaj dni z razliko 0,5 °C ali manj, še bolj nazorno pa nehomogenost kaže 11-dnevno drseče povprečje razlik (modra krivulja).

Figure 6. Time series of difference between air temperature at 7 a.m. and daily minimum temperature in Tomaj from 1998 to 2002. Approximately from February 1999 to October 2001 the minimum temperature values are too low, probably due to the failure of the minimum thermometer. There were only a handful of days with the difference of no more than 0.5 °C in the aforementioned period. The inhomogeneity is even more obvious from the 11-day moving average of the temperature difference (blue curve).

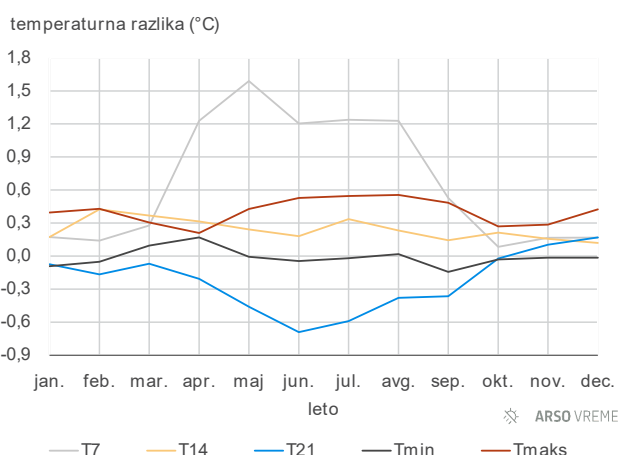
Dopolnitev časovnih nizov

Naslednji korak v pripravi podatkovnih nizov za homogenizacijo je bil samodejna prostorska interpolacija manjkajočih dnevnih vrednosti. Pri izračunu interpolacijske vrednosti smo upoštevali le temperaturno najbolj sorodne dneve v primerjalnem obdobju (ne po absolutnih vrednostih, temveč po relativnih prostorskih razlikah in časovnem poteku). Računalniški program je za vsako interpolirano postajo določil šest najprimernejših referenčnih postaj in izračunal regresijsko premico za vsak par interpolirana-referenčna postaja. Interpolacijska



Slika 7. Časovni potek temperature zraka ob 21. uri na treh merilnih mestih v južni in jugovzhodni Sloveniji v obdobju 20. oktober–20. november 1957. Prostorsko interpolirane vrednosti za Kočevje so označene z modrimi krogi.

Figure 7. Time series of air temperature at 9 p.m. at three measurement sites in southern and southeastern Slovenia from October 20 to November 20, 1957. Spatially interpolated values for Kočevje are indicated by blue circles.



Slika 8. Mesečna povprečna temperaturna razlika med meritvami samodejne in opazovalne meteorološke postaje v Ratečah v obdobju januar 2000–september 2001 (levo) in v Novi vasi na Blokah v obdobju februar 2016–februar 2018 (desno). V Ratečah sta postaji na istem opazovalnem prostoru, meritve so bile izvedene v isti meteorološki hišici. V Novi vasi sta postaji približno 400 metrov narazen, meteorološka hišica samodejne postaje je bistveno manjša kot pri opazovalni postaji (kot na sliki 1).

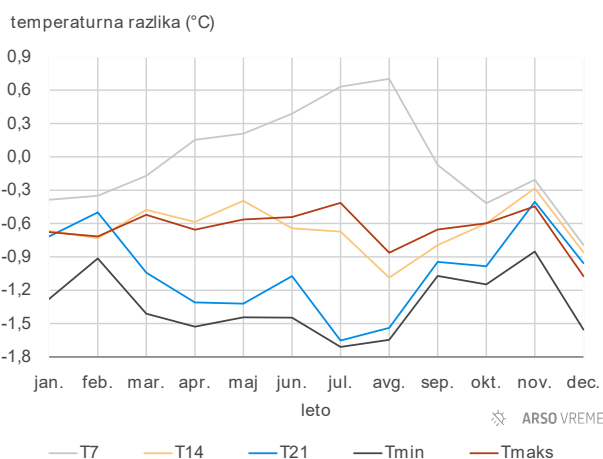
Figure 8. Monthly mean temperature difference between automatic and manual station in Rateče from January 2000 to September 2001 (left), and in Nova vas (Bloke plateau) from February 2016 to February 2018 (right). In Rateče the stations are at the same site and measurements are taken in the same thermometer screen. In Nova vas the stations are 400 metres apart and the thermometer screen of the automatic station is considerably smaller than that of the manual station (as shown in Figure 1).

vrednost je bila vsota uteženih regresijskih vrednosti. Primer rezultatov prostorske interpolacije temperature prikazuje slika 7.

Spojitev nizov s pomočjo vzporednih meritev

Selitev meteoroloških postaj in sprememba načina merjenja sta glavna razloga za nehomogen časovni niz podatkov. Včasih ob selitvi postaje nekaj let meritve potekajo sočasno na stari in novi lokaciji meteorološke postaje, kar lahko izkoristimo za neposredno homogenizacijo časovnega niza, brez primerjave z okoliškimi postajami. Na enak način lahko izkoristimo sočasne meritve opazovalca in samodejne postaje ter pri združevanju nizov dveh deloma prekrivajočih se nizov bližnjih in podnebno zelo podobnih postaj. Ta metoda homogenizacije časovnih nizov je ob dovolj dolgem trajanju vzporednih meritev, navadno nekaj let, boljša od homogenizacije s pomočjo nizov sosednjih postaj. V slovenski državni mreži meteoroloških postaj najdemo vse tri zgoraj omenjene vrste sočasnih meritev, a so daleč najpogostejše vzporedne meritve samodejne in klasične meteorološke postaje.

V okviru projekta HDS smo z analizo vzporednih meritev ovrednotili vpliv dejavnikov za sistematizirane razlike med časovnimi nizi: različne merilne naprave in/ali temperaturni zaklon, časovni zamik meritev pri klasičnih postajah in različna lokacija merilnih mest (slika 8). V splošnem je zadnji dejavnik najpomembnejši, pri temperaturi ob 7. in 21. uri pa je lahko poglobljen dejavnik tudi čas meritve na opazovalni postaji. Nekateri opazovalci zaradi različnih razlogov sistematično odčitavajo temperaturo več



kot deset minut, v izjemnih primerih več kot pol ure pred ali po predvidenem terminu. To lahko v mesecih s hitrim spreminjanjem temperature ob teh terminih pomeni tudi za več desetink stopinje Celzija veliko sistematično napako.

Metapodatki

Poleg izmerkov so v postopku homogenizacije pomembni podatki o zgodovini postaje – metapodatki. Sem uvrščamo informacije o zgodovini merilnega mesta, merilnih napravah, o načinu meritev in njihovi obdelavi (Venema in sod. 2020). Iz metapodatkov lahko sklepamo na vzrok in točen datum nehomogenosti. Homogenizacija je praviloma najbolj učinkovita ob souporabi metapodatkov in statističnih homogenizacijskih metod. Pri tem se moramo zavedati, da so zlasti v zgodnjem obdobju meritev metapodatki nepopolni.

Metapodatke, ki smo jih uporabili v projektu HDS, smo začeli zbirati, rekonstruirati in digitalizirati v okviru projekta INTERREG FORALPs 2005–2008, večina gradiva pa je bila zbrana in digitalizirana v okviru projekta PSS, ker smo našli še dodatne vire, dopolnjevali že zbrane metapodatke in zbirali nove (Nadbath, 2015). Po zaključku projekta PSS se zbiranje in dopolnjevanje metapodatkov za meteorološke postaje še nadaljuje.

Homogenizacija mesečnih podatkov

Kakovostni in homogeni časovni nizi podatkov so ključni za analizo podnebne spremenljivosti in podnebnih sprememb (Venema in sod., 2020). Izraz homogen izvira iz grščine in pomeni »iste narave«. Na žalost večina dolgih nizov podnebnih podatkov ni »iste narave« in so neprimerni za neposredno analizo podnebnih sprememb. Nepodnebni dejavniki, kot so na primer spremembe pri izvajanju meritev, lahko znatno vplivajo na izmerjene vrednosti in povzročijo odklone v statističnih lastnostih časovnih nizov. Učinek teh odklonov je lahko primerljiv s podnebnimi spremembami in lahko vodi do napačnih zaključkov.

Z medsebojno primerjavo daljših časovnih nizov bližnjih merilnih postaj lahko bolje ocenimo podnebni signal, ki je v večji meri skupen tem postajam. Kadar v časovnem nizu mesečnih ali letnih razlik dveh postaj nastopi nenaden skok ali postopna sprememba, lahko sklepamo, da je prišlo do umetnega vpliva na meritve pri vsaj eni od primerjanih postaj. Umetnim signalom v časovnih nizih, ki niso posledica vremena, in jih ne štejemo za del podnebnega signala, pravimo nehomogenosti. So posledica različnih umetnih dejavnikov na meritve, zlasti selitve postaje, menjave opazovalca ali merilne naprave, urbanizacije ipd. Čas in velikost nehomogenosti lahko točneje določimo s primerjavo večjega števila postaj in

ustreznimi metapodatki. Delno ali popolno odpravo nehomogenosti dosežemo s postopkom, ki ga imenujemo homogenizacija. Popravljeni časovni niz podatkov bolje odraža vremensko oziroma podnebno spremenljivost določenega kraja ali območja.

Homogenizacijo smo v projektu HDS izvedli s programskim paketom HOMER, na podoben način kot v projektu PSS (Vertačnik in sod., 2015b). HOMER (HOMogenizatON softwarE in R) je programsko orodje za homogenizacijo osnovnih podnebnih spremenljivk na mesečni ali letni časovni ravni (Mestre in sod., 2013) in teče v programskem okolju za statistično računanje in grafiko R. Temelji na rezultatih testiranja različnih metod za homogenizacijo časovnih nizov temperature in padavin v okviru projekta COST ES0601 (HOME), ki je potekal v letih 2007–2011 (Venema in sod., 2012). HOMER je interaktivno orodje, pri katerem nehomogenosti odkrivamo z različnimi homogenizacijskimi metodami, pomagamo si lahko tudi z metapodatki. Vsebuje tudi grafični vmesnik za ročno kontrolo časovnih nizov – odkrivanje izstopajočih delov niza, ki niso primerni za homogenizacijo.

Najprej smo s Homerjem na grafičnem prikazu časovnih nizov preverili izstopajoče vrednosti, tako osamelce kot daljša obdobja, in jih preverili z drugimi meritvami in metapodatki. Kjer je bilo potrebno, smo odstopajoče podatke zavrgli. Podrobneje smo preverili več kot sto osamelcev in jih približno polovico označili kot napačne vrednosti. Večinoma smo izločili eno- do večmesečna obdobja izstopajočih dnevni vrednosti, le v posameznih primerih smo lahko s pomočjo metapodatkov točneje določili začetek in konec podatkov slabe kakovosti. Glavna razloga za napačne vrednosti sta bila nepravilen čas meritve in okvara merilne naprave.

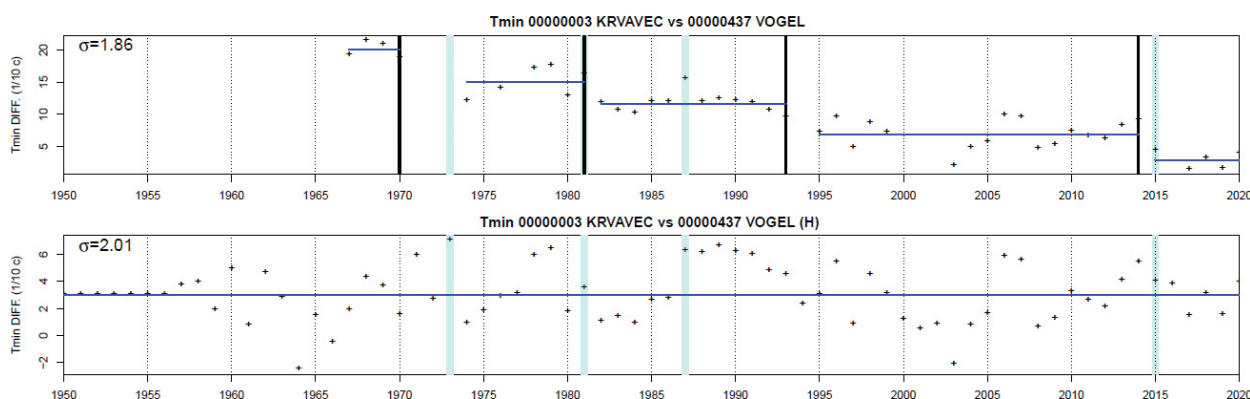
V projektu PSS smo homogenizirali ves sklop časovnih nizov naenkrat, po nadaljnjih izkušnjah s homogenizacijo pa smo se tokrat odločili za homogenizacijo po podnebnih regijah, ki smo jih določili po temperaturni podobnosti z referenčnimi postajami. Zaradi boljše prostorske povezanosti rezultatov smo pri homogenizaciji osnovnemu naboru postaj v posamezni regiji dodali še nekaj postaj iz drugih regij. Podrobneje je postopek določitve regij predstavljen v prilogi (Način izbora primerjalnih postaj pri homogenizaciji temperature zraka).

Homogenizacijo smo izvedli po posameznih spremenljivkah, regijah in v več krogih, z osnovnimi nastavitvami kot so navedene v preglednici 1. V prvem krogu smo najprej z grafičnim pregledovalnikom na podlagi dveh statističnih metod odkrili največje nehomogenosti (detekcija nehomogenosti, primer na sliki 9). V datoteko s seznamom nehomogenosti smo vnesli datume teh nehomogenosti, HOMER

Preglednica 1. Nastavitve parametrov za izbor okoliških postaj v HOMER-ju

Table 1. Parameter settings for reference stations in HOMER

Spremenljivka	Način korekcije	Izbor postaj	Največja razdalja (km)	Najmanjše število postaj
temperatura	aditivni	geografski	20	vse, razen v regiji 5 (25 postaj)
padavine	multiplikativni	geografski	10	15



Slika 9. Zaznavanje prelomov v razliki časovnih nizov najnižje temperature s Krvavca in Vogla pred (zgoraj) in po homogenizaciji (spodaj) s programskim orodjem HOMER. Prikazani so rezultati metode »pairwise detection« (zaznavanje nehomogenosti, v parih testirane z okoliškimi postajami). S črno so označeni statistično predlagani prelomi, s turkizno vstavljeni prelomi. V začetnem obdobju je veliko podatkov manjkajočih (zgoraj), a so v postopku homogenizacije interpolirani (spodaj).

Figure 9. Break detection in the minimum temperature time series difference between Krvavec and Vogel before (above) and after homogenisation (below) with HOMER software tool. Results of the pairwise detection method are shown (detection of inhomogeneities in the time series difference of candidate and reference stations). Black lines denote statistically detected breaks and turquoise lines inserted breaks. There are many missing data in the initial period (top), which were replaced by interpolated values during homogenisation (bottom).

pa je izračunal popravljene nize, na katerih smo izvedli naslednji krog detekcije nehomogenosti. Kjer je bilo možno, smo nehomogenosti določili s pomočjo metapodatkov na mesec točno, sicer smo v seznam navedli le leto nehomogenosti. Ko opaznih nehomogenosti ni bilo več, smo v HOMER-ju zagnali ukaz za samodejno določitev leta in meseca nehomogenosti, kjer iz metapodatkov nismo mogli sklepati na datum nehomogenosti. HOMER je nato izračunal popravljene nize, homogenizacijo mesečnih nizov smo s tem zaključili. Poleg homogenizacije je program izvedel tudi interpolacijo manjkajočih mesečnih vrednosti.

Kot smo omenili že zgoraj, so številne postaje s časovnimi nizi nastopale v dveh ali več regijah. Za te nize smo časovno uskladili nehomogenosti, tako da so bile med regijami razlike le v velikosti popravka. Da bi omilili rezultatski prehod med regijami smo homogenizirane časovne nize nekaterih od teh postaj subjektivno utežili in sešteli v končni rezultat homogeniziranih mesečnih vrednosti. Primer: postaja Lesce je s svojimi temperaturni nizi nastopala v kar štirih regijah, končni homogenizirani nizi za to postajo so bili izračunani kot vsota tretjine homogeniziranih vrednosti za to postajo iz druge, četrte in pete regije. Za analizo podnebnih sprememb homogenizirani in

popolnjeni mesečni podatki običajno zadostujejo, medtem ko za analizo ekstremnih vremenskih pojavov praviloma potrebujemo dnevne ali časovno še gostejše podatke. Zato smo mesečne popravke iz homogenizacije prevedli na dnevne vrednosti, manjkajoče dnevne vrednosti pa smo prostorsko interpolirali. Opis tega postopka je naveden v prilogi (Interpolacija dnevni podatkov).

Metode analize rezultatov

V prispevku analiziramo glavne statistike homogeniziranih in dopolnjenih časovnih nizov temperature in padavin, zlasti medletni potek in dolgoletni časovni trend. Rezultate homogenizacije in prostorske interpolacije primerjamo z vhodnimi podatki, z rezultati projekta PSS in pri temperaturi zraka tudi s podatkovnima zbirkama projektov HISTALP in Berkeley Earth. Precejšen del analize temperature zraka je posvečen medsebojni primerjavi različnih temperaturnih spremenljivk.

Mesečna in letna povprečja so izračunana kot aritmetična sredina zajetih vrednosti. Dolgoletni linearni trend je, razen dveh navedenih izjem, izračunan po metodi Theila in Sena. Ponokod poleg

srednje ocene trenda navajamo 95-odstotni interval zaupanja. Statistična značilnost trendov je ocenjena z Mann-Kendallovim testom.

Rezultati

Homogenizirani in dopolnjeni časovni nizi morajo za izdelavo kakovostnih analiz izpolnjevati več statističnih kriterijev. Mesečna in letna povprečja ter njihova spremenljivost morajo biti sorazmerno blizu hipotetično izmerjenim vrednostim časovno homogenega niza, če želimo, da ti podatki odražajo splošne podnebne spremembe in medletno spremenljivost nekega kraja. Pri analizi izjemnih vrednosti, na primer zelo visoke ali nizke temperature zraka ali zelo velike dnevne višine padavin, je potrebno dobro ujemanje v repih porazdelitvene funkcije. Če pa želimo podatke uporabiti za prikaz prostorske razporeditve na posamezni dan je pomembno tudi, da je statistična napaka čim manjša. Obe zahtevi pri dnevni vrednosti sta si deloma v konfliktu, zato je potreben kompromis ali ločeni podatkovni nizi glede na namen uporabe. Odločili smo se za prvo možnost, računski postopek je opisan v prejšnjem poglavju. V tem poglavju bomo na kratko analizirali rezultate projekta HDS, kamor sodi tudi omenjeni računski postopek za pripravo dnevnih podatkov.

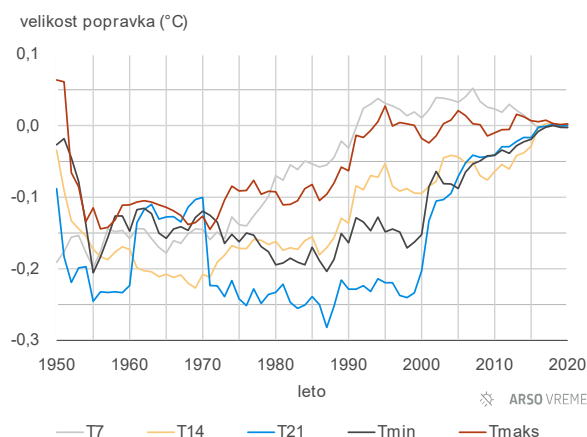
Velikost popravkov

Za začetek analizirajmo velikost temperaturnih popravkov, to je razlike med vhodnimi in izhodnimi mesečnimi vrednostmi homogenizacije (slika 10). S homogenizacijo smo na ravni celotne mreže postaj vrednosti spremenili za manj kot $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Največji popravki, večinoma v negativno smer, so bili pri starejših podatkih. Približno po letu 1995 se popravki postopno zmanjšujejo in približujejo ničli. Med spremenljivkami so pomembne razlike, zlasti v prvih letih in na sredini obdobja. Večinoma so najbolj izraziti popravki temperature ob 21. uri, le v obdobju 1961–1970 in ob koncu so primerljivi z ostalimi spremenljivkami. Popravki temperature ob 21. uri so sezonsko nekoliko različni, bolj izraziti poleti in manj pozimi (slika 11). Izraziti prelomi v letih 1960, 1970 in 2000 so posledica velikih prelomov na nekaj postajah, pri srednjem prelomu recimo zaradi premika večernega termina na avstrijskih postajah z 21. na 19. uro.

Časovna poteka popravkov temperature ob 14. uri in dnevne najvišje temperature sta na letni ravni podobna, le popravki slednje so manj v negativno smer, po letu 1990 pa so zelo majhni. Nasprotno pa je razlika med potekom temperature ob 7. uri in dnevne najnižje temperature občutna, saj se po dokaj skladnem obdobju 1955–1976 močno poveča (do

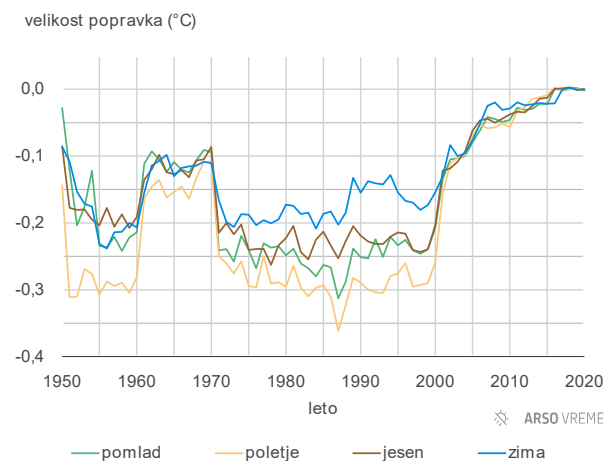
skoraj $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) in po letu 1999 spet zmanjša.

Popravki so dokaj simetrično porazdeljeni okoli ničle (slika 12). 26–30 % vseh vrednosti (odvisno od spremenljivke) je glede na izvorno s homogenizacijo spremenjena nič ali zelo malo, za največ $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 10. Letno povprečje velikosti popravka v postopku homogenizacije po temperaturnih spremenljivkah v obdobju 1950–2020

Figure 10. Annual mean of homogenisation corrections by temperature variables during the period 1950–2020

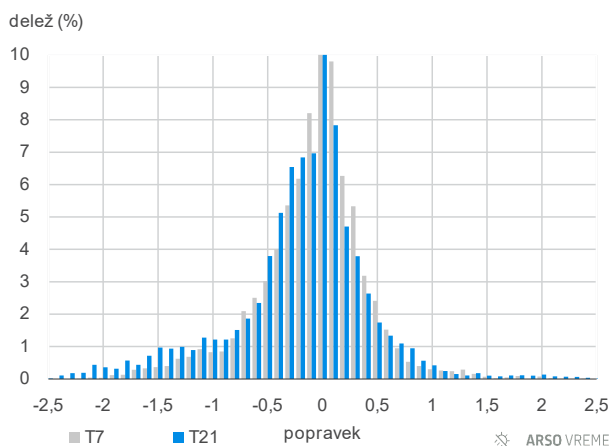


Slika 11. Povprečje velikosti popravka temperature ob 21. uri po meteoroloških letnih časih po letih obdobja 1950–2020

Figure 11. Mean homogenisation corrections of temperature at 9 p.m. by meteorological seasons and by years of the 1950–2020 period.

Delež negativnih popravkov z velikostjo nad $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ znaša pri T7 38 %, pozitivnih z velikostjo nad $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa 32 %. Večje nesorazmerje je pri ostalih spremenljivkah, zlasti pri T14, T21 in Tmin (okoli 45 % proti okoli 27 %).

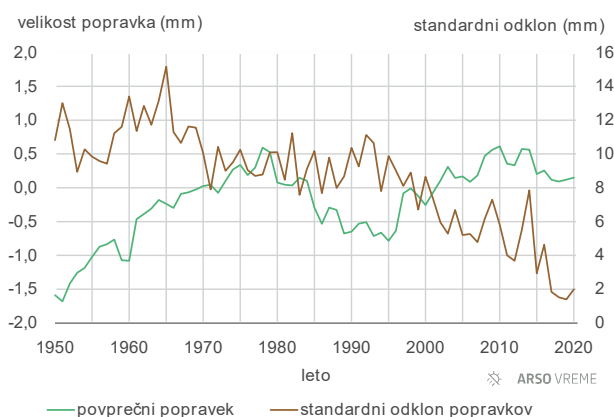
Popravki mesečne višine padavin kažejo drugačen časovni potek kot pri temperaturi (slika 13). Na ravni celotne mreže postaj so sprva negativni, a majhni



Slika 12. Histogram popravkov T7 in T21 po velikostnih razredih širine 0,1 °C. Osrednji razred, ki pokriva razpon od -0,05 do +0,05 °C, ni v celoti prikazan (vrednost 30 oziroma 27 %) in zajema tudi s homogenizacijo nespremenjene vrednosti, ki jih je okoli 3 %.

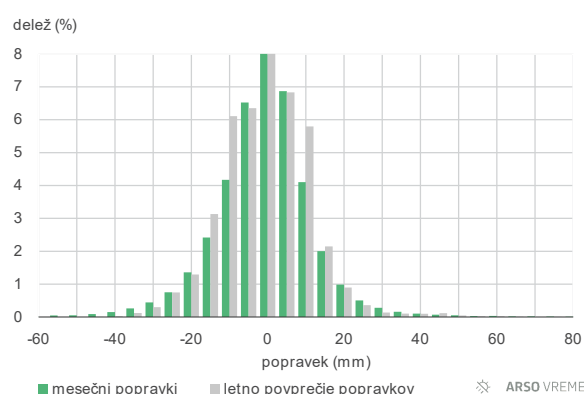
Figure 12. Histogram of T7 and T21 corrections by 0.1 °C bins. The central bin (spanning the interval of -0.05 °C to +0.05 °C) is not fully presented (with values of 30 %, and 27 %, respectively) and contains by homogenisation unchanged values, which represent about 3 % of all values.

(okoli 1 mm), nato se do leta 1970 približajo ničli in jo tudi malenkostno prečkajo. V letih 1985–1996 so popravki znova rahlo negativni, od leta 2002 pa rahlo pozitivni. Na ravni posamezne postaje pa so popravki mnogo večji, saj je njihov standardni odklon do leta 1995 8–15 mm, nato se postopno zmanjšuje. Popravki so skoraj enako razporejeni v pozitivno in



Slika 13. Letno povprečje in standardni odklon velikosti popravka mesečne višine padavin v postopku homogenizacije v obdobju 1950–2020

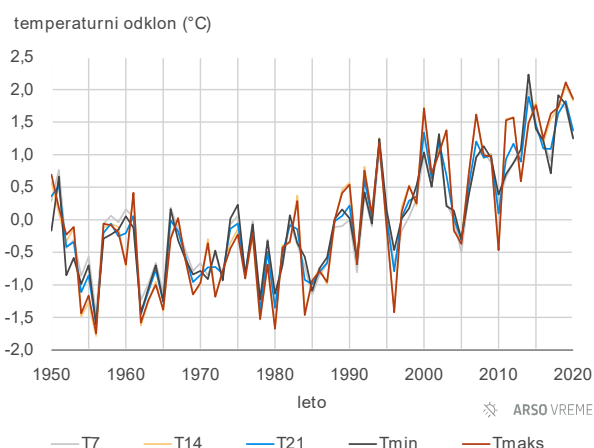
Figure 13. Annual mean and standard deviation of homogenisation corrections of monthly precipitation sum in the period 1950–2020



Slika 14. Histogram popravkov mesečne višine padavin (zeleno) in letnega povprečja mesečne višine padavin (sivo) po velikostnih razredih širine 5 mm. Osrednji razred, ki pokriva razpon od -2,5 do +2,5 mm, ni v celoti prikazan (vrednost 68 oziroma 65 %) in zajema tudi s homogenizacijo nespremenjene vrednosti, ki jih je 57 oziroma 46 %.

Figure 14. Histogram of monthly precipitation sum corrections (green) and annual mean of this corrections by 5 mm bins. The central bin (spanning the interval of -2.5 % to +2.5 %) is not fully presented (with values of 68 %, and 65 %, respectively) and contains by homogenisation unchanged values, which represent 57 % and 46 % of all values, respectively.

negativno smer; 16 % jih je nad +2,5 mm in 15 % pod -2,5 mm (slika 14). Kar 57 % mesečnih vrednosti je po homogenizaciji nespremenjenih. Podobno velja za popravke na letni ravni, le da so ti v povprečju (preračunani na mesečni nivo) še nekoliko manjši, delež popravljenih vrednosti pa znaša 46 %.



Slika 15. Letno povprečje odklona temperature glede na celotno obdobje 1950–2020. Prikazana je aritmetična sredina vseh slovenskih postaj za vseh pet homogeniziranih spremenljivk.

Figure 15. Annual mean temperature anomaly from the 1950–2020 period mean. Arithmetic mean of all Slovenian time series is shown, separately for all five temperature variables.

Preglednica 2. Pearsonov korelacijski koeficient med časovnimi nizi homogeniziranih vrednosti, in sicer letnih povprečij prek vseh postaj. Tpvov1 in Tpvov2 označujeta dnevno povprečno temperaturo, izračunano na dva načina: Tpvov1 je uteženo povprečje terminskih vrednosti (T7, T14, T21), Tpvov2 aritmetična sredina najvišje in najnižje temperature. Polja so obarvana skladno z vrednostjo korelacijskega koeficienta: siva barva označuje sorazmerno nizke vrednosti (ki pa so vseeno 0,89 ali več), rumena srednje visoke in zelena zelo visoke vrednosti.

Table 2. Pearson's correlation coefficient between network-wide homogenised time series of annual mean values. Tpvov1 and Tpvov2 denote daily mean temperature, calculated in different ways: Tpvov1 as a weighted average of the values at three times (T7, T14, T21), and Tpvov2 as an arithmetic mean of daily maximum and minimum temperature. Table fields are coloured according to the correlation coefficient: grey represents relatively low values (however still equal to or above 0,89), yellow moderately high values, and green very high values.

spremenljivka	T7	T14	T21	Tmin	Tmaks	Tpvov1	Tpvov2
T7	1,00	0,91	0,98	0,99	0,91	0,98	0,97
T14	0,91	1,00	0,97	0,89	1,00	0,98	0,98
T21	0,98	0,97	1,00	0,97	0,97	1,00	1,00
Tmin	0,99	0,89	0,97	1,00	0,89	0,97	0,97
Tmaks	0,91	1,00	0,97	0,89	1,00	0,98	0,98
Tpvov1	0,98	0,98	1,00	0,97	0,98	1,00	1,00
Tpvov2	0,97	0,98	1,00	0,97	0,98	1,00	1,00

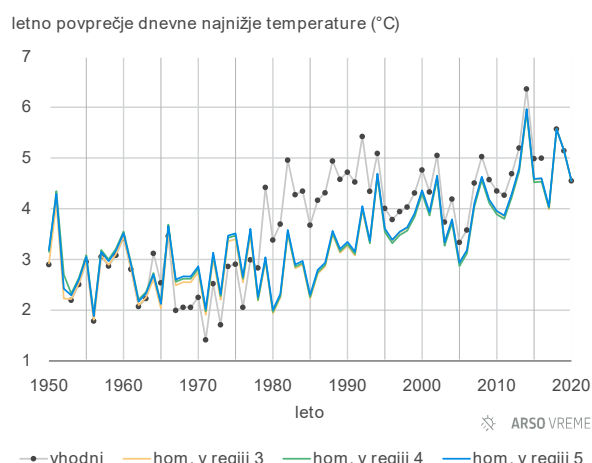
Primerjava homogeniziranih temperaturnih nizov

Homogenizirani in dopolnjeni časovni nizi različnih temperaturnih spremenljivk imajo podoben časovni potek letnih vrednosti (slika 15, preglednica 2). Največje razlike v letnih odklonih od povprečja celotnega obdobja so, pričakovano, med paroma najvišjih (T14 in Tmaks) in najnižjih vrednosti (T7 in Tmin). Časovni potek odklonov temperature ob 21. uri se približno enako dobro sklada z ostalimi štirimi spremenljivkami.

Preglednica 3. Linearni trend temperature zraka v Sloveniji v obdobju 1950–2020, izračunan po metodi Theila in Sena iz povprečja homogeniziranih in dopolnjenih časovnih nizov slovenskih postaj. Prikazane so srednja vrednost in spodnja in zgornja meja 95-odstotnega intervala zaupanja.

Table 3. Linear air temperature trend in Slovenia in the period 1950–2020, calculated from the mean of the homogenised and interpolated time series of Slovenian stations, using the Theil-Sen method. Best estimate of the trend, as well as the lower and upper end of the 95 % confidence interval are presented.

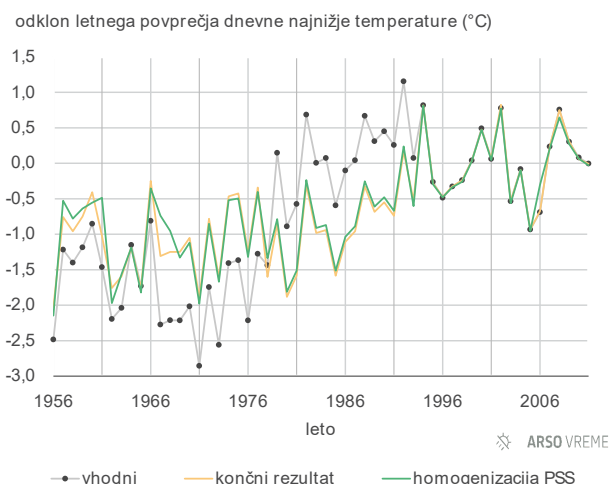
spremenljivka (variable)	srednja vrednost (best estimate)	spodnja meja (lower end)	zgornja meja (upper end)
T7	0,27	0,18	0,35
T14	0,36	0,26	0,47
T21	0,32	0,24	0,40
Tmin	0,31	0,23	0,39
Tmaks	0,37	0,26	0,47



Slika 16. Letno povprečje dnevne najnižje temperature zraka na Letališču JP Ljubljana: vhodni podatki za homogenizacijo in rezultati homogenizacije po regijah HDS. Najbolj očitna skoka v razliki med vhodnimi in homogeniziranimi podatki sta v letih 1978 (selitev postaje 7. junija 1978) in 1993 (prehod s klasičnih na samodejne meritve 1. julij 1993). Manj očitne nehomogenosti so posledica selitev postaje 14. julija 1952 in 1. junija 1966, sklopitve nizov iz Vogelj in Letališča JP Ljubljana 11. decembra 1963 ter zamenjave samodejne postaje 1. septembra 2017.

Figure 16. Annual mean of daily minimum temperature at Ljubljana JP airport: original time series for homogenisation and homogenised time series for HDS regions. The most pronounced breaks in the difference between original and homogenised time series are in years 1978 (station relocation on June 7) and 1993 (switch from manual to automatic measurements on July 1). Less obvious inhomogeneities are due to station relocations on July 14, 1952, and June 1, 1966, merging temperature series of Voglje and Ljubljana JP airport on December 11, 1963, and replacement of automatic station on September 1, 2017.

Dvig temperature zraka v celotnem obravnavanem obdobju je najvišji v temperaturi ob 14. uri in najvišji temperaturi (okoli 0,36 °C oziroma 0,37 °C na desetletje). Trend je nekoliko manjši v temperaturi ob 21. uri in najnižji temperaturi in še manjši (okoli 0,27 °C na desetletje) v temperaturi ob 7. uri (preglednica 3). Razlike med srednjimi vrednostmi trenda so manjše od statistične negotovosti, saj je širina 95-odstotnega intervala zaupanja od 0,16 °C do 0,21 °C na desetletje.

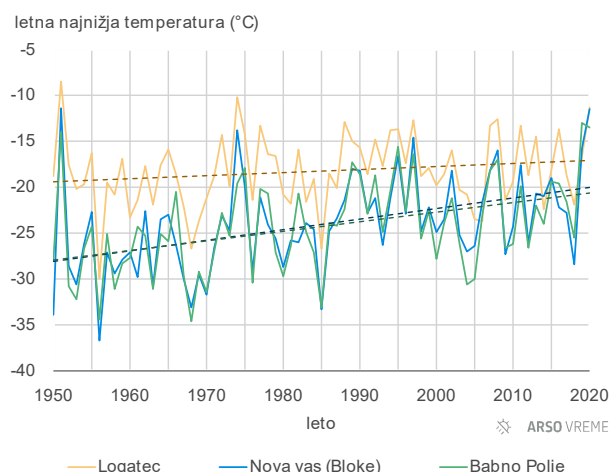


Slika 17. Odklon letnega povprečja dnevne najnižje temperature zraka na Letališču JP Ljubljana: vhodni podatki za homogenizacijo, končni rezultat homogenizacije in homogenizirane vrednosti v projektu PSS. Referenčno obdobje je 1994–2011. Najbolj očitna skoka v razliki med vhodnimi in homogeniziranimi podatki sta v letih 1978 (selitev postaje 7. junija 1978) in 1993 (prehod s klasičnih na samodejne meritve 1. julij 1993).

Figure 17. Anomaly of annual mean of daily minimum temperature at Ljubljana JP airport: original time series for homogenisation, final homogenised and interpolated time series, and homogenised time series of the PSS project. Reference period is 1994–2011. The most pronounced breaks in the difference between original and homogenised time series are in years 1978 (station relocation on June 7) and 1993 (switch from manual to automatic measurements in July 1).

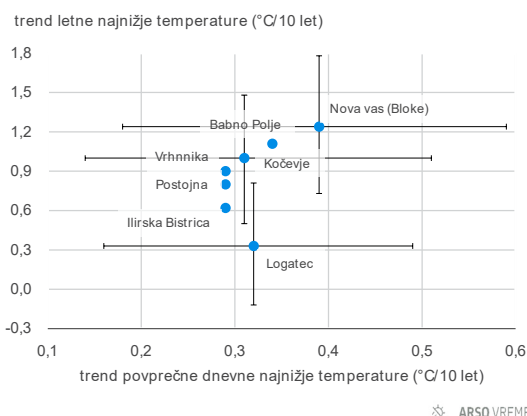
Na kakovost dobljenih rezultatov lahko sklepamo tudi iz ujemanja homogeniziranih nizov postaj, ki so nastopale v dveh ali več regijah (primer na sliki 16). Pri večjih prelomih so razlike relativno gledano sorazmerno majhne, zato lahko sklepamo, da popravljeni nizi mnogo bolje odražajo podnebne spremembe kot izvorni nizi. Tudi ujemanje med rezultati projektov HDS in PSS je v splošnem dobro in zlasti na letni ravni so razlike med homogeniziranimi nizi mnogo manjše kot med homogeniziranimi in izvornimi nizi (primer na sliki 17).

Homogenizacija v projektu HDS je bila izvedena na mesečnih vrednostih in dnevne vrednosti v posameznem mesecu so bile nato popravljene enako, ne glede na vremenske razmere. Kjer smo združevali



Slika 18. Časovni potek letne najnižje temperature zraka v homogeniziranih in dopolnjenih nizih treh izbranih postaj. S črtkano daljico je prikazan linearni trend (po metodi najmanjših kvadratov) skozi celotno obdobje. Trend za Logatec je bistveno manjši od trenda za Novo vas in Babno Polje, kar je posledica neodpravljene nehomogenosti v temperaturnem nihanju pri spojitvi nizov Planine pri Rakeku in Logatec.

Figure 18. Annual time series of daily minimum air temperature in homogenised and interpolated time series for three selected stations. Dash line represents a linear trend (using the least-squares method) over the entire period (1950–2020). The trend value for Logatec is much smaller than for the Nova vas and Babno Polje as a consequence of remaining inhomogeneity in temperature variability after merging the time series of Planina (near Postojna) and Logatec.

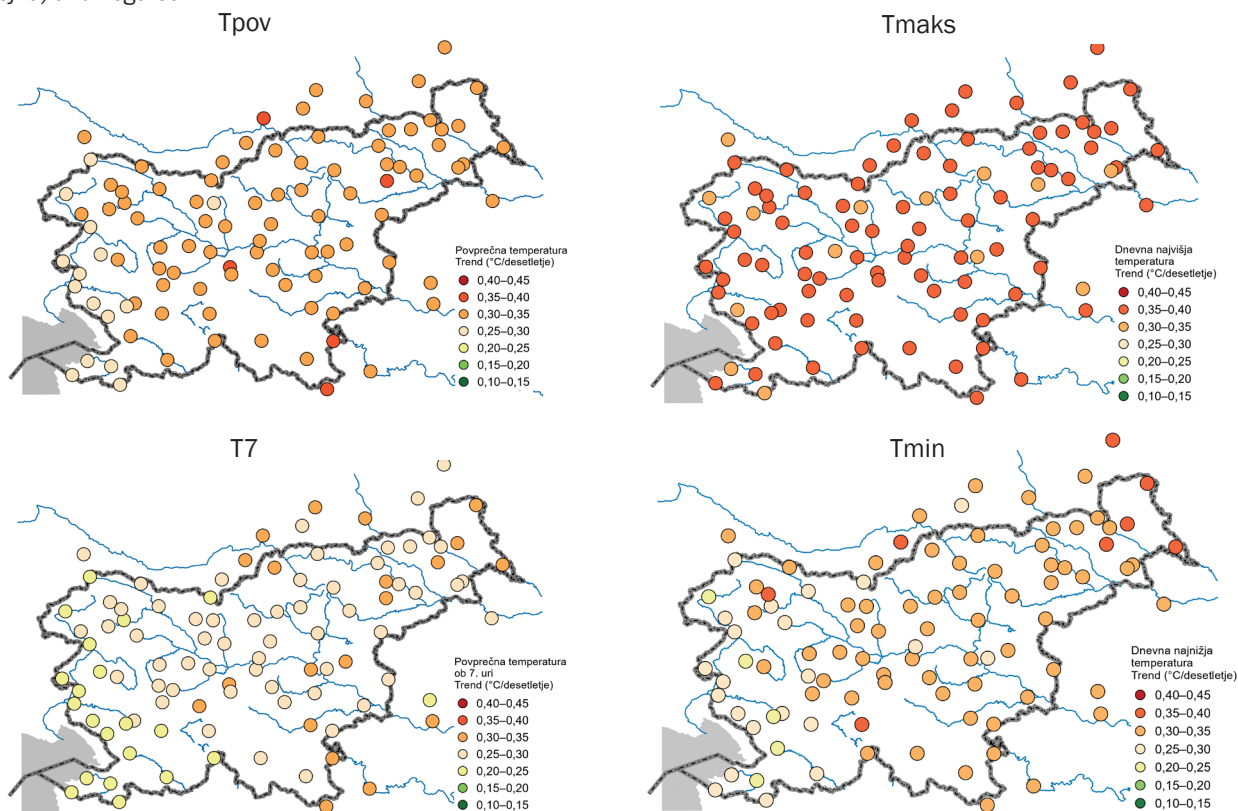


Slika 19. Razsevni grafikon linearnega trenda najnižje temperature zraka v obdobju 1950–2020 za izbrane postaje. Na vodoravni osi je trend povprečne dnevne najnižje temperature v mesecih januar–marec in december, na navpični osi trend letne najnižje temperature, oboje izračunano po metodi Theil in Sena. Vrednosti trenda povprečne vrednosti najnižje temperature so za velikostni red bolj izenačene od vrednosti trenda letne najnižje temperature zraka – posledica nehomogenosti v varianci dnevni vrednosti najnižje temperature. Za postaje Logatec, Nova vas in Kočevje je podana tudi negotovost trenda v obliki 95-odstotnega intervala zaupanja. Razlika v trendu letne najnižje temperature med Novo vasjo in Logatcem je izrazito statistično značilna, v trendu povprečne dnevne najnižje temperature pa neznačilna, a je blizu meje statistične značilnosti. Vse statistične značilnosti v članku podajamo za stopnjo značilnosti 5 %.

Figure 19. Scatter plot of linear trend in minimum air temperature at selected stations for the period 1950–2020. On the horizontal axis the trend in mean daily minimum air temperature in December–March is plotted, while on the vertical axis the trend in annual minimum temperature (the lowest value in a year) is plotted. Both trends are calculated using the Theil-Sen method. The trend values in the mean are an order of magnitude in better agreement than the trends in the extremes of minimum temperature. This disparity of trend differences is a consequence of inhomogeneity in the variance of daily minimum temperature. For Logatec, Nova vas and Kočevje the 95 % confidence interval of the estimated trend is also plotted. The trend difference in annual minimum temperature between Nova vas and Logatec is statistically significant, whereas the difference in mean minimum temperature is insignificant but close to the significance limit value. All statements about statistical significance in the article are based on a significance level of 5 %. Postojna) and Logatec.

časovne nize z različnih mikrolokacij (npr. Logatec in Planino pri Rakeku), se različna spremenljivost temperature v krajših časovnih obdobjih odraža v nehomogenih nizih ekstremnih vrednosti. Zlasti je to očitno pri najnižji temperaturi zraka, ki se v času in prostoru od vseh temperaturnih spremenljivk najhitreje spreminja. Zato je potrebno biti pri uporabi teh nizov za analizo podnebnih sprememb z vidika ekstremnih dnevnih vrednosti pazljiv. Pred podrobno analizo je priporočljivo primerjati časovne nize okoliških oziroma podnebno podobnih postaj (primer je na slikah 18 in 19).

Trend temperature kaže naslednjo prostorsko sliko. Povprečna temperatura, temperatura ob 7. uri in najnižja temperatura zraka je v obdobju 1950–2020 hitreje naraščala v vzhodni in osrednji Sloveniji kakor



Slika 20. Linearni trend temperature v obdobju 1950–2020 za štiri temperaturne spremenljivke, izračunan z metodo Theila in Sena

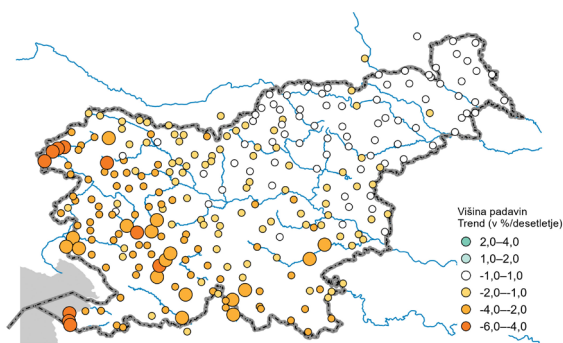
Figure 20. Map of linear temperature trend in the period of 1950–2020 for four temperature variables. The trend is calculated using the Theil-Sen method.

ob meji z Italijo (slika 20). Od teh spremenljivk je najmanjši trend, 0,20–0,35 °C/desetletje za T7, pri ostalih dveh spremenljivkah pa je večinoma v razredu 0,30–0,35 °C/desetletje, mestoma je višji, na zahodu pa tudi nižji. Dnevna najvišja temperatura kaže hitrejši dvig, večinoma med 0,35 °C/desetletje in 0,40 °C/desetletje, podobno je za T14 (ni prikazano). Pri slednjih dveh spremenljivkah tudi ni očitnih razlik med vzhodnim in zahodnim delom Slovenije.

Primerjava homogeniziranih padavinskih nizov

Homogenizirani padavinski nizi kažejo bolj razgibano prostorsko sliko dolgoletnega trenda, ki pa na letnem in sezonskem nivoju skoraj nikjer ni statistično značilen. Omembe vredna izjema so le območja v južnem in zahodnem delu Slovenije, kjer je poletna višina padavin skozi obdobje 1950–2020 padala za približno štiri odstotne točke na desetletje (slika 21). A tudi v teh primerih je statistična negotovost

Kazalnik višine padavin, poletni trend



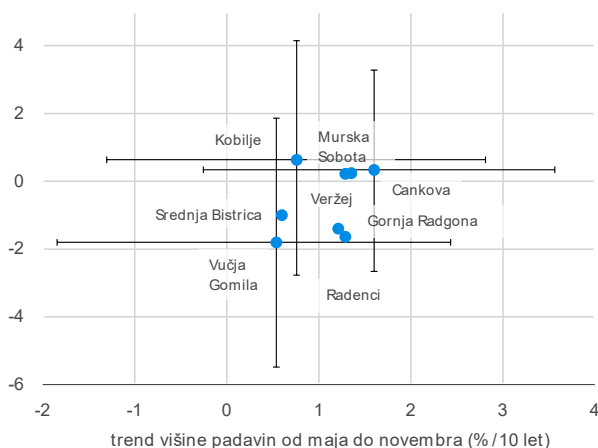
Slika 21. Linearni trend kazalnika poletne višine padavin v obdobju 1950–2020, izračunan z metodo Theila in Sena. Statistično značilne vrednosti so označene z večjimi krogi.

Figure 21. Map of linear trend in summer precipitation index in the period of 1950–2020. The trend is calculated using the Theil-Sen method. Statistically significant values are denoted by larger circles.

tako velika, da zgornji rob 95-odstotnega intervala zaupanja skoraj doseže ničlo.

Prostorska spremenljivost izračunanega trenda višine padavin je mnogo večja pri dnevni ekstremi kot pri večmesečnih povprečjih, ki zajemajo te dnevne ekstreme (slika 22). Trend povprečne višine padavin (od maja do novembra) je v Murski Soboti in bližnji Radencih zelo podoben (okoli 1,3 %/desetletje), na prvi pogled znatna pa je razlika v trendu dnevni ekstremov (–1,4 % in 0,2 % / desetletje), kar je morda

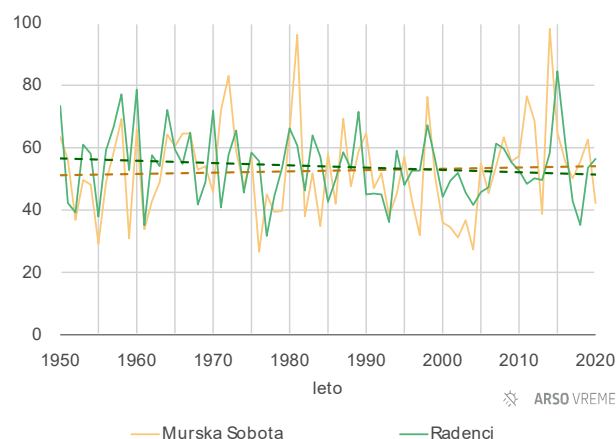
trend letnega maksimuma dnevne višine padavin (%/10 let)



Slika 22. Razsevni grafikon linearnega trenda višine padavin od maja do novembra v obdobju 1950–2020 za izbrane postaje v Pomurju. Na vodoravni osi je trend sezonske višine padavin (maj–november), na navpični osi trend letnega maksimuma dnevne višine padavin, oboje izračunano po metodi Theila in Sena. Za postaje Cankova, Kobilje in Vučja Gomila je podana tudi negotovost trenda v obliki 95-odstotnega intervala zaupanja. Za nobeno od prikazanih postaj trend letnega maksimuma višine padavin in sezonske višine padavin ni statistično značilen, ker je negotovost zelo velika. Tudi razlike trendov med postajami niso statistično značilne.

Figure 22. Scatter plot of linear trend in May–November precipitation in the period 1950–2020 for selected stations in Pomurje region. On the horizontal axis the trend in seasonal precipitation sum (May–November) is shown, whereas on the vertical axis the trend in maximum daily precipitation amount is shown. Both trends are estimated using the Theil-Sen method. For Cankova, Kobilje and Vučja Gomila the 95 % confidence interval of the estimated trend is also plotted. None of the daily maximum trends as well as seasonal precipitation sum trends are statistically significant, as confidence intervals are very large. Even the trend differences between the stations are not statistically significant.

letna največja dnevna višina padavin (mm)



Slika 23. Časovni potek letne največje dnevne višine padavin v homogeniziranih in dopolnjenih nizih dveh izbranih bližnjih postaj. S črtkano daljico je prikazan linearni trend (izračunan z metodo najmanjših kvadratov) skozi celotno obdobje. Kljub navidezno veliki razliki v trendu, si trenda pri stopnji značilnosti 5 % nista statistično značilno različna.

Figure 23. Annual maximum of daily precipitation amount in homogenised and interpolated time series of two nearby stations. Dash line represents a linear trend (using the least-squares method) over the whole period. Despite the trend difference appearing large, it is not statistically significant at 5 % level of significance.

posledica nehomogenosti v porazdelitvi dnevni vrednosti (slika 23). Razlike trendov na sliki 22 niso statistično značilne, saj se dnevni ekstremi zelo hitro spreminjajo tako v prostoru kot času. Širina 95-odstotnega intervala zaupanja pri večmesečni višini padavin na posamezni postaji znaša okoli štiri odstotne točke na desetletje, pri dnevni ekstremi pa okoli sedem odstotnih točk na desetletje.

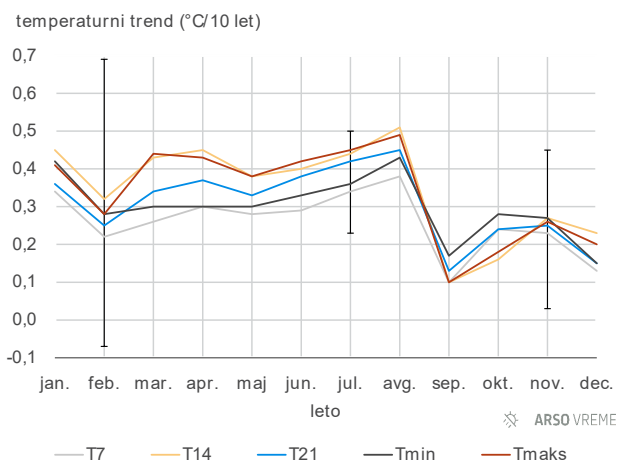
Razprava

Temperatura zraka

Kakovost rezultatov homogenizacije s HOMER-jem je odvisna od kakovosti vhodnih podatkov, podnebne spremenljivke in izkušenosti strokovnjaka, ki izvaja

homogenizacijo. Že v projektu PSS se je pokazalo, da so lahko razlike pri temperaturi zraka med posameznimi strokovnjaki znatne, a popravki so praviloma istega predznaka in podobne velikosti, zato so homogenizirani nizi med seboj dokaj skladni (Vertačnik in sod., 2015). V projektu HDS je celotno homogenizacijo temperature in padavin opravil le en strokovnjak, zato rezultatov ne moremo ovrednotiti na enak način kot pri projektu PSS.

Rezultati projekta HDS kažejo na dobro ujemanje v medletnem poteku linearnega trenda temperature na ravni slovenskih postaj (slika 2422). Trenda najvišje temperature in temperature ob 14. uri se izjemno dobro ujemata in sta večji del leta višja od trenda ostalih spremenljivk. Nekoliko slabše je ujemanje med ostalimi tremi spremenljivkami, ki so bolj vezane na nočno ohlajanje. Zanimivo se najmanjši trend večji del leta kaže pri temperaturi ob 7. uri. V povprečju se trend najnižje temperature celo bolj sklada s temperaturo ob 21. kakor ob 7. uri. Statistična negotovost trenda (polovica širine 95-odstotnega intervala zaupanja) je za skoraj vse kombinacije mesecev in spremenljivk v razponu od 0,13 °C/desetletje do 0,33 °C/desetletje. V splošnem je najmanjša statistična negotovost trenda od aprila do oktobra, posebej velika pa je februarja. Med spremenljivkami je nekoliko večja negotovost trenda pri Tmaks in T14 (okoli 0,28 °C/desetletje) kot pri ostalih spremenljivkah (okoli 0,22 °C/desetletje). Za januar in mesece od marca do avgusta je trend



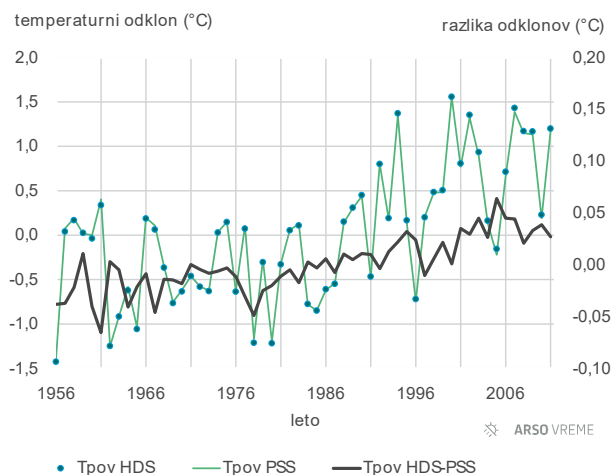
Slika 24. Linearni trend temperature zraka po mesecih ob različnih urah dneva in ekstremnih vrednosti za obdobje 1950–2020. Prikazane vrednosti so izračunane z metodo Theila in Sena iz povprečja homogeniziranih nizov slovenskih postaj. Za tri podatkovne točke (T21 novembra, Tmin julija in Tmaks februarja) je prikazan tudi 95-odstotni interval zaupanja.

Figure 24. Monthly values of linear trend in air temperature at different hours and for daily temperature extremes for the period 1950–2020. The plotted values are calculated using Theil-Sen method on arithmetic means of homogenised Slovenian time series. For three data points (T21 November, Tmin July, Tmaks February) the 95 % confidence interval is also shown.

za vse spremenljivke statistično značilen, za februar neznačilen, za zadnje mesece leta pa pri nekaterih spremenljivkah značilen, pri drugih ne.

Linearni trend (°C/desetletje) na letni ravni je po spremenljivkah T7, T14, T21, Tmin in Tmaks naslednji: 0,27 / 0,36 / 0,32 / 0,31 / 0,37. Statistična negotovost trenda (polovica širine 95-odstotnega intervala zaupanja) je na letni ravni primerljiva z razlikami med spremenljivkami in znaša 0,08–0,11 °C na desetletje. Na letni ravni je statistično značilna razlika v trendu le med temperaturo ob 7. uri in temperaturo ob 14. uri oziroma najvišjo temperaturo.

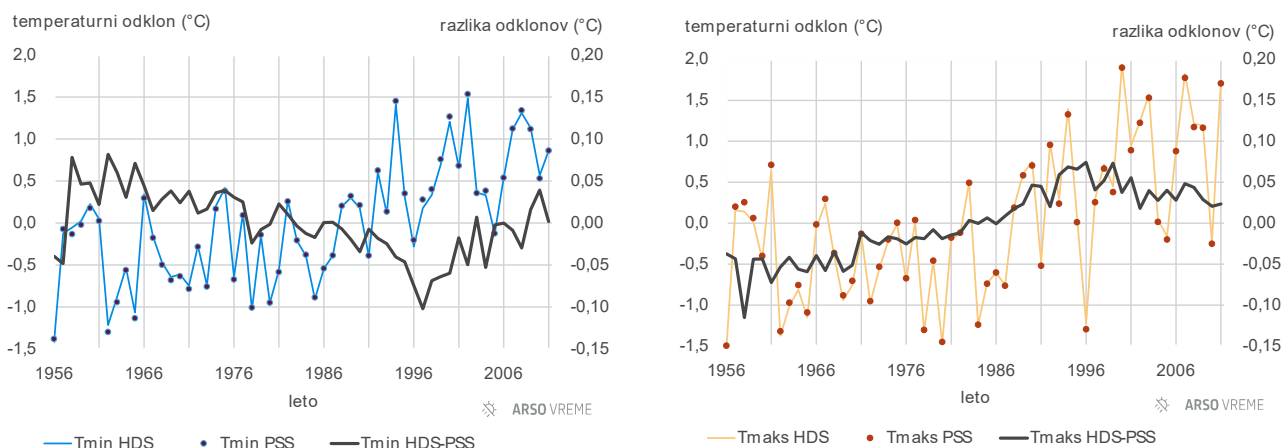
Osnovna primerjava rezultatov projekta HDS in PSS kaže na dobro ujemanje časovnih nizov na ravni Slovenije in majhne razlike v trendih (sliki 2523 in 26). Trend letne povprečne temperature zraka na podlagi 48 časovnih nizov v obdobju 1956–2011 znaša pri projektu HDS 0,30 °C/desetletje (0,18–0,41 °C/desetletje pri petodstotni stopnji zaupanja) in pri projektu PSS 0,29 °C/desetletje (0,17–0,40 °C/desetletje). Negotovost trendov je sicer za velikostni razred manjša od razlike trendov, a je trend razlik zaradi skoraj identičnega časovnega poteka statistično značilen (slika 25). Nekoliko drugačna



Slika 25. Primerjava časovnega poteka povprečja letnega odklona povprečne temperature v projektih HDS in PSS za skupno obdobje 1956–2011. V izračun je zajetih 48 časovnih nizov z istih slovenskih postaj, primerjalno obdobje je 1956–2011.

Figure 25. Time series comparison of annual anomaly of mean temperature in the HDS and PSS projects for the common period of 1956–2011 and common 48 time series of Slovenian stations. The reference period is 1956–2011.

je slika pri dnevni najnižji temperaturi zraka. Letno povprečje te spremenljivke na 36 postajah v obeh projektih kaže enak trend (0,29 °C/desetletje), a medsebojna razlika kaže drugačen trend kot pri povprečni temperaturi (slika 26, levo). Časovni potek razlike v najvišji temperaturi kaže na veliko podobnost s povprečno temperaturo, le da je trend razlike še nekoliko bolj izrazit (slika 26, desno). Absolutna vrednost trenda v najvišji temperatura znaša pri HDS

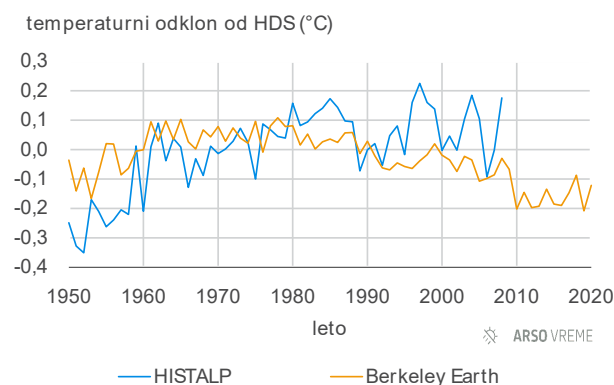
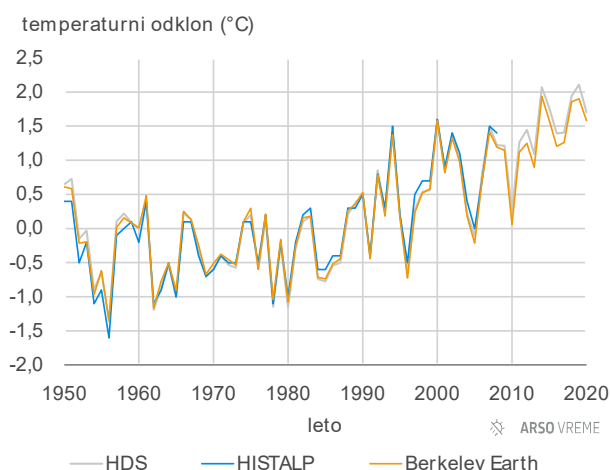


Slika 26. Primerjava časovnega poteka povprečja letnega odklona najnižje (levo) in najvišje temperature (desno) v projektih HDS in PSS za skupno obdobje 1956–2011. V izračun je zajetih 36 oziroma 48 časovnih nizov z istih slovenskih postaj, primerjalno obdobje je 1956–2011.

Figure 26. Time series comparison of annual anomaly of daily minimum temperature (left) and maximum temperature (right) in the HDS and PSS projects for the common period of 1956–2011 and common 36 or 48 time series of Slovenian stations. The reference period is 1956–2011.

0,35 °C/desetletje, pri PSS 0,33 °C/desetletje. Temperaturne rezultate projekta HDS smo primerjali tudi z mednarodnima podatkovnima zbirkama HISTALP in Berkeley Earth. HISTALP je skoraj dve desetletji trajajoč projekt zbiranja in homogenizacija dolgih podnebnih nizov s širšega območja Alp in okolice (Auer in sod., 2007). Podatkovna zbirka HISTALP vsebuje originalne in homogenizirane časovne nize temperature zraka in višine padavin z več kot sto postaj ter trajanja sončnega obsevanja in zračnega tlaka z nekaj deset postaj. Avstrijska

meteorološka služba oziroma GeoSphere Austria to podatkovno bazo uporablja tudi za spremljanje tekočih podnebnih razmer in njihovo primerjavo tudi z več kot 200-letnimi nizi podatkov. Berkeley Earth je nepridobitna organizacija, ki je leta 2013 objavila članek o gibanju temperature zraka nad kopnim v obdobju 1753–2011, in sicer z nekoliko drugačnim pristopom od takrat uveljavljenih podnebnih središč, kjer so analizirali podatke z vsega sveta (Muller in sod., 2013). Podatkovna baza Berkeley Earth glede na druge, ki zajemajo celotno svetovno kopno, zajema



Slika 27. Odklon letne povprečne temperature zraka v Sloveniji za tri podatkovne zbirke: odklon od povprečja obdobja 1950–2008 (levo) in odklon glede na HDS (desno). Za HDS je prikazana aritmetična sredina nizov slovenskih postaj, za HISTALP nižinske vrednosti mrežne točke 46° N, 15° E (https://www.zamg.ac.at/histalp/dataset/grid/one_deg.php) in za Berkeley Earth povprečje za ozemlje Slovenije (<https://berkeleyearth.org/data/>).

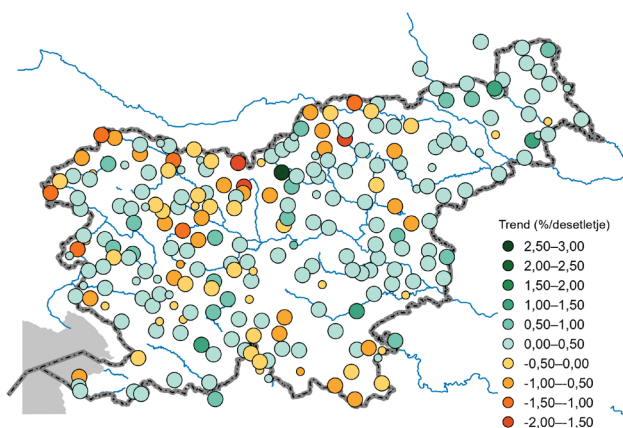
Figure 27. Annual mean air temperature anomaly in Slovenia for three datasets: anomaly from the mean of the period 1950–2008 (left) and anomaly from the HDS data (right). The HDS values are calculated as an arithmetic mean of Slovenian time series, for HISTALP the »lowland« values for 46° N, 15° E are used (https://www.zamg.ac.at/histalp/dataset/grid/one_deg.php), and for Berkeley Earth the Slovenian mean values are used (<https://berkeleyearth.org/data/>).

večjo število kopenskih postaj, tudi tiste, ki jih druga podnebna središča smatrajo za manj kakovostne ali s prekratki časovnimi nizi. V primerjavi z izračuni ostalih svetovnih središč za analiz podnebnih razmer pa rezultati Berkeley Earth ne odstopajo bistveno (<https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/>).

Na ravni Slovenije se nizi letne povprečne temperature dobro ujemajo z omenjenima mednarodnima podatkovnima zbirkama (slika 27). Linearni trend ($^{\circ}\text{C}/\text{desetletje}$) za skupno obdobje 1950–2008 je podoben: HDS 0,21; HISTALP 0,26; Berkeley Earth 0,20. Višji trend HISTALP lahko razložimo zlasti s hladnejšimi prvimi leti, malenkost nižjega pri Berkeley Earth pa z nekoliko hladnejšimi zadnjimi leti, kar se še bolj opazno nadaljuje po letu 2009 (slika 27).

Višina padavin

Primerjava z rezultati projekta PSS za skupno obdobje (1961–2011) kaže zanimivo prostorsko sliko (slika 28). Na letni ravni je za večino merilnih postaj, skupnih projektoma PSS in HDS, sicer opaziti statistično značilno različen trend, ki pa po velikosti le redkokje presega eno odstotno točko na desetletje. To je mnogo manj od statistične nezanesljivosti samega trenda, ki znaša 2–3 odstotne točke na desetletje



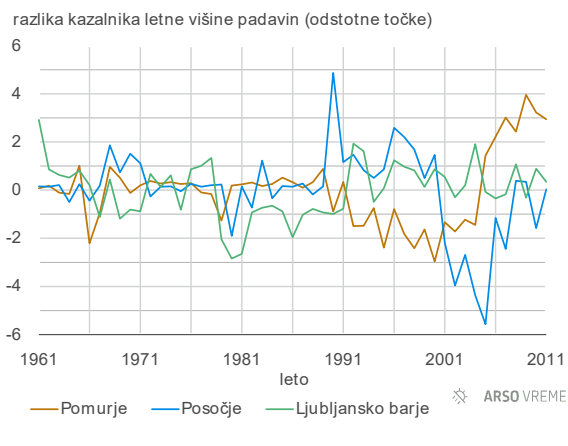
Slika 28. Linearni trend razlike kazalnika padavin homogeniziranih nizov projekta PSS in HDS v obdobju 1961–2011, izračunan z metodo Theila in Sena. Statistično značilne vrednosti so označene z večjimi krogi.

Figure 28. Linear trend of precipitation index difference between the PSS and HDS homogenised time series in the period 1961–2011, calculated using the Theil-Sen method. Statistically significant values are indicated by larger circles.

(polovica širine intervala s stopnjo zaupanja 95 %). Omenjene razlike v trendu med projektoma so posledica časovno raznoliklega poteka, z obdobji večjih in manjših razlik med podatkovnima zbirkama PSS in HDS. Pod drobnogled za ilustracijo vzemimo tri podnebno različna območja.

V regiji Posočje so največje razlike v obdobju 1990–2007, ko v posameznih letih dosežejo 4–6 odstotnih točk (slika 29), kar je še vedno za velikostni razred manj od medletnega nihanja kazalnika višine padavin pri posameznem nizu. V regiji Pomurje so največje razlike v drugem delu primerjanega obdobja, zlasti povsem ob koncu, ko presežejo dve ali tri odstotne točke v različnih smereh (slika 29). V regiji Ljubljansko barje so skrajne razlike najmanjše in v nobenem letu ne presežejo treh odstotnih točk. Korelacijski koeficient kazalnika med nizoma HDS in PSS je v vseh treh regijah zelo visok: v Pomurju in na Ljubljanskem barju 0,992, v Posočju 0,990.

Linearni trend skozi celotno presečno obdobje (1961–2011) se med HDS in PSS ne razlikuje bistveno, statistično je razlika trenda neznačilna. Razlika trenda (HDS–PSS) v odstotnih točkah na desetletje je naslednja: Pomurje 0,01, Posočje –0,04, Ljubljansko barje 0,10.



Slika 29. Razlika kazalnika letne višine padavin med HDS in PSS v treh regijah. Kazalnik je izračunan kot aritmetična sredina kazalnika na petih postaj za vsako regijo (Pomurje: Srednja Bistrica, Veržej, Murska Sobota, Kobilje, Lendava; Ljubljansko barje: Ljubljana Bežigrad, Lavrica, Črna vas, Tomišelj, Vrhnika; Posočje: Log pod Mangartom, Trenta, Soča, Lepena, Bovec). Referenčno obdobje je 1961–2011.

Figure 29. Difference of annual precipitation sum index between HDS in PSS for three regions. The precipitation sum index represents an average of five station's time series in each region (Pomurje: Srednja Bistrica, Veržej, Murska Sobota, Kobilje, Lendava; Ljubljansko barje: Ljubljana Bežigrad, Lavrica, Črna vas, Tomišelj, Vrhnika; Posočje: Log pod Mangartom, Trenta, Soča, Lepena, Bovec). The reference period is 1961–2011.

Sklepne misli

Predstavljeno delo je nadgradnja projekta Podnebna spremenljivost v Sloveniji (PSS), tako v podatkovnem kot metodološkem smislu. Poleg temperature zraka smo homogenizirali in interpolirali tudi časovne nize višine padavin, skupnega in novega snega in trajanja sončnega obsevanja. Z večjim naborom

podatkovnih nizov, daljšimi časovnimi nizi, izboljšano obdelavo podatkov in interpolacijo manjkajočih dnevni vrednosti smo izboljšali vedenje o nedavnih podnebnih spremembah v Sloveniji. Predstavljeno delo je tudi temelj izračuna podnebnih povprečij za novo 30-letno primerjalno obdobje, 1991–2020 in bodočih podnebnih analiz za ozemlje Slovenije. Nova podnebna povprečja so objavljena na spletni strani https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/statistike_1950_2020/.

Priloga

Preglednica 4. Seznam postaj s homogeniziranimi temperaturnimi nizi. Navedeni so številka postaje, ime postaje, nadmorska višina zadnje lokacije postaje (m), povprečno število let zajetih meritev (za vseh pet spremenljivk, zaokroženo na celo število; z zeleno barvo so označeni popolni časovni nizi), osnovna regija postaje in seznam dodatnih regij, v katerih nastopa temperaturni niz. Regije s približnim opisom so naslednje: 1 – gorati svet, 2 – zahodna Slovenija, 3 – mrazišče in zatišne lege na dinarski gorski pregradi, 4 – termalni pas v notranjosti Slovenije in 5 – nižine osrednje in vzhodne Slovenije. Pri nekaterih postajah je zaradi razločevanja v oklepaju zapisano ime občine.

Table 4. List of stations with homogenised temperature series. The table includes: station ID number, name of station, station's last location altitude (m), mean length of time series (across all five variables, rounded to integer value; green colour denotes time series without missing data), primary station network region and a list of additional regions where station's time series are taken into account. Station network regions with an approximate geographic description are as follows: 1 – mountains, 2 – western Slovenia, 3 – frost hollows and »windless« areas of the Dinaric mountain range, 4 – thermal belt in the interior of Slovenia, 5 – lowlands of central and eastern Slovenia. For some stations there is municipality provided in brackets.

št. postaje	ime postaje	nad-morska višina	število let meritev	os-nov-na regija	nas-topa tudi v regi-jah
3	Krvavec	1742	57	1	
6	Volčji Potok	342	28	5	
8	Letališče JP Ljubljana	362	70	5	3,4
22	Zgornja Sorica	846	43	4	1,2
26	Preddvor	485	45	4	
38	Planina pod Golico	957	70	1	2,4
48	Kredarica	2513	66	1	
51	Rateče	864	71	2	1
58	Bovec	441	56	2	
65	Krn	918	27	1	2
76	Vojsko	1065	62	1	2,4
85	Čepovan	604	34	2	1,3

št. postaje	ime postaje	nad-morska višina	število let meritev	os-nov-na regija	nas-topa tudi v regi-jah
92	Vedrijan	232	35	2	
96	Nova Gorica	112	31	2	
97	Bilje	55	70	2	
106	Komen na Krasu	269	31	2	
107	Tomaj	320	64	2	
121	Kubed	234	41	2	
136	Postojna	538	71	3	1,2
143	Nanos Abram	896	35	4	1
147	Logatec	485	44	3	
150	Rakitna	787	32	3	
158	Nova vas (Bloke)	718	65	3	
164	Babno Polje	755	58	3	
174	Kočevje	468	69	3	5
179	Rovte	704	29	4	1,2
189	Topol pri Medvodah	692	69	4	3,5
192	Ljubljana Bežigrad	299	71	5	3
197	Vrhnika	370	45	3	4
203	Mali Lipoglav	525	35	4	3
205	Sevno	556	59	4	5
206	Litija	266	31	5	3,4
214	Vače	513	29	4	
222	Radeče	207	21	5	
223	Planina pri Sevnici	575	41	4	1
231	Bizeljsko	175	67	5	
241	Malkovec	397	50	4	
249	Novo mesto	220	70	5	4
257	Dobliče	157	70	5	3
268	Celje Medlog	242	69	5	
274	Mozirje	340	32	5	4
276	Gornji Grad	438	31	5	3
287	Ravne na Koroškem	396	41	5	
296	Velenje	388	51	4	
301	Slovenske Konjice	314	66	4	5
307	Gaj (Prager-sko)	248	36	5	
309	Starše	238	57	5	4
311	Letališče ER Maribor	264	44	5	
318	Radlje ob Dravi	355	36	5	

št. postaje	ime postaje	nad-morska višina	število let meritev	os-nov-na regija	nas-topa tudi v regi-jah
321	Šmartno pri Slovenj Gradcu	444	70	5	
331	Jareninski Vrh	280	47	5	4
333	Kremberk	358	31	4	5
336	Gornja Radgona	232	66	5	
338	Biserjane	205	31	5	
348	Jeruzalem	334	70	4	5
355	Rakičan	187	71	5	
359	Šalovci	308	68	5	
360	Koper	56	52	2	
403	Lesce	509	65	4	2,3,5
432	Metlika	165	38	5	
437	Vogel	1515	65	1	
452	Lisca	947	36	1	4,5
461	Rogla	1495	37	1	
464	Letališče Portorož	2	57	2	
482	Bohinjska Češnjica	596	67	2	4
510	Zgornje Jezersko	894	39	3	
553	Rudno polje	1344	33	3	1
580	Miklavž na Gorjancih	959	35	1	
581	Škocjan (Divača)	420	38	2	3
622	Rogaška Slatina	289	52	5	4
623	Koseze (Ilirska Bistrica)	415	61	3	2
654	Trebnje	303	28	5	3
749	Letališče Cerklje ob Krki	154	56	5	
750	Boršt pri Gorenji vasi	564	28	3	
771	Lendava	159	64	5	
781	Grosuplje	350	33	3	4
786	Ivanjковci	225	38	5	4
816	Podnanos	153	62	2	
828	Volče (Tolmin)	188	40	2	
829	Limovce	673	23	4	
836	Maribor Vrbanski plato	279	71	5	
861	Ptuj	222	49	4	

št. postaje	ime postaje	nad-morska višina	število let meritev	os-novna regija
1116601	Fürstenfeld	271	70	5
1118900	Deutschlandsberg (Lonč)	353	28	5
1119000	Leibnitz (Lipnica)	275	31	5
1119204	Bad Gleichenberg	269	66	5
1120020	Villacher Alpe (Dobrač)	2140	71	1
1120400	St. Michael ob Bleiburg (Šmihel pri Pliberku)	500	30	5
1120500	Sankt Paul im Lavanttal (Šentpavel v Labotski dolini)	384	32	5
1120600	Wiel	928	37	1
1120901	Bad Radkersburg (Radgona)	208	26	5
1121300	Bad Eisenkappel (Železna Kapla)	623	43	5
1402001	Abrami	85	35	2
1402003	Bosiljevo	207	38	5
1402010	Karlovac	110	70	5
1402023	Puntijarka	988	39	1
1402030	Varaždin	167	70	5
1402034	Zagreb Grič	157	71	5

Preglednica 5. Seznam postaj s homogeniziranimi padavinskimi nizi. Navedeni so številka postaje, ime postaje, nadmorska višina zadnje lokacije postaje (m) in število let zajetih meritev (zaokroženo na celo število; z zeleno barvo so označeni popolni časovni nizi).

Table 5. List of stations with homogenised precipitation series. The table includes: station ID number, name of station, station's last location altitude (m), mean length of time series (rounded to integer value; green colour denote time series without missing data).

št. postaje	ime postaje	nadmos-ka višina	število let meritev
1	Črnivec	848	54
2	Kamniška Bistrica	615	60
3	Krvavec	1742	45
4	Ambrož pod Krvavcem	977	57
5	Cerklje na Gorenjskem	420	40
8	Letališče JP Ljubljana	362	68
11	Naklo	403	59
12	Zgornja Besnica	472	60

št. postaje	ime postaje	nadmos- ka višina	število let meritev
13	Knape	428	71
14	Zgornje Bitnje	378	49
15	Škofja Loka	367	71
16	Poljane (Škofja Loka)	385	69
18	Leskovica	793	62
20	Žiri	498	71
21	Davča	987	71
22	Zgornja Sorica	839	60
23	Železniki	476	68
25	Dražgoše	857	65
26	Preddvor	485	62
27	Zgornje Jezersko	876	62
28	Podljubelj	680	71
29	Tržič	526	67
30	Jelendol	760	69
33	Breg (Žirovnica)	543	70
35	Javorniški Rovt	939	64
38	Planina pod Golico	957	67
40	Zgornja Radovna	755	66
41	Mrzli Studenec	1220	44
44	Bohinjska Bistrica	507	69
48	Kredarica	2513	66
49	Mojstrana	660	53
50	Kranjska Gora	802	71
51	Rateče	864	71
53	Log pod Mangartom	648	68
55	Trenta	622	58
56	Soča	485	69
57	Lepena	480	46
58	Bovec	441	59
59	Plužna	360	36
60	Žaga	353	55
61	Breginjš	546	49
62	Livek	695	52
63	Kobarid	240	71
68	Kneške Ravne	739	68
69	Rut	695	66
70	Podbrdo	503	65
72	Bukovo	706	71
75	Šebreljski Vrh	1066	63
76	Vojsko (Idrija)	1065	63
78	Mrzla Rupa	907	58
79	Idrijska Bela	420	41
81	Črni Vrh (Idrija)	688	70
83	Otlica	826	69
84	Kal na Kanalom	688	59
85	Čepovan	593	40
86	Lokve	946	71
87	Trnovo	789	44
89	Morsko	163	69

št. postaje	ime postaje	nadmos- ka višina	število let meritev
90	Čolnica	488	59
91	Plave	86	67
92	Vedrijan	241	60
96	Nova Gorica	112	31
97	Bilje	55	59
98	Zalošče	75	70
99	Šempas	85	71
101	Vipava	104	43
104	Opatje selo	165	65
105	Novelo	353	42
106	Komen	289	37
107	Tomaj	320	70
109	Senožeče	565	47
111	Kozina	484	71
116	Strunjan	30	66
118	Seča	2	66
122	Movraž	208	65
123	Rakitovec	504	71
127	Podgrad (Ilirska Bistrica)	596	63
128	Zabiče	440	43
132	Mašun	1022	36
133	Juršče	700	65
135	Slavina	545	45
136	Postojna	533	71
137	Ravbarkomanda	613	50
138	Planina (Postojna)	462	57
139	Bukovje	579	41
141	Razdrto	577	60
143	Nanos Abram	896	40
144	Podkraj (Ajdovščina)	796	67
145	Hrušica (pri Podkraju)	872	68
146	Hotedršica	550	67
147	Logatec	485	71
148	Borovnica	305	53
149	Pokojišče	716	65
151	Rob	510	58
152	Korošče	829	51
158	Nova vas (Bloke)	720	71
160	Cerknica	569	70
162	Šmarata	579	60
164	Babno Polje	755	59
167	Hrib - Loški Potok	827	71
168	Sodražica	542	68
169	Prigorica	484	69
170	Podtabor	420	54
172	Novi Lazi	545	40
173	Grčarice	520	68
174	Kočevje	467	71

št. postaje	ime postaje	nadmoska višina	število let meritev
175	Trava	765	59
179	Rovte	700	60
181	Šentjošt nad Horjulom	627	71
184	Lučine	642	71
186	Črni Vrh (Dobrova - Polhov Gradec)	738	70
189	Topol pri Medvodah	662	70
192	Ljubljana Bežigrad	299	71
193	Lavrica	293	41
195	Črna vas	287	70
197	Vrhnika	326	71
198	Tomišelj	296	57
199	Želimlje	309	60
204	Prežganje	635	48
205	Sevno (Šmartno pri Litiji)	556	67
206	Litija	266	69
208	Kal pri Krmelju	509	68
210	Kum	1211	43
212	Trbovlje	455	39
213	Izlake	380	42
215	Moravče	408	60
216	Zgornje Loke	394	71
217	Golice	665	60
221	Laško	222	71
223	Planina pri Sevnici	575	42
224	Ložice	565	67
225	Žusem	623	60
226	Podčetrtek	254	60
227	Vrnska Gorca	213	41
228	Podsreda	245	71
229	Sromlje	282	70
231	Bizeljsko	175	70
233	Kapele	220	49
235	Brod v Podbočju	150	70
236	Smednik	186	68
237	Brege	156	61
238	Veliki Trn	416	69
239	Sevnica	179	70
240	Telče	535	37
241	Malkovec	397	58
242	Hrastovica	244	71
244	Fužina	243	71
246	Dvor pri Polhovem Gradcu	206	70
248	Vinji Vrh	218	60
249	Novo mesto	220	71
251	Kočevske Poljane	188	62
253	Semič	241	60

št. postaje	ime postaje	nadmoska višina	število let meritev
255	Cerovec pri Črešnjevcu	191	71
256	Otok (Metlika)	138	44
257	Dobliče	157	71
258	Gorenjci pri Adlešičih	232	71
259	Sinji Vrh	365	71
260	Predgrad	375	70
262	Žetale	342	59
263	Sveti Florijan	317	41
266	Šentjur	266	58
268	Medlog (Celje)	242	71
269	Višnja vas	286	71
271	Gomilsko	293	70
272	Jeronim	760	69
274	Mozirje	340	59
275	Radegunda	794	64
276	Gornji Grad	428	70
277	Ljubno ob Savinji	410	41
278	Luče (Luče)	513	70
279	Solčava	639	60
280	Logarska Dolina	776	59
282	Koprivna	1112	63
283	Topla	675	44
284	Podpeca	942	70
285	Mežica	469	56
286	Strojna	940	71
287	Ravne na Koroškem	396	48
288	Kotlje	450	64
290	Vernerica	1105	47
291	Zgornji Razbor	864	64
292	Bele Vode	1026	71
293	Topolšica	390	42
296	Velenje	388	53
298	Vitanje	478	42
299	Oplotnica	477	65
301	Slovenske Konjice	314	69
302	Zbelovska gora	275	64
303	Poljčane	320	44
304	Črešnjevec	294	71
308	Fram	320	67
309	Starše	238	68
311	Letališče ER Maribor	264	44
313	Ruše	303	53
314	Lovrenc na Pohorju	420	57
315	Sveti Duh na Ostrem vrhu	870	50
316	Remšnik	660	65
317	Kozji Vrh	332	59
319	Sveti Primož nad Muto	803	58

št. postaje	ime postaje	nadmoska višina	število let meritev
320	Dravograd	384	70
321	Šmartno pri Slovenj Gradcu	444	71
322	Mislinja	623	69
323	Gradišče (Slovenj Gradec)	786	67
324	Ribnica na Pohorju	583	69
325	Lukanja	870	59
330	Šentilj v Slovenskih goricah	306	70
331	Jareninski Vrh	280	68
333	Zgornja Ščavnica	358	43
334	Gornja Radgona	232	48
335	Cankova	212	70
336	Radenci	198	33
339	Kadrenci	302	60
341	Sakušak	321	47
343	Ptuj	240	60
345	Cirkulane	241	71
347	Ormož	213	45
348	Jeruzalem	334	63
349	Podgradje	272	40
350	Veržej	182	70
351	Srednja Bistrica	171	61
352	Lendava	190	71
353	Kobilje	185	70
354	Vučja Gomila	225	57
355	Rakičan (Murska Sobota)	187	71
356	Kančevci	343	71
357	Mačkovci	274	58
358	Martinje	380	63
359	Šalovci	308	69
360	Koper	56	40
403	Lesce	509	58
432	Metlika	165	59
433	Bled	482	51
434	Cerkno	354	64
437	Vogel	1515	66
442	Grm (Ivančna Gorica)	330	55
452	Lisca	947	37
464	Letališče Portorož	2	59
475	Dekani	80	44
482	Bohinjska Češnjica	596	71
483	Belšinja vas	289	67
490	Ptujska Gora	319	52
493	Gorenje Blato	315	58
498	Iskrba	532	53
552	Dolenje (Ajdovščina)	86	29
559	Idrija	330	51
622	Rogaška Slatina	289	46

št. postaje	ime postaje	nadmoska višina	število let meritev
623	Koseze (Ilirska Bistrica)	415	67
656	Kranj	392	53
670	Podgorje (Apače)	230	60
749	Letališče Cerklje ob Krki	154	58
751	Domžale	296	45
784	Podraga	163	70
822	Šmarje pri Jelšah	251	60
828	Volče (Tolmin)	188	42
831	Cerkniško jezero	586	55
836	Maribor Vrbanski plato	279	61
1119021	Wagna (Leibnitz)	268	57
1119204	Bad Gleichenberg	269	67
1120902	Bad Radkersburg	210	43
1121100	Loibl Tunnel	1098	49
1121300	Bad Eisenkappel	623	47
1401013	Klana	564	56
1401027	Prezid	764	55
1401032	Štrigova	202	50
1401033	Tršče	820	36
1401037	Vivodina	316	53
1401039	Zamost	308	38
1402019	Parg	863	44

Način izbora primerjalnih postaj pri homogenizaciji temperature zraka

HOMER omogoča tri načine izbora primerjalnih oziroma referenčnih nizov pri homogenizaciji: nize vseh postaj, nize najbližjih postaj in najbolj podobne nize (z najvišjim korelacijskim koeficientom). Homogenizacija in prostorska interpolacija temeljita na analizi variance razlik med primerjalnim in homogeniziranim nizom, brez upoštevanja prostorske slike oziroma kovariančne strukture. To pomeni, da pri izboru vseh postaj za primerjalne postaje lahko pričakujemo, da bo končni rezultat homogenizacije prostorsko precej enotna slika, brez izrazitih regionalnih razlik.

Geografsko najbližje postaje so pogosto tudi najbolj korelirane, a so časovni nizi prostorsko precej neenakomerno porazdeljeni, kar pripelje do naslednje težave. V zgodnjih letih obravnavanega obdobja (začetek 50. let 20. stoletja) je nizov s podatki relativno malo, kasneje pa mnogo več, zato se lahko zgodi, da zadovoljivo število primerjalnih postaj v začetnem obdobju pripelje do pretiranega števila primerjalnih postaj v obdobju največje gostote meritev (učinek je podoben kot pri izboru vseh postaj za primerjalne).

Tudi korelacijski način izbora primerjalnih postaj ni brez slabosti. Korelacijski koeficient med nizoma dveh postaj je izračunan na letnih podatkih presečnega obdobja meritev. Presečno obdobje je lahko zelo kratko, le nekajletno, in zaradi znatne statistične negotovosti je lahko izračunan korelacijski koeficient povsem neustrezen. V izboru najbolje koreliranih postaj se tako lahko znajdejo pari zelo oddaljenih ali podnebno izrazito različnih postaj, na primer Kopra in Kočevja ali Vogla in Vrhniko (izmišljena primera). To lahko, enako kot pri prej opisanih načinih izbora, privede do prostorskega glajenja podnebnega signala oziroma dolgotrajnega trenda.

Zaradi zgoraj opisanih slabosti smo se odločili, da izbor primerjalnih postaj že na začetku zožimo na podnebno oziroma temperaturno sorodne postaje. Nize smo razvrstili v pet podnebnih regij, ki smo jih določili po temperaturni podobnosti z referenčnimi postajami: Vogel, Bilje, Nova vas (Bloke), Sevnica in Murska Sobota (slika 3 in preglednica 44). Nekaj postaj smo uvrstili v dve ali več regij, saj tako dobimo tudi bolj gladek prehod v končnih rezultatih med regijami. Regije s približnim opisom so naslednje (v oklepaju navajamo dva primera): 1 – gorati svet (Lisca, Kredarica), 2 – zahodna Slovenija (Čepovan, Letališče Portorož), 3 – mraziščne in zatišne lege na dinarski gorski pregradi (Postojna, Babno Polje), 4 – termalni pas v notranjosti Slovenije (Rovte, Jeruzalem) in 5 – nižine osrednje in vzhodne Slovenije (Ljubljana, Murska Sobota). Ustrezno smo v ta območja razvrstili tudi tuje postaje.

Regije se razlikujejo zlasti po številu pripadajočih postaj in povprečni nadmorski višini postaj, precej manj po povprečni dolžini nizov (preglednica 44). Skladno z različno nadmorsko višino in geografsko

lego se regije znatno razlikujejo po temperaturi zraka, kar prikazuje slika 3028. Regija 1 je, zaradi višje nadmorske višine, izrazito najhladnejša. Regija 2, ki zajema zlasti Primorsko, je nekoliko toplejša od regij 4 in 5. Regije 2, 3 in 5 imajo relativno velik dnevni hod, to je razliko med dnevno najvišjo in najnižjo temperaturo, regija 1 pa izrazito majhen dnevni hod. Regija 4, s postajami v termalnem pasu, je s sorazmerno toplimi jutri in zmerno toplimi popoldnevi nekje vmes.

Interpolacija dnevnih podatkov

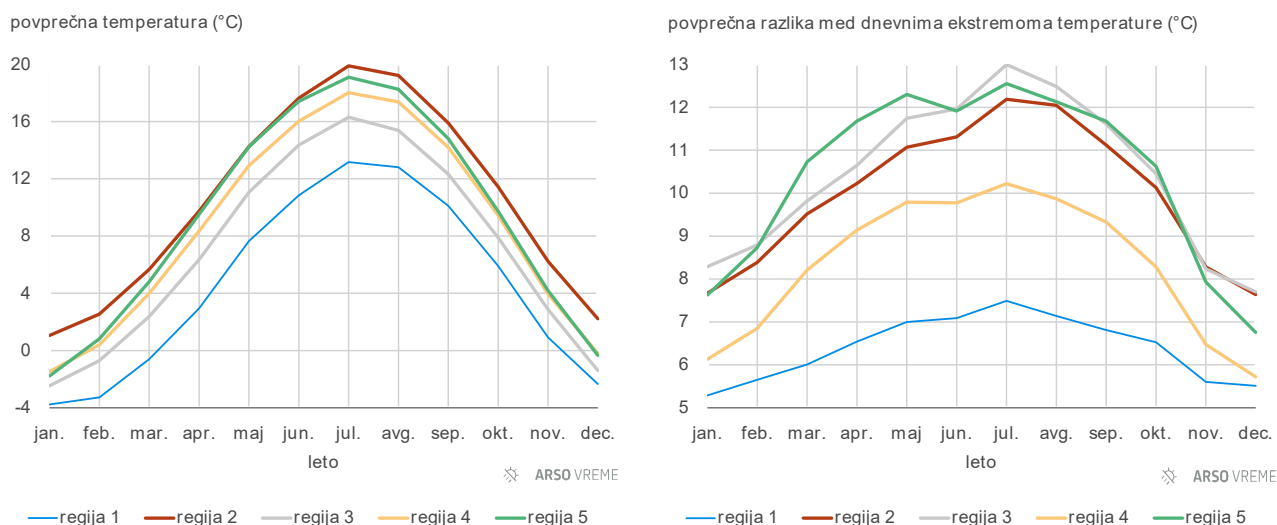
Interpolacijo temperature zraka smo izvedli na enak način kot pri dopolnitvi nizov za homogenizacijo, torej na podmnožici primerjalnih dni, ki so na primerjalnih postajah temperaturno najbolj podobni interpoliranemu dnevu. Upoštevali smo le primerjalne postaje z zadostnim časovnim prekrivanjem niza z nizom interpolirane postaje (vsaj 150 dni znotraj trimesečnega časovnega okna v letu). Začetno vrednost dolžine primerjalnega obdobja smo nastavili na pet let. To primerjalno obdobje je, če se da, usrediščeno glede na interpolirani dan in po potrebi ustrezno raztegnjeno v obe časovni smeri, dokler ne zadosti pogoju 150 dni skupnih meritev.

Izbor primerjalnih postaj smo razdelili v dva koraka. Najprej smo poiskali geografsko najbližje postaje, pri čemer smo upoštevali tudi nadmorsko višino; 300 km horizontalne razdalje med postajama smo pripisali enak učinek kot 1000 metrom razlike v nadmorski višini. V drugem koraku smo glede na razpoložljivost meritev obdržali dve najbližji postaji in tri postaje z največjim korelacijskim koeficientom med pripadajočima nizoma temperature. Nato smo poiskali temperaturno najbolj podobne dneve v primerjalnem obdobju. Upoštevali smo časovno-prostorsko sliko

Preglednica 6. Nekaj osnovnih značilnosti regij: število postaj, povprečna nadmorska višina osnovnega nabora postaj (m) in zaokrožena povprečna dolžina pripadajočih nizov (leta)

Table 6. Basic properties of station network regions: number of stations, mean altitude of stations (m), and mean time series length (rounded to full years)

številka regije	geografski opis regije	število postaj (osnovni / razširjeni nabor)	povprečna nadmorska višina osnovnega nabora	povprečna dolžina nizov osnovnega nabora
1	gorati svet	12 (20)	1347	50
2	zahodna Slovenija	16 (24)	289	49
3	mraziščne in zatišne lege na dinarski gorski pregradi	12 (23)	641	48
4	termalni pas v notranjosti Slovenije	17 (31)	529	46
5	nižine osrednje in vzhodne Slovenije	41 (50)	276	50



Slika 30. Povprečni sezonski hod temperature zraka (levo) in dnevne amplitude temperature zraka (desno) v obdobju 1950–2020 po regijah na podlagi homogeniziranih in interpoliranih podatkov

Figure 30. Mean seasonal variation (left) and diurnal variation (maximum–minimum temperature, right) of air temperature in the period of 1950–2020 for station network regions, based on homogenised and interpolated data

temperature za interpolirano spremenljivko in dve dodatni temperaturni spremenljivki (na primer pri interpolaciji temperature ob 7. uri smo pri izboru dni upoštevali tudi vrednosti najnižje temperature istega dne in temperature ob 21. uri dan prej). Na podlagi teh vrednosti smo izračunali nekakšno evklidsko razdaljo med interpoliranim in primerjalnim dnevom. Razdalje smo razvrstili po velikosti in za nadaljnjo obravnavo izbrali n_{pd} dni z najmanjšo evklidsko razdaljo:

$$n_{pd} = \text{int}(n_v^{0,7}),$$

kjer je int zaokrožitev na celo število in n_v število vseh dni z izračunano evklidsko razdaljo. Eksponent 0,7 smo določili empirično.

V interpolacijo smo vključili tri postaje z največjim korelacijskim koeficientom med pripadajočim nizom in nizom interpolirane postaje. Za vsak par interpolirana-primerjalna postaja smo na podlagi meritev v izbranih dneh izračunali regresijsko premico in nato oceno vrednosti interpolirane spremenljivke na interpolirani dan. To regresijsko oceno smo popravili, tako da je bila varianca vseh izračunanih regresijskih ocen enaka varianci izmerjenih vrednosti. Iz regresijskih ocen za interpolirani dan smo z linearno interpolacijo izračunali končno interpolirano vrednost, pri čemer smo izločili morebitne zelo izstopajoče regresijske ocene. Uteži v interpolaciji so bile obratno sorazmerne z varianco ostankov regresije.

Dnevno višino padavin smo interpolirali na drug način. Sprva smo na podlagi oddaljenosti postaj (z upoštevanjem nadmorske višine) izbrali 20 potencialno primerjalnih postaj. Izmed teh smo poiskali štiri (oziroma vsaj dve) z največjim

korelacijskim koeficientom med nizoma primerjalne in interpolirane postaje. Upoštevali smo podatke skozi vsa leta celotnega razpona obdobja 1950–2020, a v sezonsko določenem časovnem oknu. Leto smo razdelili na 36 dekad dolžine večinoma deset dni in v časovno okno zajeli dekada z interpoliranim dnevom ter predhodno in naslednjo dekada. Primerjalna in interpolirana postaja sta morali imeti vsaj 200 dni skupnih meritev znotraj opisanega primerjalnega obdobja. Vrednosti dnevne višine padavin na primerjalni postaji smo normalizirali na interpolirano postajo – pomnožili smo jih z razmerjem vsote padavin na interpolirani in primerjalni postaji. Uteži pri interpolaciji smo določili s korelacijskim koeficientom r_{xy} med referenčno postajo x in interpolirano postajo y:

$$w_x \propto \frac{r_{xy}^2}{1-r_{xy}^2},$$

kar ustreza ostanku regresije pri interpolaciji temperature.

Sledilo je prilagajanje interpoliranih vrednosti na porazdelitev izmerjenih vrednosti, in sicer po velikostnih razredih. Z empirično enačbo smo najprej določili število razredov n_r :

$$n_r = \text{int}\left(\sqrt{\frac{n_{pad}}{10}}\right)$$

kjer je n_{pad} število padavinskih dni, int pa zaokrožitev vrednosti na celo število. Če je po tej enačbi dobljeni r enak 0, ga popravimo na 1.

Interpolirane vrednosti smo razvrstili po velikosti in jih razvrstili v razrede tako, da so imeli razredi približno

enake vsote vrednosti. Tako je bil razred najšibkejših padavin mnogo številčnejši od razreda najmočnejših padavin. Za vsak razred smo izračunali korekcijski faktor, to je razmerje med vsoto izmerjenih in interpoliranih vrednosti. S tem faktorjem smo množili interpolirane vrednosti in dobili končno interpolirano vrednost dnevne višine padavin.

Viri

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Nieplová, E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region HISTALP. *International Journal of Climatology*, 27, 17–46, DOI: 10.1002/joc.1377.

Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., Böhm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Dubuisson, B., Stepanek, P., 2013: HOMER : a homogenization software – methods and applications. *Időjárás, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, Vol. 117, No. 1, January–March 2013, str. 47–67.

Muller, R., Rohde, R., Jacobsen, R., Muller, E., Wickham, C., 2013. A New Estimate of the Average Earth Surface Land Temperature Spanning 1753 to 2011. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 1:1, DOI: 10.4172/2327-4581.1000101.

Nadbath, M., 2015: Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011, 1. zvezek, *Meteorološka opazovanja I. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje*, 99. str.

Roškar, J., 2015. *Bober: Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji*. Vetrnica, 8, str. 38–53.

Venema, V. K. C., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J. A., Domonkos, P., Vertachnik, G., Szentimrey, T., Stepanek, P., Zahradnicek, P., Viarre,

J., Müller-Westermeier, G., Lakatos, M., Williams, C. N., Menne, M. J., Lindau, R., Rasol, D., Rustemeier, E., Kolokythas, K., Marinova, T., Andresen, L., Acquaotta, F., Fratianni, S., Cheval, S., Klancar, M., Brunetti, M., Gruber, C., Prohom Duran, M., Likso, T., Esteban, P., Brandsma, T., 2012: *Benchmarking homogenization algorithms for monthly data*. *Clim. Past*, 8, 89–115.

Venema, V., Trewin, B., Wang, X., Szentimrey, T., Lakatos, M., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J. A., Menne, M., Oria, C., Likeba Louamba, W. S. R., in Rasul, G., 2020: *Guidelines on homogenization*, WMO no. 1245. World Meteorological Organization Geneva, 63 str.

Vertačnik, G., Dolinar, M., Bertalanič, R., Klančar, M., Dvoršek, D., Nadbath, M., 2015a: *Ensemble homogenization of Slovenian monthly air temperature series*. *International Journal of Climatology*, Volume 35, 13, str. 4015–4026.

Vertačnik, G., Vičar, Z., Bertalanič, R., 2015b: *Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011, 2. zvezek: Kontrola in homogenizacija podnebnih podatkov*. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, 53 str.

Zahvala

Za izdelavo nekaterih slik se zahvaljujem Renatu Bertalaniču in Mateji Nadbath z oddelka za podnebne analize in storitve, ARSO. Za izračun mnogih statistik se zahvaljujem Anžetu Medvedu, za lekturo angleških napisov k slikam in preglednicam pa Živi Vlahovič z istega oddelka. Renatu Bertalaniču, Mateji Nadbath, Anžetu Medvedu, Damijani Gartner in neimenovanemu recenzentu se zahvaljujem za pregled besedila, odkrite napake in koristne pripombe, ki so pripomogli k izboljšanju besedila. Sodelavcem oddelka za kontrolo podatkov se zahvaljujem za grafična orodja, ki so izboljšala kontrolo podatkov, in vse drugo delo, ki je pripomoglo k projektu HDS. Meteorološkima službama Avstrije (ZAMG/GeoSphere) in Hrvaške (DHMZ) se zahvaljujem za posredovane podatke merilnih postaj, ki so zlasti na obmejnih območjih izboljšali kakovost končnih rezultatov.

