



2

PODNEBNA SPREMENLJIVOST
SLOVENIJE V OBDOBJU 1961–2011

KONTROLA IN
HOMOGENIZACIJA
PODNEBNIH PODATKOV

Avtorji:
Gregor Vertačnik, Zorko Vičar, Renato Bertalanič

2

PODNEBNA SPREMENLJIVOST
SLOVENIJE V OBDOBJU 1961–2011

KONTROLA IN HOMOGENIZACIJA PODNEBNIHPODATKOV

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

551.583.1

VERTAČNIK, Gregor

Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. 2, Kontrola in homogenizacija podnebnih podatkov / avtorji Gregor Vertačnik, Zorko Vičar, Renato Bertalanič ; [sodelavci Urška Bajec ... et al.]. - Ljubljana : Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, 2015

ISBN 978-961-6024-64-8
1. Vičar, Zorko 2. Bertalanič, Renato
284071936



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE

KAZALO

| | | | |
|--|----|---|----|
| BESEDA DIREKTORJA | 6 | HOMOGENIZACIJA PODNEBNIH PODATKOV V PROJEKTU PODNEBNA SPREMENLJIVOST SLOVENIJE | 42 |
| UVOD | 7 | Priprava vhodnih podatkov | 42 |
| UVODNI POVZETEK | 8 | Priprava vhodnih podatkov trajanja sončnega obsevanja | 42 |
| KONTROLA PODATKOV V KLIMATOLOGIJI | 10 | Programsko orodje HOMER | 46 |
| Priporočila Svetovne meteorološke organizacije | 10 | Skupinska homogenizacija | 48 |
| Razvoj operativne kontrole v državni meteorološki službi | 11 | Statistika odkritih nehomogenosti in homogenizacijskih popravkov | 51 |
| Sodobna kontrola podatkov | 13 | Temperatura zraka | 52 |
| Sodelovanje s tujino v okviru projekta Podnebna spremenljivost Slovenije | 17 | Višina padavin | 56 |
| Kakovost slovenskih meteoroloških podatkov glede na tujino | 17 | Višina novega snega in snežne odeje | 58 |
| Sodobne metode kontrole podatkov v strokovni literaturi | 17 | Trajanje sončnega obsevanja | 61 |
| KONTROLA PODATKOV V PROJEKTU PODNEBNA SPREMENLJIVOST SLOVENIJE | 20 | Referenčna evapotranspiracija | 64 |
| Kontrola višine padavin, novega snega in snežne odeje | 20 | Zračni tlak | 65 |
| Prostorska kontrola višine padavin | 20 | Odras homogenizacije na vrednosti spremenljivk na državni ravni | 66 |
| Kontrola višine novega snega in snežne odeje ter skladnosti z višino padavin | 20 | Temperatura zraka | 67 |
| Kontrola temperature zraka | 23 | Višina padavin | 70 |
| Medsebojna skladnost različnih temperaturnih spremenljivk | 23 | Višina novega snega in snežne odeje | 72 |
| Prostorska kontrola temperature zraka | 24 | Trajanje sončnega obsevanja | 75 |
| Kontrola hitrosti in smeri vetra | 30 | Referenčna evapotranspiracija | 77 |
| Kontrola gostote toka globalnega in difuznega sevanja | 30 | Zračni tlak | 79 |
| Kontrola trajanja sončnega obsevanja | 32 | Skladnost homogeniziranih nizov med strokovnjaki | 80 |
| Kontrola zračnega tlaka | 34 | Temperatura zraka | 81 |
| HOMOGENIZACIJA PODNEBNIH PODATKOV | 36 | Višina padavin | 84 |
| Zgodovinski pregled homogenizacije v svetu | 36 | Višina novega snega in snežne odeje | 85 |
| Zgodovinski pregled homogenizacije v Sloveniji | 38 | Trajanje sončnega obsevanja | 85 |
| Sodobne metode homogenizacije podnebnih podatkov | 39 | Ocena vpliva izbire primerjalnih postaj na izračunane trende | 86 |
| | | Zanesljivost homogeniziranih podatkov in izračunanih trendov | 87 |
| | | Temperatura zraka | 87 |
| | | Višina padavin | 88 |
| | | Višina novega snega in snežne odeje | 89 |
| | | Trajanje sončnega obsevanja | 89 |
| | | Referenčna evapotranspiracija | 89 |
| | | Zračni tlak | 90 |
| | | VIRI IN LITERATURA | 91 |
| | | PRILOGA | 94 |
| | | Matematični opis kontrole podatkov v projektu Podnebna spremenljivost Slovenije | 94 |
| | | Kontrola višine padavin, novega snega in snežne odeje | 94 |
| | | Samodejna kontrola prostorske skladnosti izmerkov temperature zraka | 95 |
| | | Preračun podatkov o trajanju sončnega obsevanja na matematično obzorje | 99 |

BESEDA DIREKTORJA



Spoštovani,

Agencija RS za okolje spremlja in analizira stanje podnebja v Sloveniji. Podnebje vpliva na procese v okolju in na mnoga področja človekove dejavnosti. Spreminjanje je splošna značilnost podnebja, vendar je hitrost spreminjanja v zadnjem stoletju izjemna, v zgodovini Zemlje poznamo le nekaj podobnih primerov. Med strokovnjaki ni nobenega dvoma več, da je za tako hitre spremembe odgovoren človek. Vplive že čutimo v našem vsakdanju, zato za kakršnokoli načrtovanje ukrepov potrebujemo kakovostne podatke o spreminjanju podnebja pri nas. Da bi jih zagotovili, smo na agenciji konec leta 2008 začeli obsežen projekt Podnebna spremenljivost v Sloveniji. Ugotovitve projekta želimo predstaviti najširši javnosti, zato smo izdali tri publikacije, v katerih podajamo oceno sprememb našega podnebja v zadnjih petdesetih letih, predstavljamo bogato zgodovino naših merilnih postaj ter objavljamo metodologijo kontrole in homogenizacije podatkov, ki je namenjena zainteresirani strokovni javnosti.

Na podlagi dolgoletnih meritev lahko ugotovimo, kako se podnebje v Sloveniji spreminja in kako se na njem izražajo globalne spremembe. Priprava analiz stanja podnebja je zahteven postopek. Spremembe merilnih mest in merilnih tehnik skozi zgodovino meritev lahko pomembno vplivajo na izmerjene nize podnebnih spremenljivk: bodisi

zabrišejo ali pa spodbudijo naravno ali človeško pogojeno spremenljivost podnebja. Zato mora analiza spremenljivosti podnebja vedno temeljiti na homogenih nizih, kjer so prej omenjeni umetni vplivi v čim večji meri odstranjeni.

Raziskave podnebnih sprememb na območju Slovenije so bile doslej omejene le na skromno zbirko časovnih nizov izbranih postaj. V okviru projekta pa smo izkoristili bogat arhiv meritev uradne meteorološke mreže tako, da smo s sodobnimi metodami kontrole ponovno preverili vse podatke in odstranili umetne vplive iz časovnih nizov podnebnih podatkov. Po časovno zelo zahtevni kontroli podatkov je nize homogeniziralo več naših strokovnjakov, kar je celo v svetovnem merilu edinstven pristop. Šele na tako prečiščenih nizih smo lahko analizirali spremenljivost slovenskega podnebja in ugotovili, kako se globalne podnebne spremembe izražajo na podnebnju v Sloveniji.

Kakovostni podatki so temelj za učinkovito načrtovanje ukrepov prilagajanja spremenjenim podnebnim razmeram, da se tako hitreje in učinkoviteje odzivamo na potrebe naše družbe ter prispevamo k večji varnosti in blaginji ljudi, zaščiti okolja, narave in premoženja, trajnostni oskrbi z naravnimi viri ter učinkovitejšemu gospodarstvu.

Joško Knez,
generalni direktor Agencije RS za okolje

UVOD

Agencija za okolje Republike Slovenije je leta 2008 začela z izvajanjem projekta Podnebna spremenljivost Slovenije. Projekt je potekal v štirih vsebinskih sklopih, ki so večinoma potekali zaporedoma. Prvi sklop je obsegal kontrolo podatkov, drugi homogenizacijo časovnih podatkovnih nizov skupaj z zbiranjem metapodatkov, tretji analizo časovnih nizov in četrti sintezo rezultatov. Pričujoči drugi zvezek publikacije tega projekta je namenjen predstavitvi prvega in dela drugega vsebinskega sklopa.

V postopku od merjenja meteoroloških spremenljivk do vnosa v podatkovno zbirko prihaja do različnih napak. Napaka lahko nastane že ob merjenju ali opazovanju spremenljivke, v procesu prenosa in zbiranja meritev in pri prepisu podatkov v zbirko. Čeprav je zbirka meteoroloških podatkov za končne uporabnike (uporabniška zbirka) že preverjena, je v njej še vedno precej napačnih podatkov. Metodologija sprotne kontrole podatkov se je sčasoma razvijala in prilagajala vedno bolj zmogljivim orodjem informacijske tehnologije. Predvsem v zgodnejših letih digitaliziranih podatkov (šestdeseta in sedemdeseta leta 20. stoletja) je bilo zaradi slabše računske zmogljivosti takratnih orodij spregledanih več napak. Zato smo pred nadaljnjo obdelavo podatkov ponovili kontrolo podatkov z enotnimi, modernimi metodami kontrole podatkov, ki jih danes uporabljamo tudi v operativni kontroli podatkov.

Spremenljivost podnebja v širšem pomenu opisujemo s spremenljivostjo podnebnih spremenljivk. Pri tem se moramo zavedati, da na meritve teh spremenljivk poleg vremenskega dogajanja na širšem območju vplivajo tudi

spremembe v okolici merilnega mesta (poselitev, vegetacija) in spremembe merilnih tehnik in inštrumentov. Nemalokrat so spremembe zaradi vpliva okolice in merilnih inštrumentov velikostnega reda podnebnih sprememb. Zato je ključno, da pred analizo spremenljivosti podnebnih razmer in dolgoročnega trenda podnebja preverimo ustreznost časovnih nizov podnebnih spremenljivk. Iz časovnih nizov odstranimo vpliv sprememb merilnega mesta, merilnih tehnik in inštrumentov. Temu postopku pravimo homogenizacija časovnih nizov. Homogenizirani časovni nizi tako bolje odražajo dejansko podnebno spremenljivost in dolgoročne spremembe kakor izvorni nizi.

UVODNI POVZETEK

V projektu Podnebna spremenljivost Slovenije smo kontroli in homogenizaciji podnebnih podatkov namenili veliko časa in truda, saj so kakovostni podatki temelj verodostojnih študij o podnebjju in njegovem spreminjanju.

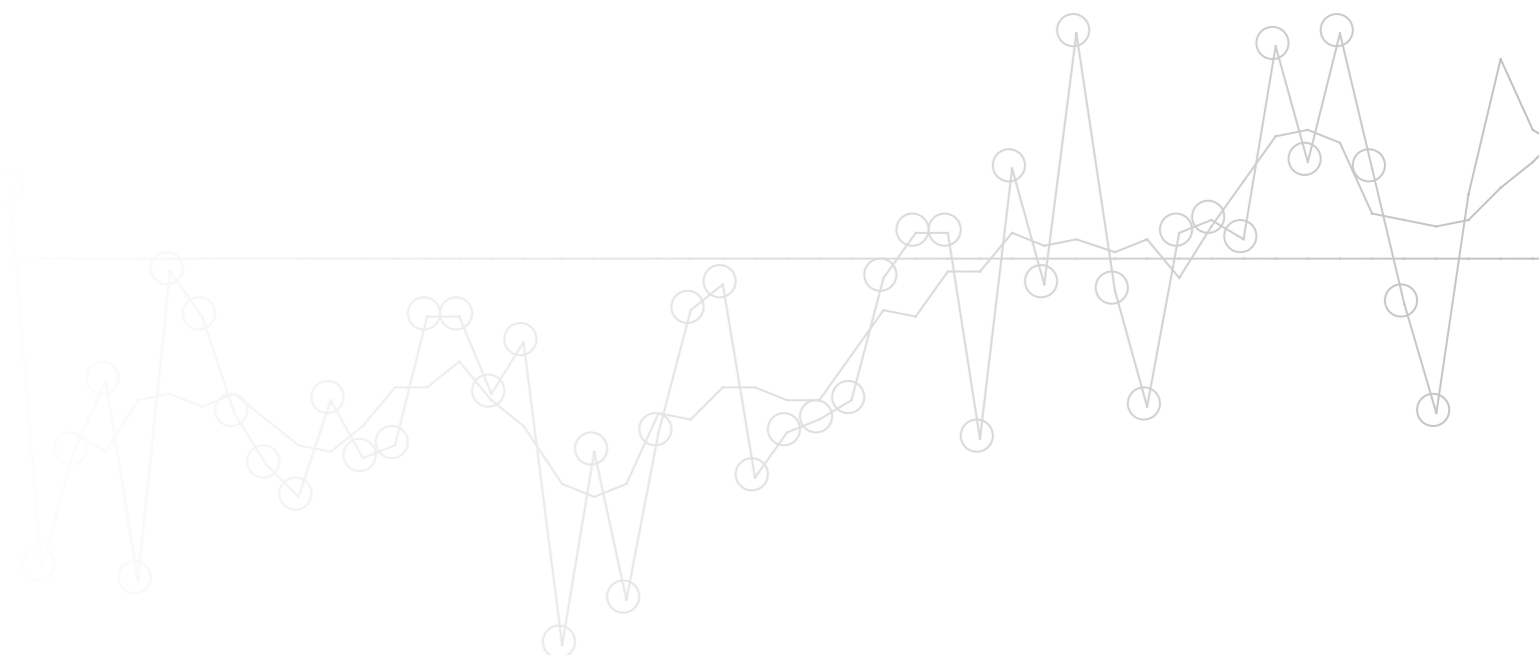
Izmerjene podatke smo podrobno preverili in skušali odkriti čim več napak, še posebej tistih, ki bi lahko pomembno vplivale na nadaljnjo delo s temi podatki. Preverjali smo skladnost med različnimi izmerjenimi podatki na postaji in skladnost meritev med podnebno primerljivimi postajami. S sodobnimi računalniškimi orodji, ki omogočajo objektivno primerjavo različnih podatkov, smo lahko mnogo učinkoviteje odkrivali napake kakor nekoč, ko marsikaterih primerjav sploh ni bilo mogoče narediti. Statistično najbolj sumljive vrednosti smo vzeli pod drobnogled – ročno smo jih primerjali z razpoložljivimi vremenskimi zapisi in umestili v prostorsko-časovno sliko vremenskega dogajanja. Pokazalo se je, da je uspešnost kontrolorja odvisna tudi od njegove detektivske žilice in seveda izkušenj – to dvojje omogoča ločiti nenavadne vremenske primere od napačnega vremenskega podatka.

Z računalniškimi orodji smo prečesali večji del zbirke meteoroloških podatkov od leta 1961 do 2009. Kar nekaj milijonov vrednosti je šlo skozi statistično sito, le majhen del tega pa je pristal pod lupo kontrolorjev. Številne sumljive vrednosti so se izkazale za pravilne, po drugi strani pa smo na posamezni paket kontrole običajno odkrili od nekaj sto do nekaj tisoč napačnih vrednosti.

Delež teh napačnih vrednosti je glede na obseg kontroliranih podatkov majhen: sega od 0,03 % pri logični kontroli temperature do 3 % pri kontroli gostote toka difuznega sevanja. Le posamezne napake so bile zelo velike, recimo za 10 °C pri temperaturi zraka, 100 mm pri višini padavin ali 500 W/m² pri gostoti toka sončnega sevanja.

Kontrolirani meteorološki podatki so bili podlaga za homogenizacijo in merilo kakovosti posameznih časovnih nizov. Skupaj z metapodatki o postajah (kje, kaj, kdaj in kako je bilo kaj izmerjeno ali opazovano) smo izbrali boljše časovne nize in jih pripravili za homogenizacijo – popravek sistematičnih odstopanj v časovnih nizih.

Homogenizacijo podnebnih nizov smo izvedli s sodobnim programskim orodjem, ki združuje moč statistične obdelave podatkov in zmožnost strokovnjaka, da se s skupaj z metapodatki odloči, kje in kdaj je prišlo do sistematičnih sprememb, ki niso posledica podnebnega dogajanja. Homogenizirali smo mesečne vrednosti več podnebnih spremenljivk, od temperature zraka do referenčne evapotranspiracije, kar je prvi takšen primer za ozemlje Slovenije. Pri nekaterih spremenljivkah, na primer pri temperaturi zraka, je bilo odpravljanje nehomogenosti lažje, pri drugih, na primer višini snega, težje. Pri nekaterih



spremenljivkah smo popravili večino časovnih nizov, pri drugih je večina sistematičnih sprememb ostala skrita v šumu podnebne spremenljivosti, zato smo lahko odpravili le največja odstopanja. V postopku homogenizacije smo s pridom uporabili izčrpne metapodatke – ti so nam povedali, kje, kdaj in zakaj je na kakšni postaji prišlo do sistematične spremembe v izmerjenih podatkih. Pri tem je pomembno znanje tistega, ki izvaja homogenizacijo, saj vsak metapodatek še ni znak za pomembno nehomogenost, prav tako pa pozitiven rezultat statističnega testa še ne pomeni, da je treba podatke popravljati. Da bi ovrednotili subjektivni vpliv, je homogenizacijo nekaterih podnebnih spremenljivk opravilo od tri do šest strokovnjakov (Vertačnik in sod., 2015). Končni rezultati so bili povečini skladni tako v številu odkritih nehomogenosti, kakor v velikosti popravkov. Sočasno s homogenizacijo smo s prostorsko interpolacijo zapolnili vrzeli v časovnih nizih, ki so bodisi posledica slabe kakovosti podatkov bodisi manjkajočih meritev. Interpoliranih podatkov je bilo od ene do dveh tretjin vseh podatkov, odvisno od spremenljivke.

Z izčrpno kontrolo in homogenizacijo podnebnih podatkov smo dobili kakovostnejše podatke in zanesljivejše ocene podnebnih sprememb in spremenljivosti v Sloveniji v obdobju 1961–2011. Ti podatki so in bodo podlaga za številne študije o podnebnih spremembah in podnebni spremenljivosti. Marsikatera od teh študij ima glede na vse bolj pereče globalno segrevanja daljnosežne posledice, zato je še toliko bolj

pomembno, da temeljijo na verodostojnih in kakovostnih podnebnih podatkih.

V času izvedbe projekta Podnebna spremenljivost Slovenije je uradna slovenska mreža meteoroloških postaj doživljala korenite spremembe, ki dolgoročno zadevajo tudi kakovost podnebnih podatkov. V okviru projekta BOBER smo za potrebe učinkovitejšega spremljanja vodnih razmer namestili številne samodejne hidrološke in meteorološke postaje. Nekatere, če ne mnoge od teh, so že ali bodo nadomestile opazovalne postaje. Avtomatizacija meteoroloških meritev omogoča hitrejši dostop do še večje množice meteoroloških podatkov, a hkrati nas beseda avtomatizacija ne sme napeljati na misel, da bo vse potekalo samodejno, brez vpletanja človeka. Nasprotno, zaradi večje zapletenosti postopka od posameznega meteorološkega izmerka dokončnih podnebnih produktov je potrebna še toliko večja previdnost pri načrtovanju in izvajanju samodejnih meteoroloških meritev. Kontrola, homogenizacija in interpolacija podatkov niso čarobne palice, ki slabe izmerke ali manjkajoče vrednosti spremenijo v odlične podatke, temveč le izboljšajo uporabnost izmerjenih vrednosti. S stališča študije podnebnih sprememb in spremenljivost sta bistveni stalnost in neprekinjenost kakovostnih meritev. Vsaka sprememba, tudi tehnološka izboljšava, namreč vnaša negotovost v oceno podnebnih razmer in sprememb. Zato se trudimo, da bi v Sloveniji tako kot v 20. tudi v 21. stoletju ohranili meteorološke meritve na visoki ravni.

KONTROLA PODATKOV V KLIMATOLOGIJI

Svetovna meteorološka organizacija je že pred desetletji izdala priporočila – vodnik za obdelavo meteoroloških podatkov v klimatologiji, ki ga je pozneje dvakrat dopolnila in posodobila (WMO, 2011). Na kratko bomo povzeli priporočila za sodobno kontrolo podatkov v klimatologiji.

Priporočila Svetovne meteorološke organizacije

Namen kontrole kakovosti podatkov je preveriti ustreznost podatka glede na tisto, kar želimo izmeriti, in vpliv z vremenom nepovezanih dejavnikov na podatek. Meteorološke podatke naj bi označili kot ustrezne za stalno arhiviranje le po ustrezni kontroli njihove kakovosti. Že pred zapisom in pošiljanjem izmerjenih podatkov se je treba prepričati o pravilnosti identifikacije postaje in časa meritve, o tem, da podatek zanesljivo odseva trenutne vremenske razmere in da so podatki merjenih ali opazovanih spremenljivk skladni. Dnevnik ročnih meritev naj bi že pred vnosom v računalniško zbirko pregledalo izkušeno osebje. Podatke, shranjene v digitalni obliki, naj bi center za arhiviranje redno in temeljito pregledoval.

Najboljša praksa kontrole podatkov je združitev računalniške in ročne oblike kontrole podatkov. Statistične metode so neprecenljive zlasti pri odkrivanju napak. Prikazi v obliki zemljevidov, grafikonov in podatkovnih izvlečkov so odlično orodje za pregled podatkov. Izkušenemu kontrolorju omogočajo prepoznavanje izstopajočih vrednosti, sumljivih podatkov in oceno uspešnosti samodejnih

postopkov kontrole podatkov. Kakovost vseh meritev in opazovanj naj bi bila primerno označena. Popravki in ocene pravih vrednosti naj bi bili vneseni v podatkovno zbirko, prav tako naj bi bili shranjeni tudi izvorni podatki. Treba je preprečiti vnos napak v podatke v postopku kontrole podatkov. Podatek opremimo s kazalnikom verodostojnosti, ki lahko odraža vrsto podatka (na primer izmerjeni, popravljeni), stopnjo izvedene kontrole in način pridobitve podatka (na primer izpis samodejne meteorološke postaje ali dnevnik meritev in opazovanj). Napake v podatkih večinoma izvirajo iz instrumentov, opazovalcev, prenosa in kodiranja podatkov, postopka vrednotenja podatkov, zgodijo pa se tudi pri spremembi oblike podatkov in izračunu izvedenih podatkov. Pri vzpostavitvi kontrole podatkov je treba upoštevati vse možne vrste, vire in vzroke napak. Pri nekaterih spremenljivkah so manjkajoči podatki bolj pereči kakor pri drugih, na primer ena sama manjkajoča vrednost dnevne višine padavin lahko močno vpliva na izračunano mesečno vsoto višine padavin.

Ločimo štiri vrste skladnosti oziroma neskladnosti podatkov: notranja, časovna in prostorska skladnost ter skladnost izvedenih vrednosti z izvornimi. Notranja skladnost se nanaša na različne spremenljivke, izmerjene ob istem času ali v istem

Rapport
über die ordentlichen ombrometrischen und Temperaturbeobachtungen.

| 1 Datum | 2 Niederschlag pro 24 Stund. | 3 Art und Dauer des Niederschlages | 4 Schneehöhe vom Boden bis zur Schneeoberfläche in cm | 5 Höhe des in den letzten 24 Stunden gefallenen Nauschnees in cm | 6 Temperatur Celsius | | | | 7 Anmerkung |
|------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|---|-------------------------|------------|---------|--------------|----------------|
| | | | | | 7 F. | 8 N. M. | 9 N. | 10 Mittel | |
| 1. | | | | | 13.6 | 18.2 | 15 | 14.5 | |
| 2. | 15.2 | 1.36 N.M. 9z N. 6.2 | | | 12.6 | 17.2 | 14.8 | 14.8 | |
| 3. | 17.4 | 1.47 | | | 13.4 | 18 | 15 | 15.1 | |
| 4. | | | | | 11.6 | 21.2 | 14 | 15.2 | |
| 5. | 0 | 1.1 N.M. | | | 10.2 | 21.4 | 14 | 15.2 | Nebel |
| 6. | | | | | 10 | 20 | 15.2 | 15.1 | |
| 7. | 15.6 | 6.30 N.M. - 8.50 N | | | 15.2 | 17.4 | 15.4 | 15.7 | |
| 8. | | | | | 14.4 | 21.6 | 17.2 | 17.6 | |
| 9. | 25.2 | 8.47 9z 9z - N | | | 14.6 | 14.2 | 12.4 | 13.7 | |
| 10. | 7.4 | 6.17 6.17 10 N. M. 9z 9z | | | 11.4 | 13.2 | 12 | 12.8 | |
| 11. | 10.8 | 2 N - 7.06 | | | 12 | 14.2 | 12 | 12.7 | |
| 12. | | 5 F | | | 12.8 | 16.8 | 15 | 14.8 | |
| 13. | | | | | 14.8 | 18.4 | 12 | 15.1 | Nebel |

Slika 1. Izsek iz mesečnega poročila podnebne postaje Metlika oktobra 1909. Opombe in popravki kontrolorja so označeni z rdečo.

obdobju glede na fizikalne povezave med njimi in na njihove definicije. Pri časovni skladnosti gre za skladen ali primeren časovni potek spremenljivke. Sumljive so tako nagle spremembe ali prelomi (na primer nenaden padec temperature), kakor tudi stalnost (na primer nespremenjena hitrost vetra kaže na težave z anemometrom). Prostorsko skladni podatki so tisti, ki se ob istem času ujemajo na pripadajočem geografskem območju. To vrsto skladnosti ugotavljamo s primerjavo kontrolirane vrednosti na neki postaji z oceno te vrednosti na podlagi meritev bližnjih meteoroloških postaj. Velika odstopanja označimo za pregled, popravek ali izbris podatka. Zadnja od omenjenih vrst skladnosti zadeva pravilnost izvedenih vrednosti, na primer ujemanje letne višine padavin iz mesečnih vrednosti z vsoto vseh dnevniških vrednosti višine padavin v istem letu. Pravilnost podatkov preverimo tudi z mejami, ki zajemajo razpon fizikalno sprejemljivih vrednosti neke spremenljivke. Običajno je meja statistično določena – rekordna vrednost v nekem obdobju, normalizirani odklon od povprečja ipd.

Razvoj operativne kontrole v državni meteorološki službi

V državni meteorološki službi in njenih predhodnicah se kontrolo podatkov na

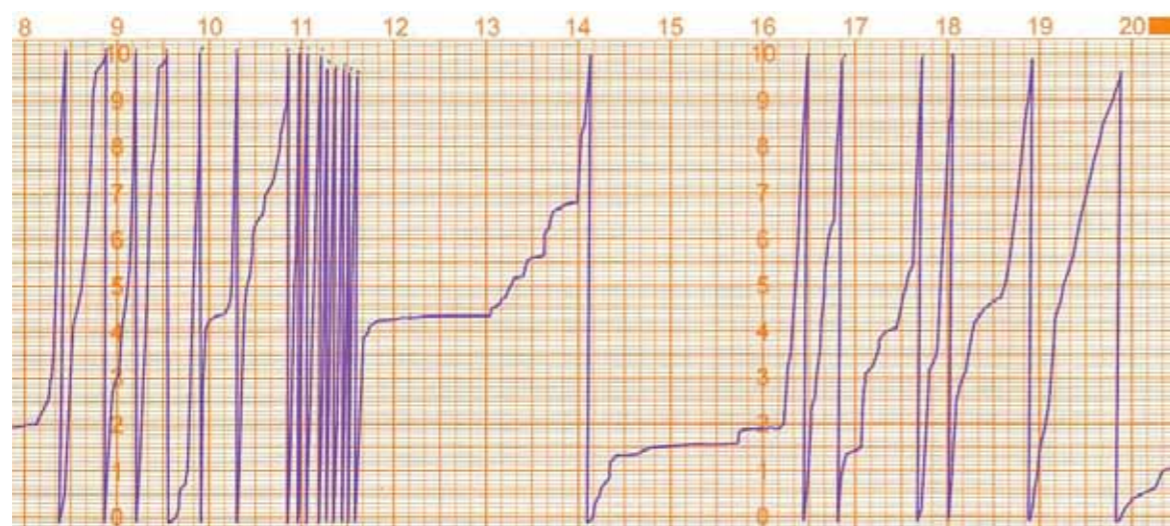
opazovalnih meteoroloških postajah izvaja že od začetka, a je do sredine 20. stoletja ostala precej omejena in v primerjavi z današnjimi metodami bistveno manj učinkovita.

Preverjanje dnevniških zapisov je potekalo že v času Avstro-Ogrske, kjer je kontrolor z rdečo barvo označeval popravke na izvorne zapise (slika 1). Ta način označevanja popravkov je v uporabi še danes. Do uvedbe računalnikov leta 1977 je bila kontrolo podatkov razmeroma zamudna, subjektivna in omejena na glavne meteorološke spremenljivke. Po uvedbi računalniške kontrole je ta postala objektivnejša in je zajela vse meteorološke spremenljivke, a odpravljanje napak je bilo še vedno delo kontrolorja (slika 2). Že takrat so se porajala vprašanja o namenu kontrole. Z njo popravimo napake v podatkih, kar je namenjeno nadaljnji obdelavi in analizi. Hkrati pa je odkrivanje napak namenjeno tudi izobraževanju opazovalcev, ki jih opozorimo na določeno vrsto napak, da jih v prihodnje ne delajo več (Pristov, 1977). Z uvedbo računalnika se je začela digitalizacija podatkov dnevniških meritev in opazovanj, ki pa zaradi velikega obsega podatkov še danes ni dokončana (Cegnar, Zupančič & Dolinar, 2004). Za obdobje pred letom 1961 imamo digitalizirane le časovne nize izbranih postaj, velik del podatkov iz konca 19. in začetka 20. stoletja je še vedno le na papirju – v dnevnikih. Že v začetku digitalizacije so na računalniške medije prenašali le podatke z zanesljivih postaj,

| | | | | | | | |
|---------------------------|--|-----|--|---|--|-------------------|--|
| St. postaje 1 2 3 4 5 6 7 | | 145 | | AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE | | Postaja HRUŠICA | |
| Leto 2008 | | 08 | | MESEČNO POROČILO PADAVINSKE POSTAJE | | Občina AJDOVŠČINA | |
| Mesec MAJEC | | 03 | | | | Porečje PIVKA | |

| Dan | Višina padavin v mm | | Višina snežne odeje v cm | | PADAVINE IN OSTALI ATMOSFERSKI POJAVI | Šifriranje pojavov | | | | | R. št. kartice | |
|-----|---|----------------|--------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------------|----|----|----|----|----------------|----|
| | V zadnjih 24 urah merjena danes ob 7. uri | Oblika padavin | merjena danes ob 7. uri | novoga snega | | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | | 31 |
| 01 | 4.8 | | | | rj. ≡ 8, dp 0 - pp 0 | | | | | | | |
| 02 | 5.9 | | | | | | | | | | | |
| 03 | | | | | | | | | | | | |
| 04 | | | | | 730 * | | | | | | | |
| 05 | 15.8 | | 04 | 27 | rj. 0 - 10° | | | | | | | |
| 06 | 0.0 | | 20 | 0 | dp ≡, n 0 | | | | | | | |
| 07 | 2.0 | | 16 | 1 | n 0 | | | | | | | |
| 08 | 2.9 | | 8 | 0 | rj. 0 | | | | | | | |
| 09 | 1.1 | | 3 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 6.9 | | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |

Slika 2. Izsek iz mesečnega poročila padavinske postaje Hrušica marca 2008. Popravki kontrolorja so označeni z rdečo.



Slika 3. Izsek pluviograma za Davčo ob izjemnih padavinah 18. septembra 2007. Navpična os pomeni padavinsko vsoto od jutra. Za vsakih 10 mm vsote se krivulja premakne na dno. Na vrhu slike je navedena ura po srednjeevropskem času. Zgostitev okoli 11. ure kaže na zelo močan naliv – v 50 minutah je padlo več kakor 80 mm dežja.

torej je tudi zaradi tega papirnati arhiv za opazovalne postaje obsežnejši od digitalnega.

Z računalniškim programom smo že na začetku kontrolirali podatke padavinskih in podnebnih postaj, vključno s pluviogrami ali ombrogrami (slika 3). Za preverjanje podnebnih podatkov smo uporabljali 77 kontrol in upoštevali medsebojno odvisnost spremenljivk. Merila so bila določena tudi v skladu s številom dobljenih dvomljivih podatkov. Takrat še ni bilo na voljo programov za interpolacijo in popravek podatkov. Pri merjenih meteoroloških spremenljivkah je bilo največ odkritih napak pri mokrem termometru in najnižji temperaturi pri tleh. Že takrat smo se zavedali

problematike merjenja vlage in še danes velja, da so pri tej meteorološki spremenljivki napake pogoste, meritve pa sorazmerno nezanesljive glede na spreminjanje v daljšem časovnem obdobju. Še bolj problematična kakor merjenje ob podnebnih terminih so bila opazovanja pojavov, recimo nevihte in megle, ki so bila odvisna od natančnosti, pozornosti in razumevanja opazovalca. Zaradi homogenosti arhiva smo se odločili, da bodo v računalniški arhiv prenesli le zanesljive podatke, nezanesljivi pa bodo ostali v dnevnikih (Pristov, 1977).

Postopki kontrole podatkov so zelo počasi prehajali iz papirnate oblike v računalniška

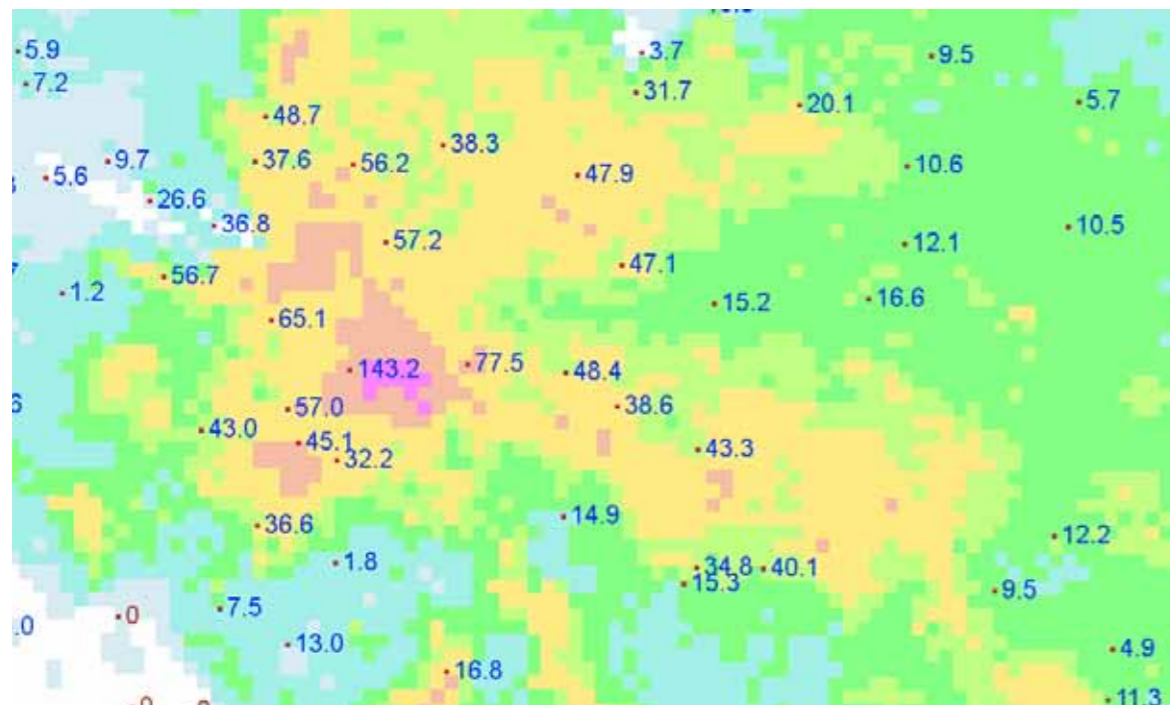
kontrolna orodja. Računalniki so tudi omogočili nove metode preverjanja meteoroloških meritev in opazovanj, ki jih človek (ali ekipa) zaradi lastne počasnosti obdelave ni zmožal. Kontrolni programi na podatkovnih delovnih postajah so najprej vsebovali preverjanja notranje skladnosti podatkovnih nizov. Sem sodi recimo pogoj, da nobena terminska temperatura ne sme biti izven intervala, ki ga določata najnižja in najvišja temperatura, ali da mora biti ob prisotnosti snežne odeje ustrezno šifrirano tudi stanje tal (tla, pokrita s snegom, itn). V osemdesetih letih 20. stoletja so bila orodja za kontrolo notranje skladnosti podatkov prenesena na osebne računalnike kontrolorjev. Večina programov je bila napisana v fortranu. Tudi orodja za vnos in prepis podatkov v tekstovne datoteke formata ASCII so bila napisana v fortranu in le deloma v pascalu. Z uvedbo objektivne računalniške kontrole meteoroloških podatkov se je delež zaznanih napak močno povečal.

Časovna in prostorska kontrola meteoroloških podatkov sta se zelo počasi uvajali. Najprej so podatke, na primer višino padavin, izpisovali na papir in jih primerjali. Z razvojem grafike na osebnih računalnikih smo začeli grafično primerjati podatke sosednjih postaj – recimo potek temperature na istem grafu. A že kmalu je bila podana zamisel in vzpostavljena načela, da bi pri primerjavi upoštevali podobnost merilnih nizov, in ne le prostorske razdalje (podatki iz Murske Sobote in Bilj pri Novi Gorici so zaradi ravninske lege in podobne nadmorske višine lahko kdaj bolj podobni kot podatki Murske Sobote in Šalovcev na Goričkem). A do uvedbe takega orodja je preteklo kar nekaj časa. K razvoju kontrole je veliko prispevalo sodelovanje s tujino in v mednarodnih projektih – na primer MAP (Mesoscale Alpine Programme). Leta 1997 smo uvedli prvo objektivno prostorsko kontrolo padavin, po priporočilih Svetovne meteorološke organizacije s Shearmanovo metodo (Abbott, 1986). V okviru programa MAP smo spoznali, da podobno prostorsko kontrolo izvajajo tudi druge države, kar nam je dalo pogum za naprej. Tako smo zelo zmanjšali vpliv subjektivne ocene o porazdelitvi padavin na nekem območju. Kmalu smo za posebne primere uporabljali tudi prostorsko orodje gstat (to je orodje za modeliranje, napovedovanje in simulacije geostatističnih podatkov v eni, dveh ali treh dimenzijah). Ena od prelomnic v kontroli podatkov je bila tudi uvedba meritev meteorološkega radarja v kontrolo padavin (Vičar, 2004; slika 4).

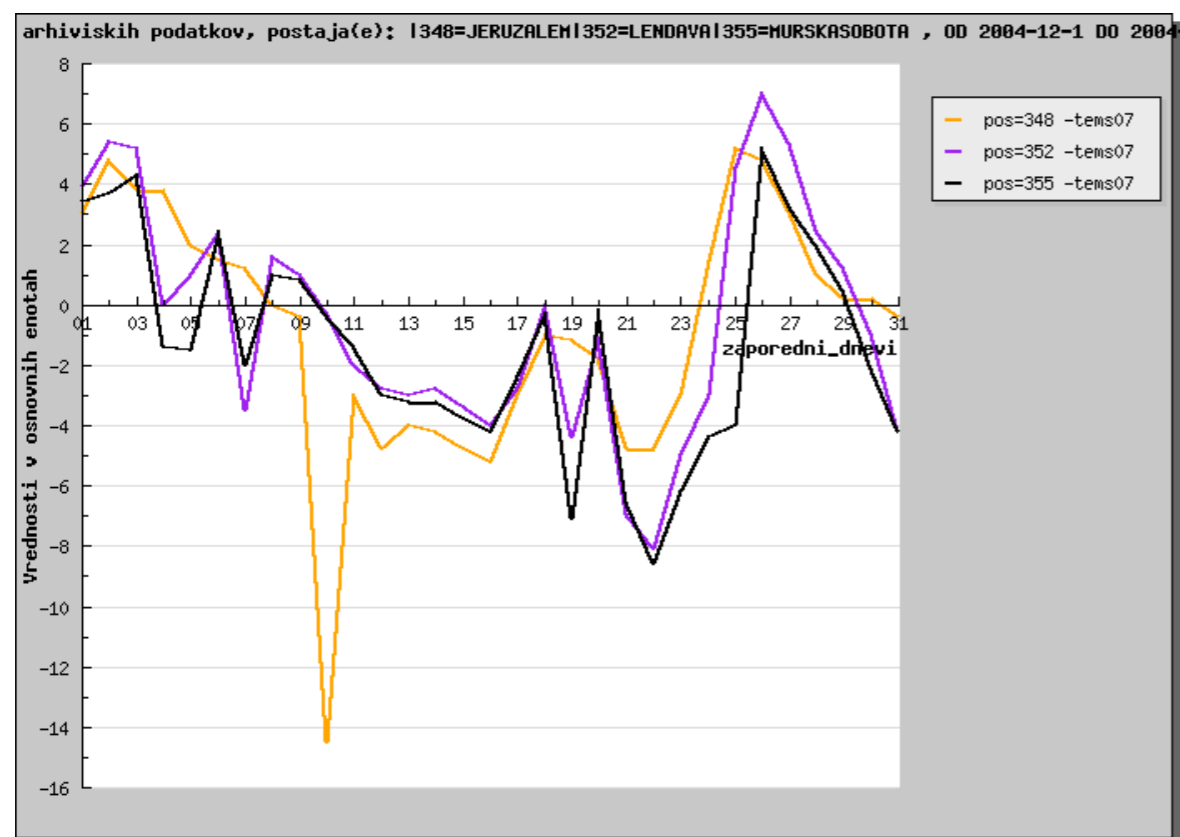
Velik napredek pri obdelavi in dostopu do podatkov so omogočile relacijske zbirke (recimo PostgreSQL) in operacijski sistem Linux. Na začetku 21. stoletja smo tako prešli na novo vnosno orodje (AMEBA) za podatke padavinskih in podnebnih postaj ter postaj s meritvami trajanja sončnega obsevanja. Ta ima spletni vmesnik za neposredni vnos podatkov v postgresove podatkovne tabele. S tem orodjem smo lahko podatke takoj ponudili uporabnikom in hkrati zelo zmanjšali število napak pri vnosu. Orodje nam omogoča tudi spletno popraviljanje arhivskih podatkov, kar smo s pridom uporabili v projektu Podnebna spremenljivost Slovenije.

Sodobna kontrola podatkov

Kontrola meritev in opazovanj na opazovalnih postajah je po vpeljavi računalnikov na Hidrometeorološkem zavodu sčasoma zajela vse večji nabor podatkov in večje število testov. S prej omenjenim orodjem AMEBA za vnos podatkov iz podnebnih (klimatoloških) in padavinskih dnevnikov v digitalno obliko z 205 testi preverimo pravilnost vnesenih izmerkov; od teh je 110 testov namenjenih kontroli notranje skladnosti izmerkov. Največ testov je namenjenih temperaturi zraka. Kontrola je zelo raznolika in obsega logično kontrolo, primerjavo s podnebnimi mejami, medsebojno skladnost vrednosti različnih spremenljivk in časovno spremenljivost. Tako preverjamo izmerek glede na definicijo spremenljivke, na primer temperaturo zraka ob 7. uri glede na najvišjo temperaturo istega dne, temperaturo suhega in mokrega termometra, ko na krpici mokrega termometra ni ledu, in predznak trajanja sončnega obsevanja. Pri kontroli časovnih sprememb preverjamo, če je razlika med sosednjimi termini znotraj fizikalno smiselnih mej (recimo razlika med tlakoma ob 7. in 21. uri ne sme preseči 20 hPa). Podobna je kontrola s podnebnimi mejami; relativna vlažnost zraka mora biti med 10 % in 100 %, le na višinskih postajah so dovoljene nižje vrednosti. Ker so nekatere spremenljivke medsebojno precej povezane, je smiselno preveriti njihovo skladnost. Takšni primeri so recimo skladnost najnižje temperature zraka 5 cm in 2 m nad tlemi v oblačni noči, skladnost šifre oblike padavin pri novem snegu in nezamrznjena tla pri pozitivni temperaturi zraka ob 21. uri. Primerjamo tudi skladnost meritev iste spremenljivke med različnimi inštrumenti, na primer 24-urno vsoto padavin v Hellmannovem dežemeru in na pluviogramu. Po vnosu v digitalno zbirko kontrolor na podlagi grafičnega prikaza in s



Slika 4. Prostorski prikaz 24-urne višine padavin (mm) do 5. avgusta 2014 zjutraj na opazovalnih meteoroloških postajah (številčne vrednosti) skupaj z oceno višine padavin na podlagi radarskih meritev (barvna lestvica). Zemljevid zajema del osrednje in zahodne Slovenije.



Slika 5. Primerjava časovnih nizov temperature ob 7. uri zjutraj na treh bližnjih meteoroloških postajah. Deseti dan niza postaje številka 348 močno odstopa od drugih dveh vrednosti, kar kaže na napačno vrednost.

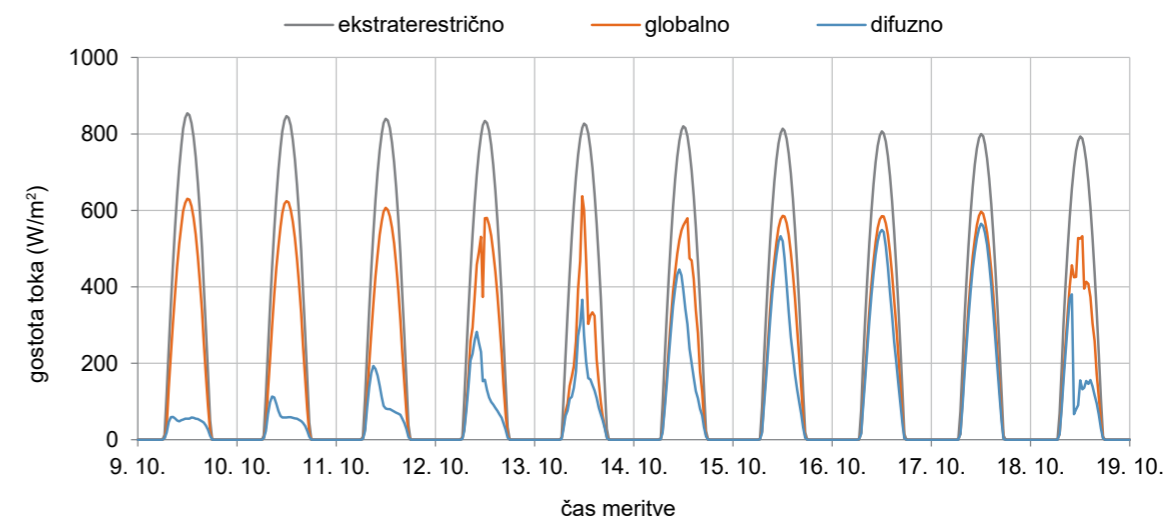
programskimi orodji preveri prostorsko skladnost podatkov in skladnost z nekaterimi drugimi podatki, na primer radarskimi meritvami padavin in temperaturo zraka, ki jo izmeri elektronski zapisovalnik. V digitalnem arhivu hranimo izvirne oziroma izmerjene vrednosti, preverjene in popravljene vrednosti. Vrednosti so označene s šifro verodostojnosti podatka (od 0 do 9), ki nam pove način pridobitve podatka (izmerjeni, ročno interpolirani, podatek iz drugega vira ipd.).

Sodobna kontrola meteoroloških podatkov v Državni meteorološki službi na Agenciji RS za okolje poleg meritev in opazovanj opazovalcev zajema tudi samodejne meritve. Kontrola samodejnih meritev sega v 90. leta 20. stoletja, v čas izgradnje mreže samodejnih postaj. Sprva je bila kontrola skopa in večinoma omejena na primerjavo med trenutno, povprečno, najvišjo in najnižjo vrednostjo v polurnih intervalih. V zadnjih letih se je kontrola močno razširila in postala deloma interaktivna. Na dnevni ravni sedaj poleg samodejne kontrole grafično kontroliramo temperaturo in relativno vlažnost zraka, zračni tlak in višino padavin. Kontrolor na podlagi grafičnega prikaza obravnavane spremenljivke skupaj z nekaterimi drugimi podatki preveri pravilnost meritev in jih lahko tudi enostavno popravi. Z različnimi metodami prostorske interpolacije ocenimo vrednost spremenljivke na izbrani postaji iz vrednosti na okoliških postajah, kar je v veliko pomoč kontrolorju pri odločitvi o ustreznosti meritve.

Odprtokodni skriptni programski jeziki in druga orodja (PHP, perl, HTML, javascript, CGI itn.) so omogočili nov pristop k obdelavi podatkov prek

spletnih programov. Poleg objektivne kontrole, ki poteka samodejno v ozadju, smo razvili interaktivna grafična orodja za vizualno kontrolo podatkov in hkrati neposredno popraviljanje napak v zbirki prek spleta (slika 5). Orodja se po potrebi dopolnjujejo in nastajajo nova. Sedaj tudi veliko lažje hkrati vključujemo v kontrolo vse vire podatkov: klasične meritve, depeše, samodejne postaje, radarske meritve in druge vire. Naslednja faza je dokončanje prenove kontrole samodejnih postaj in vključitev satelitskih produktov neposredno v obdelavo podatkov. Držimo se načela, da ohranjamo vse izvirne vrednosti (izmerke) v posebnih tabelah in tako lažje primerjamo kakovost postaj skozi čas.

Kontrola polurnega povprečja gostote toka sončnega sevanja poteka samodejno na dnevni ravni. Iz osnovne podatkovne zbirke se v vmesno podatkovno zbirko PostgreSQL prepisejo podatki, nato se izvede glavna kontrola. Program primerja skladnost podatkov s fizikalnimi omejitvami (višina Sonca nad obzorjem) in medsebojno skladnost podatkov, recimo difuznega in globalnega sevanja. Kadar manjka ali je napačnih le nekaj polurnih podatkov v časovni vrsti (Štirje za globalno in UVB sevanje, dvanajst za difuzno sevanje), zapolnimo manjkajoče vrednosti s časovno interpolacijo. Na drugi stopnji program dopolni preostale manjkajoče vrednosti na podlagi podatkov najbolj primerljivih postaj ali urnega trajanja sončnega obsevanja na obravnavani postaji. Končne vrednosti se prepisejo v drugo podatkovno zbirko PostgreSQL. Kljub zapleteni in obsežni samodejni kontroli vsakih nekaj let ročno pregledamo časovni



Slika 6. Primer napačnih meritev difuznega sevanja. Prikazan je časovni potek izmerjenega polurnega povprečja gostote toka globalnega, difuznega in izvenzemeljskega sevanja na samodejni postaji Portorož v obdobju od 9. do 18. oktobra 2006. O meritvah in kontroli gostote toka sončnega sevanja podrobneje pišemo v poglavju Kontrola gostote toka globalnega in difuznega sevanja.

niz podatkov, kjer najdemo preostale napake (slika 6). Pri tem sestavimo seznam nepravilnih vrednosti zaradi nepravilne nastavitve senčilnega obroča – Sonce sije neposredno na senzor za difuzno sevanje – ali vremenskih razmer, ki kvarijo kakovost meritev (ivje, slana, sneg). Program za samodejno kontrolo na podlagi tega seznama popravi vrednosti z interpolacijo.

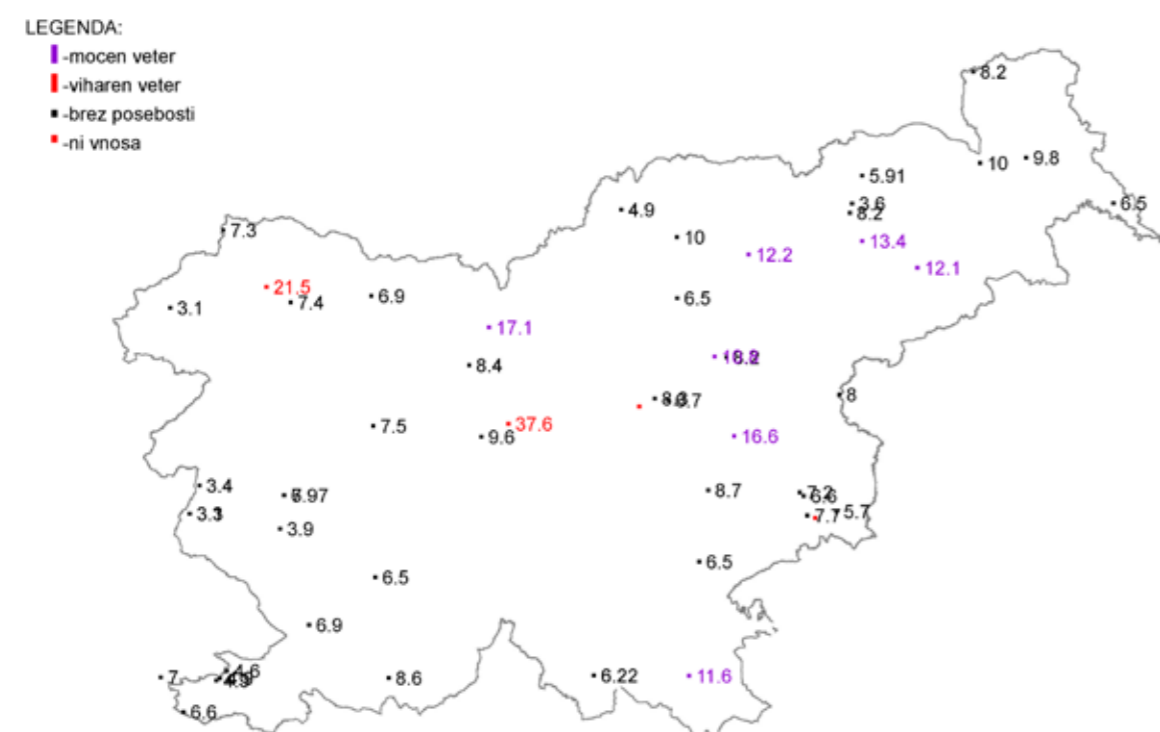
Kontrola polurnih izmerjenih vrednosti hitrosti vetra je še na osnovni stopnji. Poteka enkrat mesečno, ko se iz osnovne podatkovne zbirke podatki preprišejo v uporabniško tabelo in v tabelo napak v isti zbirki. Preprišejo se podatki o povprečni hitrosti in smeri vetra, največji sunek vetra in njegova smer, terminska hitrost in njena smer (terminska hitrost je povprečna hitrost vetra v zadnjih desetih minutah merskega intervala) ter standardni odklon hitrosti vetra v merskem intervalu. Pri tem program primerja skladnost podatkov s fizikalnimi omejitvami (hitrosti med 0 in predpisano zgornjo mejo, smeri med 0 in 360 stopinjami) in notranja skladnost podatkov (npr. povprečna in terminska hitrost ne smeta presegati največjega sunka vetra v istem intervalu, terminska hitrost je največ trikratnik povprečne polurne hitrosti). Pri obdelavi sunkov hitrosti se največji sunki ročno preverijo glede na meritve okoliških postaj, radarskih slik padavin in vremenske slike v času meritev (slika 7).

Pri kontroli samodejnih meritev vsakemu podatku priredimo indeks verodostojnosti v obliki 15-bitnega binarnega zapisa, ki pa se v zbirko zapiše v desetiški obliki, torej v razponu od 0 do 32.767.

Kljub veliki računalniški podpori je operativna kontrola še vedno dolgotrajen in zamuden postopek, saj računalnik ni sposoben ovrednotiti pravilnosti podatkov z vseh možnih vidikov. Izkušeno oko kontrolorja ujame marsikatero napačno vrednost ali potrdi oziroma ovrže sum na napačen podatek, ki izhaja iz računalniške kontrole.

Slovenija je ena redkih držav, ki ima podatke meteoroloških opazovanj in meritev dostopne prek spleta, tako za fizične kot pravne osebe. To kakovost nam priznava tudi tujina. Problem bo nastal, če (ali ko) bomo zmanjšali število opazovalcev in skrbnikov na postajah – občani nas na to dnevno opozarjajo ob izpadih meritev, ki so vse pogostejši. Zagotovo pa je kakovost meritev odvisna od mnogih dejavnikov, glavni so:

- ustreznost merilnega mesta, ki mora biti značilno za širšo okolico in vzdrževano, okolica pa se ne sme spreminjati,
- kakovost merilne opreme in vzdrževanja,
- število merilnih naprav za eno spremenljivko (potrebovali bi tri z neodvisnim napajanjem),



Slika 7. Primer napačnih meritev sunkov vetra. Na merilni postaji Brinje je bil 11. 10. 2014 zabeležen nenavadno močan sunek vetra s hitrostjo 37,6 m/s, ki ga na okoliških merilnih postajah niso opazili. Izpis je narejen z grafičnim pregledovalnikom vremena.

- neprekinjenost meritev – na postajah je torej obvezna navzočnost opazovalca (vsaj občasno), ki vzdržuje postajo, ob izpadih pa tudi sam ročno opravlja meritve.

Kako ravnati v prihodnje, si oglejmo na primeru padavin. Padavine so ena bolj občutljivih in pomembnih meteoroloških spremenljivk. Ničkolikokrat se je zgodilo, da smo hoteli izbrisati močne petminutne nalive (na primer 25 mm padavin v petih minutah), izmerjene na samodejnih postajah. A to željo smo opustili brž, ko smo si ogledali pluviograf, ki je neodvisno zabeležil enako količino padavin. Pluviografima namreč mehanski mehanizem in ni občutljiv za električne motnje. Če na primer izbrišemo podatke o takšnih močnih »nenadejanih« nalih, s tem bistveno vplivamo na izračune povratnih dob. Kaj s tem lahko povzročimo gradbenikom, ki načrtujejo odtoke, ni treba poudarjati.

To samo dokazuje, da moramo biti pri posegih v merilno mrežo in metode merjenj zelo previdni in strokovni – sploh v Sloveniji, ki je podnebno zelo raznolika in zahtevna država – naravne ujme nam ne prizanašajo. Stalne meritve v stvarnem času so velika pridobitev, a hkrati nam nič ne pomagajo, če so slabe ali pa postaja zaradi vremenskih ujm ali drugih razlogov nekaj tednov ali mesecev ne deluje. Kontrola podatkov se torej začne na meteorološki postaji!

Sodelovanje s tujino v okviru projekta Podnebna spremenljivost Slovenije

Mednarodna izmenjava podnebnih in padavinskih podatkov s tujino ni utečena, razen v okviru mednarodnih projektov. Težava izmenjave podatkov je zmeraj dogovor, ki mora upoštevati podatkovne omejitve posameznih držav: procedure (sestanki, pravno usklajevanje ipd.) lahko trajajo leta. Med projektom Podnebna spremenljivost Slovenije (PSS) smo se na oddelku za arhiv podatkov na ARSO odločili, da pristopimo v duhu »kdor daje, ta dobi.« Prek dosedanjih izkušenj sodelovanja s tujino smo se obrnili na sodelavce v sosednjih državah, ki se ukvarjajo s kontrolo in obdelavo podatkov in ki najbolj razumejo probleme prostorske kontrole na postajah ob meji. Avstriji, Italiji, Madžarski in Hrvaški smo ponudili meteorološke podatke slovenskih obmejnih postaj. Najprej je izmenjava stekla z naše strani, nakar smo od sosednjih držav v 80 % primerov prejeli to, kar smo potrebovali. Najlaže je bilo z Avstrijo (kontaktna oseba je bil dr. Wolfgang Lipa), saj smo kmalu po odposlanem

našem paketu podatkov od njih prejeli arhivske podatke v ustrezni obliki. S Hrvaško je bilo nekoliko več dela, njihov format zapisa je precej neobičajen. Z Italijo smo bili na pol uspešni, a še zmeraj je bil odziv, v okviru zapletenosti njihovih meteoroloških služb, pozitiven. Na Madžarskem pa nismo našli ustreznega sogovornika, a je meja z Madžarsko na srečo kratka. Veliko dela je bilo še z umestitvijo vseh teh podatkov iz sosednjih držav v našo podatkovno zbirko.

Kakovost slovenskih meteoroloških podatkov glede na tujino

Pri sinoptičnih depešah (SYNOP) smo po kakovosti podatkov nekje v zlati sredini. Poznalo se je, da naše orodje za zbiranje in odpošiljanje podatkov v sistem GTS do leta 2013 ni imelo vgrajenih kontrolnih mehanizmov. Tako so v okviru programa MAP ugotovili kar nekaj napak v depešah in tudi prostorsko neujemanje – predvsem tlaka, ki se je začel meriti na samodejnih postajah na drugih nadmorskih višinah. Primerjava samodejnih meteoroloških postaj je pokazala, da imamo podobne težave kot drugje v Evropi (izpadi meritev, nenadejani signali – izmerki ipd.). Pri kontroliranih nizih podnebnih podatkov pa skoraj ni bilo pripomb. Izjema je le naša navada, da od leta 1934 24-urno višino padavin, ki je izmerjena zjutraj, pripišemo dnevu meritve, in ne dnevu prej. Odkar so naši arhivski podatki dostopni na svetovnem spletu, jih v tujini zelo veliko uporabljajo, saj smo podnebno zelo zanimiva država.

Na oddelku, kjer sproti kontroliramo podatke, se je število zaposlenih v devetdesetih letih drastično zmanjšalo (upokojitve, bolezni ipd.), kar se je delno poznalo tudi na kakovosti podatkov. A nekatera povečanja napak so tudi posledica izjemnih meteoroloških dogodkov v posameznih letih. Delno so se posledice pomanjkanja kadrov odpravile z novimi kontrolnimi orodji. A brez mladih strokovnjakov, ki počasi prevzemajo delo starejših, ne gre. To je pokazal tudi projekt PSS.

Sodobne metode kontrole podatkov v strokovni literaturi

Hkrati z razvojem računalništva so se odprle poti za uvedbo računsko zahtevnih metod kontrole podatkov v klimatologiji. V strokovni literaturi najdemo zelo raznolike in pogosto izkustvene pristope h kontroli podatkov, ki običajno temeljijo


na statističnih izračunih in prostorski sliki določene spremenljivke. V nadaljevanju navajamo nekaj primerov.

González-Hidalgo in sod. (2008) so obravnavali napake v padavinskih nizih sredozemskega dela Španije. Sem sodijo niz enakih mesečnih vrednosti v zaporednih mesecih ali letih, ničelne vrednosti več let zapored, podvajanje vrednosti na različnih postajah idr. Pri odkrivanju napak so si pomagali s prostorsko primerjavo, s primerjalnimi nizi na podlagi meritev bližnjih postaj ali postaj s podobnim časovnim potekom. Pri tem so bile uteži postaj pri primerjalnem nizu obratno sorazmerne s kvadratom razdalje od obravnavane postaje, do največje razdalje 50 km. Odkrivanje podatkov je potekalo iterativno, s postopnim izločanjem napak in izračunavanjem posodobljenih primerjalnih nizov. Primerjali so razmerja višine padavin (skupaj z dodatkom 30 mm, da se izognejo problemu z 0 mm in da zmanjšajo občutljivost razmerja za majhne količine padavin) med primerjalno in kontrolirano postajo, za merilo izločanja so uporabili razmerje med prvim in tretjim kvartilom vrednosti. S tem postopkom prostorske primerjave so izločili okoli 0,75 % vseh mesečnih vrednosti; največ okoli let 1925 in 1960. Prvi vrh napak je bil posledica večjega deleža slabih vrednosti in drugi večjega števila postaj.

Wan, Wang in Swail (2008) so izmerjene vrednosti zračnega tlaka na kanadskih merilnih postajah kontrolirali s petimi vrstami kontrole. Preverili so skladnost podatkov z zgornjo in spodnjo podnebno mejo, s spremembo (tendenco) zračnega tlaka, skladnost podatkov s hidrostatično enačbo in časovno ter medsebojno usklajenost podatkov. Podnebne meje so določili z najvišjo in najnižjo vrednostjo zračnega tlaka v obdobju 1971–2000. Zaradi nezadostne dolžine referenčnega obdobja so obema mejama dodali toleranco 3,4 hPa. Pri spremembah zračnega tlaka so glede na dolžino intervala za celo državo postavili enotno mejo: 3,9 hPa/h, 6,9 hPa/2 h, 9,9 hPa/3 h. Zračni tlak pada z višino, zato je na postajah nad morsko gladino vedno manjši od tlaka, ki je preračunan na morsko raven. Obe vrednosti tlaka sta bili označeni za sumljivi, kadar nista bili v skladu s tem pravilom. S hidrostatično enačbo so preverili skladnost temperature, tlaka in nadmorske višine. Včasih je bil vzrok za neskladnost nepravilno določena nadmorska višina postaje, kar pripelje do sistematične napake – vrednosti so v daljšem obdobju previsoke ali prenizke. Pri kontroli časovne vztrajnosti so preverjali, če ima tlak 12 ur ali več enako vrednost, in takšne primere označili

kot sumljive. Najpogosteje najdene posamične slučajne napake v omenjenih kontrolah so bile napačna številka, zamenjava sosednjih števk in napačno dodana osnova pri skrajšanem zapisu, na primer 900 hPa ali 1000 hPa. Te napake so popravili samodejno, če je bila interpolirana vrednost blizu izmerjeni z enostavnim popravkom (na primer spremembo ene številke). Z izjemo peščice je preostale napake odpravil kontrolor. Na večini postaj je bil delež slučajnih napak manjši od enega odtisočka, vseh napak skupaj, glede na vso zbirko, je bilo 2 %. 30 % napak je bilo popravljenih samodejno in 70 % interaktivno.

Štěpánek in Zahradníček (2008) sta z različnimi metodami preverila kakovost izmerkov čeških meteoroloških postaj. Analizirala sta niz razlike izmerkov v postajnih parih, primerjala časovne nize glede na kvartilni razpon in primerjala izmerke s prostorsko interpolirano vrednostjo. S statistično primerjavo nizov sta izločila osamelce, močno izstopajoče vrednosti glede na bližnje postaje. Število odkritih osamelcev se je med spremenljivkami znatno razlikovalo, pri relativni vlažnosti zraka jih je bilo desetkrat več kakor pri temperaturi zraka. Na splošno sta odkrila več izstopajočih vrednosti poleti kakor pozimi, le pri višini padavin največ poleti in pozimi ter pri trajanju sončnega obsevanja pozimi. Število osamelcev je bilo v obdobju 1961–2007 neenakomerno. Pri temperaturi zraka je največ osamelcev ob koncu obdobja, pri padavinah pa število osamelcev postopno upada.



Podobno kakor sončni žarki posijejo skozi meglo in osvetlijo pokrajino, tako kontrola in homogenizacija meteoroloških izmerkov osvetlita podnebno dogajanje.

KONTROLA PODATKOV V PROJEKTU PODNEBNA SPREMENLJIVOST SLOVENIJE

Dnevna višina padavin je izmerjena vsako jutro ob 7. uri po sončnem času in je količina padavin, ki so padle od 7. ure prejšnjega dne do meritve. Pripisemo jo dnevni meritvi. Kakovost teh meritev v letih od 1961 do 2008 smo preverjali z računalniškim programom za izpis sumljivih vrednosti. Jedro programa je enako kot pri operativni kontroli dnevne višine padavin na opazovalnih postajah. Sprva smo v izračunih upoštevali le domače opazovalne postaje, po pridobitvi podatkov iz tujine pa smo postopno upoštevali obmejne avstrijske, italijanske in nato še hrvaške postaje.

Kontrola višine padavin, novega snega in snežne odeje

Prostorska kontrola višine padavin

Kontrola dnevne višine padavin temelji na primerjavi meritev izbrane postaje z meritvami desetih okoliških primerjalnih postaj. Pri tem upoštevamo povprečno dolgoletno razmerje med višino padavin na izbrani in primerjalnih postajah ter s tem upoštevamo vpliv podnebnih značilnosti določenega območja. Poleg tega upoštevamo možnost napačne meritve na kateri od primerjalnih postaj in značilni prostorski vzorec porazdelitve višine padavin. Podrobnejši opis uporabljene metode kontrole dnevne višine padavin je v prilogi.

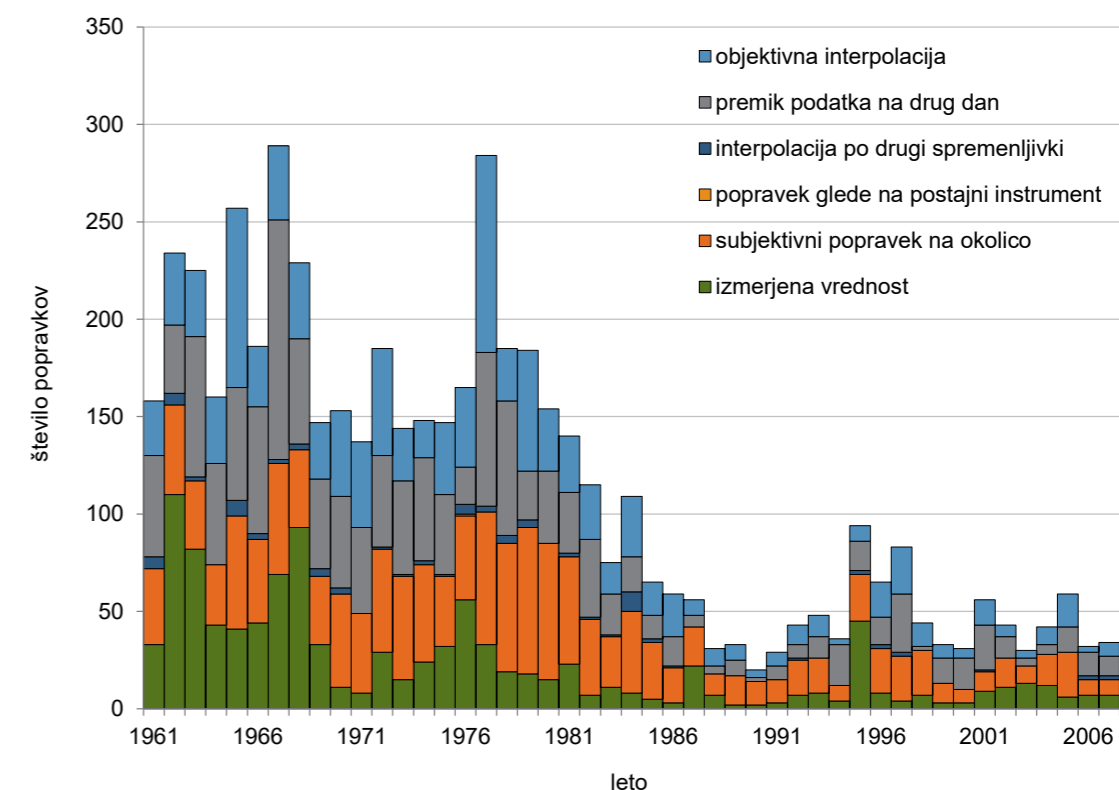
Skupno smo s programom preverili dobrih pet milijonov dnevni vrednosti višine padavin na 442 postajah in našli dobrih dvajset tisoč sumljivih vrednosti. Te smo preverili ročno. Običajno je bilo treba za posamezno postajo ročno preveriti od nekaj do več deset vrednosti, izjemoma pa tudi več kakor 100. Popravili smo okoli 5.300 vrednosti, kar je dobra četrtina sumljivih vrednosti in le tisočina preverjenih vrednosti. Od popravljenih

vrednosti smo jih približno eno petino popravili na prvotno izmerjeno vrednost, nekaj več z objektivno prostorsko interpolacijo, še več pa subjektivno, glede na okoliške izmerke. Pri dobri četrtini popravljenih vrednosti smo le premaknili podatek na drug dan. Največja gostota popravkov je v prvih dveh desetletjih obravnavanega obdobja, okoli leta 1982 pa se število popravkov naglo zniža in nato ostane na nizki ravni do konca obdobja (slika 8).

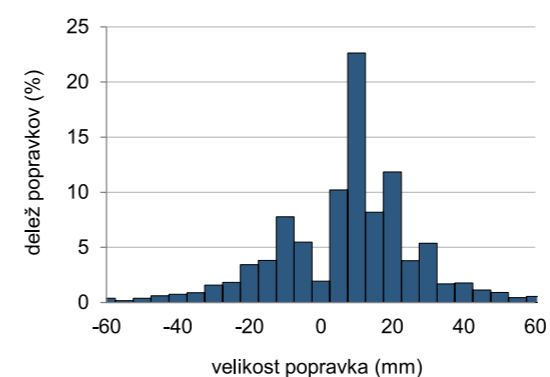
Popravki so bili po velikosti zelo različni, a bolj zastopani v posameznih velikostnih razredih (slika 9). V skladu z izkušnjami operativne kontrole in prostorske primerjave smo izmerjeni vrednosti pogosto dodali ali spremenili vodilno številko, zato na sliki 9 opazimo vrhove pri -10 mm, 10 mm, 20 mm in 30 mm. Težišče popravkov je na pozitivni strani, zato so v povprečju popravljene vrednosti za 8 mm večje od izvornih.

Kontrola višine novega snega in snežne odeje ter skladnosti z višino padavin

Podatke o dnevni višini novega snega in snežne odeje (skupnega oziroma vsega snega na tleh) smo obravnavali nekoliko drugače kot dnevno višino padavin. Z računalniškim programom



Slika 8. Časovni potek letnega števila popravkov višine padavin v obdobju 1961–2008 pri prostorski kontroli višine padavin. Barva stolpca označuje vrsto popravka.

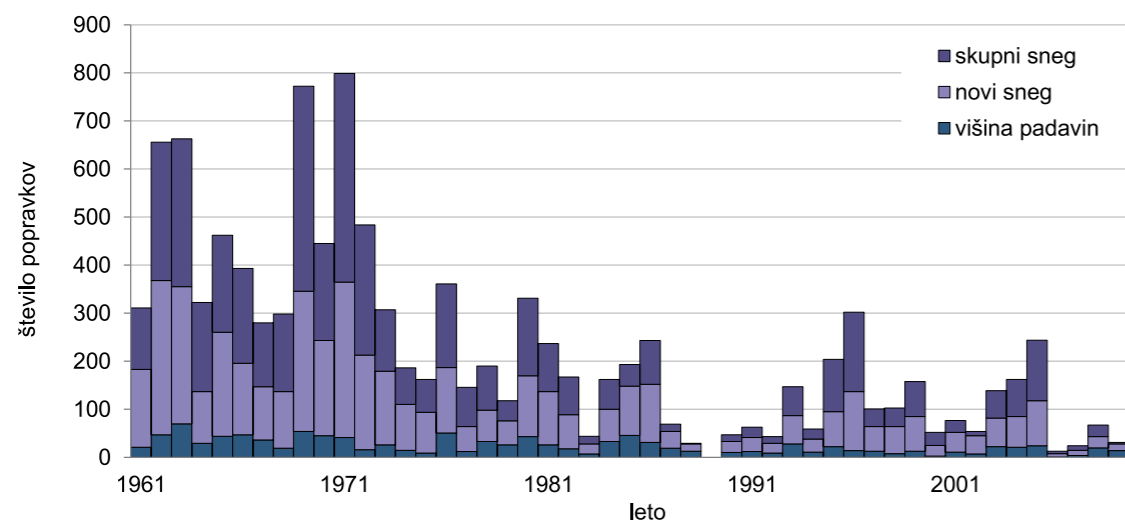


Slika 9. Porazdelitev velikosti popravkov pri prostorski kontroli višine padavin. Razredi histograma so široki 5 mm, sredina razredov je po velikosti deljiva s 5 mm (torej -60 mm, -55 mm itd.). Zelo veliki popravki v obe smeri niso prikazani. Popravkov, ki so bili po absolutni velikosti večji od 62,5 mm, je bilo 2 %.

smo izpisali sumljive in medsebojno neskladne vrednosti. Te smo glede na vrsto razvrstili v tri skupine. Neskladnosti v časovnem poteku višine novega snega in snežne odeje smo uvrstili v prvo skupino. Sem sodijo primeri, ko vsota višin novega snega na kontrolirani dan in snežne odeje dan prej ne doseže ali preseže višine snežne odeje na kontrolirani dan. Zaradi zaokrožitvene napake pri izmeri snega so izjema le primeri, ko je snežilo in je bila vsota za 1 cm nižja od današnje višine

snežne odeje. Kontrolor se na podlagi dostopnih podatkov (papirnati arhiv, druge spremenljivke, primerjava z okolico) odloči za popravek. V drugo skupino sodijo primeri z nenavadno nizko gostoto novega snega (manj kot 40 kg/m³), ki je razmerje izmerjenih padavin in višine novega snega. Na podlagi dostopnih podatkov se kontrolor odloči za popravek višine padavin ali višine novega snega. Le v izjemnih primerih, ob nizki temperaturi zraka ali močnem vetru v času sneženja, je mogoča gostota snega pod mejno vrednostjo. Zaradi vpliva vetra in izhlapevanja smo obravnavali le primere z vsaj 5 cm novega snega. V zadnjo skupino uvrščamo primere z naglim kopnenjem snežne odeje, ko se je snežna odeja glede na prejšnji dan posedla vsaj za 30 cm. Tako izrazito krčenje snežne odeje je mogoče le ob močni odjugi ali močnem vetru.

Računalniški program je po opisanih merilih preveril okoli 830.000 primerov s snežno odejo od leta 1961 do vključno leta 2009; 4.418 primerov je bilo uvrščenih v prvo skupino neskladnosti, druga skupina je vsebovala 7.035 primerov in tretja skupina 994. Sumljive primere smo ročno preverili in pogosto je bil vzrok neskladnosti napačna vrednost v dnevni pred sumljivim primerom, nemalokrat pa smo odkrili napake tudi v nekaj dneh pred ali po sumljivem primeru.



Slika 10. Časovni potek letnega števila popravkov višine padavin in snega v obdobju 1961–2009 pri logični kontroli višine snega.

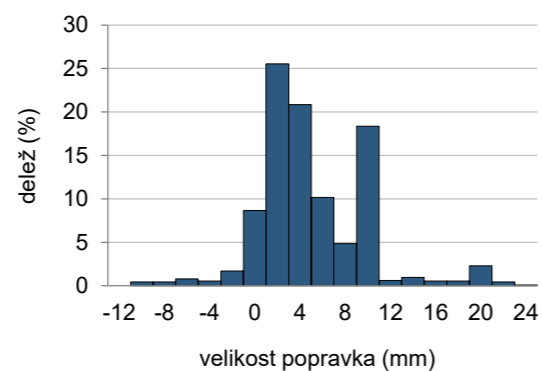
Posebej smo izpisali in popravili tudi primere nekaterih drugih neskladnosti v podatkovni zbirki, na primer takrat, kadar so bile padavine izmerjene, zabeleženo je bilo sneženje, a je bila višina novega snega označena z vrednostjo –1, in ne 0 kot je po pravilih. Takšni primeri so najpogosteje spremenili zapis pri višini novega snega, običajno z 0 na –1 ali nasprotno. Vrednost –1 pomeni popolno odsotnost padavin oziroma sneženja in snežne odeje, medtem ko 0 pri višini padavin pomeni padavine v sledovih, pri višini snega pa bodisi manj kot polovično pokritost tal s snegom bodisi zabeležen pojav sneženja, ki pa mu ni sledila snežna odeja ob 7. uri zjutraj.

Skupno smo v kontroli višine snega in skladnosti z višino padavin za obdobje 1961–2009 popravili okoli 4.700 vrednosti višine novega snega, okoli 5.100 vrednosti višine snežne odeje in okoli 1.100 vrednosti višine padavin. V primerjavi z vsemi vrednostmi 0 ali več v podatkovni zbirki v kontroliranem obdobju je število popravkov majhno. Pri novem snegu znaša 1,1 %, pri snežni odeji 0,6 % in pri padavinah 0,05 %. Delež popravkov, kjer je bila višina snega ali padavin pred ali po popravku večja od nič, je bil naslednji: pri novem snegu 49 %, pri snežni odeji 82 % in pri padavinah 99 %.

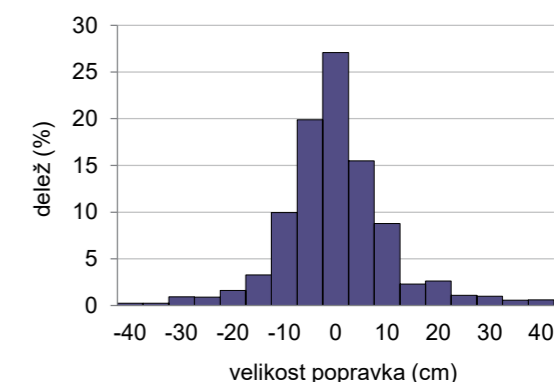
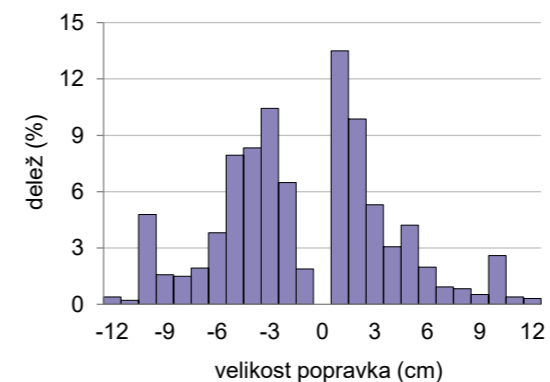
Podobno kot pri prostorski kontroli višine padavine smo tudi pri kontroli snega največ napak odkrili v zgodnejšem obdobju meritev, po letu 1972 pa se je njihovo število precej zmanjšalo (slika 10). Spreminjanje števila napak iz leta v leto je veliko, saj je močno odvisno od števila dni s snežno odejo in števila dni s sneženjem. V nekaterih letih z obilico snega, na primer v letih 1969, 1971, 1996

in 2005, je teh napak relativno veliko, v nekaterih letih pa nekajkrat manj. V podatkih za leto 1989, ko je bilo izjemno malo snega, nismo odkrili nobene napake.

Popravki višine padavin so bili mnogo manjši kakor pri prostorski kontroli, 90 % jih je v razponu od –1 mm do 11 mm (slika 11). Vrhovi popravkov so pri 2, 10 in 20 cm. Tudi pri višini novega snega so popravki večinoma majhni, 91 % jih je v razponu od –10 do 10 cm (slika 12). Izraziti vrhovi števila popravkov novega snega so pri vrednostih –10 cm, –3 cm, 1 cm in 10 cm. Mnogo večji so popravki višine snežne odeje, v nekaterih primerih tudi nekaj deset centimetrov (slika 12). Tudi tu je opaziti več vrhov (na sliki niso vidni), na primer pri –20 cm, –10 cm, 1–2 cm in 10 cm. Glede na statistiko popravkov višine snega sklepamo, da sta bila med



Slika 11. Porazdelitev velikosti popravkov višine padavin pri logični kontroli višine snega. Širina razreda je 2 mm, sredina je celoštevilaska soda vrednost (–12 mm, –10 mm itd.). Slab odstotek vseh popravkov je manjši od –13 % in dober odstotek večji od 25 %. Popravki na sliki niso prikazani.



Slika 12. Porazdelitev velikosti popravkov višine novega snega (levo) in snežne odeje (desno) pri logični kontroli višine snega. Širina razreda je pri novem snegu 1 cm in pri snežni odeji 5 cm. Pri snežni odeji je sredina razreda na 5 cm (–40 cm, –35 cm itd.). Pri višini novega snega je sedem odstotkov popravkov izven prikazanega razpona, pri snežni odeji je takšnih popravkov tri odstotke.

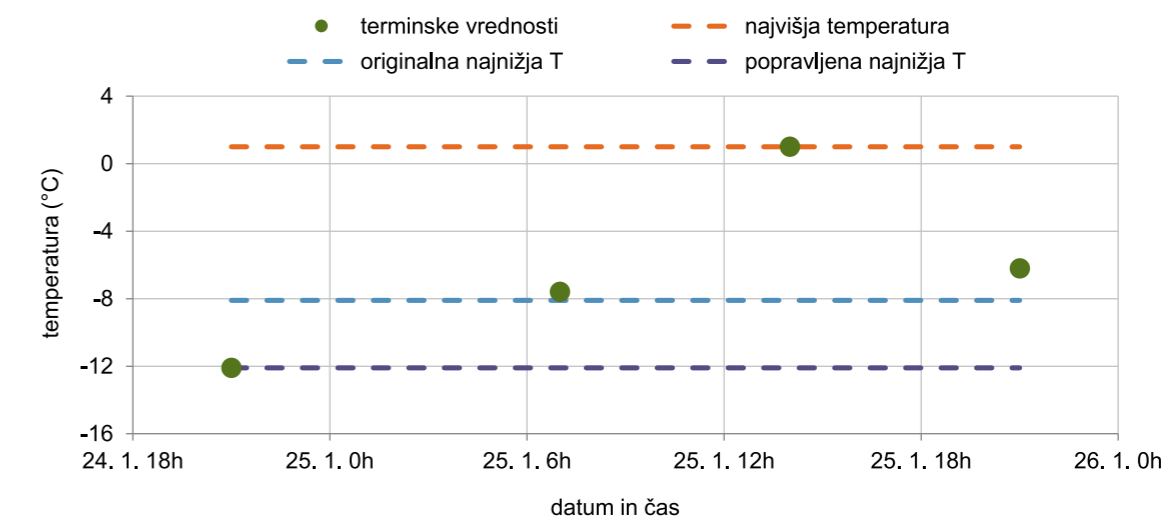
glavnimi razlogi za popravljanje malenkostno neujemanje podatkov in napačna ali odsotna vodilna številka.

Kontrola temperature zraka

Medsebojna skladnost različnih temperaturnih spremenljivk

V okviru projekta smo preverili kakovost meritev temperature zraka na opazovalnih podnebnih postajah. Opazovalci trikrat dnevno, ob 7., 14. in 21. uri po sončnem času, odčitajo trenutno temperaturo in v večernem terminu še najvišjo in najnižjo temperaturo preteklih 24 ur. Na nekaterih postajah merijo tudi najnižjo temperaturo zraka 5 cm nad tlemi. Meritve izvajajo s tekočinskimi termometri na 0,1 °C natančno.

Najprej smo preverili medsebojno skladnost izmerkov. Termenske vrednosti od 21. ure preteklega do 21. ure obravnavanega dne morajo biti znotraj intervala, ki ga omejujeta najnižja in najvišja temperatura obravnavanega dne (slika 13). Pri nočni najnižji temperaturi zraka 5 cm nad tlemi smo dovolili 1 °C pribitek glede na temperaturo ob 7. uri istega dne in temperaturo ob 21. uri dan prej. Preverili smo tudi močno izstopajoče izmerke: nenavadno nizka najnižja temperatura (več kot 10 °C nižja od drugih izmerkov v istem obdobju), nenavadno visoka najvišja temperatura (več kot 8 °C višja od drugih izmerkov) in nenavadno nizka nočna najnižja temperatura 5 cm nad tlemi (več kot 10 °C nižja od temperature ob 7. uri istega dne in temperature ob 21. uri prejšnjega dne). Naštetim merilom ni zadostilo več kot tisoč primerov. Skrbno smo pregledali le manjšino vseh sumljivih primerov, pri nekaterih manjših napakah pa smo se odločili za samodejni popravek.



Slika 13. Primer napačne vrednosti dnevne najnižje temperature: Rogaška Slatina, 25. januar 1963. Zapisana vrednost je bila 4 °C višja od temperature ob 21. uri dan prej. Popravljen vrednost se sklada z vsemi termenski vrednostmi v pripadajočem 24-urnem obdobju.

Preglednica 1. Število pregledanih in popravljenih vrednosti pri logični kontroli temperature zraka v obdobju 1961–2009

| Spremenljivka | Sumljivi | Vsi popravki | Izbrisane vrednosti |
|------------------------------|----------|--------------|---------------------|
| temperatura ob 7. uri | 1363 | 36 | 1 |
| temperatura ob 14. uri | 945 | 26 | 1 |
| temperatura ob 21. uri | 2268 | 118 | 3 |
| najnižja temperatura | 1094 | 496 | 2 |
| najvišja temperatura | 1025 | 384 | 1 |
| najnižja temperatura na 5 cm | 501 | 411 | 137 |
| skupaj | 7196 | 1471 | 145 |

Opisana kontrola je za obdobje od leta 1961 do leta 2009 razkrila kar nekaj napak, ki so prostorsko in časovno izrazito neenakomerno porazdeljene. Tudi med postajami so velike razlike, saj na večini postaj nismo našli niti 10 napak, pri nekaterih pa več kot 40. Skupno smo ročno preverili 7.196 sumljivih primerov, največ za temperaturo zraka ob 21. uri (preglednica 1). Popravili smo le petino preverjenih sumljivih vrednosti, še največ napak smo odkrili pri ekstremnih temperaturah. Nekaj posameznih vrednosti smo izbrisali iz podatkovne zbirke, več takšnih primerov je bilo le pri najnižji temperaturi zraka 5 cm nad tlemi. Kontrola te spremenljivke je bila tudi najbolj težavna, saj je le deloma omejena z vrednostjo drugih temperaturnih spremenljivk, pogosto pa od njih zaradi vremenskih razmer odstopa za več stopinj Celzija. Kljub navidezno velikemu številu popravkov je teh le 0,03 % vseh preverjenih temperaturnih vrednosti.

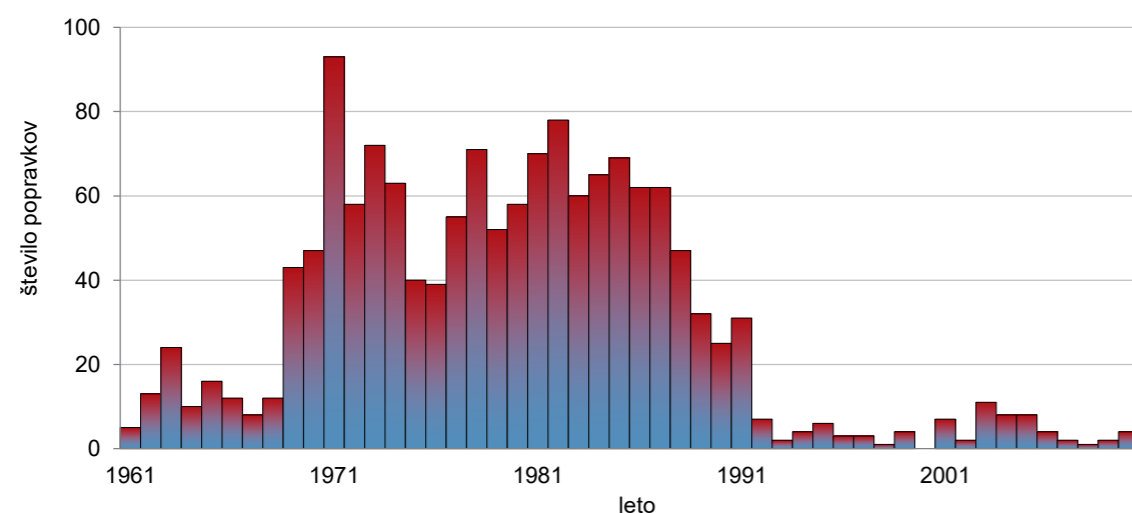
Časovni potek popravkov kaže izrazito povečano število popravkov v obdobju 1969–1991 (slika 14). Od leta 1992 je število najdenih napak zelo majhno, najverjetneje zaradi izboljšane operativne

kontrole. Pogostost popravkov je močno odvisna tudi od letnega časa; januarja jih je 273, avgusta le 40. V večini mesecev je popravkov med 80 in 170.

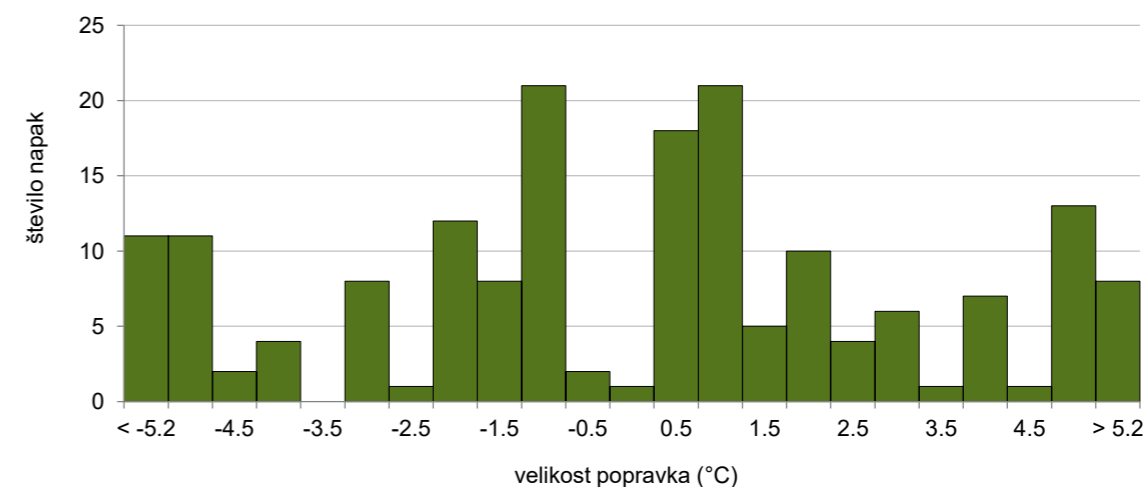
Velikostna porazdelitev popravkov je bila med temperaturnimi spremenljivkami zelo različna (sliki 15 in 16). Pri termiski temperaturi je bilo število pozitivnih in negativnih popravkov približno uravnoveženo, pri ekstremnih temperaturah pa izrazito asimetrično. Večinoma so popravki sorazmerno majhni, pod 2 °C, in posledica neskladnosti termiskih vrednosti z ekstremnimi vrednostmi (na primer temperature ob 21. uri in najvišje temperature zraka). Precej popravkov je bilo tudi velikosti 5 °C in 10 °C, kar je posledica merilne skale z večjimi razdelki na 5 °C in napačno zabeležene vodilne številke.

Prostorska kontrola temperature zraka

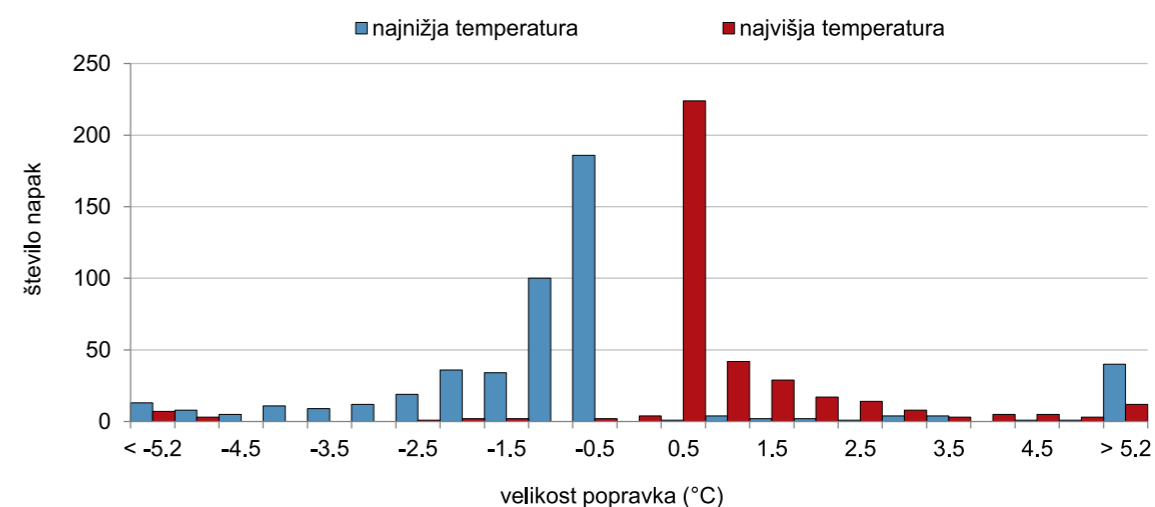
Po kontroli medsebojne skladnosti temperaturnih meritev smo nadaljevali s prostorsko kontrolo, primerjavo izmerkov s primerjalnimi postajami. Z računalniškim programom smo izpisali sumljive vrednosti



Slika 14. Časovni potek letnega števila popravkov pri logični kontroli temperature zraka, obdobje 1961–2009.



Slika 15. Porazdelitev velikosti popravkov pri logični kontroli termiske temperature zraka. Vrednosti na vodoravni osi predstavljajo sredino polstopinjskih intervalov.



Slika 16. Porazdelitev velikosti popravkov pri logični kontroli najnižje in najvišje temperature zraka. Vrednosti na vodoravni osi predstavljajo sredino polstopinjskih intervalov.

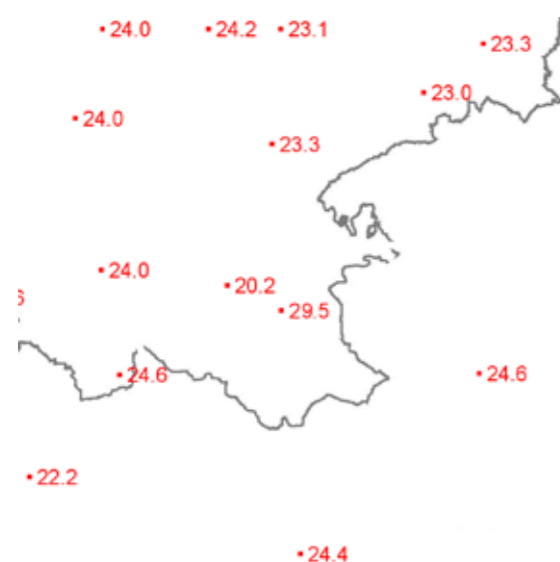
s pripadajočo statistiko. Najbolj sumljive ali izstopajoče vrednosti smo ročno preverili.

Računalniški izbor sumljivih vrednosti temelji na intenzivni statistični obdelavi meritev na kontrolirani in primerjalnih postajah v nekajletnem obdobju. Pri tem za vsak primer posebej upoštevamo časovno in prostorsko sliko več meteoroloških spremenljivk. Ocenjena vrednost kontrolirane spremenljivke kontroliranega dne na kontrolirani postaji temelji na podatkih vremensko sorodnih dni na kontrolirani in primerjalnih postajah. Testiranje je namreč pokazalo, da s tem izboljšamo interpolirano oceno v primerjavi z običajnim pristopom, v katerem zajamemo vse dni v določenem primerjalnem obdobju. Podroben opis celotnega postopka omenjene kontrole je v prilogi.

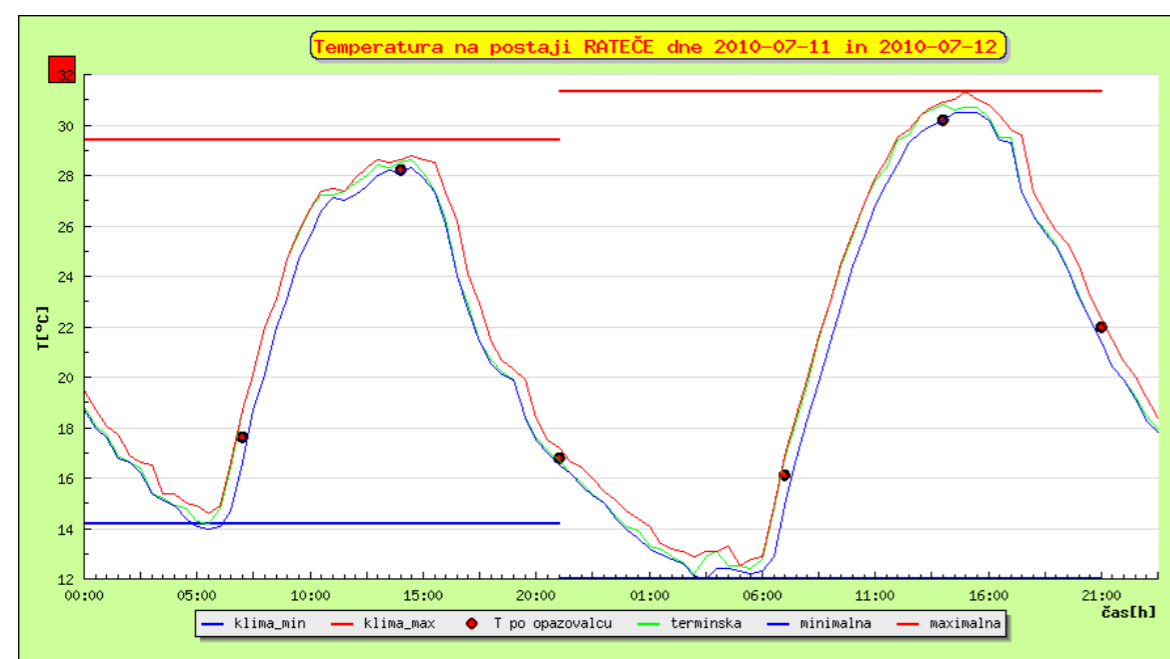
Po izpisu sumljivih vrednosti z omenjenim računalniškim programom za prostorsko interpolacijo temperaturnih podatkov smo najbolj sumljive vrednosti prenesli v poseben obrazec za ročno kontrolo. Od postaje do postaje smo preverili različno število primerov, za vsako spremenljivko od okoli 50 do nekaj 100 primerov. Pomagali smo si s termogrami, samodejnimi meritvami (za zadnje obdobje) in grafičnim pregledovalnikom vremena – računalniškim orodjem za vizualno primerjavo podatkov.

Pregledovalnik vremena je bil namenjen za prostorski prikaz posameznih spremenljivk in s tem za boljšo prostorsko predstavo o temperaturi zraka v izbranem primeru (slika 17). Na večini podnebnih postaj smo merili tudi s termografom,

tako da smo s pridom izkoristili časovne zapise temperature na trakovih. Ker so ti večkrat močno odstopali od dejanske temperature zraka, smo jih upoštevali nekoliko zadržano. Razlog za odstopanje je bil predvsem v slabi nastavitvi peresa, ki zapisuje potek temperature na termogram. Pri nizki temperaturi je pogosto prišlo do zamrzovanja termografa in s tem onemogočenega ali nepravilnega zapisa peresa na trak. V takšnih primerih je bil graf stopničast in termogram za kontrolo neuporaben.



Slika 17. Izsek prostorskega prikaza najvišje temperature zraka 18. junija 1970 – vrednosti v jugovzhodni Sloveniji in na bližnjih hrvaških postajah. Vrednost 29,5 °C za Črnomelj močno izstopa glede na okolico, zato smo jo popravili na 24,5 °C.



Slika 18. Primer primerjave časovnega poteka samodejnih meritev (krivulje) in meritev opazovalcev (krogci in vodoravni črti).

Z uvajanjem samodejnih meteoroloških postaj ob koncu 20. stoletja smo za kontrolo posameznih podnebnih postaj pridobili tudi podatke samodejne elektronske meritve temperature. Ročna kontrola je bila na podlagi teh podatkov malce hitrejša, saj smo s poteka temperature na samodejnih postajah enostavno razbrali, kdaj je bil obravnavani podatek podnebne postaje resnično napačen in ga je bilo treba popraviti (slika 18).

Popravke ročne kontrole smo shranili v datoteke, nato pa smo jih s posebnim računalniškim programom AMEBA vnesli v podatkovno zbirko (slika 19). Na koncu smo preverili skladnost vnesenih popravkov in omenjene datoteke ter izločili morebitne napake pri vnosu v zbirko.

Prostorska kontrola temperature zraka za obdobje 1961–2010 je razkrila mnogo več sumljivih in nepravilnih vrednosti od prej omenjene logične kontrole. V kontrolo smo zajeli 88 postaj s skupno 5,5 milijona izmerkov. Ročno smo preverili okoli 50.000 sumljivih izmerkov in jih 11.937 popravili (spremenili vrednost), 406 izbrisali iz podatkovne zbirke in 7 na novo vnesli v zbirko.

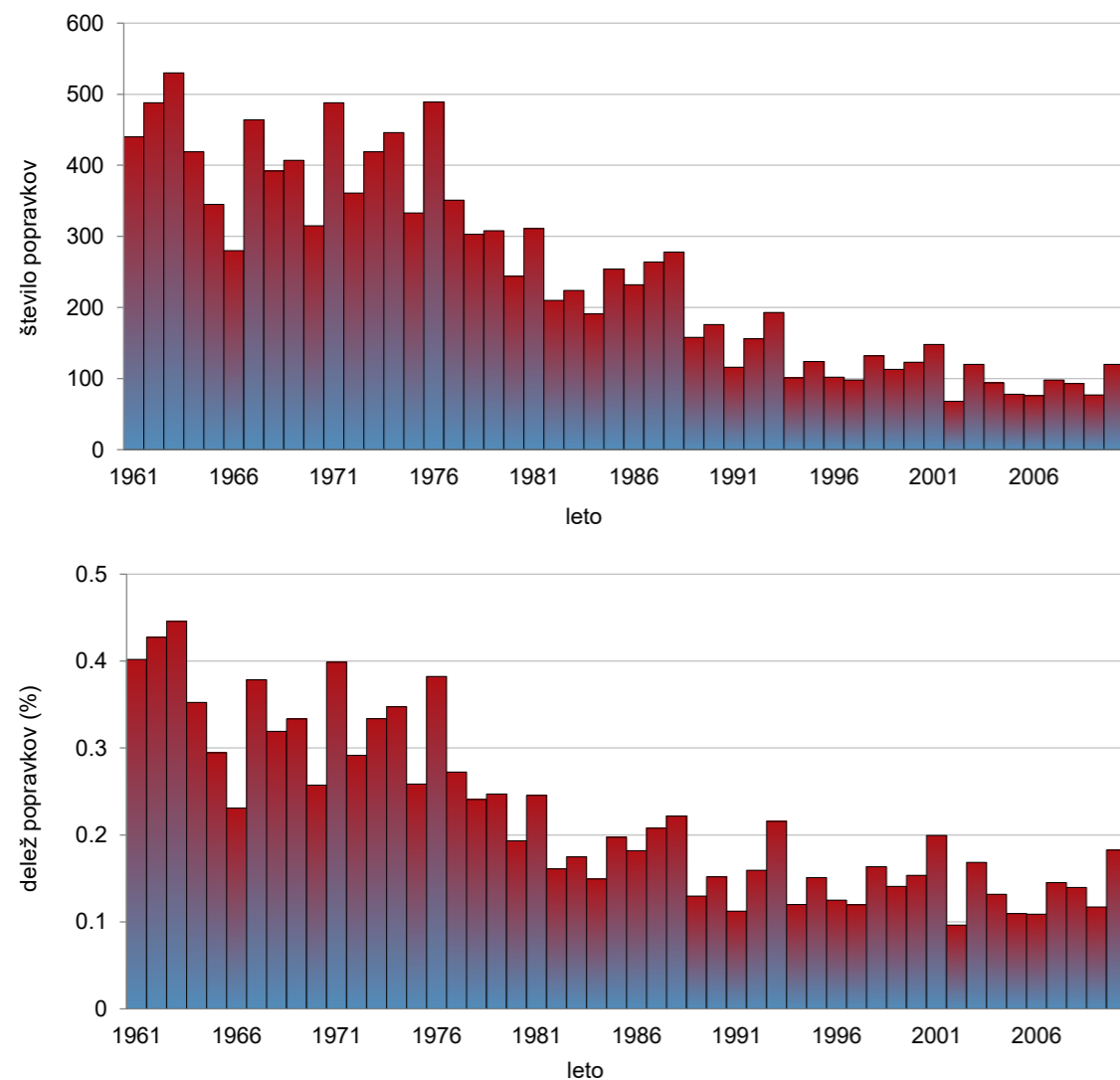
V postopku kontrole smo ugotovili zelo slabo kakovost časovnih nizov treh postaj in jih izločili iz nadaljnje obravnave. Pri nekaterih postajah so bili za nadaljnjo obravnavo neprimerni le odseki časovnih nizov. V nadaljevanju navajamo le statistični prikaz popravkov za 85 postaj, izključujoč zelo slabe časovne odseke.

| Uporabnik: kontrolor | | Št. postaje: 268 | | Tip postaje: 003 | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|------------------|-------------------|------------------|-----------|-------------------|----|------------|-----------|-------------------|----|
| Postaja: CELJE - MEDLOG | | IDMM: 1848 | | IDMM: 1848 | | | | | | | |
| Vnesel: kontrola | | Vnesel: kontrola | | Vnesel: kontrola | | | | | | | |
| Opazoval: | | Opazoval: | | Opazoval: | | | | | | | |
| 2015-03-04 | 7 | 14 | 21 | 2015-03-05 | 7 | 14 | 21 | 2015-03-06 | 7 | 14 | 21 |
| Zračni pritisk | 7446 | 7441 | 7465 | 7478 | 7462 | 7488 | | 7521 | 7517 | 7535 | |
| Minimalna na 5 cm | -58 | 0 | Minim. -27 | 22 | 0 | Minim. 39 | | -60 | 0 | Minim. -19 | |
| Suhli termometer | -3 | 0 | 112 | 46 | 0 | 86 | | -12 | 0 | 89 | |
| Mokri termometer | -4 | 0 | 61 | 15 | 0 | 34 | | -22 | 0 | 38 | |
| Led | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 0 | |
| Higrograf | 99 | 43 | 61 | 57 | 39 | 49 | | 79 | 37 | 54 | |
| smer | E | E | NE | E | NE | ENE | | NE | ENE | E | |
| jakost | | | | | | | | | | | |
| hitrost | 6 | 35 | 35 | 35 | 60 | 36 | | 5 | 59 | 24 | |
| Stanje tal | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | |
| Vidnost | 50 | 50 | 20 | 20 | 50 | 50 | | 50 | 50 | 50 | |
| Oblačnost | 9 | 9 | 10 | 10 | 8 | 6 | | 1 | 6 | 1 | |
| Višina padavin v zadnjih 24h ob 7h | -1 | 0 | Trajanje sonca 12 | 1 | 0 | Trajanje sonca 19 | | -1 | 0 | Trajanje sonca 78 | |
| Oblika padavin | -1 | | | 1 | | | | -1 | | | |
| Višina snežne odeje merjena ob 7. uri | Skupna | Novi sneg | Gostota snega | Skupna | Novi sneg | Gostota snega | | Skupna | Novi sneg | Gostota snega | |
| | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | | -1 | -1 | -1 | |

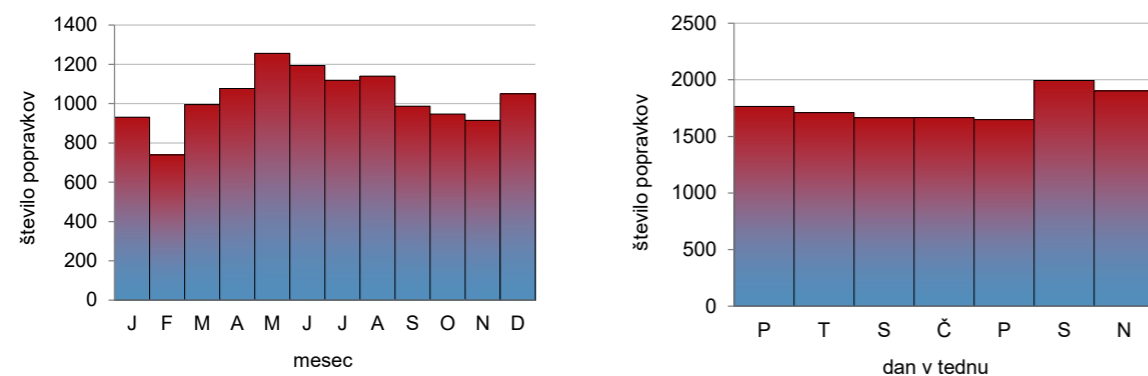
Slika 19. Program AMEBA, ki smo ga uporabili za vnos popravkov v podatkovno zbirko. V glavnem se program uporablja za prepis ročno zapisanih vrednosti, izmerjenih na opazovalnih postajah. Da bi prišlo pri prepisu do čim manj napak, program po videzu spominja na dnevnik opazovanj. Vnesene vrednosti program preveri in vnašalca pred zapisom v podatkovno zbirko opozori na nenavadne ali neskladne vrednosti.

Število popravkov se je med posameznimi spremenljivkami bolj ali manj razlikovalo. Pri temperaturi zraka ob 7. uri je bilo 2.055 popravkov, pri temperaturi ob 14. uri 1.911, pri temperaturi ob 21. uri 2.295, pri najvišji temperaturi 2.628 in najnižji temperaturi kar 3.461. Napake so bile po letih izrazito neenakomerno razporejene (slika 20). Pri vseh spremenljivkah jih je bilo več v 60. in 70. letih 20. stoletja, nato se je njihova pogostost zmanjšala in se v zadnjih 20 letih ustalila. Takšen trend je večinoma posledica izboljšane kontrole, zlasti uvedbe računalnika, in manj krčenja mreže podnebnih postaj od sredine 70. let. Na večini postaj smo popravili nekaj deset vrednosti, na nekaterih postajah zelo slabe kakovosti pa tudi več kot 300. Glede na dolžino zajetega merilnega obdobja je bila pogostost od manj kot 1 napake

na leto do več kot 10 na leto. Nekaj več popravkov je bilo od maja do avgusta in najmanj februarja, a so razlike med meseci le zmerno velike (slika 21). Tudi po dnevu v tednu popravki niso bili povsem enakomerno razporejeni; nekaj več jih je bilo v soboto in nedeljo (slika 21). Omenjena časovna porazdelitev po mesecih in dnevu v tednu pa se je med posameznimi spremenljivkami deloma razlikovala.

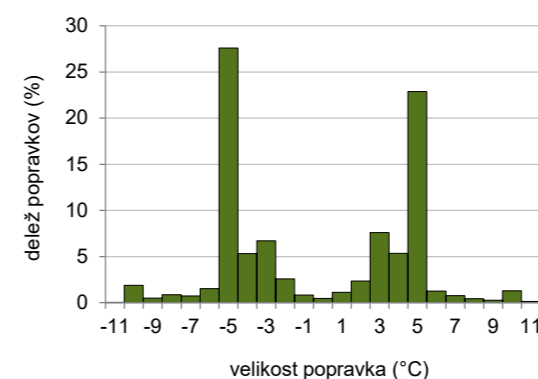


Slika 20. Letno število popravkov pri prostorski kontroli temperature zraka (zgoraj) in relativni delež napak na število podatkov (spodaj)



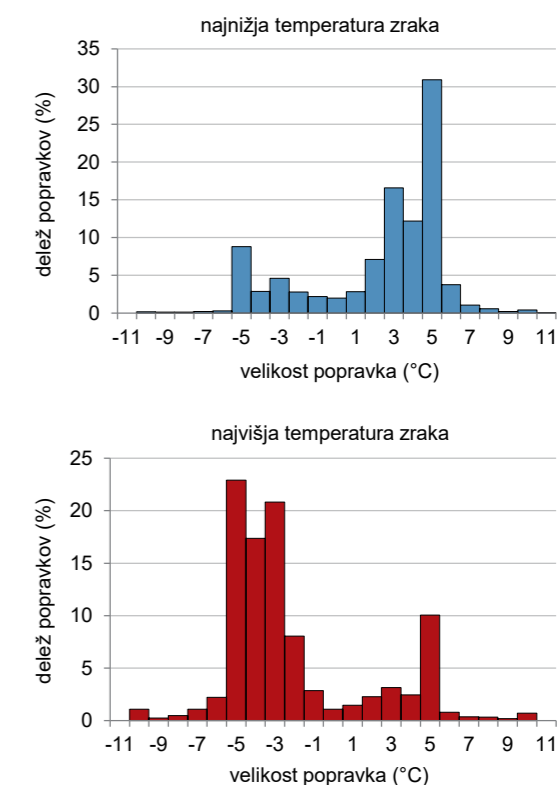
Slika 21. Število popravljenih vrednosti pri kontroli temperature zraka po mesecih (levo) in dnevu v tednu (desno)

Porazdelitev velikosti popravkov je precej drugačna kakor pri logični kontroli (sliki 22 in 23). Majhnih popravkov je malo, saj s prostorsko primerjavo težko odkrijemo majhne napake. Tako je največ popravkov velikosti okrog 5 °C, deloma tudi zaradi prej omenjene merilne skale, ki ima večji razdelek dolžine 5 °C. Opazovalci tako včasih zamenjajo sosednja razdelka in v dnevnik zapišejo za 5 °C napačno temperaturo zraka. V nekaj primerih so opazovalci tudi napačno zapisali vodilno številko ali za 10 °C narobe odčitali temperature s termometra – odtod več popravkov za 10 °C kakor pri sosednjih stopinjskih razredih. Pri vseh spremenljivkah sta opazna vrhova pri stopinjskih razredih -5 °C in 5 °C, a sta različno močno izražena. Pri temperaturi zraka ob 7. uri je izrazitejši vrh pri -5 °C (38 % vseh primerov), pri najvišji temperaturi razredi od -5 °C do -3 °C (61 % vseh primerov) in pri najnižji temperaturi vrh pri 5 °C (31 % vseh primerov). Oblika porazdelitve velikosti popravkov se v obravnavanem 50-letnem obdobju ne spreminja bistveno.



Slika 22. Porazdelitev velikosti popravkov pri prostorski kontroli terminske temperature zraka po stopinjskih razredih s celoštevilsko srednjo vrednostjo.

Aritmetična sredina razlike med popravljeno in izvorno vrednostjo se močno razlikuje med spremenljivkami, kar kaže na različen izvor napak. Pri temperaturi zraka ob 7, 14. in 21. uri znaša -1,5 °C, 0,6 °C in -0,1 °C; pri najvišji temperaturi znaša -2,1 °C in pri najvišji 2,2 °C. Povprečje je pri treh spremenljivkah od petih dokaj stalno v času, pri najvišji temperaturi je opazen negativen trend in pri temperaturi ob 14. uri sprva upad in nato še močnejši dvig.



Slika 23. Porazdelitev velikosti popravkov pri prostorski kontroli najnižje temperature (zgoraj) in najvišje temperature (spodaj) po stopinjskih razredih s celoštevilsko srednjo vrednostjo.

Število popravkov je skoraj pri vseh postajah zelo majhno glede na število vseh podatkov. Povprečno smo popravili okoli 0,2 % podatkov, torej je vpliv popravkov na časovne trende mesečnih in letnih povprečij zanemarljiv. Z redkimi izjemami je tudi sprememba posameznih mesečnih vrednosti zanemarljiva.

Ugotovili smo, da je kontrola temperature zraka zahtevnejša od kontrole višine padavin in snežne odeje, saj lahko na majhni razdalji prihaja do velikih razlik v enaki vremenski situaciji, denimo ob temperaturnem obratu v jasnem vremenu, ko se temperatura z višino naglo spreminja. Pri terminskih vrednostih je pogosto težko oceniti točnost podatka, razen če gre za veliko napako (5 °C ali več). Kontrola višinskih postaj je mnogo zahtevnejša od nižinskih. Najpogostejši viri napačnega podatka so nevestnost opazovalca, slabo odčitavanje z ekstremnih termometrov, okvara termometra in prepisovanje vrednosti s samodejne meteorološke postaje.

Kontrola hitrosti in smeri vetra

Kontrolirali smo le izmerjeno hitrost in smer vetra na samodejnih postajah v celotnem obdobju meritev, od leta 1989. V tem obdobju opravljamo na podatkih o vetru samo osnovne kontrole pri prepisu v uporabniško tabelo, torej tabelo s popravljenimi vrednostmi hitrosti in smeri vetra ter z označenim indeksom verodostojnosti. Kontrole so naslednje:

1. Trde meje za povprečno polurno (ali enourno) hitrost vetra, sunek in terminsko hitrost ter vse njihove smeri. Hitrosti morajo biti v intervalu med 0 in 35 m/s, sunki med 0 in 60 m/s, smeri med 0 in 360 stopinjami.
2. Notranja skladnost. Sunek mora biti večji od povprečne in terminske hitrosti. Terminska hitrost mora biti manjša ali enaka trikratniku povprečne hitrosti (za polurne meritve) oziroma šestkratniku povprečne hitrosti (za urne meritve).
3. Smer 0 se uporablja samo za hitrost 0 m/s, sever je označen s 360.

Najpogostejše napake so:

1. negativna hitrost,
2. visoke vrednosti hitrosti, tudi 1.700 m/s,
3. visoki sunki vetra, čez 50 m/s, ob drugače nizkem povprečju. Vreme v času meritev ne upravičuje takih sunkov,

4. previsoki, vendar na prvi pogled ne preveliki sunki vetra. Take sunke vetra je zelo težko odkriti in jih operativno še ne popravljamo,
5. povprečja in terminske vrednosti večji od sunkov,
6. manjkajoče vrednosti za smeri ob izmerjeni hitrosti,
7. veliko brezvetrja (hitrost vetra pod 0,3–0,5 m/s) ali veliko meritev s hitrostjo enako 0 m/s). To lahko kaže na okvaro merskega instrumenta,
8. zaustavitev smeri na eni vrednosti za daljše zaporedje meritev, kar kaže na okvaro merilnika smeri vetra.

Kontrola gostote toka globalnega in difuznega sevanja

Na nekaterih samodejnih meteoroloških postajah s piranometrom merimo gostoto toka globalnega in difuznega sevanja, ki pada na vodoravno ploskev z zgornje poloble. V podatkovno zbirko sproti zapisujemo polurne vrednosti: trenutno, povprečno, najvišjo in najnižjo vrednost. Daleč najbolj uporabljena in najlažje preverljiva med temi je polurna povprečna vrednost, zato smo kontrolo omejili na to spremenljivko.

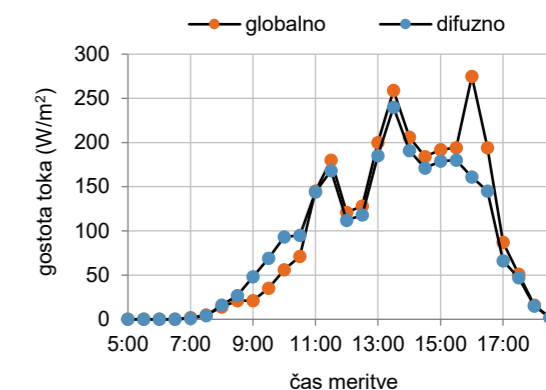
Na podlagi definicije spremenljivk, fizikalnih zakonitosti in empiričnega znanja izvajamo samodejno operativno kontrolo. Preverjamo skladnost meritev globalnega in difuznega sevanja z vrednostjo na vrhu ozračja, to je izvenzemljskim ali ekstrasolarnim sevanjem. Na postajah, kjer merijo tako globalno kakor difuzno sevanje, preverjamo medsebojno skladnost obeh vrst sevanja. Nekatere izstopajoče ali nenavadne vrednosti dodatno preverjamo s prostorsko kontrolo ali trajanjem sončnega obsevanja.

Številnih manjših in tudi večjih napak ni mogoče odkriti s samodejno kontrolo, zato smo v okviru projekta Podnebna spremenljivost Slovenije za večino postaj izvedli ročno kontrolo za obdobje od začetka meritev do vključno leta 2013.

Najprej smo grafično preverili skladnost poteka globalnega, difuznega in izvenzemljskega sevanja. Odkrili smo zlasti daljša obdobja slabih meritev difuznega sevanja zaradi nepravilno nastavljenega senčilnega obroča. Nato smo medsebojno primerjali časovne poteke gostote toka difuznega in globalnega sevanja na kontrolirani postaji, v primerjavo pa vključili še časovne poteke s katere od sosednjih postaj. Tako smo odkrili številne napačne vrednosti zaradi trdnih padavin,



Slika 24. Zasneženi piranometer za difuzno sevanje v Ljubljani 18. marca 2008 zjutraj (levo) in časovni potek globalnega in difuznega sevanja istega dne (desno). Malo po 8. uri je bil piranometer za difuzno sevanje očiščen in je do 10.30 kazal bistveno večjo gostoto toka od še vedno zasneženega piranometra za globalno sevanje. Kasneje se je sneg naglo stalil in od 11.30 dalje so bili izmerki obeh piranometrov pravilni.



ki pokrijejo piranometer (slika 24). Na podlagi meritev višine novega snega, temperature zraka, trajanja sončnega obsevanja in zapisanih pojavov v meteoroloških poročilih smo podrobno pregledali obdobja z veliko verjetnostjo za snežno odejo na stekleni kupoli piranometra. V podrobneje pregledanih obdobjih smo odkrili tudi popačene izmerke zaradi slane ali ivja na kupoli piranometra. Nekaj je bilo tudi primerov sistematične napake zaradi neprimerne nastavitve parametrov v elektroniki in okvare inštrumenta.

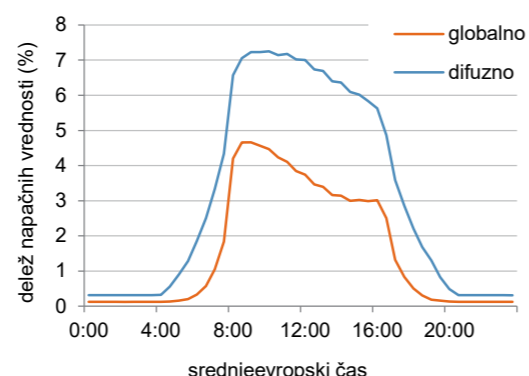
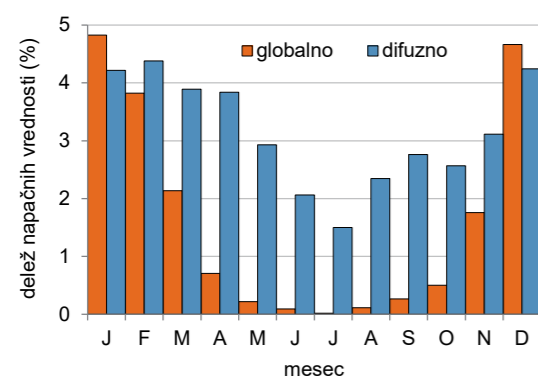
Sestavili smo seznam slabih meritev in zraven dopisali tudi vzrok slabe meritve. Program za samodejno kontrolo uporabi ta seznam, da napačne vrednosti izbriše iz podatkovne zbirke in jih nadomesti z interpoliranimi vrednostmi na podlagi časovno bližnjih meritev, meritev sorodnih postaj ali z vrednostmi, izračunanimi iz trajanja sončnega obsevanja na postaji.

Skupno smo za obdobje 1992–2013 v osnovni podatkovni zbirki odkrili 207.753 vrednosti napačne ali slabe kakovosti. Pri globalnem sevanju je bilo napak 115.994, kar je 1,6 % vseh vrednosti v zbirki, in pri difuznem sevanju 91.759 ali 3,2 % vseh vrednosti. Ker skoraj polovica vseh izmerjenih vrednosti sodi v nočni čas, je odstotek napačnih ali slabih vrednosti v svetlem delu dneva skoraj dvakrat tolikšen in doseže vrh dopoldne s 4,7 % pri globalnem sevanju in 7,3 % pri difuznem sevanju. Dopoldanski vrh lahko razložimo z jutranjim čiščenjem senzorjev, še bolj pa z vremenskimi razmerami. Pri globalnem sevanju je vreme v 92 % primerov vzrok za slab izmerek, pri difuznem znaša ta delež 36 %. Glavna vremenska vzroka za takšne napačne izmerke sta snežna odeja in slana (preglednica 2). Sneg, še bolj pa slana, sta na senzorjih pogostejša v nočnem in jutranjem času in se med dnevom pogosto stalita (slika 25).

S tem pojasnimo mnogo slabšo kakovost zimskih meritev od poletnih, zlasti pri globalnem sevanju. Pri difuznem sevanju je daleč najpomembnejši razlog za slabo meritev nepravilna lega senčilnega obroča, ki je odvisna od vestnosti opazovalca na postaji. Delež slabih in napačnih meritev z leti ne kaže izrazitega linearnega trenda, temveč niha v skladu s stanjem posameznih postaj. Pri globalnem sevanju delež slabih ali napačnih vrednosti na večini postaj ni presegel 2 %: največji, 4–5-odstotni delež, je bil na Rogli, Kredarici in Krvavcu, kjer je sneženje najpogostejše. Pri difuznem sevanju sta se najslabše odrezali postaji Radenci (13 %) in Maribor Tabor (10 %), v obeh primerih zaradi nepravilno nastavljenega senčilnega obroča.

Preglednica 2. Statistika popravljenih vrednosti globalnega in difuznega sevanja

| Vzrok | Globalno | Delež (%) | Difuzno | Delež (%) |
|-------------------------------|----------|-----------|---------|-----------|
| sneg | 82998 | 71,6 | 26616 | 29,0 |
| slana | 14954 | 12,9 | 2436 | 2,7 |
| druge padavine | 8249 | 7,1 | 3663 | 4,0 |
| okvara | 5229 | 4,5 | 682 | 0,7 |
| napačno nastavljeni parametri | 0 | 0,0 | 7104 | 7,7 |
| ničla | 2676 | 2,3 | 757 | 0,8 |
| zamik ure | 1529 | 1,3 | 876 | 1,0 |
| senčilni obroč | 0 | 0,0 | 49361 | 53,8 |
| drugi vzroki | 359 | 0,3 | 264 | 0,3 |
| skupaj | 115994 | 100,0 | 91759 | 100,0 |



Slika 25. Povprečni sezonski (levo) in dnevni (desno) potek deleža napačnih vrednosti globalnega in difuznega sevanja

Kontrola trajanja sončnega obsevanja

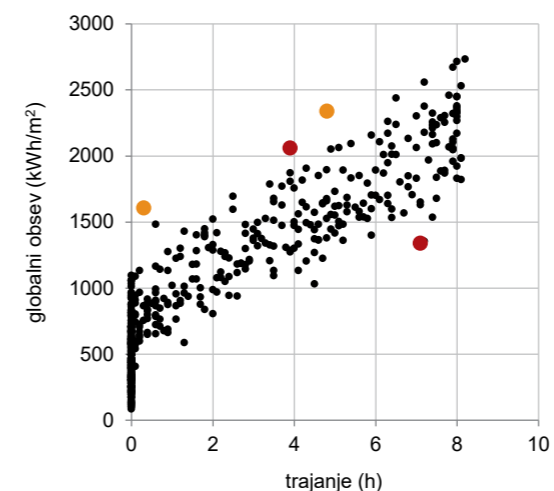
V okviru projekta smo preverili kakovost urnih in dnevni vrednosti trajanja sončnega obsevanja. Primerjali smo jih z gostoto toka globalnega sevanja in količino oblačnosti. Preverili smo skladnost dveh podatkovnih tabel, to je urnih vrednosti in dnevni vsoti, ter iskali ponavljajoče se dnevne vrednosti, ki so lahko posledica podvajanja istega podatka.

Trajanje sončnega obsevanja v državni mreži meteoroloških postaj že desetletja merimo s Campbell-Stokesovim heliografom. Za odčitavanje traku obstaja nekaj pravil (vrednotenje oblike robu, vzorec in jakost sledi), a je zlasti v spremenljivem vremenu težko objektivno oceniti trajanje sončnega obsevanja. Preprosta merilna naprava sicer omogoča enostavne meritve, a so te lahko obremenjene z znatno sistematično napako, do 10 %.

V sončnem vremenu je gostota toka globalnega sevanja vedno sorazmerno velika, v posameznih

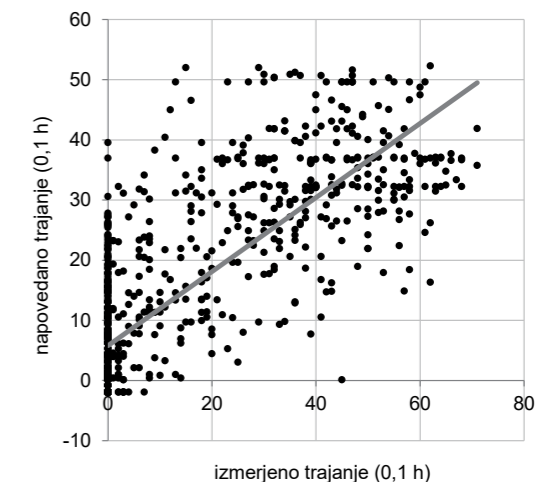
primerih z veliko difuzne svetlobe pa je velika tudi v oblačnem vremenu brez vidnega Sonca. Skladnost globalnega sevanja in trajanja sončnega obsevanja je večja na dnevni kakor na urni ravni. Druga težava pri primerjavi urnih podatkov je časovni zamik meritev trajanja sončnega obsevanja. Zaradi nenatančne postavitve heliografa ali nepravilne namestitve lepenke lahko pride tudi do polurnega ali še večjega zamika glede na dejanski čas. Zaradi omenjenih razlogov smo tako preverili le skladnost dnevni vrednosti trajanja sončnega obsevanja in globalnega obseva. Za vsako postajo in mesec ali polovico meseca smo izrisali razsevni grafikon globalnega obseva v odvisnosti od trajanja sončnega obsevanja (slika 26). Zveza je približno linearna, zato so najbolj sumljive vrednosti daleč proč od glavne veje. Takšne vrednosti smo podrobneje preverili v papirnatem in digitalnem arhivu, pri čemer smo upoštevali vremenske razmere. Močno odstopajoče napačne vrednosti smo popravili in popravke vnesli v digitalno podatkovno zbirko. Pri kontroli medsebojne skladnosti trajanja sončnega obsevanja in globalnega obseva smo ročno pregledali 421 primerov in jih od tega 108

popravili. Delež popravljenih vrednosti izmed vseh vrednosti dnevnega trajanja sončnega obsevanja znaša le 0,2 %. Najpogostejši razlogi za veliko odstopanje od prave vrednosti so bili slana in sneg na piranometru ter slab trak na heliografu.



Slika 26. Odvisnost izmerjenega dnevnega globalnega obseva od izmerjenega trajanja sončnega obsevanja v Ljubljani za januar, obdobje januar 1994–januar 2010. Oranžni znak pomeni napačno vrednost globalnega obseva in rdeči napačno vrednost trajanja.

V nadaljevanju smo primerjali skladnost dnevnega trajanja sončnega obsevanja z opazovanji količine oblačnosti ob 7., 14. in 21. uri po zimskem času. Za vsak mesec ali polovico meseca in vsako postajo smo izračunali regresijsko premico za trajanje v odvisnosti od oblačnosti. Upoštevali smo vse tri terminske vrednosti in njihove kvadrate, skupno torej šest spremenljivk. Podobno kot pri primerjavi z globalnim obsevom smo izrisali graf odvisnosti napovedane vrednosti trajanja od izmerjene (slika 27). Izstopajoče vrednosti smo primerjali s papirnatim in digitalnim arhivom. Sestavili smo seznam sumljivih dni, kjer smo označili posamezne sumljive in napačne vrednosti trajanja sončnega obsevanja in oblačnosti. Napačne vrednosti smo popravili in popravke vnesli v digitalno zbirko. Pri kontroli medsebojne skladnosti meritev trajanja sončnega obsevanja in količine oblačnosti smo pregledali 1.858 primerov in jih od tega popravili 421; pri 345 od teh smo popravili trajanje sončnega obsevanja. Delež popravkov med vsemi dnevnimi vrednostmi trajanja sončnega obsevanja v podatkovni zbirki je le ena tisočina. Najpogostejši razlogi za napake so bili pojav slane in ivja na heliografu ter zamenjava dneva pri digitalizaciji trakov.

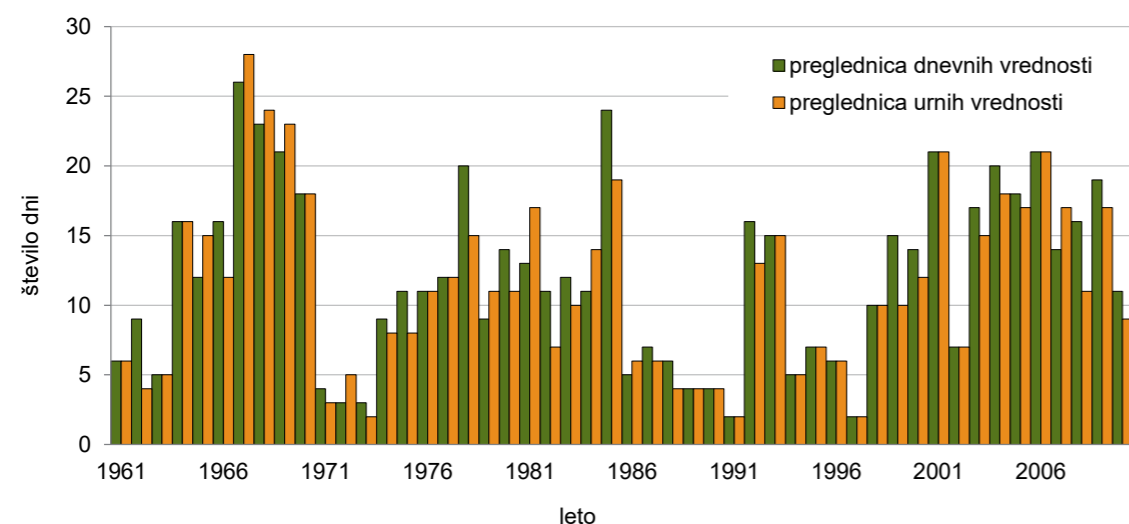


Slika 27. Razsevni grafikon iz oblačnosti napovedanega dnevnega trajanja sončnega obsevanja v odvisnosti od izmerjene vrednosti. Vrednosti, ki so najdlje od regresijske premice, so najbolj sumljive.

Pri kontroli skladnosti trajanja sončnega obsevanja v dveh podatkovnih tabelah, z dnevno vsoto in urnimi vrednostmi, smo ugotovili 100 primerov neskladnosti v dnevnem trajanju, kar je le 0,03 % vseh dnevnih vrednosti. Popravki so bili enakomerno porazdeljeni po celotnem obdobju kontrole podatkov.

V tabelah z urnimi in dnevnimi vrednostmi smo našli več primerov z enakim zapisom v zaporednih dneh in tiste z deloma sončnim vremenom podrobno preverili. Popravili smo podatke za 79 dni.

Skupno smo v postopku kontrole trajanja sončnega obsevanja popravili 601 dnevno vrednost, od tega jih je bilo 100 izbrisanih iz podatkovne zbirke. Mnogo več je bilo popravljenih urnih vrednosti, in sicer v 563 dneh. Od tega so bile za 100 dni vse urne vrednosti izbrisane. V pregledanem obdobju 1961–2010 so popravki neenakomerno razporejeni, z obdobji večje in manjše pogostosti (slika 28). Največ popravkov je bilo pri postajah Vojsko in Letališče E. R. Maribor, kjer smo popravili vrednosti v 52 oziroma 50 dneh. Polovica postaj je imela popravke v največ 12 dneh. Največ napačnih vrednosti smo zaznali decembra in januarja, najmanj od marca do avgusta. Presežek napak pozimi glede na druge mesece izvira iz motenega delovanja heliografa zaradi slane, snega ali ivja, ki zmanjšajo ali onemogočajo zbiranje žarkov v gorišču.



Slika 28. Časovni potek letnega števila popravljenih dnevni vrednosti trajanja sončnega obsevanja (zeleno) in števila dni s popravljenimi urnimi vrednostmi trajanja sončnega obsevanja (oranžno)

Kontrola zračnega tlaka

Meritve zračnega tlaka se izvajajo na maloštevilnih meteoroloških postajah, a hkrati se odklon zračnega tlaka od povprečnih razmer v prostoru in času spreminja le počasi. To omogoča dokaj zanesljivo in enostavno kontrolo vrednosti zračnega tlaka. Preverjali smo kakovost vseh izmerkov zračnega tlaka na glavnih postajah ob 7., 14. in 21. uri po srednjeevropskem času v obdobju od začetka meritev do sredine leta 2010.

Z drugimi meritvami (na okoliških postajah, samodejni postaji na isti lokaciji) smo preverili skoraj 600 posameznih sumljivih vrednosti in jih 94 % popravili. Delež popravljenih vrednosti je bil izjemno majhen, saj celotna zbirka izmerjenih podatkov do sredine leta 2010 obsega skoraj milijon vrednosti. Nekaterih vrednosti zaradi skromne mreže postaj ni bilo mogoče ustrezno preveriti. Poleg tega smo odkrili nekaj različno dolgih obdobjih sistematično napačnih vrednosti, večinoma zaradi okvare barometra.

Skrbne meteorološke meritve in vzdrževana okolica meteorološke postaje so ključni za zanesljivost podnebnih podatkov. Homogenizacija lahko le deloma odpravi vpliv nepodnebnih dejavnikov na meritve.



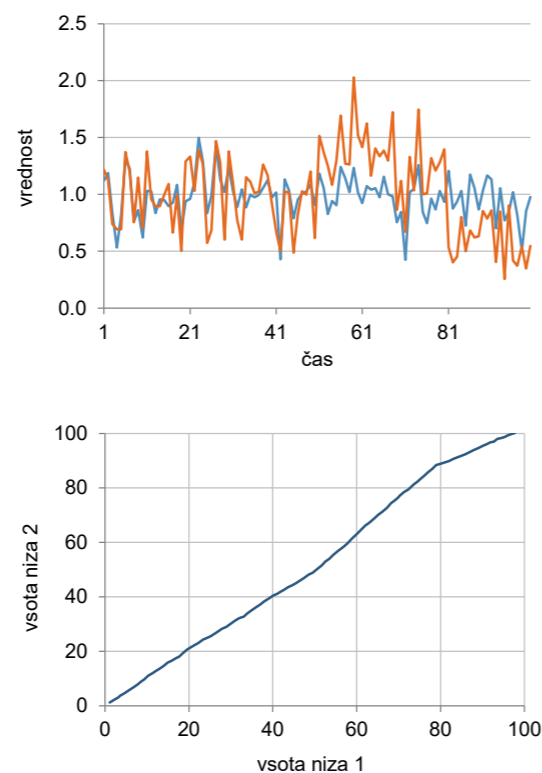
HOMOGENIZACIJA PODNEBNIH PODATKOV

Ideja o odstranitvi sistematične napake zaradi tehničnih vzrokov iz časovnih nizov meteoroloških meritev sega v obdobje nastanka meteoroloških mrež. Prve metode so temeljile na vizualnem pregledu izmerkov in uporabi eksperimentalnih meritev. Kreil (1854) je s primerjalnimi meritvami v Padovi popravil dolgoletni niz dnevne povprečne temperature zraka v Milanu, ki je namesto na urnih vrednostih temeljil na sedmih meritvah v dnevu.

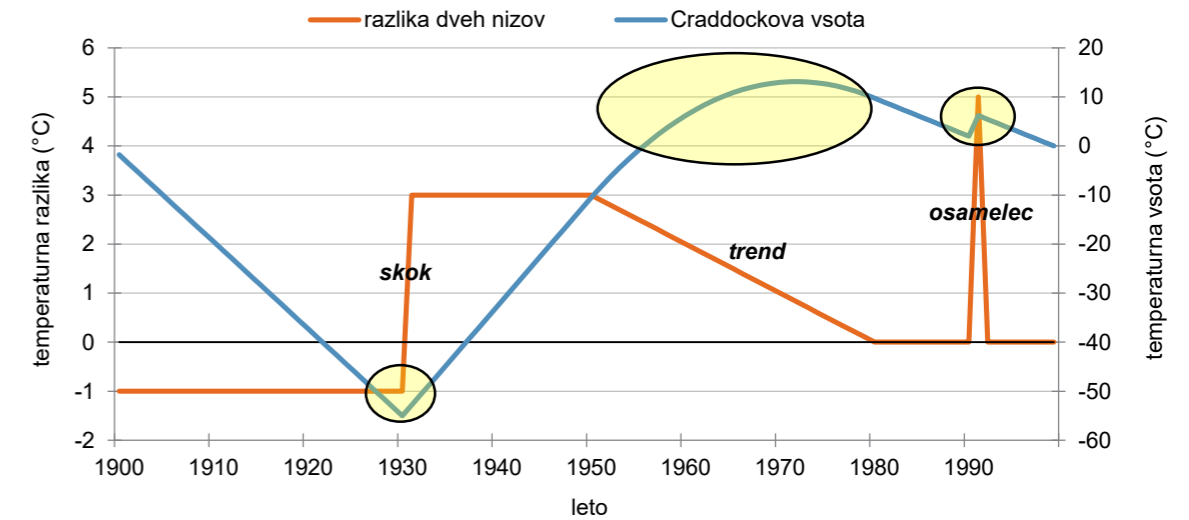
Zgodovinski pregled homogenizacije v svetu

Prvi znani primer statistične homogenizacije je iz leta 1925, ko je Conrad razdelil padavinski niz v dva dela in ju statistično primerjal (Conrad, 1925). Premikal je leto razdelitve in ugotavljal, kdaj je statistična razlika med obema deloma največja. Daljši časovni nizi pogosto vsebujejo več prelomov, a pred letom 1990 je bil razvoj v glavnem usmerjen v metode za zaznavo posameznega preloma v nizu. Od sredine stoletja je bila med priljubljenimi metoda dvojne kumulative (ang. double-mass analysis), to je primerjava nakopičenih razlik med dvema postajama (slika 29). Podobni metodi sta razvila Craddock (1979) in Buishand (1982), pri čemer je druga nekoliko bolj objektivna. V istem obdobju so bili v uporabi različni statistični testi, ki so temeljili na neparametričnih metodah, metodi največjega verjetja, primerjavi povprečij odsekov in prilaganju regresijske premice.

Craddockova metoda je subjektivna homogenizacijska metoda, pri kateri so primerjalni nizi homogeni nizi ali dovolj dolga obdobja homogenih podatkov (Aguilar in sod., 2003). Pri testu izračunamo vsoto normalizirane razlike med dvema nizoma, kontroliranim in primerjalnim, od začetnega do tekočega leta (slika 30).



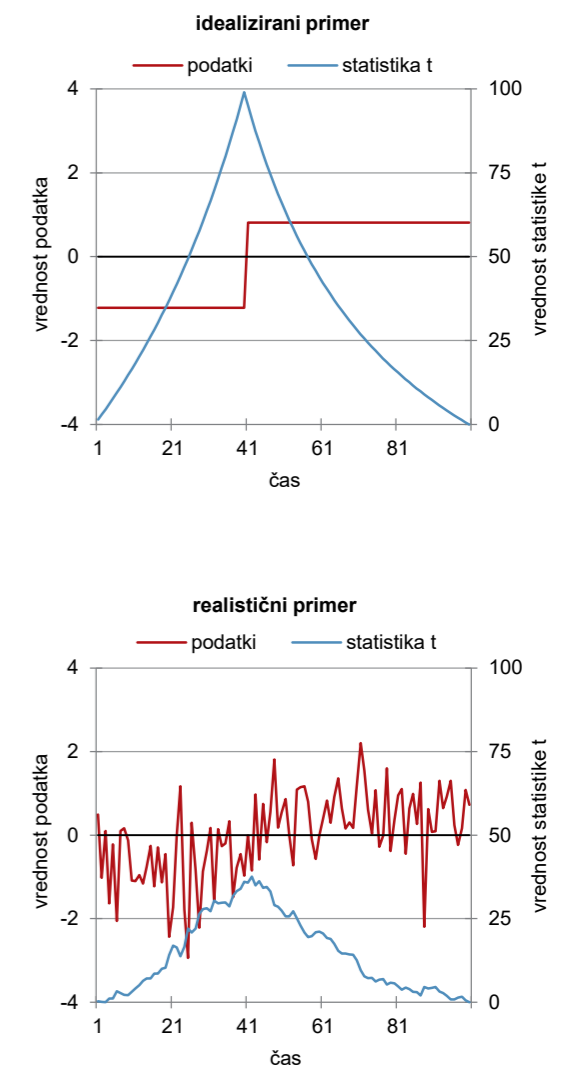
Slika 29. Primer delovanja metode dvojne kumulative. Zgoraj sta prikazana dva časovna niza, pri čemer ima oranžna krivulja preloma pri času 51 in 81. Na grafikonu dvojne kumulative (spodaj) sta preloma vidna kot nenadni spremembi naklona.



Slika 30. Prikaz delovanja Craddockove metode. Oranžna krivulja pomeni razliko med časovnim nizoma dveh postaj in modra popravljen kumulativno vrednost (Craddockova vsota). Nenadni skok v razliki se odraži kot zlom kumulativne krivulje, posamezna napačna vrednost kot zamik in dolgoletni trend kot ukrivljenost.

Standardni normalni homogenizacijski test (ang. Standard normal homogeneity test, s kratico SNHT) sodi med doslej najbolj uporabljene homogenizacijske metode v klimatologiji (Aguilar in sod., 2003). Test temelji na nizu razlike ali razmerja kontroliranega in primerjalnega niza, ki mu nato odštejemo povprečje in ga delimo z njegovim standardnim odklonom. Niz razdelimo na dva dela in s premikanjem lege razdelitve ugotavljamo največjo vrednost statistike t , ki je hkrati tudi mesto potencialnega preloma (slika 31). Obstaja več različic tega testa, za več prelomov in tudi za iskanje trendov.

Ker želimo pri homogenizaciji ločiti podnebni, za neko območje značilni signal, in umetni, nepodnebni signal, praviloma analiziramo nize razlik dveh postaj, in ne posameznih nizov. Pri tem se zastavlja vprašanje izvora razlike med dvema nizoma, to je s katere postaje izvira napaka. Temelje modernim metodam, ki lahko hkrati obravnavajo več prelomov v časovnem nizu, je postavil že Hawkins (1972), a je bila njegova zamisel široko sprejeta in uporabljena šele okoli 30 let pozneje. Homogenizacija kot sestavni del analize podnebja je postala pomembna okoli leta 1990, ko so podnebne spremembe začeli obravnavati kot potencialno resen problem. Leta 1994 je bil v Budimpešti prvi od rednih seminarjev za kontrolo podatkov in homogenizacijo. V tistem času je nekaj raziskovalcev razvilo metode za hkratno odkrivanje prelomov v posameznem nizu (Szentimrey, 1996; Caussinus & Mestre, 1996), Easterling & Peterson (1995) pa sta se enakega problema lotila s postopnim odkrivanjem prelomov in deljenjem časovnega niza. Slednja sta že leto prej predstavila uteženo linearno kombinacijo nizov primerjalnih postaj kot metodo za izračun primerjalnega



Slika 31. Primer delovanja metode SNHT z idealiziranim primerom (zgoraj) in realističnim (spodaj). Najbolj verjetna točka preloma ustreza maksimumu statistike t (modra krivulja).

niza (Peterson & Easterling, 1994). Leta 1996 je bila objavljena tudi prva metoda za odkrivanje prelomov in trendov (Lanzante, 1996).

V naslednjih letih so bile opravljene prve primerjalne študije, a z nekaterimi pomanjkljivostmi: slaba statistična primerljivost umetnih nizov z izmerjenimi, omejenost primerjave na čas prelomov, majhno število preskušanih metod. Raziskave od leta 2004 naprej so razkrile pomembne statistične lastnosti izmerjenih nizov, kar je vplivalo na nadaljnje preskušanje in razvoj metod za homogenizacijo. Vse večji poudarek je bil na razlikah med izvornim in homogeniziranim nizom, zlasti na korenu povprečnega kvadrata napake (ang. root mean square error) in razliki v linearnem trendu.

Najobsežnejši preskus obstoječih homogenizacijskih metod je bil opravljen v okviru projekta COST ES0601 (HOME) v obdobju 2007–2011. Številne homogenizacijske metode so bile temeljito preskušene na pestrem naboru podatkovnih zbirk mesečnih podatkov o temperaturi zraka in padavinah z različnih evropskih območij. Pri tem kontrolorji niso poznali pravih rezultatov (slepi poskus). V analizi homogenizacijskih rezultatov so se pokazale pomembne razlike med modernimi delno ali popolnoma samodejnimi statističnimi metodami (MASH, PRODIGE, ACMANT, USHCN) in starejšimi statističnimi metodami (SNHT, PMT). Nenavadno dobro se je odrezala Craddockova metoda, kjer so bili rezultati podobno kakovostni kakor pri omenjenih modernih metodah. Po homogenizaciji temperaturnih nizov z najboljšimi metodami se je na splošno močno izboljšala pravilnost ocene dolgoročnega trenda tako na posameznih postajah kakor na ravni mreže postaj (Venema in sod., 2012). Nasprotno je bilo izboljšanje pri korenu povprečnega kvadrata napake pri mesečnih vrednostih skromno in pri letnih zmerno. V projektu COST HOME je bil na podlagi rezultatov razvit programski paket HOMER, ki združuje najboljše dele obstoječih homogenizacijskih metod, skupaj z metodo sočasne delitve nizov, ki se uporablja v analizi DNK (ang. joint segmentation method) (Domonkos in sod., 2012).

V istem časovnem obdobju in v naslednjih letih je bilo nekaj raziskav usmerjenih v proučevanje občutljivosti nastavitve parametrov samodejnih homogenizacijskih metod. S temi parametri določamo obseg primerjave nizov in izračun popravkov. Williams, Menne in Thorne (2012) so preskusili metodo USHCN za številne vrednosti homogenizacijskih nastavitvev in različne umetne nize podatkov, ki so podobne prizemnim meritvam

temperature v mreži ZDA, a se razlikujejo po vrsti in strukturi vstavljenih nehomogenosti. Njihova analiza homogeniziranih vrednosti je za večino primerov pokazala znatno izboljšanje ocene trenda na ravni mreži, to je približanje ocene trenda vrednosti, ki temelji na povsem homogenih podatkih. Izboljšanje je bilo odvisno bolj od vrste in strukture nehomogenosti kakor od homogenizacijskih nastavitvev.

Zgodovinski pregled homogenizacije v Sloveniji

Strokovne in znanstvene študije podnebnih sprememb v Sloveniji so do nedavnega praviloma temeljile na kontroliranih podatkih, a časovni nizi teh podatkov niso bili homogenizirani. Nekateri raziskovalci so sicer iz analize podatkov in metapodatkov ugotovili neprimernost nekaterih podatkov za analize podnebja, a homogenizacija šele v zadnjih letih postaja sestavni del podnebnih analiz.

Gavazzi (1925) je že v začetku 20. stoletja ugotovil, da ljubljanska meteorološka postaja na državni realki na Vegovi ulici nima primerne mesta, zato jo je preselil na boljše mesto. Težave pri primerjavi temperature z različnih merilnih mest zaradi drugačne namestitve termometrov in vpliv mestnega toplotnega otoka omenja nekaj let kasneje Reya (1937).

Gams in Krevs (1990) sta analizirala spreminjanje podnebnih razmer glede temperature zraka in višine padavin v 18. ali 19. stoletju v Evropi in naših krajih. Ugotovila sta različne spremembe, odvisno od regionalne in lokalne lege meteoroloških postaj. Omenila in ovrednotila sta vpliv mestnega toplotnega otoka glede na podeželje, a nista navedla homogenizacije časovnega niza podatkov ali uskladitve podatkov različnih merilnih mest posamezne meteorološke postaje. Obdelala sta padavinske podatke, s poudarkom na Trstu in Ljubljani. Pri temperaturi zraka sta analizirala podatke peščice meteoroloških postaj v Sloveniji.

Vpliv mestnega toplotnega otoka na temperaturo zraka omenja tudi Klimatografija Slovenije 1961–1990 in ga prikaže na primeru Maribora, kjer temperatura zraka v obdobju 1961–1990 narašča hitreje kakor v bližnjih Staršah (Mekinda-Majaron & Cegnar, 1995). Kljub omembi mestnega toplotnega otoka in selitev postaj, ki vplivajo na izmerjeno temperaturo, preglednice z mesečnimi vrednostmi temeljijo na nehomogeniziranih podatkih. Dolgoletna podnebna povprečja na podlagi takšnih podatkov so kljub temu uporabna, do težave in povsem napačnih zaključkov pa lahko pride pri medsebojni primerjavi

posameznih mesečnih vrednosti ali izračunu časovnih trendov. Problem nehomogenosti je prav tako prisoten pri drugih spremenljivkah iz zbirke Klimatografija Slovenije (HMZS, 1991; Zupančič, 1995; Ovsenik-Jeglič, 2000; MOPE, 2004).

O velikem vplivu mestnega toplotnega otoka in selitvah meteoroloških postaj na časovni niz temperature v Ljubljani piše tudi Trontelj (1997), a kljub temu navaja le nehomogenizirane vrednosti, ki pa niso reprezentativne za večje območje.

Dolgoletni niz meritev globalnega obseva v Ljubljani od 1964 do 1994 je homogenizirala D. Kastelec (1998). Popravki so bili znatni, velikostnega reda 10 %. Poleg tega so bili popravki za krajši odsek celotnega obdobja (julij 1984–marec 1986) odvisni od urnega trajanja sončnega obsevanja.

Obsežno poročilo »Ranljivost slovenskega kmetijstva in gozdarstva na podnebno spreminjivost in ocena predvidenega vpliva« podrobno obravnava podnebne spremembe v Sloveniji, pri čemer v glavnem temelji na časovnem trendu v temperaturi zraka v obdobju 1951–2000 (Kajfež-Bogataj in sod., 2003). Izvorni podatki za izračun so le deloma homogenizirani, recimo za Črnomelj in Portorož zaradi selitve postaje. Podrobnejša analiza temperature zraka v Ljubljani od 1851 do 2002 temelji na izmerjenih podatkih, četudi avtorji poročila ugotavljajo, da niz zaradi selitev postaje in urbanizacije ni homogen.

V mednarodnem projektu INTERREG FORALPS (2005–2008), ki je bil namenjen izboljšanju vedenja o hidroloških in meteoroloških procesih v Alpah, je sodelovala tudi Agencija RS za okolje (Dolinar in sod., 2008). Z zbiranjem metapodatkov v uporabniku prijaznejšo obliko, digitalizacijo dela papirnatega arhiva ter homogenizacijo in rekonstrukcijo daljših nizov meritev smo dobili boljši vpogled v podnebne in vremenske razmere v preteklosti. V projektu je bil poudarek na poznavanju ekstremnih vremenskih razmer v preteklosti za oceno vpliva podobnih dogodkov na okolje in morebitno škodo ob podobnih primerih v prihodnosti. Z zbranimi metapodatki smo homogenizirali in dopolnili časovni niz dnevne povprečne temperature za Ljubljano (1866–2007), Rateče in Celje ter niz največje sezonske višine snežne odeje na Kredarici (1896–2007). Ljubljanski niz je bil homogeniziran z uporabo Craddockove metode, niz s Kredarice pa na podlagi meritev temperature zraka in višine padavin od novembra do aprila s sosednjih meteoroloških postaj (Nadbath, Pavčič & Vertačnik, 2008). Oba primera kažeta na podnebne spremembe v daljšem

časovnem obdobju in spremenljivost na letni ali dnevni časovni ravni.

Muri (2010) je za namen vrednotenja podnebnega modela RegCM3 homogeniziral nehomogene časovne nize povprečne temperature zraka na podlagi primerjave z domnevno homogenimi nizi podatkov. Za določanje točk prelomov je uporabil Mann-Whitneyjev test.

Sodobne metode homogenizacije podnebnih podatkov

V pomoč državnim hidrometeorološkim službam pri zbiranju metapodatkov in homogenizaciji podnebnih nizov je Svetovna meteorološka organizacija leta 2003 izdala Smernice za podnebne metapodatke in homogenizacijo (Aguilar in sod., 2003). Metapodatki so nepogrešljivi člen v verigi pridobitve visokokakovostnih in dolgih časovnih nizov podnebnih podatkov. Opisujejo namreč nepodnebne dejavnike, ki vplivajo na večino dolgih podnebnih nizov, kar ima lahko za posledico, da izmerjeni niz ne odraža več le dejanskega spreminjanja podnebnih razmer v času. Med nepodnebne dejavnike sodijo merilne naprave, načini merjenja, mikrolokacije postaj, formule za izračunavanje povprečij in spremembe v okolici postaje. Nekatere spremembe teh dejavnikov povzročijo ostre prelome in druge počasne spremembe v podatkih. Takšne nehomogenosti lahko vodijo do napačne razlage proučevanega podnebja. Torej je pomembno odstraniti nehomogenosti ali vsaj določiti možno napako zaradi njih. Znanje o zgodovini postaje izboljša zaupanje v rezultate statističnih metod, s katerimi želimo doseči, da časovni niz odraža le podnebno spreminjivost in podnebne spremembe.

Včasih je mogoče nize homogenizirati z neposredno primerjavo merilnih naprav ali zaklonov. Statistično dobljene razlike lahko neposredno uporabimo za korekcijo dela niza.

Številni raziskovalci so razvili metode za odkrivanje in odstranjevanje nehomogenosti iz podnebnih nizov. Pri tem so upoštevali številne dejavnike, ki vplivajo na postopek homogenizacije: meteorološka spremenljivka, časovna in prostorska spremenljivost, dolžina in popolnost podatkov, razpoložljivost metapodatkov in prostorska gostota postaj.

Zelo pomembno je preprečevanje sprememb na meteoroloških postajah in v njihovi okolici, saj vodijo do nehomogenosti; to naj velja

vsaj za postaje z dolgim nizom meritev, ki je uporaben za analizo podnebja. Globalni sistem za opazovanje podnebja (ang. Global Climate Observing System) za podnebna merilna mesta močno priporoča, da se vzdržuje kar se da stalen način meritev in inštrumentov (WMO, 2003). Priporočajo, da v opis zgodovine postaje pazljivo zabeležimo metapodatke o spremembah. Prav tako so pomembne nekajletne vzoredne meritve z novim in starim inštrumentom, saj je to najboljša možnost za ugotavljanje razlik in nato homogenizacijo.

Pred homogenizacijo je priporočljivo izrisati časovni niz podatkov, saj lahko kljub predhodni kontroli še vedno odkrijemo izstopajoče napačne vrednosti. Odkrivanje in odpravljanje nehomogenosti je težka in zahtevna naloga, saj je v večini primerov nehomogenost podobno velika ali manjša od dejanskega spreminjanja podnebnih razmer. Zaradi tega je priporočljiva primerjava izbranega niza s primerjalnim, saj slednji v grobem zajema širše podnebne učinke izbranega niza. Če sta oba niza homogena, bosta njuna razlika ali razmerje nihala okrog stalne vrednosti, brez nenadnih prelomov in trendov. Obstaja več načinov izračuna primerjalnega niza, med katerimi je najbolj pogost linearna kombinacija nizov primerjalnih postaj. Pogosto uporabljena alternativa je primerjava kontroliranega niza z nizom vsake primerjalne postaje posebej. Pri izračunu primerjalnega niza nastanejo težave zaradi prostorske spremenljivosti. Ta je odvisna od meteorološke spremenljivke, tipa podnebja in časovne ločljivosti podatkov. Prav tako je težava sočasna nehomogenost na ravni meteorološke mreže ali nekega območja, na primer pri sistematični menjavi vrste zaklona.

Obstaja več metod za odkrivanje nehomogenosti, ki temeljijo na statističnih testih in uporabi metapodatkov. Tudi le z dobrimi metapodatki je mogoče odpraviti nehomogenosti, sicer je treba medsebojno primerjati nize bližnjih postaj. Pri nekaterih metodah imamo primerjalni niz za homogen in v tem primeru je krog preverjanja le eden; pri drugih metodah gre za iterativni proces popravljanja časovnih nizov, pri katerih se izmenjujeta vlogi primerjalne in kontrolirane postaje. Zaradi manjšega šuma je priporočljivo najprej homogenizirati letna povprečja, pri nekaterih spremenljivkah, na primer temperaturi, pa zaradi letnega cikla nehomogenosti sezonska povprečja. Statistični testi za odkrivanje nehomogenosti imajo slabšo sposobnost odkrivanja v začetnih in končnih letih časovnega niza.

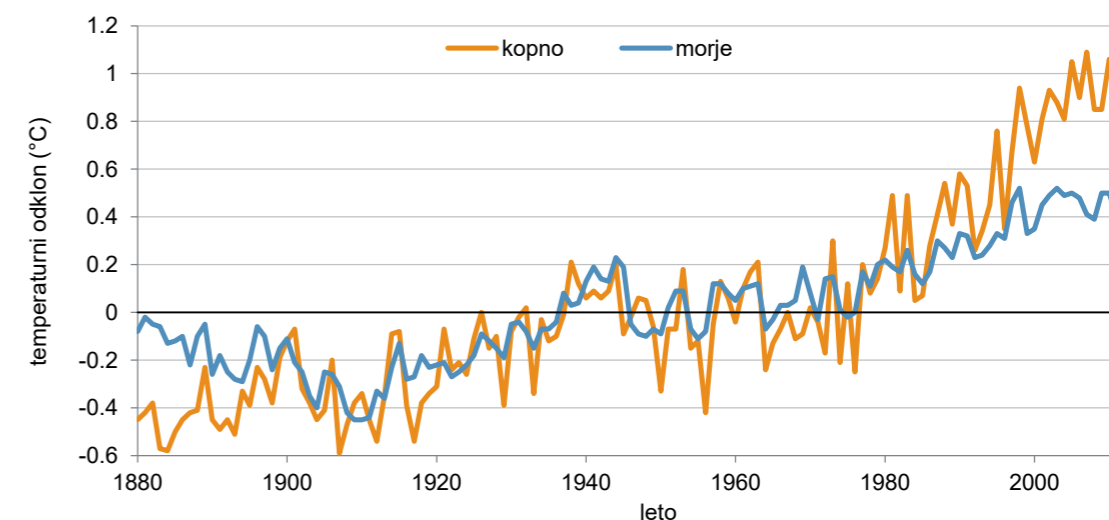
V postopku homogenizacije po odkrivanju nehomogenosti poteka popravljanje podatkov. Najprej se je treba po možnosti na podlagi metapodatkov odločiti, kateri najdeni prelomi so prave nehomogenosti. Kadar v metapodatkih ne najdemo razloga za domnevni prelom, mora strokovnjak presoditi, ali gre za pravi prelom ali »lažni alarm« (ang. false positive test). Pri tem si pomagamo z grafičnim prikazom podatkov. Nato odpravimo nehomogenost, priporočljivo s prilagoditvijo dela niza pred nehomogenostjo delu niza po nehomogenosti. S tem ob dopolnjevanju niza z najnovjšimi podatki zagotovimo homogenost celotnega niza, vse do prve nove nehomogenosti. Popravek je običajno razlika ali razmerje povprečja dveh časovnih odsekov okoli nehomogenosti. Pri postopni spremembi izračunamo trend razlike ali razmerja.

V nadaljevanju bomo na kratko opisali dve pogosto uporabljeni homogenizacijski metodi.

Metoda Caussinusa in Mestreja išče neznanu število prelomov v časovnem nizu. Temelji na predpostavki o homogenosti odsekov niza med dvema odkritima prelomoma. Vsak niz primerja z drugimi v istem podnebnem območju, pri čemer izračuna razliko ali razmerje dveh nizov. Na teh nizih razlike ali razmerja išče prelome. Prelomi, ki so skupni različnim parom kontrolirane postaje s primerjalnimi postajami, so pripisani kontrolirani postaji.

Metoda večkratne analize nizov za homogenizacijo (ang. multiple analysis of series for homogenisation, s kratico MASH) za primerjalni niz ne predpostavlja homogenega niza. Odkrivanje in popravljanje potencialnih prelomov poteka v medsebojni primerjavi nizov posameznega podnebnega območja. Pri tem se za vsako postajo menjata vlogi kontrolirane in primerjalne postaje. Nizi se v procesu homogenizacije postopno spreminjajo. S to metodo ne izračunamo le fiksnih vrednosti popravkov, temveč tudi njihovo negotovost oziroma razpon za določeno stopnjo značilnosti. Metoda lahko samodejno uporablja seznam metapodatkov.

Homogenizacija podatkovne zbirke je odvisna od cilja raziskovalca. Včasih zadošča, da v analizo vključimo postaje z zadostno kakovostjo podatkov, lahko pa je naš cilj homogenizacija celotne mreže postaj z namenom pridobitve nove podatkovne zbirke. Slednje je bil cilj projekta Podnebna spremenljivost Slovenije. Postopek homogenizacije je močno odvisen tudi od razpoložljivosti metapodatkov in možnosti za izračun primerjalnega niza. Pri odkrivanju nehomogenosti je treba



Slika 32. Odklon povprečne temperature zraka pri tleh nad kopnim (oranžno) in morjem (modro) od povprečja 20. stoletja, obdobje 1880–2013. Vir: NOAA

upoštevati statistično porazdelitev vrednosti v podatkih. Naše sposobnosti, viri in časovne omejitve so prav tako pomembni dejavniki pri homogenizaciji. Na koncu procesa homogenizacije naj bi ovrednotili dobljene rezultate. Pri vrednotenju popravkov si lahko pomagamo s primerjavo izvornih in homogeniziranih nizov z neodvisnimi podatki, na primer iz sosednjih držav, podatkov v pravilni mreži ali s kazalniki oziroma pomožnimi podatki. Lahko tudi preverimo, če so popravki na ravni mreže v skladu z našim pričakovanjem na podlagi podatkov o mreži postaj. Če analiza rezultatov pokaže, da so homogenizirani podatki veljavni, lahko zaključimo, da popravljeni nizi podatkov bolje odražajo časovno spreminjanje analizirane spremenljivke od izvornih nizov. Homogenizacija podnebnih nizov je težavna, a neizbežna naloga, saj lahko s pravilnimi popravki v časovnem nizu izboljšamo razumevanje podnebja, še posebej njegove spremenljivosti in sprememb.

Homogeni podatki so pomembni pri analizi sprememb ekstremov. Za razliko od mesečnih in letnih vrednosti je homogenizacija dnevni in urnih vrednosti poseben problem, saj so popravki teh podatkov lahko močno odvisni od dnevnih vremenskih razmer. Poleg tega za uporabo statističnih orodij pri iskanju nehomogenosti potrebujemo veliko podatkov, ekstremne vrednosti pa so že po definiciji redke. Težavo lahko deloma rešimo z analizo najbolj homogenih nizov ali homogenih odsekov nizov. Mogoče je tudi popravljanje vrednosti glede na vremenske razmere in čas v letu ali po centilih oziroma razredih porazdelitvene krivulje spremenljivke. Kljub temu homogenizacija dnevni in urnih podatkov ostaja zelo težavna, zato Svetovna meteorološka organizacija posebnih napotkov zanj ne daje.

Cilj homogenizacije podatkov je popravljanje časovnih nizov, a brez dokončnega, enoličnega rezultata. Na enakih izvornih podatkih lahko izvedemo drugačen homogenizacijski postopek, ki da nekoliko drugačen rezultat. Zato je pomembno, da izvirne podatke hranimo za nadaljnjo uporabo.

Med najdaljše časovne nize merjenih podnebnih spremenljivk v svetovnem merilu sodita temperatura zraka pri tleh in temperatura površja morja (slika 32). Obe spremenljivki sta tako kakor druge meritve podnebnega sistema podvrženi nepodnebnim vplivom, ki jih moramo upoštevati. Skupek globalnih nizov obeh spremenljivk je pomemben kazalnik podnebnih sprememb. Navežemo ga lahko na občutljivost podnebnega sistema, to je segretju ozračja pri podvojitvi vsebnosti CO₂ v ozračju. Kot najdaljši globalni niz meritev je ključen pri razumevanju vzroka in vzorcev podnebnih sprememb ter vloge, pomembnosti in velikosti naravne spremenljivosti podnebja (Hartmann in sod., 2013).

Večina zgodovinskih in tudi sodobnih meteoroloških meritev ni izrecno namenjena spremljanju podnebja. Meritve so se spreminjale v skladu z zahtevami po podatkih, spreminjali sta se merilna praksa in tehnologija. Tovrstne spremembe skoraj vedno vplivajo na značilnosti merilnih nizov – povprečje in/ali spremenljivost. Meritve je tako treba obdelati, preden jih sprejmemo za uporabne pri oceni dejanskega razvoja podnebja. Z izjemo nekaterih meritev sestave ozračja in tokov je iz velike večine nizov nemogoče izločiti vse nepodnebne vplive, zato je ocena spremembe podnebnega sistema obremenjena z negotovostjo (Hartmann in sod., 2013).

HOMOGENIZACIJA PODNEBNIH PODATKOV V PROJEKTU PODNEBNA SPREMENLJIVOST SLOVENIJE

Po končani kontroli smo na podlagi števila odkritih napak, metapodatkov in medsebojne primerjave spremenljivk preverili kakovost posameznih časovnih nizov. Nize najslabše kakovosti ali dele nizov smo izločili iz nadaljnje obdelave.

Pri temperaturi zraka smo zaradi pomembnega vpliva postopne spremembe okolice izločili postaje Ljubljana, Maribor, Velenje in Nova vas na Blokah. Podatke nekaterih bližnjih postaj smo zaradi zelo podobnih podnebnih razmer združili v enoten niz. Dnevne podatke smo pretvorili v mesečna povprečja ali vsote in pripravili datoteke za homogenizacijo časovnih nizov. Z grafično primerjavo časovnih nizov različnih postaj v programskem paketu HOMER smo odkrili še nekaj dodatnih časovnih odsekov in celotnih nizov podatkov slabe kakovosti, neprimernih za homogenizacijo in nadaljnjo analizo.

Priprava vhodnih podatkov

Končno število postaj, ki smo jih zajeli v homogenizacijo, je bilo odvisno od spremenljivke

(preglednica 3). Časovnih nizov hitrosti vetra in gostote toka sončnega obsevanja zaradi prekratkega merilnega obdobja nismo homogenizirali. Pri nekaterih spremenljivkah smo upoštevali tudi podatke izbranih čezmejnih postaj. Postaje so pri vseh spremenljivkah v prostoru dokaj enakomerno razporejene, le njihova gostota je zelo različna (slike 33–38).

Priprava vhodnih podatkov trajanja sončnega obsevanja

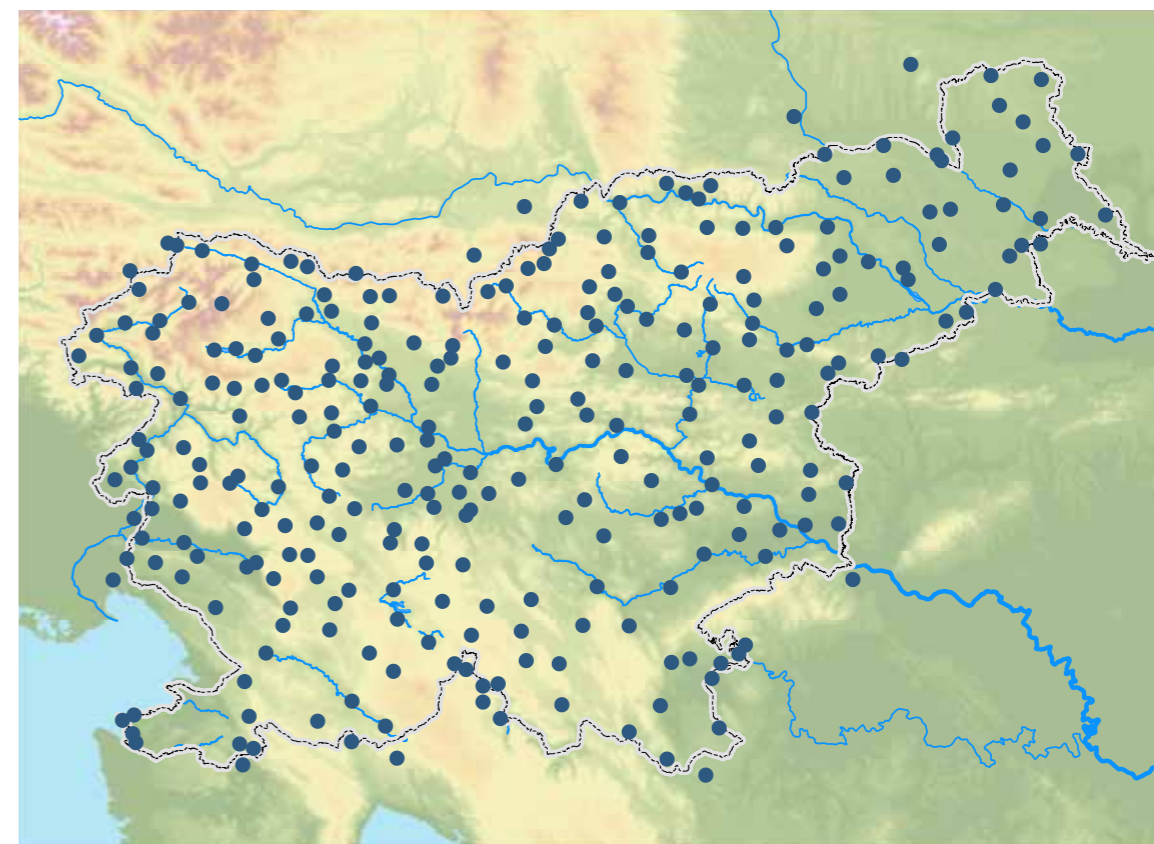
Zabeleženo trajanje sončnega obsevanja je poleg vremenskih razmer in tipa inštrumenta močno odvisno od lokacije meritev, zlasti višine obzorja. Naravne ovire večjih razsežnosti (gore, hribi) sodijo k podnebnim razmeram večjega območja, kar pa

Preglednica 3. Število postaj, zajetih v homogenizacijo

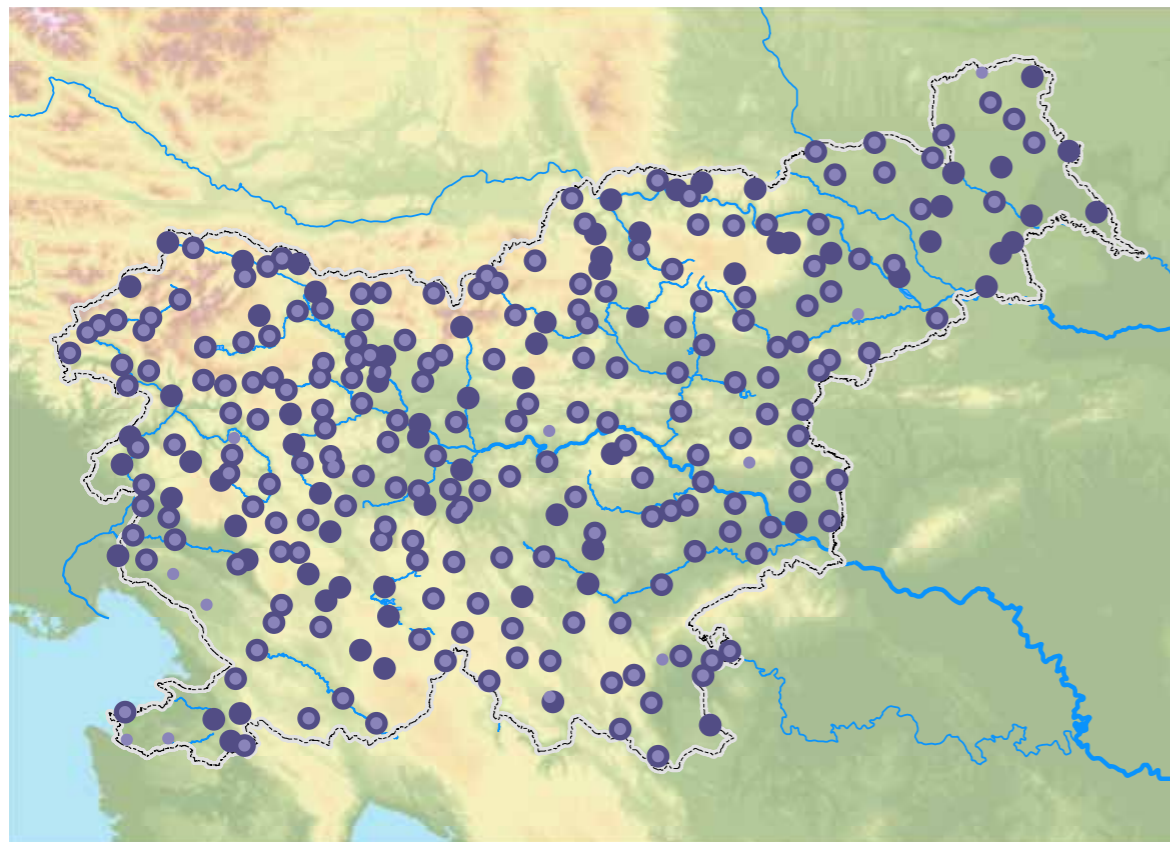
| Spremenljivka | Slovenske postaje | Tuje postaje |
|-------------------------------|-------------------|--------------|
| povprečna temperatura zraka | 49 | 11 |
| najvišja temperatura zraka | 49 | 0 |
| najnižja temperatura zraka | 36 | 0 |
| višina padavin | 266 | 22 |
| višina novega snega | 206 | 0 |
| višina snežne odeje | 268 | 0 |
| trajanje sončnega obsevanja | 27 | 0 |
| referenčna evapotranspiracija | 63 | 0 |
| zračni tlak | 12 | 5 |



Slika 33. Postaje s homogeniziranimi nizi temperature zraka. Z rdečo je označena najvišja, z zeleno povprečna in z modro najnižja temperatura.



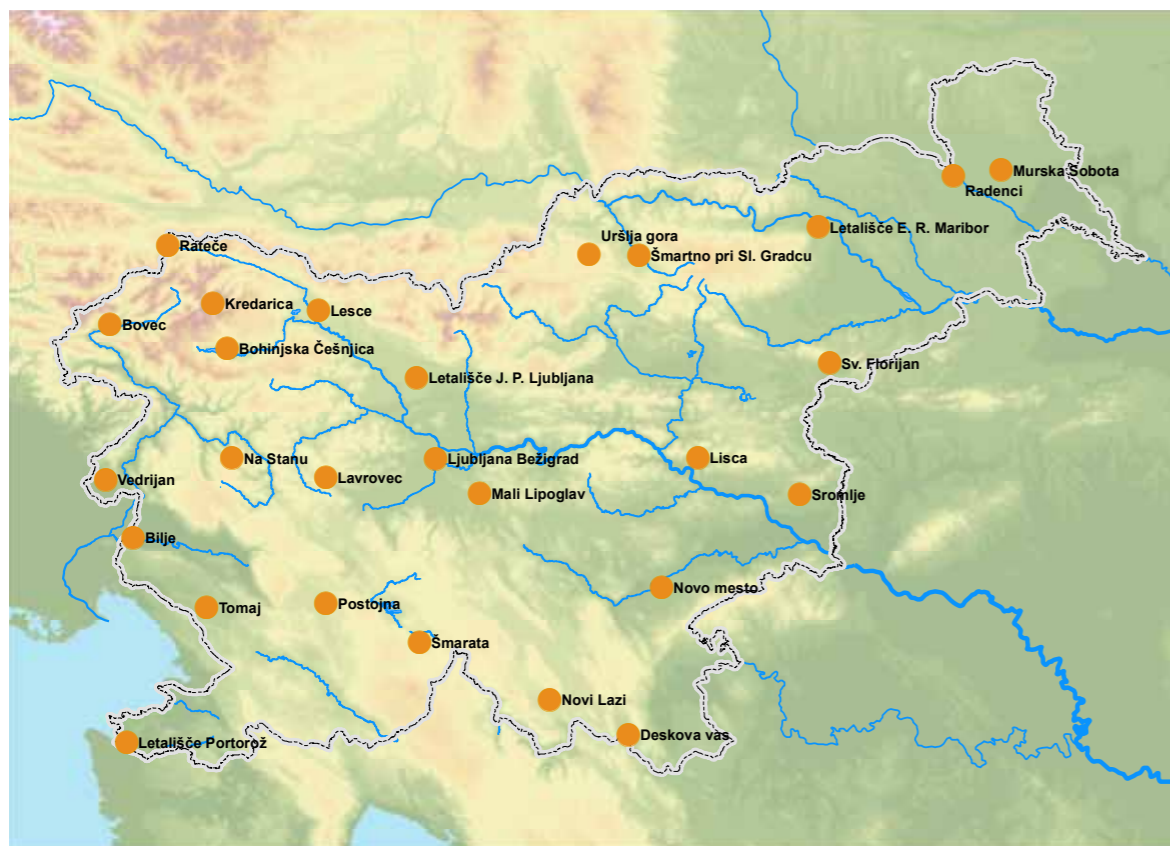
Slika 34. Lokacije postaj s homogeniziranimi nizi višine padavin



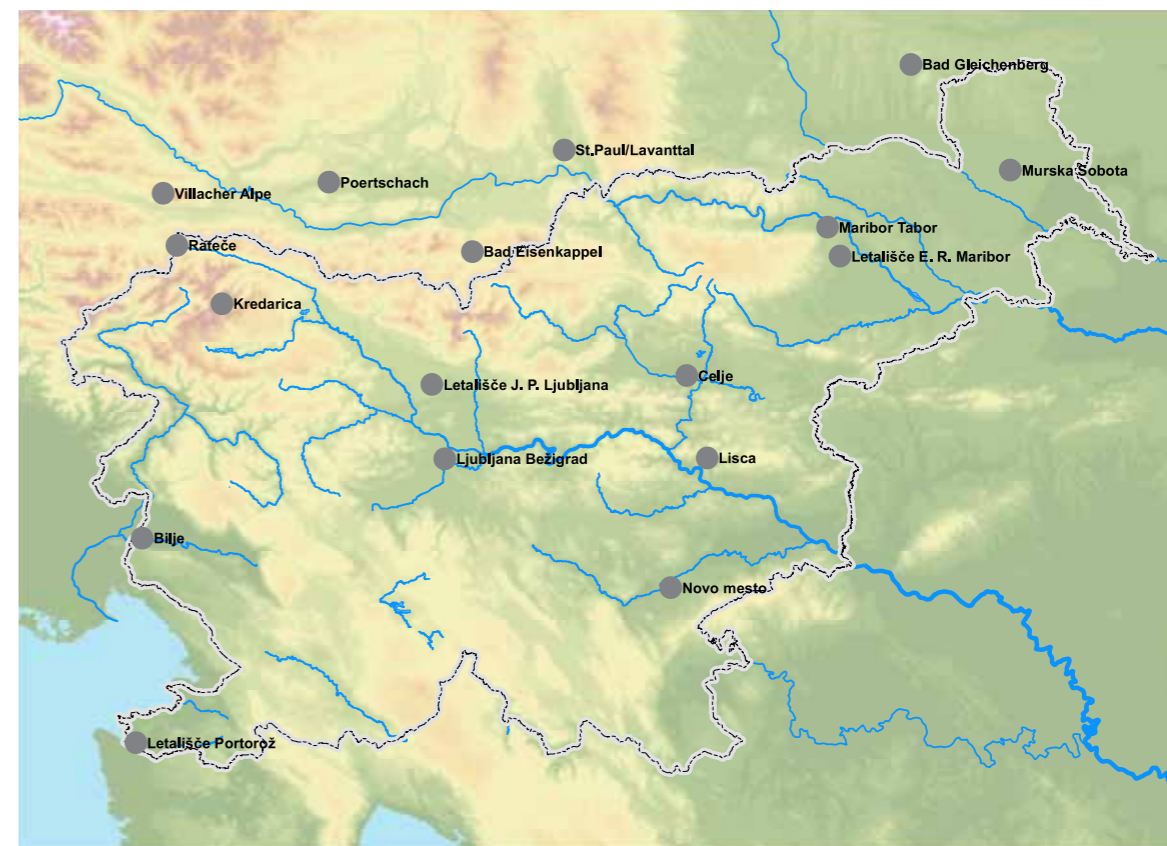
Slika 35. Lokacije postaj s homogeniziranimi nizi višine snežne odeje (temno vijolično) in višine novega snega (svetlo vijolično)



Slika 37. Postaje s homogeniziranimi nizi referenčne evapotranspiracije



Slika 36. Postaje s homogeniziranimi nizi trajanja sončnega obsevanja



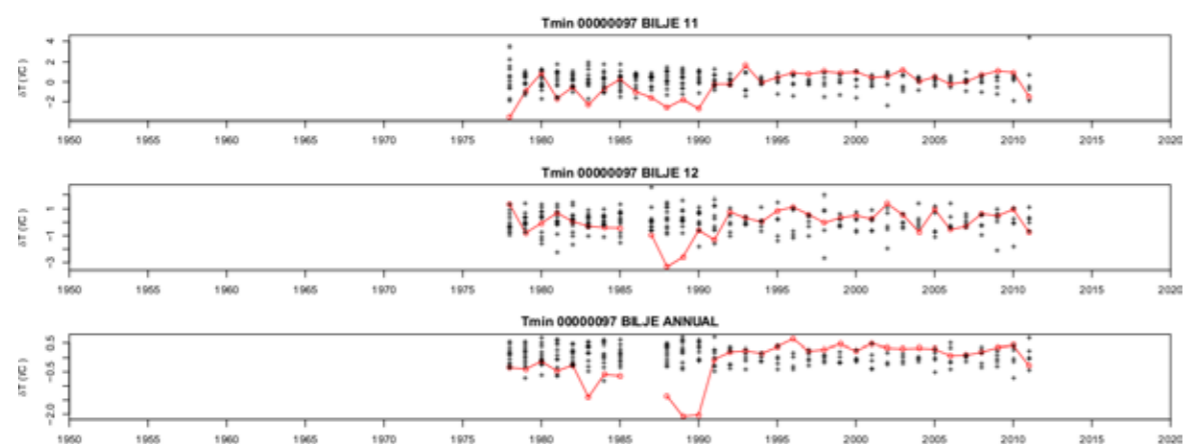
Slika 38. Postaje s homogeniziranimi nizi zračnega tlaka

ne moremo trditi za umetne ovire (zgradbe). Pri oceni podnebnih razmer so problematične tudi časovno spreminjajoče se ovire, recimo drevesa v okolici merilnega mesta. Ker je arhiv popisanih ovir za heliografe daleč od popolnega in ker je iz meritev zelo težko ali nemogoče ločiti med vrstami ovir, smo se odločili, da ocenimo teoretično največje možno trajanje sončnega obsevanja na posamezni postaji. Pri tem smo predpostavili matematično obzorje, torej odsotnost vseh vrst ovir na postaji. Primerljivost takšnih podatkov med postajami je v primeru zgradb in dreves večja, a hkrati se zastavlja vprašanje njihove uporabnosti v močno razgibanem reliefu (na primer alpskem svetu). Dejansko trajanje v dolini je lahko tudi za desetino ali več krajše od omenjenih podatkov. Treba se je zavedati tudi dejstva, da bi se ob fizični odstranitvi naravnih ovir spremenilo podnebje tistega območja in tako izračunano trajanje prav tako ne bi odražalo dejanskih razmer. Na drugi strani tako izračunani nizi zadovoljivo odražajo podnebno spremenljivost in dolgoletni trend.

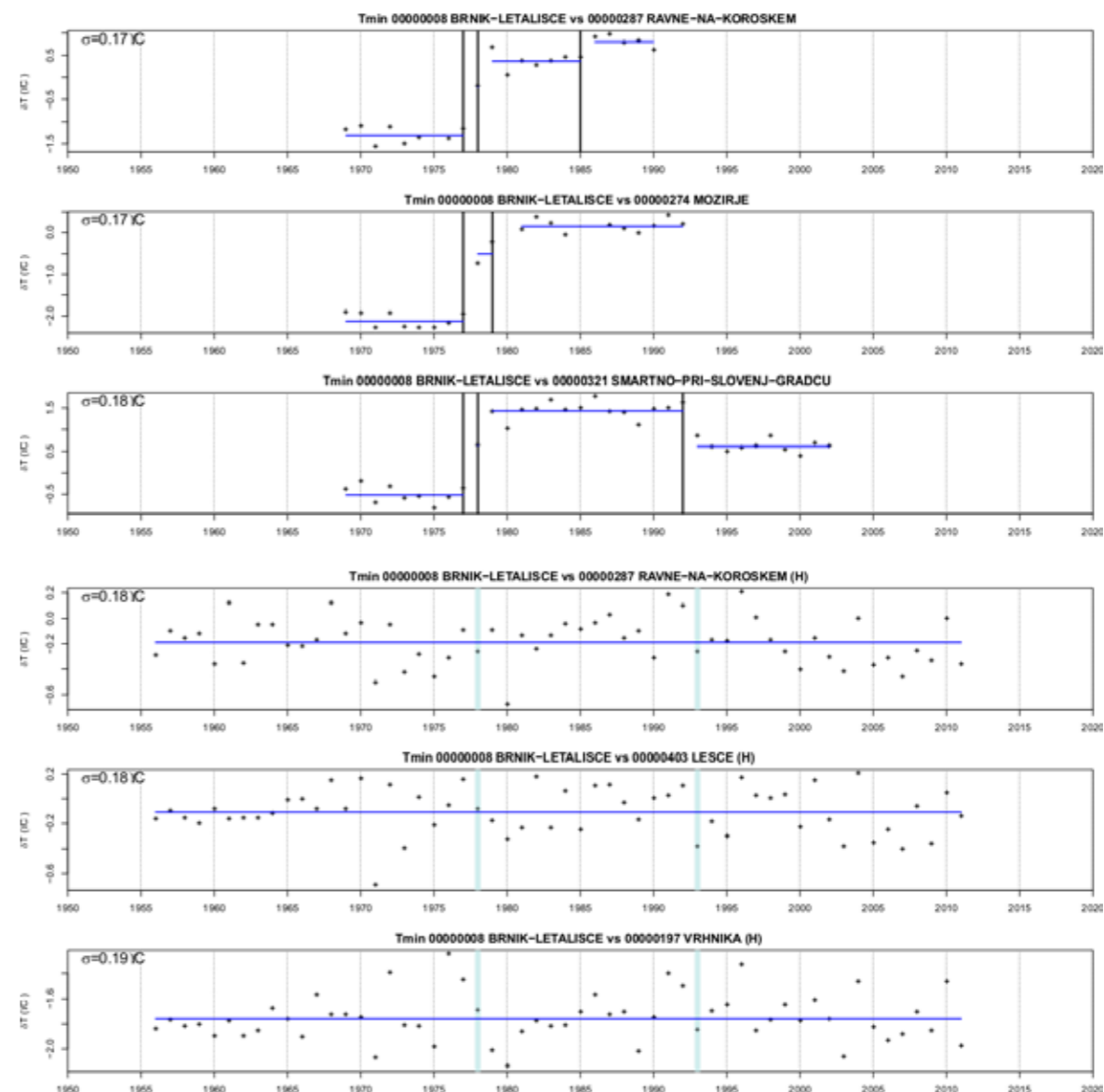
Časovne nize nekaterih postaj smo združili v enotni in daljši niz. Z računalniškim programom smo meritve s statistično analizo preračunali na prej omenjeno matematično obzorje. Podrobni opis postopka je v prilogi. Zaradi različno močnega vpliva vremena in ovir na izmerjeno trajanje sončnega vremena čez dan smo podatke razdelili v tri skupine. V prvi je zajeto trajanje do 9. ure po srednjeevropskem času, v drugi od 9. do 15. ure in v tretji po 15. uri. Posebej smo homogenizirali časovne nize za vsako od teh treh skupin.

Programsko orodje HOMER

Zaradi številnih homogenizacijskih metod, ki so nastale zlasti od devetdesetih let 20. stoletja dalje, in nezadostne primerjave učinkovitosti posameznih metod se je na pobudo raziskovalcev podnebja leta 2007 začel evropski projekt COST ES0601 z naslovom Napredki v metodah homogenizacije podnebnih nizov: celovit pristop. V okviru projekta je bilo na podlagi rezultatov testiranja homogenizacijskih metod izdelano novo programsko orodje, ki združuje dobre plati dokazano najbolj učinkovitih metod, dodana pa je metoda sočasne delitve nizov na odseke (Mestre in sod., 2013). HOMER (HOMogenization Software in R) je interaktivno in deloma samodejno orodje, namenjeno homogenizaciji mesečnih in letnih nizov temperature in višine padavin. Temelji na dinamičnem programiranju in hitrejšem iskanju optimalne kombinacije prelomov v časovnem nizu. Za odkrivanje prelomov uporablja metodo analize variance, samodejno lahko poišče statistično najverjetnejši datum preloma. Uporabniku omogoča odstranitev linearnega trenda, na primer zaradi urbanizacije. Vključuje tudi metodo ACMANT, ki išče prelome v velikosti letnega hoda temperature (pozimi bistveno drugačen trend kakor poleti). Grafični vmesnik omogoča uporabniku enostavno potrjevanje, odstranjevanje ali vstavljanje prelomov. Običajno prelome iz nizov izločamo v več krogih odkrivanja in popravljanja, od najbolj do najmanj izrazitih. Pri tem si lahko strokovnjak pomaga z metapodatki. Programsko orodje omogoča tudi grafični pregled časovnih nizov in njihovo medsebojno primerjavo, kar je zlasti uporabno pred homogenizacijo za izločanje napačnih vrednosti.



Slika 39. Izsek grafičnega prikaza hitre kontrole časovnega niza za Bilje, najnižja temperatura zraka, za november (zgoraj) in december (sredina) ter celo leto (povsem spodaj). Posamezni križci pomenijo temperaturni odklon primerjalne postaje glede na njeno povprečje obdobja celotnega niza. Rdeča krivulja pomeni enako vrednost za Bilje. Neskladnost križcev s krivuljo lahko kaže na napačne meritve na kontrolirani postaji. V tem primeru so vrednosti za Bilje v letih 1988–1990 za okoli 2 °C prenizke.

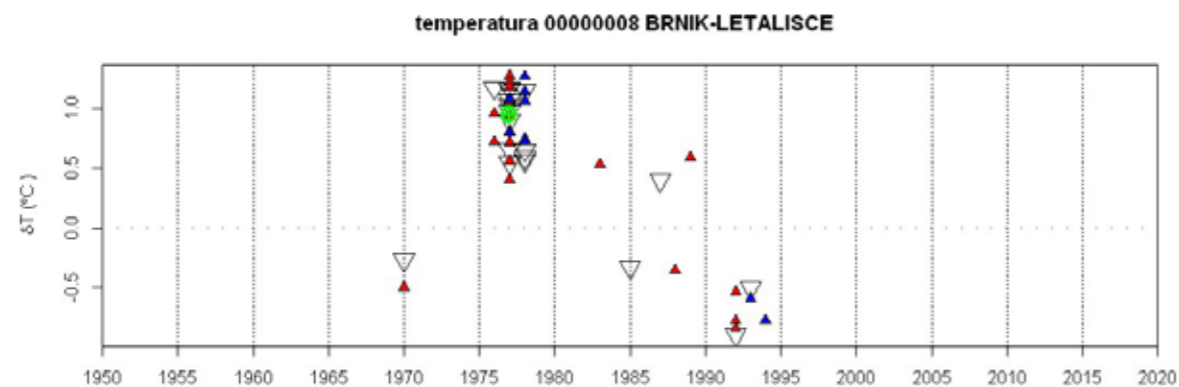


Slika 40. Izsek grafičnega prikaza izračuna po metodi odkrivanja prelomov po parih nizov (ang. pairwise detection) pred homogenizacijo (zgoraj) in po homogenizaciji (spodaj) niza najnižje temperature zraka na Brniku. S križci je prikazana razlika med Brnikom in primerjalno postajo. Črne navpične črte so samodejno predlagani prelomi, blede modre navpične črte sprejeti prelomi in vodoravne modre črte povprečje posameznega homogenega obdobja. Po homogenizaciji z metodo odkrivanja prelomov po parih nizov ni več najti statistično značilnih prelomov – črne navpične črte izginejo.

V postopku homogenizacije nizov slovenskih meteoroloških postaj smo s Homerjem najprej uporabili pravkar omenjeni grafični pregled in tako našli še nekaj izstopajočih vrednosti in obdobj (slika 39). Na podlagi omembe slabih meritev v metapodatkih smo takšne primere izločili iz posameznega časovnega niza.

V drugem koraku smo z metodo odkrivanja prelomov po parih nizov označili mesta verjetnih prelomov (slika 40). V večini primerov smo te poiskali še z metodo sočasne delitve nizov in se nato na podlagi metapodatkov odločili za potrditev prelomov, ki sta jih predlagali obe metodi (slika 41). Na podlagi metapodatkov smo v večini

primerov lahko določili točen čas preloma. V posameznih, zelo redkih primerih smo v podatkih zaznali nehomogenost v obliki trenda; na seznam nehomogenosti smo zapisali čas začetka in konca trenda. Na podlagi seznama prelomov in trendov smo s Homerjem izračunali velikost popravkov in homogenizirali časovne nize. Hkrati se je izvedla še interpolacija manjkajočih vrednosti. Ves postopek odkrivanja prelomov z obema metodama smo večkrat ponovili. V zadnjih ponovitvah smo v nekaterih primerih uporabili še metodo ACMANT, ki išče prelome v velikosti sezonskega hoda temperature. S to metodo smo našli še nekaj dodatnih prelomov. V zadnjem koraku smo zagnali postopek, ki je računsko določil najverjetnejši



Slika 41. Primer grafičnega prikaza izračunanih prelomov za Brnik glede na različne primerjalne nize. Zeleni krožec prikazuje izračun po metodi sočasne delitve nizov, trikotniki pa po metodi odkrivanja prelomov po pari. Na vodoravni osi je leto, na navpični izračunana velikost preloma. Prazni trikotniki se nanašajo na nize letnih vrednosti in barvni na sezonske (rdeči za poletje, modri za zimo). Zgostitev trikotnikov kaže na veliko verjetnost dejanskega preloma na kontrolirani postaji, v tem primeru leta 1977 ali 1978. V metapodatkih je za to postajo navedena selitev 16. novembra 1978, zato smo predlagani prelom potrdili.

čas preloma za vse primere, ki jih z metapodatki nismo mogli potrditi, a so bili statistično izraziti (velik prelom). S tem smo dobili končni seznam prelomov in z računalniško korekcijo nizov tudi končni rezultat – homogenizirane časovne nize.

Prvi vtis o vplivu homogenizacije na časovne nize posamezne postaje lahko dobimo že z grafičnim orodjem, vgrajenim v HOMER (slika 42). Na primeru postaje Letališče Brnik (Letališče J. P. Ljubljana) vidimo popolnitev niza v začetnih letih in znatno spremembo okoli prelomov leta 1978 in 1993. Obdobje med obema prelomoma je v izvornih podatkih po temperaturi primerljivo s poznejšim, po homogenizaciji pa je bistveno hladnejše.

Skupinska homogenizacija

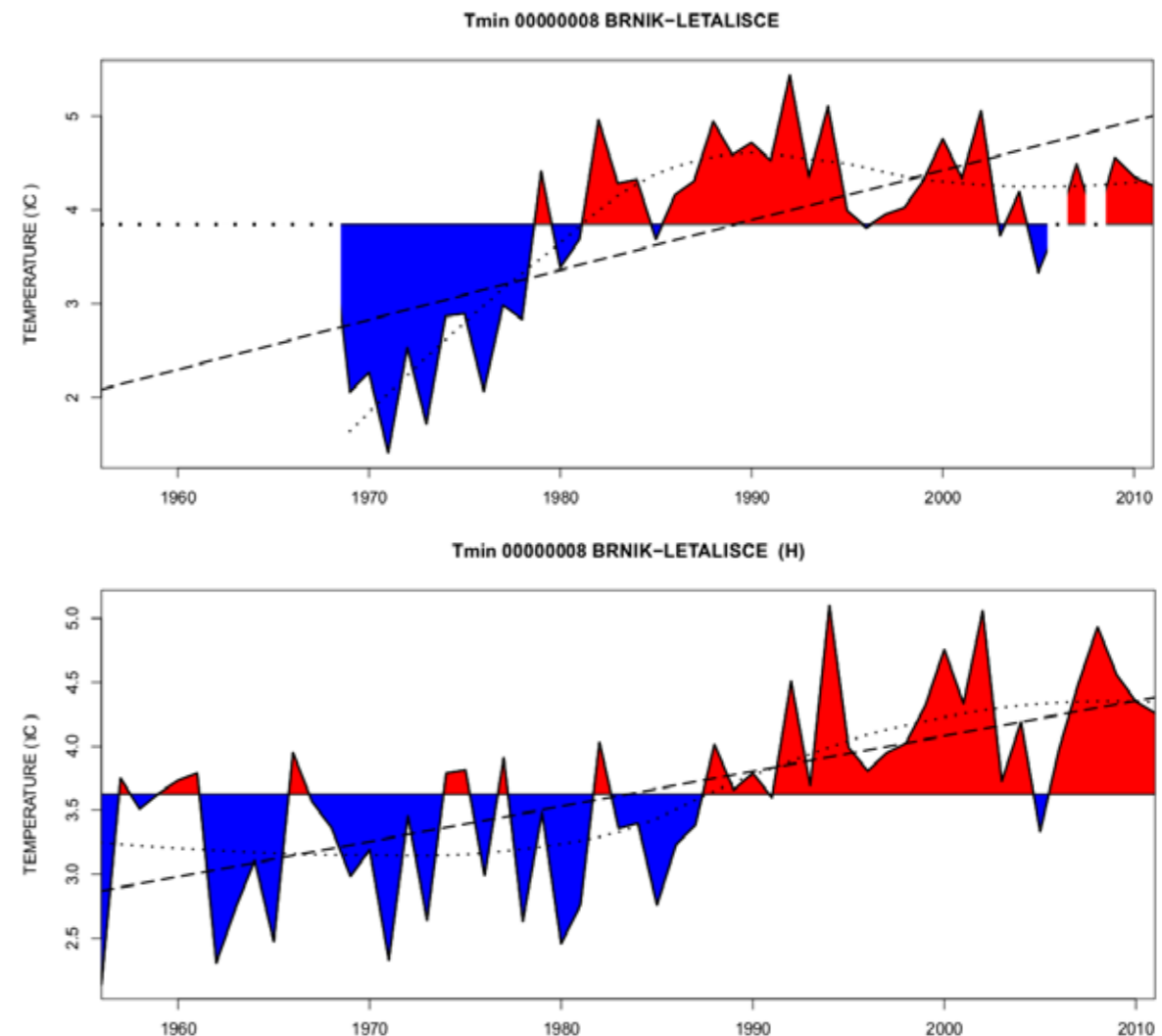
Homogenizacija s programskim orodjem HOMER poleg vgrajenih statističnih testov temelji na odločitvah strokovnjaka, ki homogenizira paket časovnih nizov. Ker ne vemo točno, kako zanesljivi so metapodatki in kako močan je vpliv vsake od sprememb na meteorološki postaji, so znanje in izkušnje tistega, ki homogenizira, nedvomno ključnega pomena. V postopku homogenizacije pogosto naletimo na dilemo, ali statistično zaznani prelom pripišemo spremembam na izbrani postaji ali naravni prostorsko-časovni spremenljivosti podnebnih razmer. Metapodatki so pri takšnih odločitvah v veliko pomoč, a moramo se zavedati, da tudi ti niso popolni in da pogosto iz njih ne moremo izluščiti stopnje vpliva na proučevani niz podnebnih podatkov. Posebej so problematični primeri, ko se zaradi pomanjkanja primerjalnih postaj ne moremo zanesti na skupni podnebni

signal. To se dogaja zlasti pri visokogorskih postajah in na območjih z redko mrežo postaj (slabo poseljena območja).

Testiranje v okviru projekta COST HOME je pokazalo, da lahko pri homogenizaciji mesečnih podatkov o temperaturi zraka pričakujemo znatno izboljšanje kakovosti časovni nizov, zlasti na ravni celotne mreže postaj. Kljub temu so lahko razlike med posameznimi metodami in strokovnjaki pomembne. Da bi ocenili zanesljivost homogeniziranih časovnih nizov, je enak ali podoben nabor podatkov homogeniziralo več strokovnjakov. Le referenčno evapotranspiracijo in zračni tlak je homogeniziral en sam strokovnjak.

Časovne nize najnižje in najvišje temperature zraka, višine padavin, novega snega in snežne odeje ter trajanja sončnega obsevanja so homogenizirali trije strokovnjaki. Formalna izobrazba in izkušnje s področja klimatologije so se med temi strokovnjaki razlikovale. Nabor postaj v procesu homogenizacije je bil za vse strokovnjake enak, razlikoval se je le pri višini padavin, kjer sta dva od treh strokovnjakov poleg slovenskih zajela tudi izbrane tuje postaje ob slovenski meji. Pri homogenizaciji je vsak strokovnjak uporabljal različne programske nastavitve (npr. število primerjalnih postaj) in nekoliko drugačno strategijo potrjevanja statistično odkritih prelomov in uporabe metapodatkov, razlike med njimi pa so bile tudi v uporabi metod znotraj programskega paketa.

Postopek homogenizacije je vsak od strokovnjakov izvajal neodvisno od drugih, okvirno so bile dogovorjene le programske nastavitve in usklajene odkrite posebnosti v podatkovnih



Slika 42. Časovni potek letnega povprečja dnevne najnižje temperature zraka na Brniku pred homogenizacijo (zgoraj) in po homogenizaciji (spodaj). Z rdečo barvo so prikazane nadpovprečne in z modro podpovprečne vrednosti. Linearni in glajeni trend sta prikazana s črtkano črto.

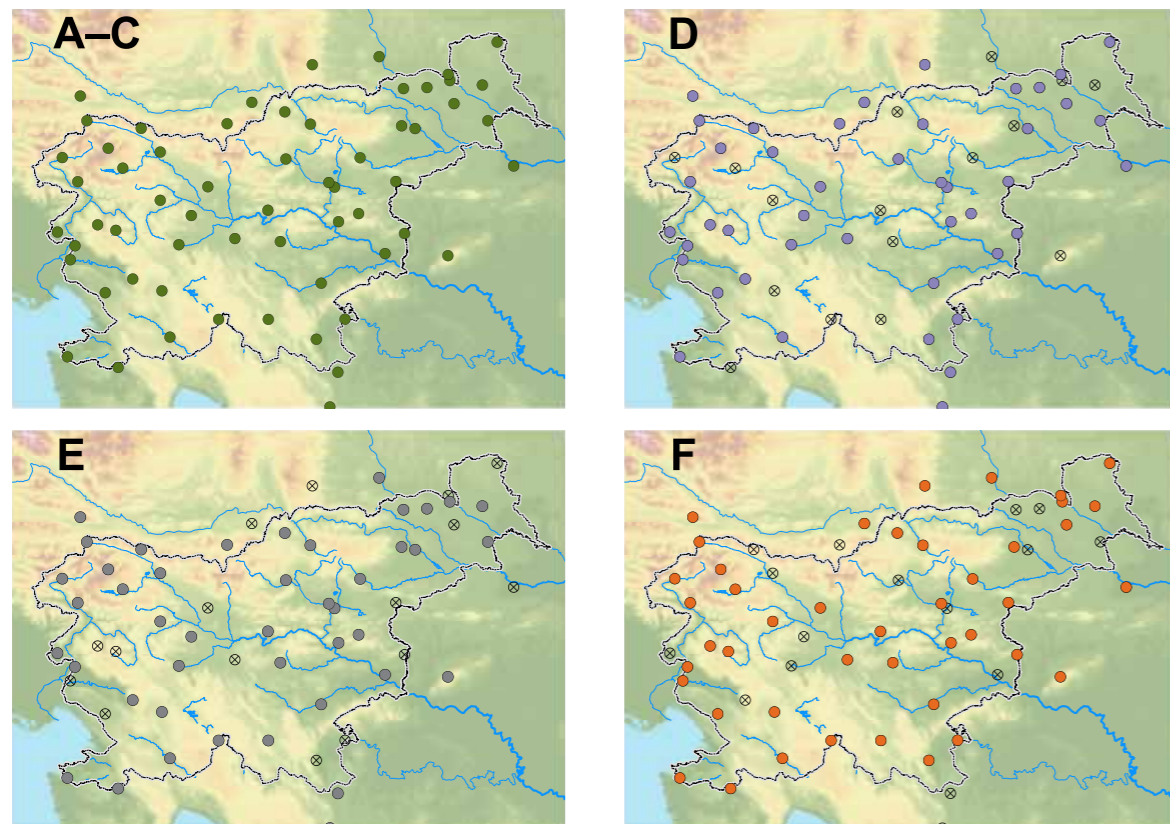
nizih (npr. časovni trend). Predhodno kontrolo podatkov s Homerjem so pri temperaturi izvedli trije strokovnjaki, pri drugih spremenljivkah le eden. Tako je bila deloma tudi vhodna podatkovna zbirka povsem enotna, le pri temperaturi zraka so se posamezni nizi malenkostno razlikovali v dolžini časovnega niza.

Pri povprečni temperaturi zraka smo v homogenizacijo vključili šest strokovnjakov. Trije smo jo izvajali na enakem podatkovnem paketu, drugi trije pa na manjšem podatkovnem paketu (slika 43). Tako smo dobili še vpogled v vpliv gostote mreže postaj na končni rezultat homogenizacije. Celotni podatkovni paket je zajemal 60 postaj, manjši paketi pa po 44 postaj. Dvanajst postaj, za katere smo menili, da so najbolj kakovostne, je bilo zajetih v vseh treh manjših paketih. Drugih 48 postaj smo razdelili v 16 geografskih skupin s tremi postajami. Iz vsake trojke smo naključno izločili eno postajo, različno

za vsakega od treh manjših paketov. Tako je bilo vseh 48 postaj enakomerno zastopanih, okleščene mreže postaj pa so bile prostorsko homogene in medsebojno precej različne.

Nastavitve v programskem paketu HOMER so se razlikovale med strokovnjaki in spremenljivkami (preglednica 4). Na začetku homogenizacije je treba izbrati način primerjave nizov (razlika ali razmerje podatkovnih nizov) in določiti način izbora primerjalnih postaj (geografska bližina, stopnja korelacije, vse postaje). Končni rezultat je odvisen tudi od števila ponovitev in izbire homogenizacijskih metod.

Pri temperaturi zraka in zračnem tlaku smo primerjali razlike časovnih nizov, pri drugih spremenljivkah njihovo razmerje. Pri razlikah so imeli popravki sezonski hod, pri uporabi razmerja pa smo bili omejeni na letne popravke, torej enak faktor za vse mesece v letu.



Slika 43. Postaje za homogenizacijo povprečne temperature zraka za različne strokovnjake Strokovnjaki A–C so homogenizirali polni nabor postaj, drugi trije strokovnjaki pa večji, a deloma drugačen kos tega nabora.

Izbira primerjalne okolice je bila odvisna od gostote postaj, saj za učinkovito odkrivanje prelomov pri odsotnosti homogenega primerjalnega niza potrebujemo vsaj okoli 10 primerjalnih postaj. Po drugi strani vemo, da se podnebni signal v prostoru spreminja, zato lahko preobsežno primerjalno območje v homogeniziranih nizih zabriše regionalne razlike. Prav študija regionalnih razlik v podnebnih spremembah je eden od temeljnih ciljev pričujoče analize. Občasno smo morali nastavitve primerjalne okolice sproti prilagajati,

ker v posameznih primerih ni bilo na voljo dovolj primerjalnih postaj, časovni nizi postaj se niso dovolj prekrivali ali pa je prišlo do kakšne druge računske napake v programu.

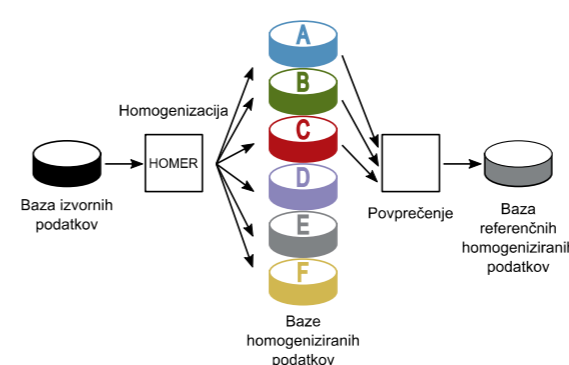
Na podlagi skupinske homogenizacije v nadaljevanju predstavljamo analizo homogeniziranih časovnih nizov od leta 1961 do leta 2011 (oziroma od leta 1971 do leta 2012 za referenčno evapotranspiracijo) za slovenske postaje. Temelj analize so različne podatkovne zbirke (slika 44). Zbirka izvornih podatkov je skupek časovnih nizov, ki so bili vhodni podatki za homogenizacijo z orodjem HOMER.

Homogenizirane vrednosti po posameznih strokovnjakih so zbirke homogeniziranih podatkov, označene s črkami od A do F – zbirka A, zbirka B itd.). Pri spremenljivkah, ki jih je homogeniziralo več strokovnjakov – temperatura zraka, višina padavin in snega, trajanje sončnega obsevanja – smo izračunali aritmetično sredino zbirk A, B in C. Aritmetična sredina teh zbirk je zbirka referenčnih homogeniziranih podatkov – končni rezultat homogenizacije in podlaga za analizo podnebja in podnebne spremenljivost, ki jo podajamo v tretjem zvezku publikacije Podnebna spremenljivost Slovenije. Pri drugih dveh homogeniziranih spremenljivkah, zračnem tlaku in referenčni evapotranspiraciji, ki jih je homogeniziral le en strokovnjak, je pripadajoča zbirka homogeniziranih vrednosti hkrati referenčna zbirka.

Trende na podlagi zbirke homogeniziranih podatkov smo primerjali s trendi na podlagi dopolnjene zbirke izvornih podatkov. Manjkajoče vrednosti v nizih izvornih podatkov smo nadomestili z interpoliranimi podatki na podlagi primerjalnih postaj – te smo izračunali s programskim orodjem HOMER. Tako lahko za

Preglednica 4. Nastavitve v Homerju in statistika uporabljenih metod za posamezne strokovnjake pri homogenizaciji povprečne temperature zraka. PPN označuje metodo odkrivanja prelomov po parih nizov in SDN metodo sočasne delitve nizov. Pri vseh strokovnjakih je bil uporabljen geografski izbor primerjalnih postaj.

| Strokovnjak | Število postaj | Polmer primerjalnega območja | Najmanjše število primerjalnih postaj | Št. krogov metode odkrivanja prelomov s PPN | Št. krogov metode odkrivanja prelomov SDN | Uporaba metode ACMANT |
|-------------|----------------|------------------------------|---------------------------------------|---|---|-----------------------|
| A | 60 | 12 | 10 | 5 | 5 | da |
| B | 60 | 30 | 15 | 6 | 6 | ne |
| C | 60 | 30 | 15 | 5 | 5 | ne |
| D | 44 | 50 | 16 | 3 | 3 | ne |
| E | 44 | 40 | 11 | 3 | 3 | da |
| F | 44 | 30 | 15 | 3 | 1 | ne |



Slika 44. Podatkovne zbirke pri homogenizaciji

vse postaje primerjamo trend v istem obdobju, 1961–2011 oziroma 1971–2012. V nadaljevanju pri obravnavi trendov pridevnik dopolnjen zaradi jedrnatosti izpuščamo.

Statistika odkritih nehomogenosti in homogenizacijskih popravkov

Mesečne podatke v zbirkah homogeniziranih podatkov po izvoru delimo v tri vrste: izvorne ali nespremenjene podatke, podatke, ki so bili popravljeni s homogenizacijo, in interpolirane vrednosti.

Najprej si oglejmo sestavo zbirk homogeniziranih podatkov, ki so neposredni rezultat posameznega strokovnjaka v postopku homogenizacije. Pri povprečni temperaturi zraka je delež izvornih podatkov od 40 % do 49 %, delež popravljenih podatkov od 25 % do 33 % in delež interpoliranih podatkov okoli 26 %. Pri najvišji in najnižji temperaturi

zraka so deleži podobni, le pri najnižji temperaturi izstopa zbirka C z le 14 % deležem popravljenih in 59 % izvornih podatkov. V zbirkah homogeniziranih podatkov o višini padavin je le od 12 % do 18 % popravljenih podatkov in 19 % interpoliranih podatkov – okoli dve tretjini podatkov torej najdemo tudi v zbirki izvornih podatkov. Pri višini snežne odeje in novega snega je delež popravljenih podatkov zelo majhen, od 2 % do 3 %, delež interpoliranih podatkov pa znaša 17 % oziroma 19 %. V zbirkah homogeniziranih podatkov trajanja sončnega obsevanja, ki so razdeljene po delu dneva, je delež interpoliranih podatkov za vse tri dele dneva 23 %, delež popravljenih podatkov pa najmanjši za sredino dneva, okoli 15 %. Večje število popravkov v zgodnjem in poznem delu dneva znaša okoli 25 % in je najverjetneje povezano z večjim vplivom ovir in običajno manjšo točnostjo heliografa kakor sredi dneva. Delež popravljenih vrednosti pri celodnevem trajanju sončnega obsevanja je precej višji, 37–39 %, in je skoraj enak deležu nespremenjenih vrednosti. Pri referenčni evapotranspiraciji je delež popravljenih podatkov 30 %, nespremenjenih 47 % in interpoliranih 23 %. Pri zračnem tlaku so deleži naslednji: 53 %, 35 % in 12 %.

V zbirki referenčnih homogeniziranih podatkov je delež popravljenih podatkov nekoliko večji od povprečja zbirk posameznih strokovnjakov, saj se prelomi med strokovnjaki in s tem lega popravkov le deloma ujemajo (preglednica 5).

Pri statistični obdelavi podatkov je poleg deleža popravljenih podatkov velikega pomena tudi njihova časovna in velikostna porazdelitev. V nadaljevanju podrobneje po posameznih spremenljivkah navajamo statistične značilnosti nehomogenosti ali prelomov in homogenizacijskih popravkov.

Preglednica 5. Sestava referenčne zbirke homogeniziranih podatkov za različne spremenljivke po deležu (v %) vrste podatka: izvorni, popravljeni in interpolirani podatek

| Spremenljivka | Izvorni podatki | Popravljeni podatki | Interpolirani podatki |
|-------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| povprečna temperatura | 44 | 29 | 26 |
| najnižja temperatura | 47 | 26 | 27 |
| najvišja temperatura | 37 | 36 | 27 |
| višina padavin | 60 | 20 | 20 |
| višina novega snega | 76 | 5 | 19 |
| višina snežne odeje | 79 | 3 | 17 |
| trajanje sončnega obsevanja | 34 | 43 | 23 |
| referenčna evapotranspiracija | 47 | 30 | 23 |
| zračni tlak | 35 | 53 | 12 |

Temperatura zraka

Časovne nize povprečne temperature zraka je homogeniziralo šest strokovnjakov. Kljub različnemu naboru postaj je statistika odkritih prelomov dokaj enotna, izstopajo le rezultati strokovnjaka D (preglednica 6). V večini

obravnavnih nizov smo odkrili vsaj en prelom, povprečno en prelom na en obravnavni niz, kar ustreza enemu prelomu na okoli 40 let podatkov. Skoraj vse odkrite prelome lahko pojasnimo z ustreznimi metapodatki. Homogenizacija časovnih nizov najnižje in najvišje temperature zraka je dala podobne rezultate (preglednica 7).

Preglednica 6. Statistika števila odkritih prelomov v časovnih nizih povprečne temperature

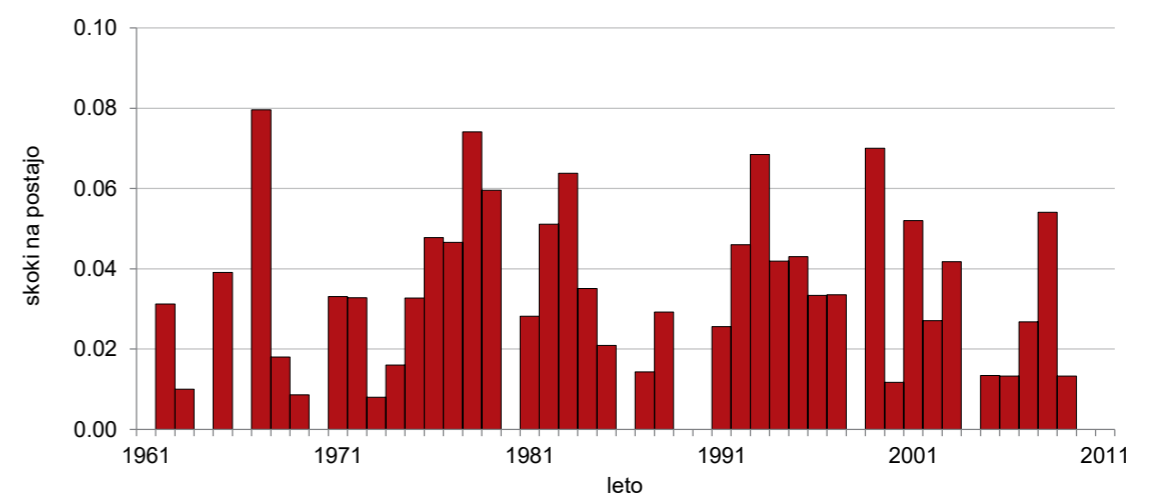
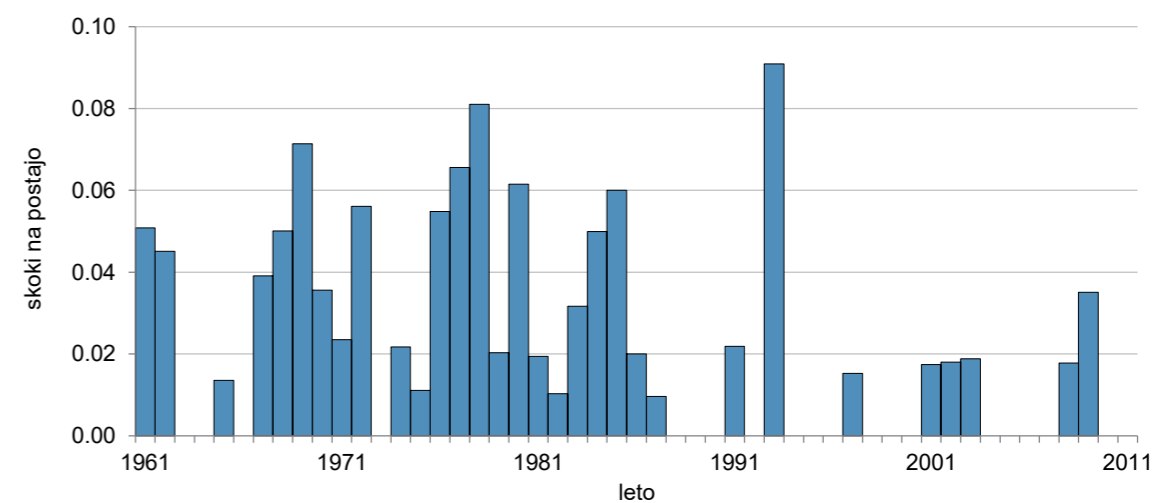
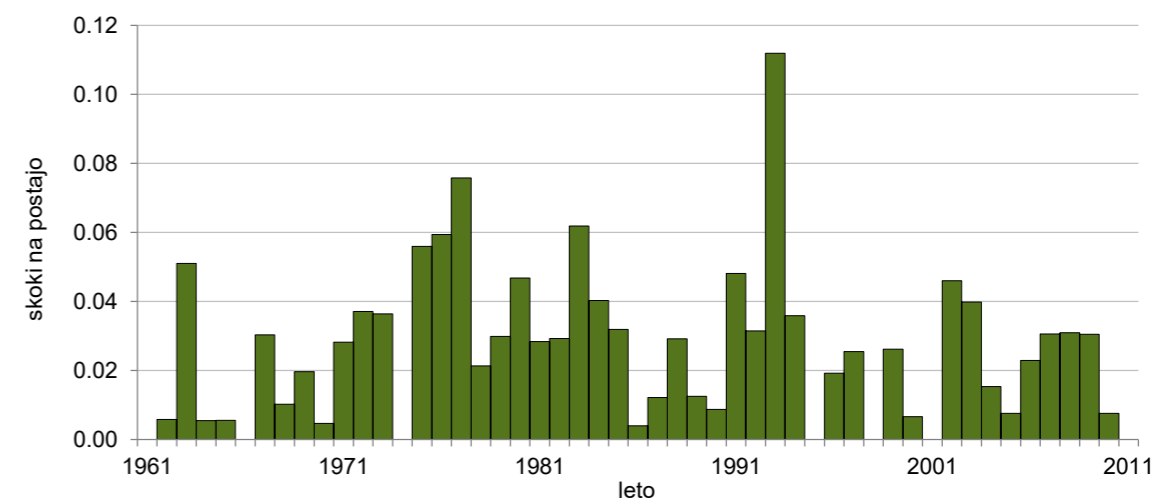
| Strokovnjak | Število postaj | Število nehomogenih nizov | Število prelomov | Delež pojasnenih z metapodatki (%) | Verjetnost preloma v danem letu na eno postajo (%) |
|-------------|----------------|---------------------------|------------------|------------------------------------|--|
| A | 49 | 30 | 45 | 89 | 2,4 |
| B | 49 | 35 | 47 | 94 | 2,6 |
| C | 49 | 29 | 42 | 86 | 2,3 |
| D | 36 | 30 | 57 | 88 | 4,3 |
| E | 37 | 24 | 29 | 86 | 2,1 |
| F | 36 | 28 | 39 | 100 | 2,8 |

Preglednica 7. Statistika števila odkritih prelomov v časovnih nizih najnižje in najvišje temperature

| Spremenljivka | Strokovnjak | Število postaj | Število nehomogenih nizov | Število prelomov | Delež pojasnenih z metapodatki (%) | Verjetnost preloma v danem letu na eno postajo (%) |
|----------------------|-------------|----------------|---------------------------|------------------|------------------------------------|--|
| najnižja temperatura | A | 36 | 27 | 38 | 89 | 2,8 |
| | B | 36 | 25 | 35 | 86 | 2,6 |
| | C | 36 | 18 | 23 | 74 | 1,7 |
| najvišja temperatura | A | 49 | 40 | 51 | 98 | 2,8 |
| | B | 49 | 37 | 53 | 96 | 2,9 |
| | C | 49 | 34 | 49 | 82 | 2,7 |

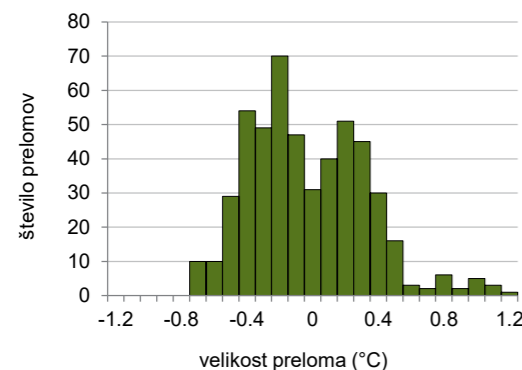
Prelomi v časovnih nizih temperaturnih spremenljivk so časovno večinoma neenakomerno razporejeni (slika 45). Povsem na začetku in koncu obravnavanega obdobja je odkritih skokov malo, kar je vsaj deloma posledica manjše statistične občutljivosti metode glede na osrednja leta. Pri povprečni temperaturi zraka večina prelomov sodi v obdobje od začetka

sedemdesetih do začetka devetdesetih let 20. stoletja; vrh doseže leta 1993 z 0,11 skoka na postajo. Pri najnižji temperaturi je obdobje povečanega števila skokov nekoliko zgodnejše, po letu 1993 pa je prelomov zelo malo. Še najbolj enakomerno so prelomi porazdeljeni pri najvišji temperaturi zraka; tam vrh leta 1993 ni več izrazit.

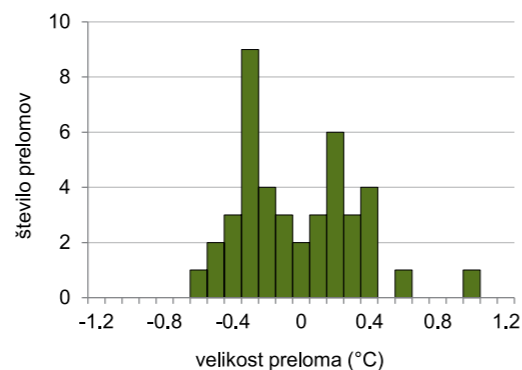


Slika 45. Povprečno število odkritih prelomov na postajo po letih za povprečno (zgoraj), najnižjo (na sredini) in najvišjo temperaturo zraka (spodaj). Prikazana je aritmetična sredina za rezultate vseh strokovnjakov (šestih za povprečno temperaturo ter treh za najnižjo in najvišjo temperaturo).

Poleg časovne razporeditve je pomembna lastnost prelomov tudi njihova velikost. Pri povprečni temperaturi so prelomi dokaj simetrično razporejeni okoli ničle (slika 46). Njihova aritmetična sredina je pri vseh strokovnjakih med $-0,1\text{ °C}$ in $0,1\text{ °C}$. Večinoma so prelomi sorazmerno majhni in po absolutni velikosti ne presegajo $0,5\text{ °C}$. Le v posameznih primerih prelom presega 1 °C . Prelomi na letnih podatkih so podobne velikosti kakor na mesečnih podatkih. Navidezno



pomanjkanje prelomov v bližini ničle je povezano s težavnim odkrivanjem zelo majhnih prelomov. Takšni prelomi so običajno skriti v šumu razlike nizov primerjalne in homogenizirane postaje, saj se podnebna spremenljivost v prostoru spreminja. Prav tako je zaradi podnebne spremenljivosti ocena velikosti odkritih prelomov obremenjena z negotovostjo, ki lahko v nekaterih primerih doseže tudi nekaj desetink stopinje Celzija.



Slika 46. Porazdelitev izračunane velikosti prelomov v časovnih nizih povprečne temperature strokovnjaka C na mesečni (levo) in letni (desno) ravni. Širina razredov je $0,1\text{ °C}$.

Podobne ugotovitve kot pri povprečni temperaturi veljajo za drugi dve temperaturni spremenljivki. Statistiko velikosti odkritih prelomov po različnih temperaturnih spremenljivkah in strokovnjakih prikazujeta preglednici 8 in 9. Aritmetična sredina velikosti prelomov je v vseh primerih zelo blizu

ničle, nekoliko manj stabilna pa je vrednost mediane. Sodeč po prvem in tretjem kvartilu so prelomi pri najnižji in najvišji temperaturi nekoliko večji kot pri povprečni temperaturi. Med vsemi prelomi je največji odkriti pri najnižji temperaturi in presega 2 °C .

Preglednica 8. Osnovna statistika porazdelitve velikosti prelomov v časovnih nizih povprečne temperature zraka

Mesečna statistika ($^{\circ}\text{C}$)

| Strokovnjak | Aritmetična sredina | Najmanj | Prvi kvartil | Mediana | Tretji kvartil | Največ |
|-------------|---------------------|---------|--------------|---------|----------------|--------|
| A | 0,01 | -0,81 | -0,23 | 0,03 | 0,22 | 1,18 |
| B | -0,01 | -0,76 | -0,27 | -0,02 | 0,21 | 1,25 |
| C | -0,03 | -0,75 | -0,29 | -0,10 | 0,23 | 1,21 |
| D | 0,01 | -1,15 | -0,19 | 0,02 | 0,19 | 1,36 |
| E | -0,02 | -0,67 | -0,24 | 0,01 | 0,21 | 0,75 |
| F | -0,04 | -0,78 | -0,28 | -0,13 | 0,19 | 1,29 |

Letna statistika ($^{\circ}\text{C}$)

| Strokovnjak | Aritmetična sredina | Najmanj | Prvi kvartil | Mediana | Tretji kvartil | Največ |
|-------------|---------------------|---------|--------------|---------|----------------|--------|
| A | 0,01 | -0,55 | -0,22 | 0,05 | 0,19 | 1,00 |
| B | -0,01 | -0,57 | -0,25 | 0,00 | 0,19 | 1,01 |
| C | -0,02 | -0,57 | -0,30 | -0,14 | 0,23 | 1,00 |
| D | 0,01 | -0,52 | -0,22 | 0,03 | 0,17 | 0,95 |
| E | -0,01 | -0,44 | -0,22 | -0,12 | 0,18 | 0,37 |
| F | -0,04 | -0,56 | -0,29 | -0,17 | 0,20 | 1,01 |

Preglednica 9. Osnovna statistika porazdelitve velikosti prelomov v časovnih nizih najnižje in najvišje temperature zraka

Mesečna statistika ($^{\circ}\text{C}$)

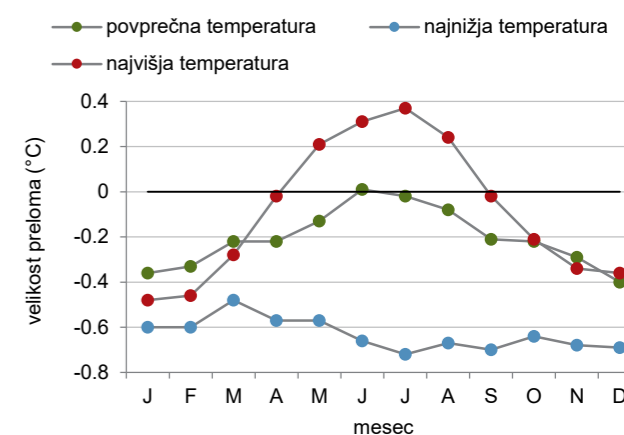
| Spremenljivka | Strokovnjak | Aritmetična sredina | Najmanj | Prvi kvartil | Mediana | Tretji kvartil | Največ |
|----------------------|-------------|---------------------|---------|--------------|---------|----------------|--------|
| najnižja temperatura | A | -0,02 | -1,29 | -0,31 | -0,08 | 0,23 | 2,13 |
| | B | 0,02 | -1,29 | -0,36 | -0,09 | 0,37 | 2,31 |
| | C | 0,04 | -1,28 | -0,45 | 0,01 | 0,42 | 2,32 |
| najvišja temperatura | A | 0,03 | -1,07 | -0,26 | 0,08 | 0,31 | 0,94 |
| | B | 0,07 | -0,94 | -0,23 | 0,13 | 0,32 | 0,98 |
| | C | -0,04 | -1,16 | -0,39 | -0,03 | 0,27 | 0,95 |

Letna statistika ($^{\circ}\text{C}$)

| Spremenljivka | Strokovnjak | Aritmetična sredina | Najmanj | Prvi kvartil | Mediana | Tretji kvartil | Največ |
|----------------------|-------------|---------------------|---------|--------------|---------|----------------|--------|
| najnižja temperatura | A | -0,02 | -0,90 | -0,32 | -0,08 | 0,22 | 1,74 |
| | B | -0,01 | -0,71 | -0,39 | -0,16 | 0,29 | 1,16 |
| | C | 0,00 | -0,69 | -0,38 | -0,01 | 0,30 | 1,18 |
| najvišja temperatura | A | 0,03 | -0,70 | -0,25 | 0,08 | 0,28 | 0,80 |
| | B | 0,07 | -0,63 | -0,33 | 0,17 | 0,31 | 0,83 |
| | C | -0,04 | -1,04 | -0,31 | -0,06 | 0,24 | 0,87 |

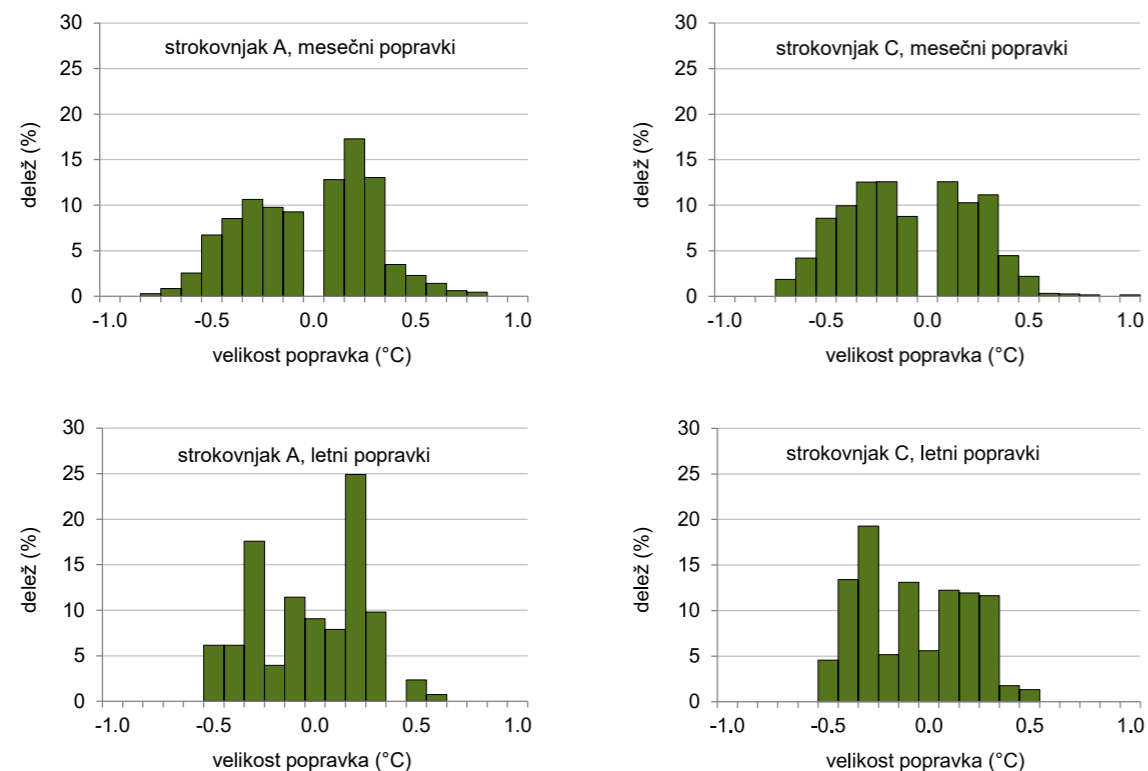
Zaznavanje prelomov v temperaturnih nizih je običajno lažje na letnih kakor na sezonskih ali mesečnih vrednostih zaradi večjega in ugodnejšega razmerja med velikostjo preloma in podnebno spremenljivostjo. Včasih pa je velikost preloma močno odvisna od letnega časa in lahko med letom spremeni predznak. V skrajnih primerih je lahko prelom na letni ravni skorajda ničnen, na sezonski pa zelo opazen (najvišja temperatura na sliki 47). V obravnavnih podatkih najdemo precej primerov menjajočega se predznaka preloma, 19–39 % po strokovnjakih za povprečno temperaturo zraka, 9–43 % pri najnižji temperaturi zraka in 33–35 % pri najvišji temperaturi zraka. Absolutna velikost preloma pri najnižji temperaturi ne kaže znatnega medletnega hoda, medtem ko je pri povprečni in najvišji temperaturi poleti nekoliko večja kakor pozimi.

Časovna razporeditev in velikost prelomov neposredno določata popravke izvornih vrednosti. Ti popravki vplivajo na nadaljnjo analizo časovnih nizov, recimo na spremenljivost in časovni trend. Pri povprečni temperaturi zraka ima razlika med homogeniziranimi in izvornimi vrednostmi večinoma porazdelitev z dvema vrhovoma, a se ta porazdelitev med zbirkami homogeniziranih podatkov oziroma strokovnjaki precej razlikuje (slika 48). Večina popravkov na mesečni in letni ravni je po absolutni velikosti manjša od $0,5\text{ °C}$.



Slika 47. Sezonski potek velikosti preloma na Vojskem nad Idrijo ob selitvi postaje novembra 1993 za tri temperaturne spremenljivke, strokovnjak C. Postaja se je preselila za 100 m k drugi opazovalki, a nadmorska višina je ostala praktično enaka. Na letni ravni velikost preloma znaša $-0,6\text{ °C}$ za najnižjo temperaturo, $-0,2\text{ °C}$ za povprečno temperaturo in $-0,1\text{ °C}$ za najvišjo temperaturo zraka.

Popolna odsotnost mesečnih popravkov med $-0,05\text{ °C}$ in $0,05\text{ °C}$ je posledica zapisa mesečnih vrednosti temperature na $0,1\text{ °C}$ natančno v vseh podatkovnih zbirkah. Letni popravki so izračunani na mesečnih vrednostih temperature, zato so lahko po velikosti mnogo bližje ničli.



Slika 48. Porazdelitev velikosti popravkov povprečne temperature zraka za strokovnjaka A (levo) in C (desno), mesečne vrednosti (zgoraj) in letne vrednosti (spodaj). Širina razredov porazdelitve je 0,1 °C.

Višina padavin

Homogenizacija višine padavin se je izkazala za trši oreh od homogenizacije temperature zraka. Na večini časovnih nizov nismo odkrili nobenega preloma, a to je verjetno posledica velike spremenljivosti višine padavin v prostoru in

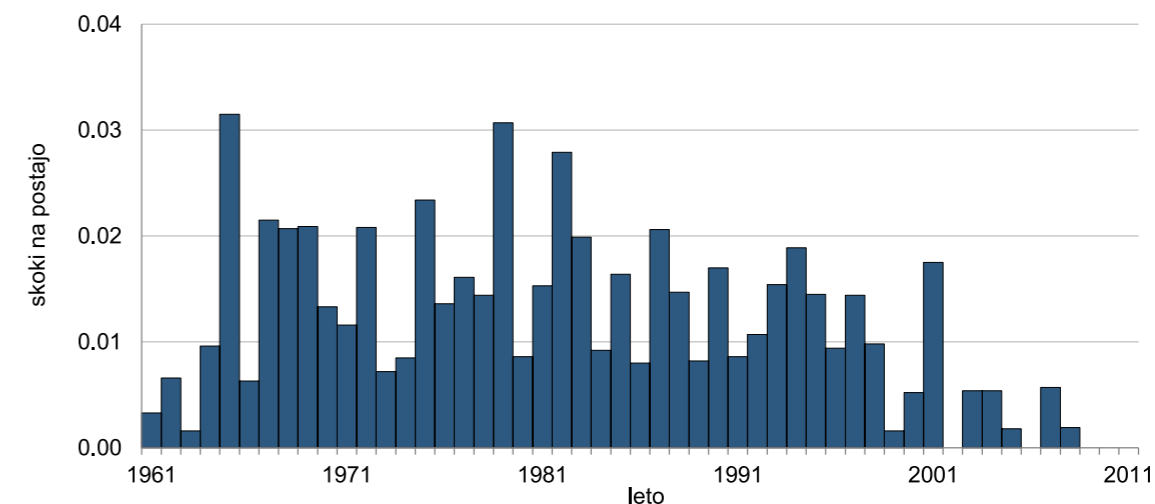
času (preglednica 10). Število odkritih prelomov na postajo ali leto je mnogo manjše kot pri temperaturi, nekoliko manjši je tudi delež z metapodatki potrjenih prelomov. Tudi število odkritih prelomov je med strokovnjaki bolj neenotno kot pri temperaturi zraka.

Preglednica 10. Statistika števila odkritih prelomov v časovnih nizih višine padavin

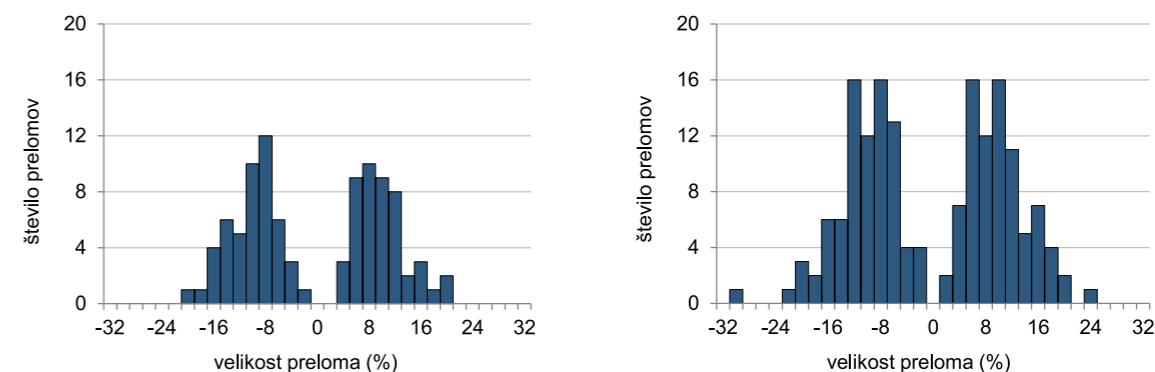
| Strokovnjak | Število postaj | Število nehomogenih nizov | Število prelomov | Delež pojasnenih z metapodatki (%) | Verjetnost preloma v danem letu na eno postajo (%) |
|-------------|----------------|---------------------------|------------------|------------------------------------|--|
| A | 266 | 83 | 97 | 70 | 0,9 |
| B | 266 | 118 | 170 | 81 | 1,6 |
| C | 266 | 100 | 135 | 72 | 1,2 |

Večja gostota prelomov je od sredine šestdesetih let do konca 20. stoletja, nato število prelomov na postajo močno upade (slika 49). Porazdelitev relativne velikosti prelomov kaže izrazita vrhova z

globokim vmesnim minimumom (slika 50). Vrhova se nahajata pri vrednosti 10 %, prelomi z absolutno velikostjo več kot 20 % pa so že zelo redki. Osnovno statistiko velikosti prelomov podaja preglednica 11.



Slika 49. Povprečno število odkritih prelomov na postajo po letih za višino padavin. Prikazana je aritmetična sredina za rezultate strokovnjakov A–C.

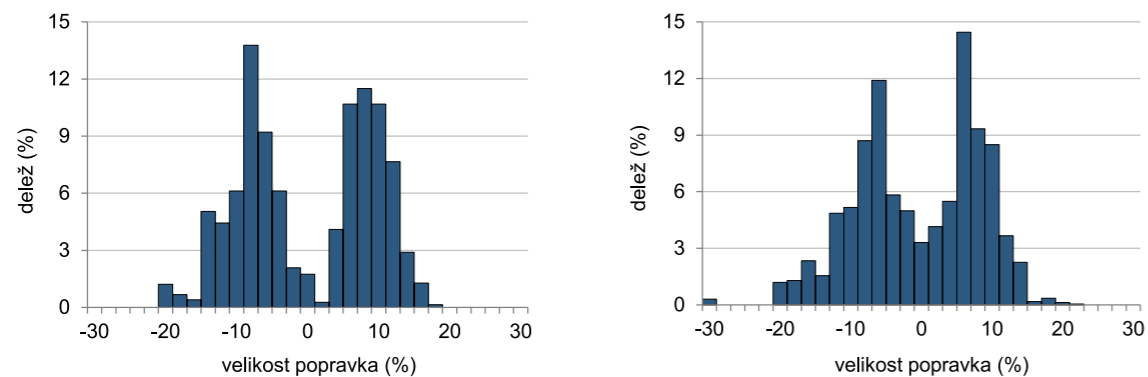


Slika 50. Porazdelitev izračunane relativne velikosti prelomov (glede na obdobje po prelomu) v časovnih nizih letne višine padavin strokovnjakov A (levo) in B (desno). Širina razredov je 2 %.

Preglednica 11. Osnovna statistika porazdelitve velikosti prelomov v časovnih nizih letne višine padavin. Navedene vrednosti so relativne glede na obdobje po prelomu in izražene v odstotkih.

| Strokovnjak | Aritmetična sredina | Najmanj | Prvi kvartil | Mediana | Tretji kvartil | Največ |
|-------------|---------------------|---------|--------------|---------|----------------|--------|
| A | -0,3 | -20,0 | -10,1 | -3,2 | 9,0 | 20,1 |
| B | -0,3 | -30,0 | -10,1 | -1,7 | 9,3 | 24,2 |
| C | -0,1 | -35,7 | -9,7 | 2,2 | 10,1 | 20,4 |

Podobno kot prelomi so tudi popravki letne višine padavin razporejeni v obliki dveh vrhova, le da sta vrhova nekoliko bližje ničli, približno pri -7 % in 7 % vrednosti izvorne višine padavin (slika 51). Večina popravkov je med -15 % in 15 % izvorne vrednosti.



Slika 51. Porazdelitev velikosti popravkov letne višine padavin za strokovnjaka A (levo) in B (desno). Velikost popravkov je prikazana relativno, glede na izvorno vrednost. Širina razredov porazdelitve je 2 %.

Višina novega snega in snežne odeje

Višini novega snega in snežne odeje se tako kot višina padavin regionalno močno spreminjata, odvisnost od nadmorske višine pa je pri snegu mnogo bolj izrazita kot pri padavinah. Prostorska spremenljivost višine snega, ki otežuje homogenizacijo, je verjetno glavni razlog, da smo kljub podobno gosti mreži postaj uspeli odkriti

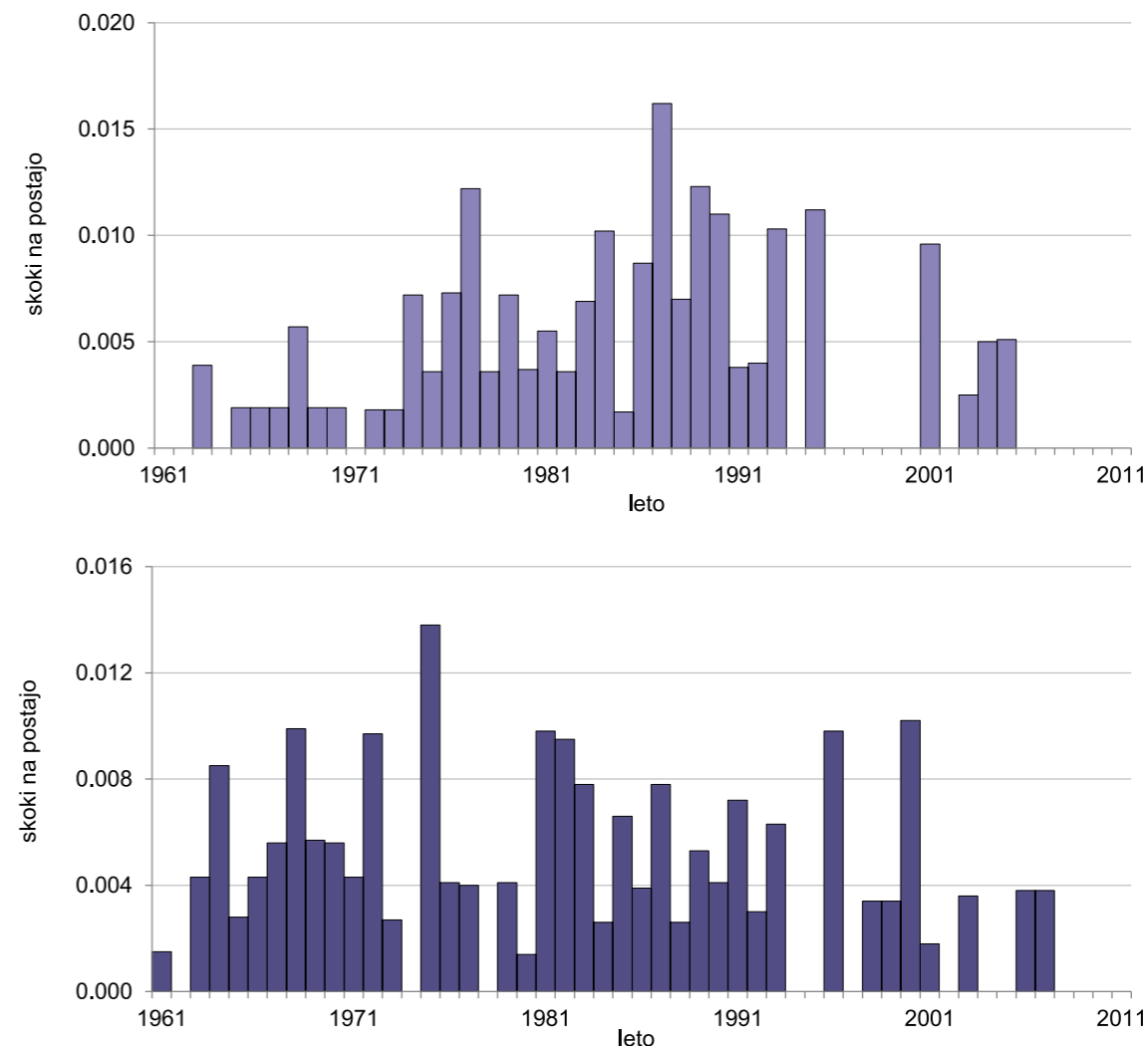
bistveno manj prelomov kot pri višini padavin (preglednica 12). Pri veliki večini postaj nismo odkrili nobenega preloma, povprečna verjetnost za prelom na poljubni postaji v poljubnem letu pa je le okoli 0,4 %. Zanimivo je razhajanje med strokovnjaki glede deleža z metapodatki potrjenih prelomov, saj se ta delež giblje od dobrih 60 % do skoraj 100 %.

Preglednica 12. Statistika števila odkritih prelomov v časovnih nizih višine novega snega in snežne odeje

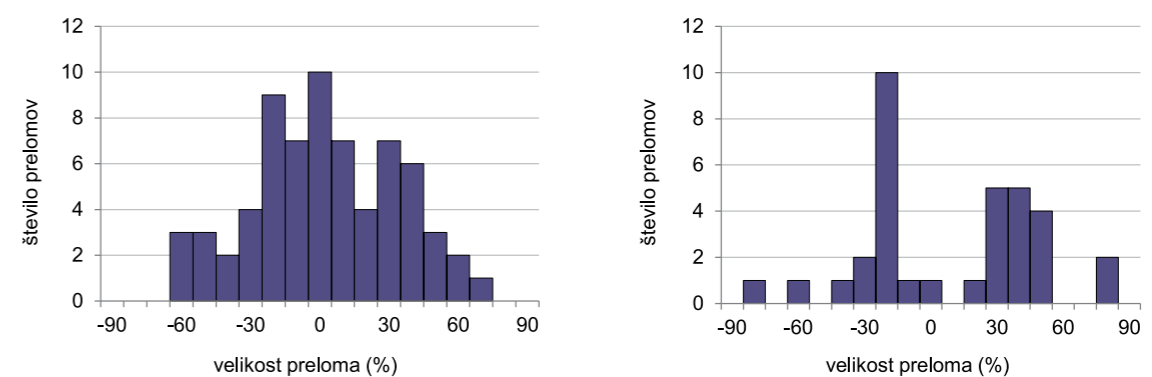
| Spremenljivka | Strokovnjak | Število postaj | Število nehomogenih nizov | Število prelomov | Delež pojasnjenih z metapodatki (%) | Verjetnost preloma v danem letu na eno postajo (%) |
|---------------|-------------|----------------|---------------------------|------------------|-------------------------------------|--|
| novi sneg | A | 206 | 28 | 31 | 97 | 0,4 |
| | B | 206 | 37 | 45 | 80 | 0,5 |
| | C | 206 | 29 | 31 | 61 | 0,4 |
| snežna odeja | A | 268 | 58 | 68 | 91 | 0,6 |
| | B | 268 | 36 | 42 | 86 | 0,4 |
| | C | 268 | 32 | 35 | 63 | 0,3 |

Prelomi v časovnih nizih višine novega snega in snežne odeje so v času različno razporejeni (slika 52). Le nekaj prelomov je v zadnjih letih, največ pa jih je v osrednjem, pri snežni odeji tudi v začetnem delu analiziranega obdobja. Le v posameznih

letih povprečno število skokov na postajo doseže 0,01, kar ustreza dvema do trem prelomom v celotni mreži postaj. Oblika porazdelitve velikosti prelomov se med strokovnjaki močno razlikuje (slika 53).

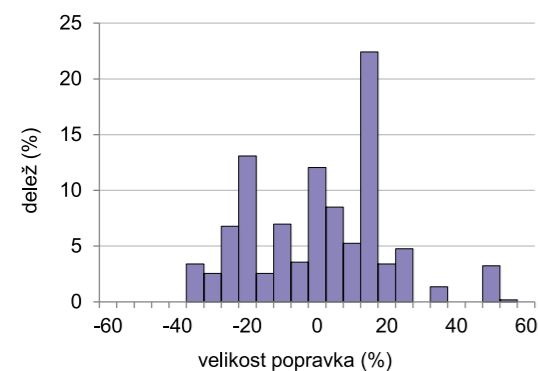


Slika 52. Povprečno število odkritih prelomov na postajo po letih za višino novega snega (zgoraj) in višino snežne odeje (spodaj). Prikazana je aritmetična sredina za rezultate strokovnjakov A-C.

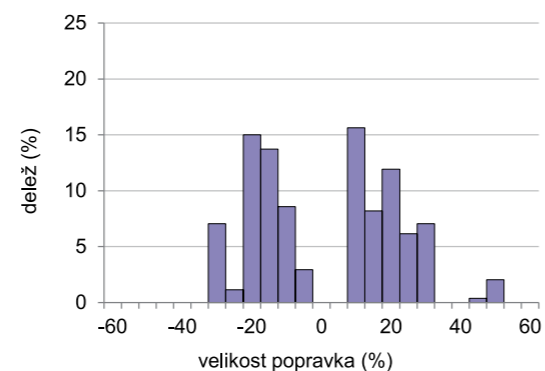


Slika 53. Porazdelitev izračunane velikosti prelomov (relativno glede na obdobje po prelomu) v časovnih nizih letnega povprečja višine snežne odeje strokovnjakov A (levo) in C (desno). Širina razredov je 10 %.

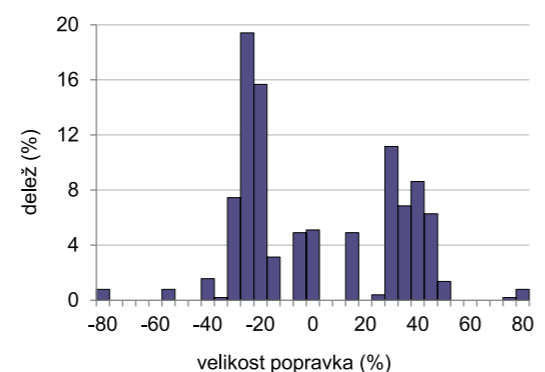
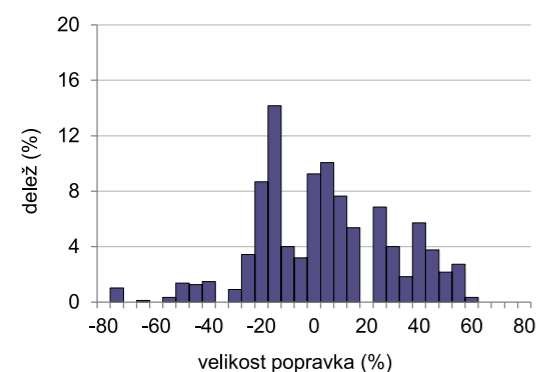
Popravki letne višine novega snega in letne povprečne višine snežne odeje so na splošno večji kot pri višini padavin in po velikosti precej neenakomerno posejani, tudi z več vrhovi (sliki



54 in 55). Oblika porazdelitve se med strokovnjaki znatno razlikuje. Zlasti pri višini snežne odeje je nekaj popravkov zelo velikih, večjih od 40 % izvorne vrednosti.



Slika 54. Porazdelitev velikosti popravkov letne višine novega snega za strokovnjaka A (levo) in B (desno). Velikost popravkov je prikazana relativno, glede na izvorno vrednost. Širina razredov je 5 %. Pri strokovnjaku B en popravek (delež 0,1 %) velikosti 80 % zaradi omejenega razpona ni prikazan.



Slika 55. Porazdelitev velikosti popravkov letne povprečne višine snežne odeje za strokovnjaka A (levo) in C (desno). Velikost popravkov je prikazana relativno, glede na izvorno vrednost. Širina razredov porazdelitve je 5 %. Dva popravka velikosti več kot 82,5 % (delež 0,2–0,4 %) pri obeh strokovnjakih nista prikazana.

Trajanje sončnega obsevanja

Homogenizacija trajanja sončnega obsevanja je potekala nekoliko drugače kot homogenizacija drugih podnebnih spremenljivk. Podatke smo zaradi različnega vpliva vremena in ovir na meritve razdelili v tri dele, glede na del dneva, in vsak del posebej homogenizirali. V približno polovici nizov

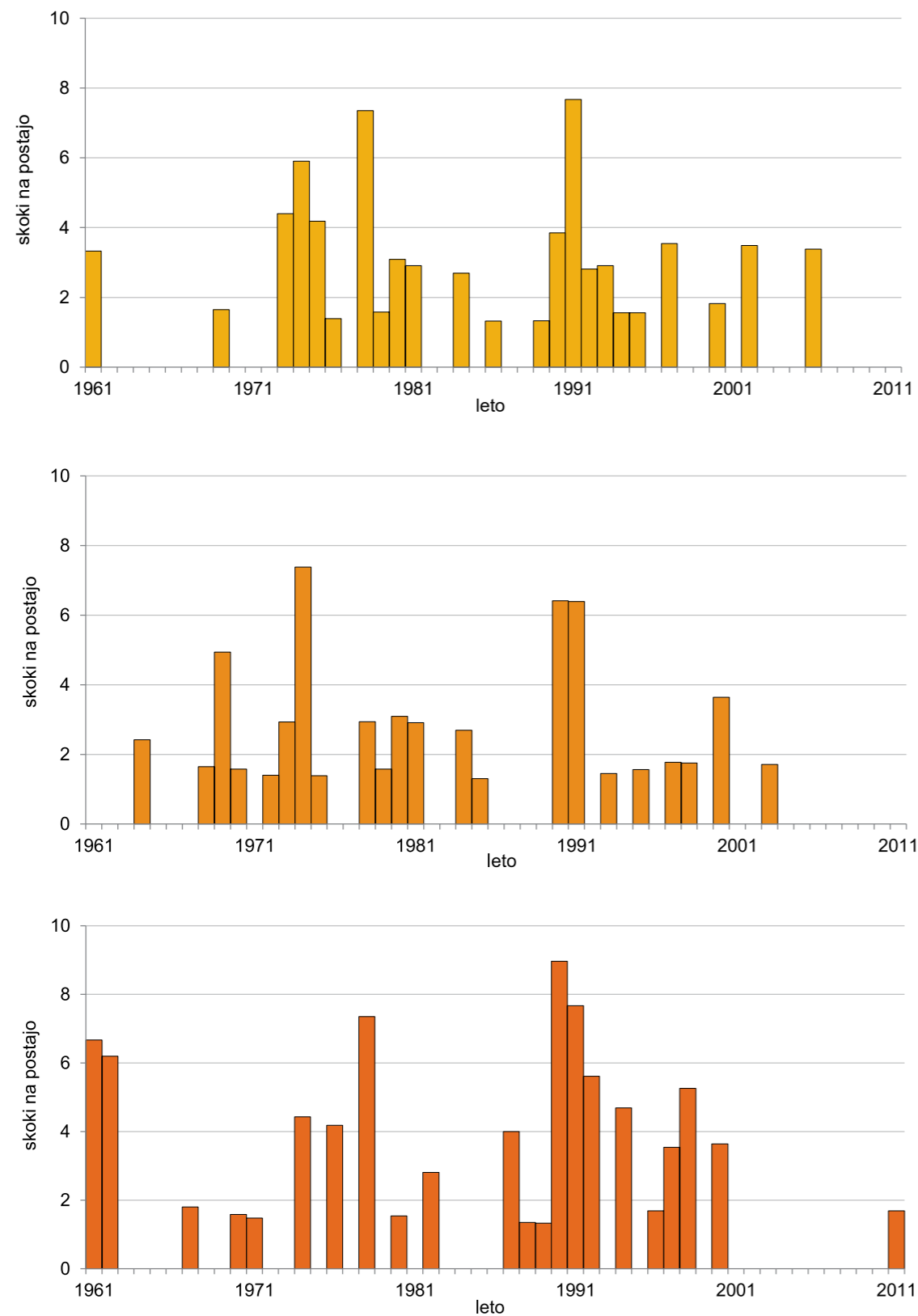
smo odkrili vsaj en prelom (preglednica 13). Število odkritih prelomov je v nizih osrednjega dela dneva nekoliko manjše kot na začetku in koncu svetlega dne. Delež z metapodatki potrjenih prelomov je približno od dve tretjini do tri četrtine. Gostota prelomov je nekoliko večja kot pri višini padavin in nekoliko manjša kot pri temperaturi zraka.

Preglednica 13. Statistika števila odkritih prelomov v časovnih nizih trajanja sončnega obsevanja po odsekih dneva. Del dneva je naveden po srednjeevropskem času.

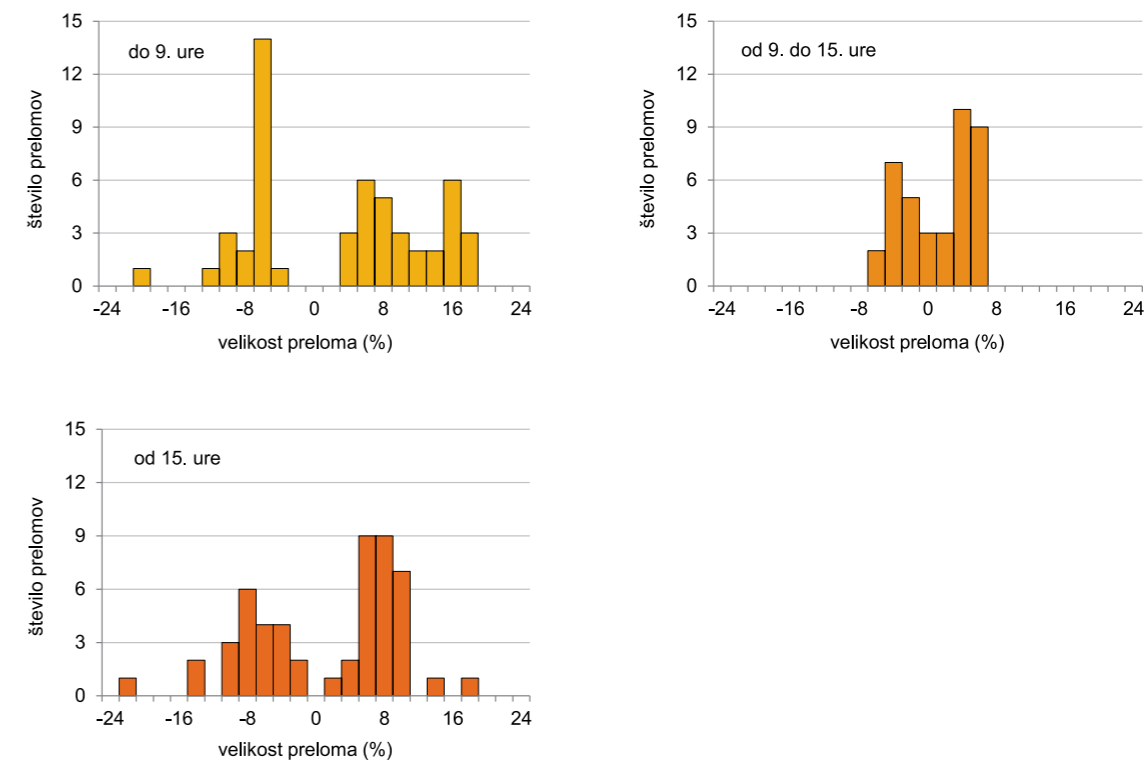
| Del dneva | Strokovnjak | Število postaj | Število nehomogenih nizov | Število prelomov | Delež pojasnenih z metapodatki (%) | Verjetnost preloma v danem letu na eno postajo (%) |
|------------------|-------------|----------------|---------------------------|------------------|------------------------------------|--|
| do 9. ure | A | 27 | 14 | 16 | 63 | 1,5 |
| | B | 27 | 14 | 17 | 76 | 1,6 |
| | C | 27 | 16 | 19 | 84 | 1,8 |
| od 9. do 15. ure | A | 27 | 13 | 16 | 69 | 1,5 |
| | B | 27 | 11 | 12 | 67 | 1,1 |
| | C | 27 | 14 | 14 | 64 | 1,3 |
| od 15. ure | A | 27 | 16 | 18 | 83 | 1,7 |
| | B | 27 | 15 | 18 | 94 | 1,7 |
| | C | 27 | 15 | 19 | 79 | 1,8 |

Odkriti prelomi so časovno močno neenakomerno razporejeni in med različnimi nizi dokaj skladni (slika 56). Glavni vrh je okoli leta 1991, zlasti v začetnih in končnih letih pa je prelomov zelo malo ali nič.

Velikost prelomov je močno odvisna od dela dneva. V zgodnjem in poznem delu dneva so večji kakor sredi dneva, bolj izrazit je tudi vmesni minimum (slika 57). Večina prelomov je manjša od 10 % izvorne vrednosti.



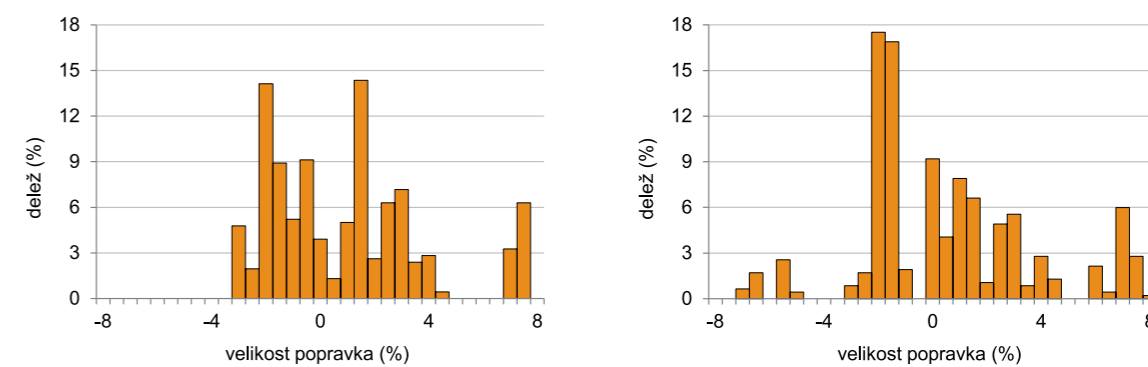
Slika 56. Povprečno število odkritih prelomov na postajo po letih za trajanje sončnega obsevanja: zgoraj interval do 9. ure, na sredi od 9. do 15. ure in spodaj po 15. uri. Prikazana je aritmetična sredina za rezultate strokovnjakov A–C.



Slika 57. Porazdelitev izračunane velikosti prelomov (relativno glede na obdobje po prelomu) v časovnih nizih letnega trajanja sončnega obsevanja. V prikaz so zajeti rezultati vseh treh strokovnjakov. Širina razredov je 2 %.

Popravki trajanja sončnega obsevanja čez ves dan pri posameznih strokovnjakih kažejo dokaj neenakomerno velikostno razporeditev (slika 58). Večina popravkov je po absolutni vrednosti manjša

od 4 % izvorne vrednosti. V primerjavi z višino snega in padavin so popravki glede na izvorno vrednost mnogo manjši.



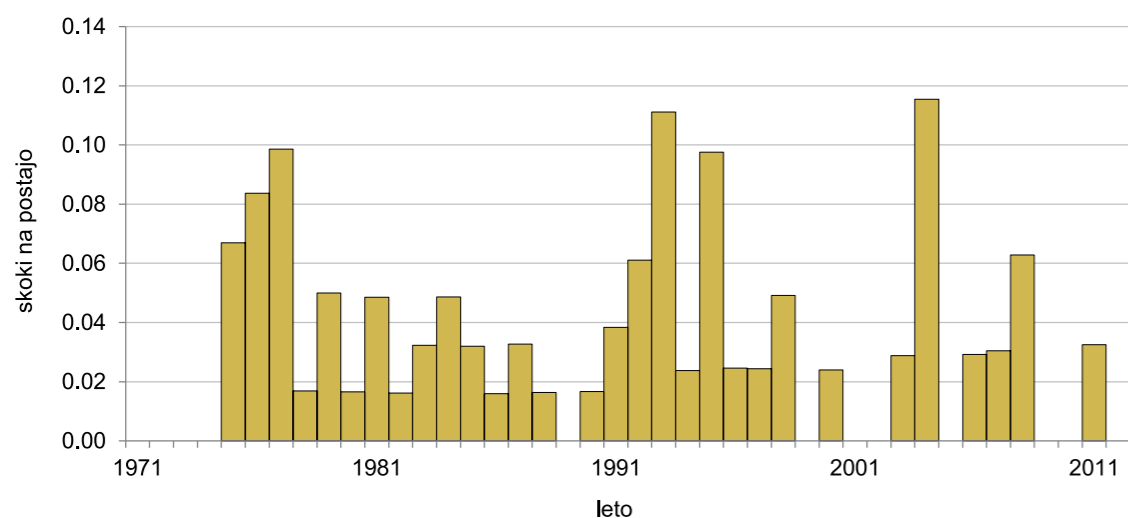
Slika 58. Porazdelitev velikosti popravkov trajanja sončnega obsevanja čez ves dan za strokovnjaka A (levo) in C (desno). Velikost popravkov je prikazana relativno glede na izvorno vrednost. Širina razredov porazdelitve je 0,5 %.

Referenčna evapotranspiracija

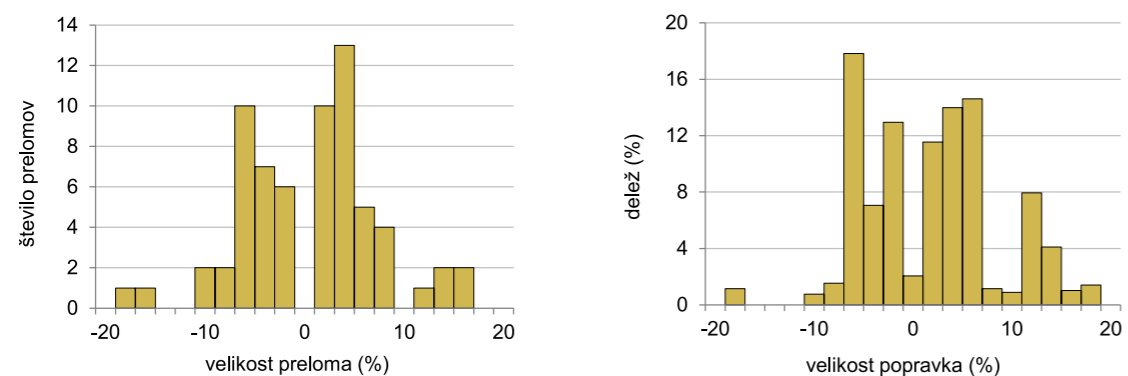
Homogenizacijo referenčne evapotranspiracije je za razliko od prej omenjenih spremenljivk izvedel le en strokovnjak. V 46 od 63 časovnih nizov smo odkrili vsaj en prelom. Skupno število odkritih prelomov je 66, kar pomeni sorazmerno veliko verjetnost preloma v posameznem letu (3,3 %). Delež z metapodatki potrjenih prelomov je 71 %. Relativno veliko število prelomov v primerjavi z drugimi spremenljivkami lahko pojasnimo z značilnostmi podatkov. Referenčna evapotranspiracija je iz osnovnih meteoroloških spremenljivk izvedena spremenljivka. Nizi vhodnih podatkov o temperaturi zraka, relativni vlažnosti, sončnem obsevanju in hitrosti vetra so nehomogeni v več pogledih. V enačbo za izračun

referenčne evapotranspiracije smo glede na časovno obdobje vnašali različne vrste podatkov (recimo trajanje in energijo sončnega obsevanja), v nekaterih primerih pa smo uporabili podatke sosednjih postaj. Vse te nehomogenosti se odražajo v nizu referenčne evapotranspiracije.

Odkriti prelomi so časovno neenakomerni z obdobji večjega in manjšega števila (slika 59). Velikostna porazdelitev kaže izrazit dvojni vrh in večina prelomov je manjša od 10 % izvorne vrednosti (slika 60). Porazdelitev letnih popravkov je nekoliko asimetrična in z več vrhovi; precej več popravkov je pozitivnih kakor negativnih (slika 60). Večina popravkov je po absolutni vrednosti manjša od 8 % izvorne vrednosti, a v nekaj primerih popravki presegajo 15 %.



Slika 59. Število odkritih prelomov na postajo po letih za referenčno evapotranspiracijo.

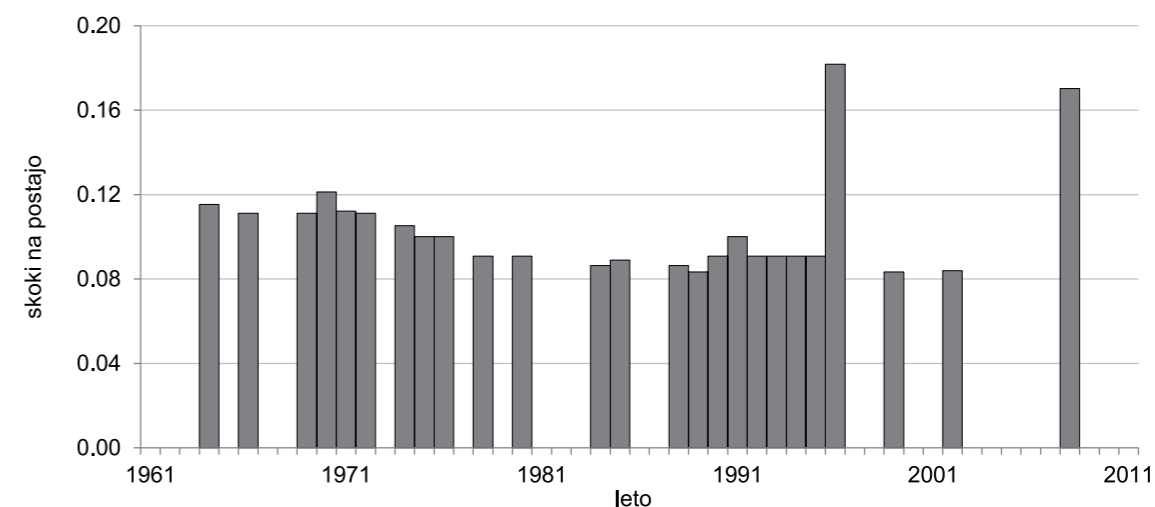


Slika 60. Porazdelitev izračunane velikosti prelomov (levo) in popravkov v časovnih nizih letne referenčne evapotranspiracije glede na izvorno vrednost (desno). Širina razredov je 2 %.

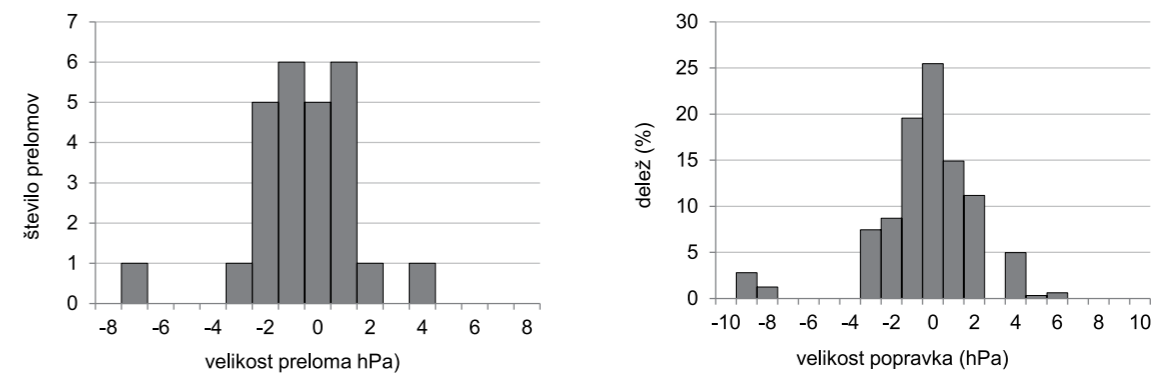
Zračni tlak

V postopku homogenizacije zračnega tlaka smo na množici 12 nizov odkrili skupno 27 prelomov, kar je največja gostota prelomov med vsemi spremenljivkami. Le v dveh nizih podatkov nismo zaznali nobenega preloma, na sedmih nizih pa smo odkrili tri ali celo štiri prelome. Verjetnost preloma na leto je pri zračnem tlaku 5 % ali en prelom na dvajset let podatkov. 63 % prelomov smo potrdili z metapodatki.

Prelomi so časovno neenakomerno razporejeni, najpogostejši so okoli let 1971 in 1992 (slika 61). Večina prelomov in popravkov zračnega tlaka je v razponu od -3 hPa do 2 hPa, le posamezni primeri so daleč izven tega razpona (slika 62).



Slika 61. Število odkritih prelomov na postajo po letih za zračni tlak.



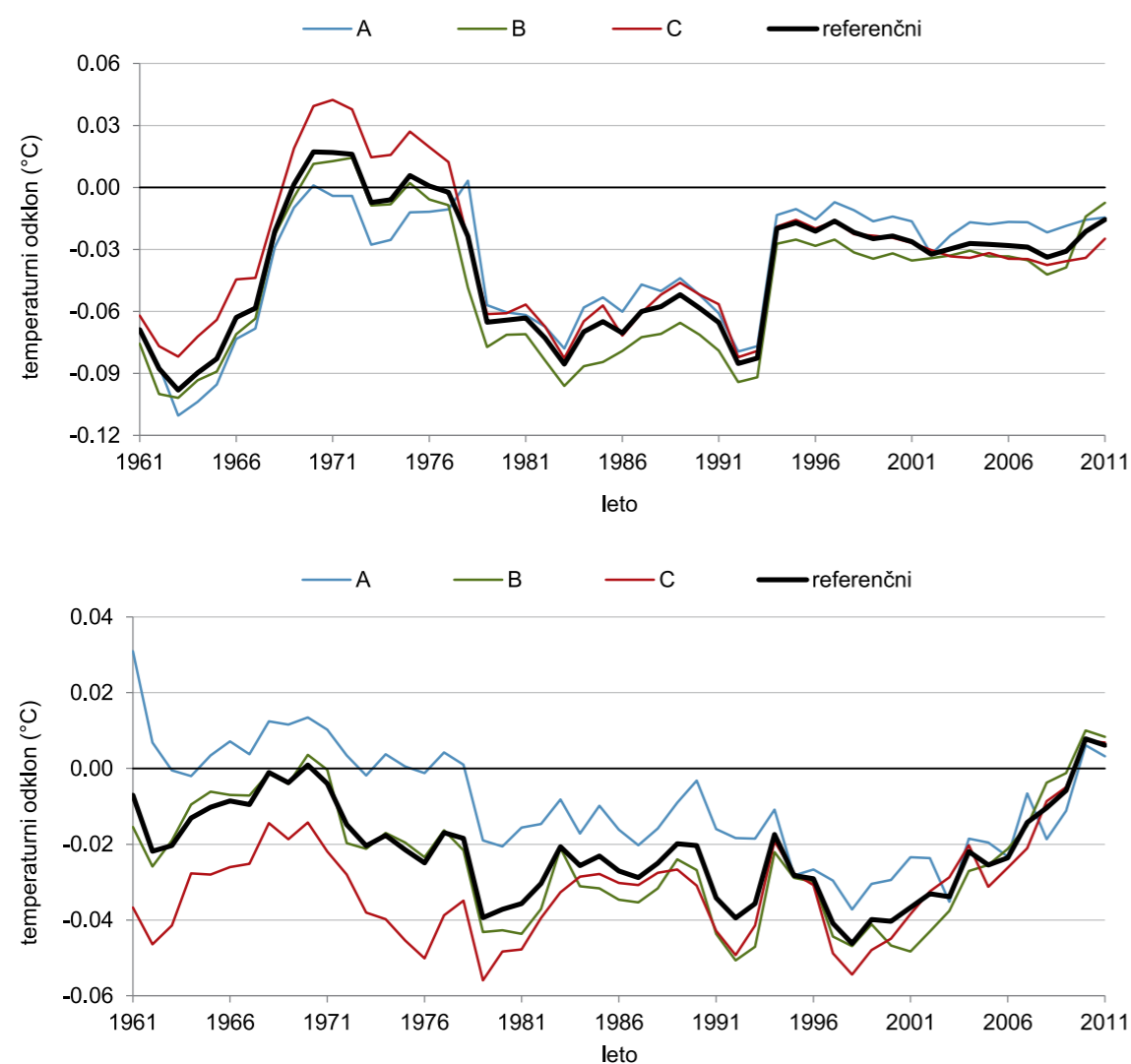
Slika 62. Porazdelitev izračunane velikosti prelomov (levo) in popravkov v nizih letnega povprečja zračnega tlaka (desno). Širina razredov je 1 hPa. Največji izračunani prelom pri zračnem tlaku, velikosti 18,5 hPa, na levi strani ni prikazan. Prav tako na desni strani ni prikazanih 2,9 % popravkov velikosti 23 hPa.

Odraž homogenizacije na vrednosti spremenljivk na državni ravni

S homogenizacijo časovnih nizov neposredno popravimo vrednosti v odsekih časovnih nizov posameznih postaj. Zaradi različnega vpliva nepodnebni dejavnikov na posameznih postajah pričakujemo, da bo prostorska slika spreminjanja podnebnih razmer po homogenizaciji enotnejša. Kadar pa pride do časovno skladnih sprememb, na primer sistematčne menjave zaklonov, menjave vrste inštrumenta ali načina merjenja, lahko pričakujemo nenadno spremembo, dvig ali padec vrednosti v delu mreže ali celotni mreži.

Poleg neposredne primerjave podatkov je najpogosteje uporabljeni kazalnik vpliva homogenizacijskih metod na končni rezultat dolgoročni linearni trend (glej npr. Venema in sod., 2012, Williams in sod., 2012). Čeprav je linearni trend le približek dejanskega podnebnega signala, je uporaben pri analizi podnebnih sprememb, ker iz meritev pogosto težko izluščimo obliko podnebnega signala.

Linearni trend na državni ravni oziroma v mreži slovenskih postaj smo za temperaturo zraka in zračni tlak izračunali na podatkih aritmetične sredine letnih vrednosti po postajah. Pri drugih spremenljivkah smo računali na naslednji način. Najprej smo za vsako postajo normalizirali časovni niz mesečnih in letnih vrednosti – vse

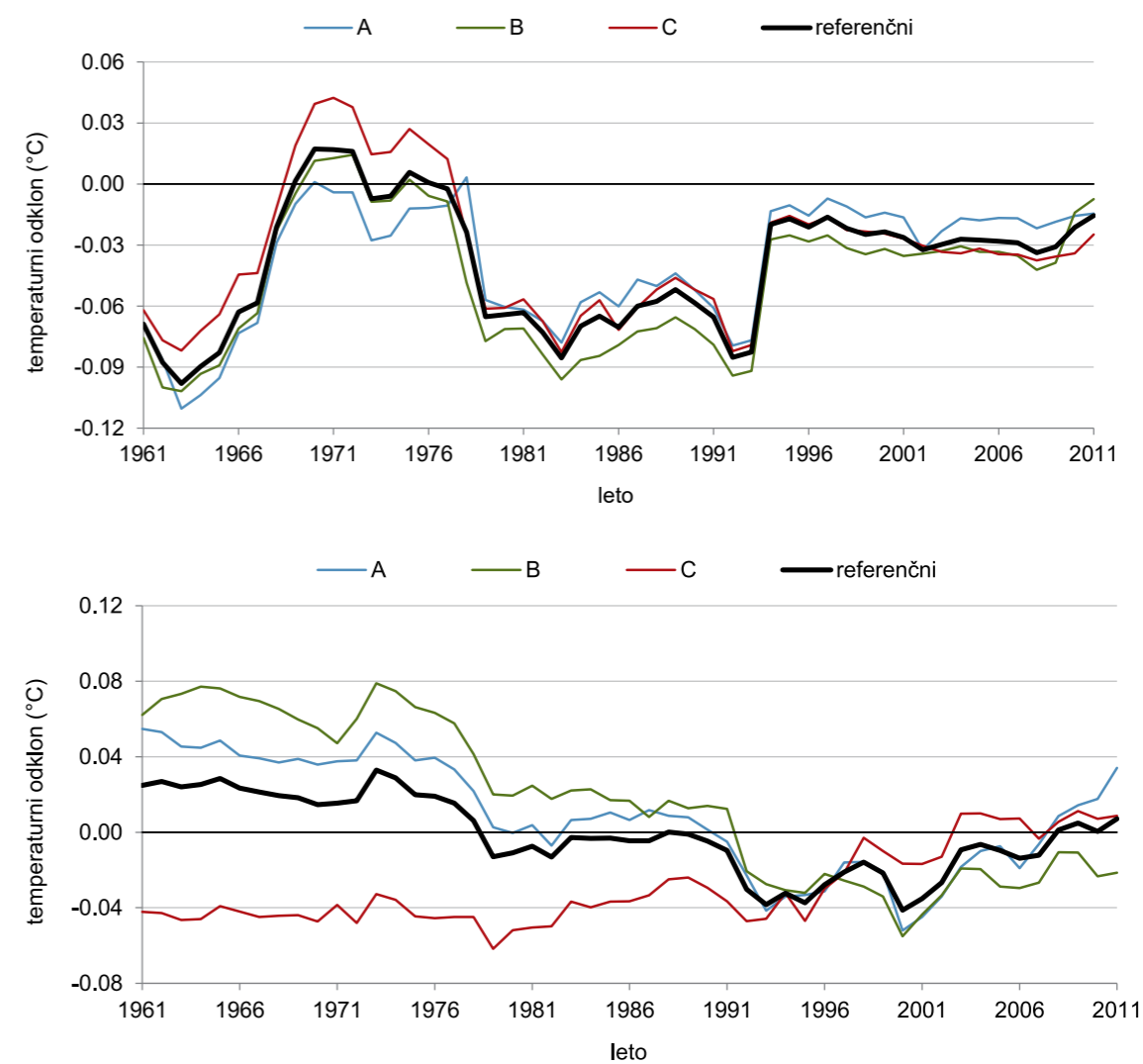


Slika 63. Letna povprečna temperatura zraka na izvornih podatkih in homogeniziranih podatkih treh strokovnjakov: odklon od povprečja obdobja 1961–2011 (zgoraj) in odstopanje homogeniziranih podatkov od izvornih podatkov (spodaj)

podatke smo delili s povprečjem celotnega obdobja na postaji. Povprečna vrednost novih podatkov je tako za vse postaje, vse mesece in celotno leto enaka 1, kar omogoča enakomernjši vpliv postajnih vrednosti na končni rezultat. Nato smo za posamezno leto ali mesec izračunali aritmetično sredino teh normaliziranih postajnih vrednosti. Na teh »državnih nizih« smo izračunali linearni trend. Pri vseh spremenljivkah smo za izračun trenda uporabili robustno metodo Theila in Sena (Wilcox, 2010). V analizi teh trendov se osredotočamo na dve vrsti razlik: med homogeniziranimi in izvornimi podatki (odstopanje trenda) ter med različnimi zbirkami homogeniziranih podatkov (razlika trenda).

Temperatura zraka

Homogenizirani letnega povprečja povprečne, najnižje in najvišje temperature zraka na državni ravni so med seboj zelo skladni in se hkrati zelo malo razlikujejo od izvornih podatkov (sliki 63 in 64). Medtem ko odklon letnih vrednosti temperature od dolgoletnega povprečja v mnogih primerih znaša 1 °C ali več, je razlika med homogeniziranimi podatki le nekaj stotink stopinje Celzija.



Slika 64. Odstopanje letnega povprečja najnižje (zgoraj) in najvišje (spodaj) temperature zraka na homogeniziranih podatkih od izvornih podatkov

Zelo dobro ujemanje časovnih potekov temperature zraka v različnih podatkovnih zbirkah se odraža tudi v zelo podobnem linearnem trendu. Trend povprečne temperature zraka na državni ravni, izračunan na časovnih nizih v zbirki homogeniziranih podatkov in časovnih nizih v zbirki izvornih podatkov, se večinoma zelo dobro

ujema (preglednica 14). Pri povprečni in najnižji temperaturi zraka je odstopanje trenda na letnih podatkih po velikosti največ 0,015 °C na desetletje. Pri najvišji temperaturi je odstopanje trenda večje, a je v primerjavi s celotnim trendom, ki znaša pri najvišji temperaturi okoli 0,4 °C na desetletje, zanemarljivo.

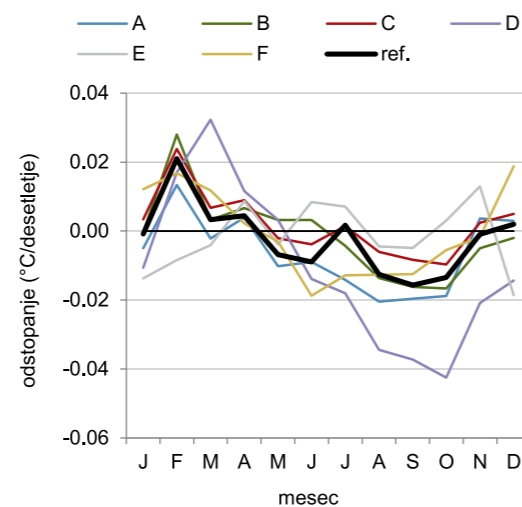
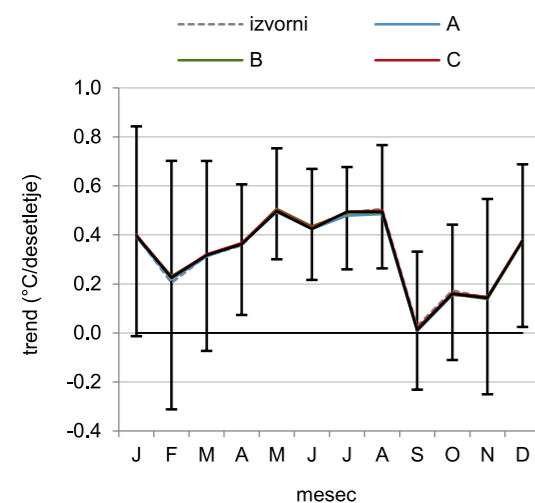
Preglednica 14. Povprečno odstopanje trenda povprečne temperature zraka na homogeniziranih nizih od trenda na dopoljenih izvornih nizih (v 0,001 °C na desetletje)

| Podatkovna zbirka | Povprečna temperatura | Najnižja temperatura | Najvišja temperatura |
|-------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| A | -6 | 3 | -16 |
| B | -6 | -2 | -30 |
| C | -1 | -6 | 13 |
| D | -15 | — | — |
| E | 2 | — | — |
| F | -1 | — | — |
| referenčna | -4 | -2 | -12 |

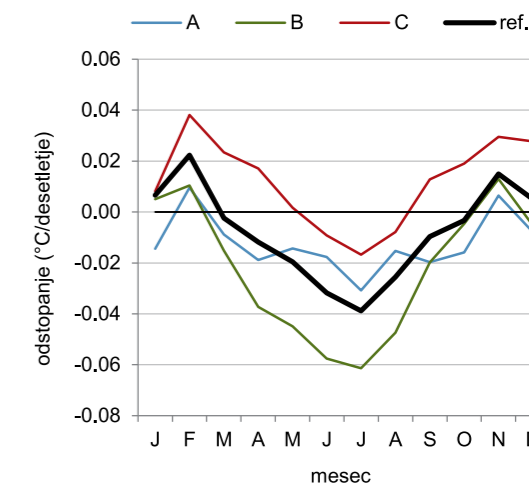
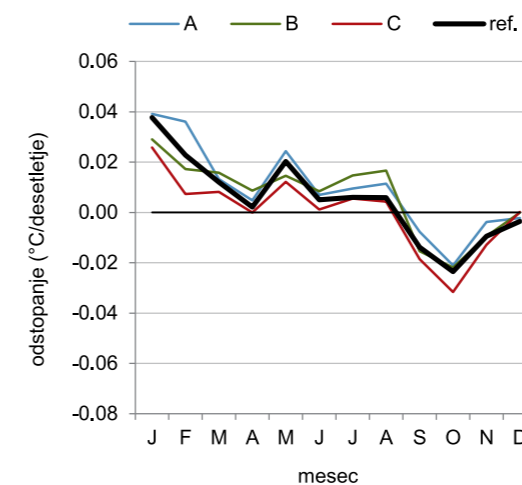
Večji kot na letni ravni, a še vedno majhen, je razpon odstopanja trenda pri mesečnih vrednostih za povprečno temperaturo zraka (slika 65). V posameznih primerih je odstopanje trenda večje od 0,02 °C na desetletje. Usklajeni medletni potek odstopanja trenda opazimo pri najnižji temperaturi zraka; vrh je v prvih dveh mesecih leta, najnižja vrednost pa je oktobra (slika 66). Vse mesečne vrednosti odstopanja trenda so po velikosti manjše od 0,04 °C na desetletje. Nasprotno so pri najvišji

temperaturi razlike v odstopanju trenda med strokovnjaki očitne: A kaže majhen letni hod, B in C pa izrazitega, a z zamikom po velikosti odstopanja trenda (slika 66). Štiri mesečne vrednosti so pri B po velikosti večje od 0,04 °C na desetletje.

V vseh mesecih in pri vseh temperaturnih spremenljivkah je odstopanje trenda na referenčnih homogeniziranih podatkih manjše od 0,04 °C na desetletje, kar je večinoma vsaj en velikostni red manj od trenda.



Slika 65. Linearni trend povprečne temperature na državni ravni po mesecih (levo, daljice označujejo 95-odstotni interval zaupanja za zbirko referenčnih homogeniziranih podatkov) in odstopanje trenda na homogeniziranih podatkih od trenda na izvornih podatkih (desno).



Slika 66. Odstopanje trenda homogeniziranih časovnih nizov na državni ravni za celoletno najnižjo temperaturo (levo) in najvišjo temperaturo (desno)

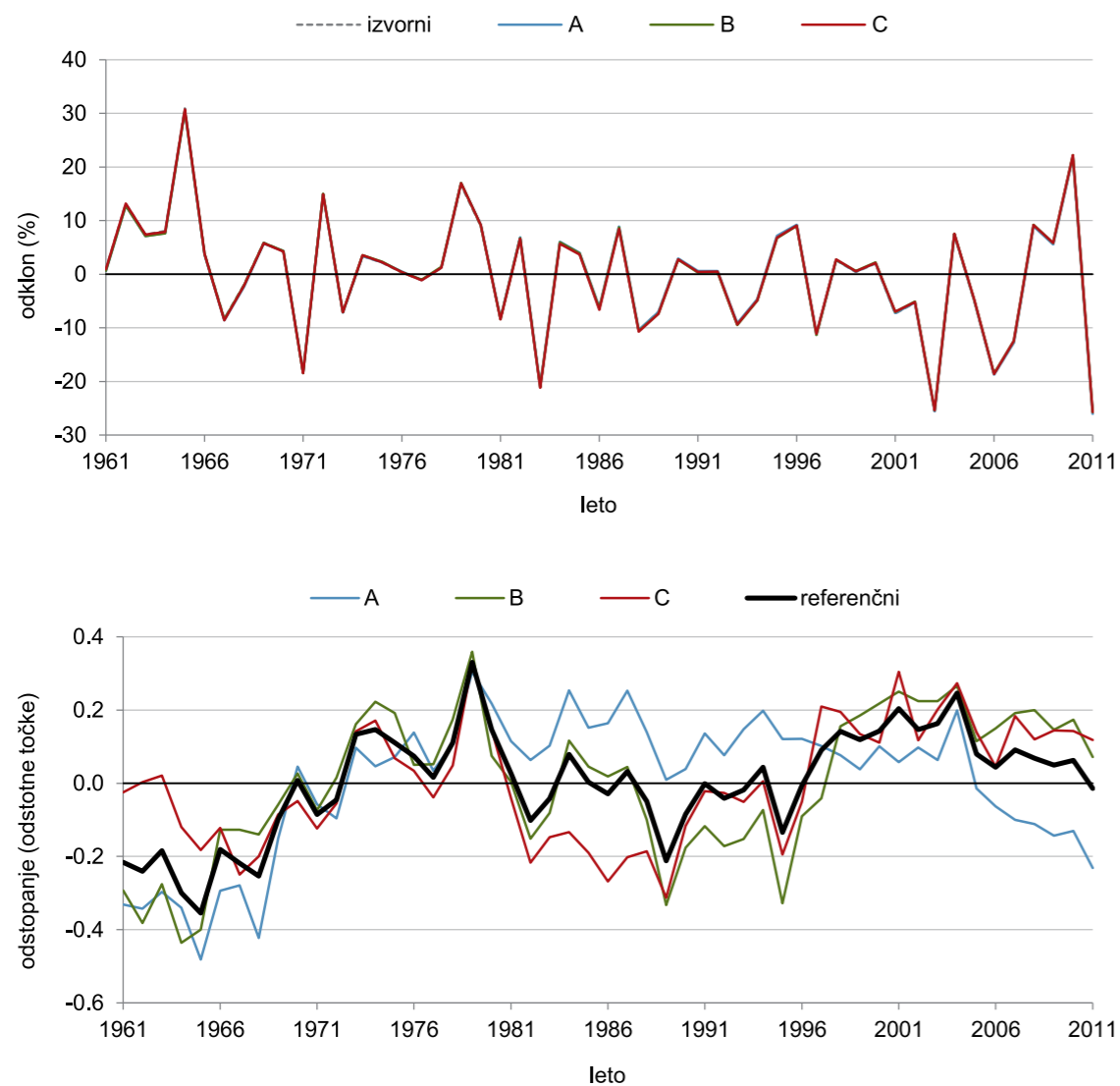
Raziskave (Venema in sod., 2012, Williams in sod., 2012) kažejo, da je trend na podlagi homogeniziranih temperaturnih podatkov na ravni celotne mreže postaj pogosto bliže pravi vrednosti trenda kakor trend, izračunan na izvornih podatkih. V našem primeru je razlika med trendom na homogeniziranih in izvornih podatkih relativno

majhna, dosegljivi metapodatki za obravnavno obdobje pa ne kažejo na pomembne sistematčne spremembe pri meritvah v merilni mreži, zato menimo, da je napaka trenda na podlagi referenčne homogenizirane zbirke za letne in mesečne podatke kvečjemu nekaj stotink stopinje Celzija na desetletje.

Višina padavin

Homogenizacija letnih vrednosti višine padavin je imela neznaten vpliv na državni ravni (slika 67). Spreminjanje padavin iz leta v leto je tudi nekaj desetodstotkov vrednosti dolgoletnega povprečja, homogenizacijski popravki pa so dva velikostna

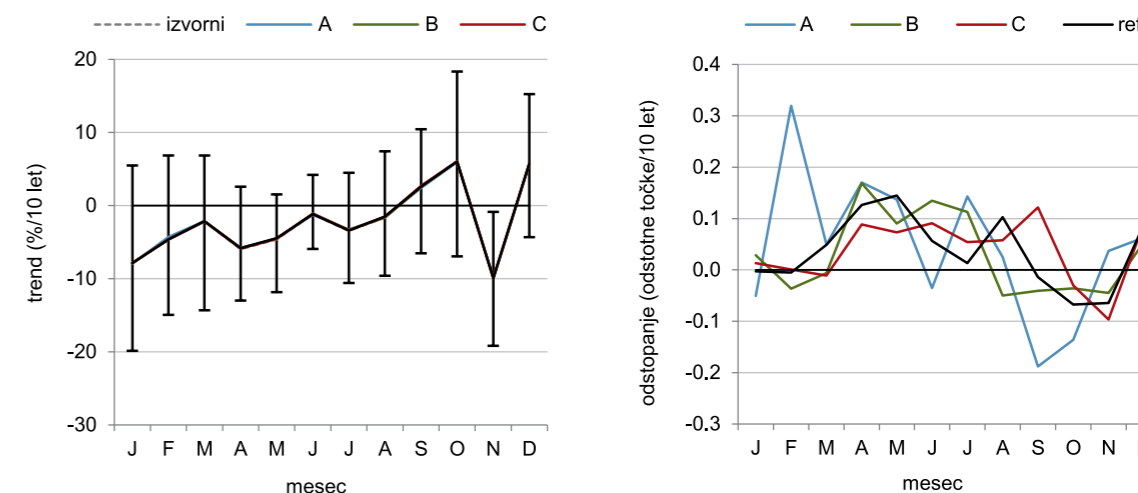
razreda manjši. Odstopanje od izvornih vrednosti se med različnimi zbirkami homogeniziranih podatkov deloma ujema, v nekaterih obdobjih pa se poteki razlikujejo (slika 67). Odstopanje ne kaže izrazitega časovnega trenda v celotnem obdobju.



Slika 67. Letna povprečna višina padavin na izvornih podatkih in homogeniziranih podatkih treh strokovnjakov: odklon od povprečja obdobja 1961-2011 (zgoraj) in odstopanje homogeniziranih podatkov od izvornih podatkov (spodaj) Prikazane vrednosti so relativne glede na povprečje podatkov vsake podatkovne zbirke za obdobje 1961-2011.

Trend mesečne višine padavin na državni ravni je po homogenizaciji le malenkost drugačen (slika 68). V primerjavi s celotnim trendom in statistično negotovostjo je odstopanje trenda za en do dva velikostna razreda manjše. Na letni ravni je odstopanje trenda od 0,11 do 0,18 odstotne točke

na desetletje, kar je prav tako malo v primerjavi s celotnim trendom, ki znaša okoli -2,2 odstotka na desetletje. Statistična negotovost trenda zaradi spreminjanja padavin iz leta v leto znaša okoli 2,2 odstotka na desetletje.

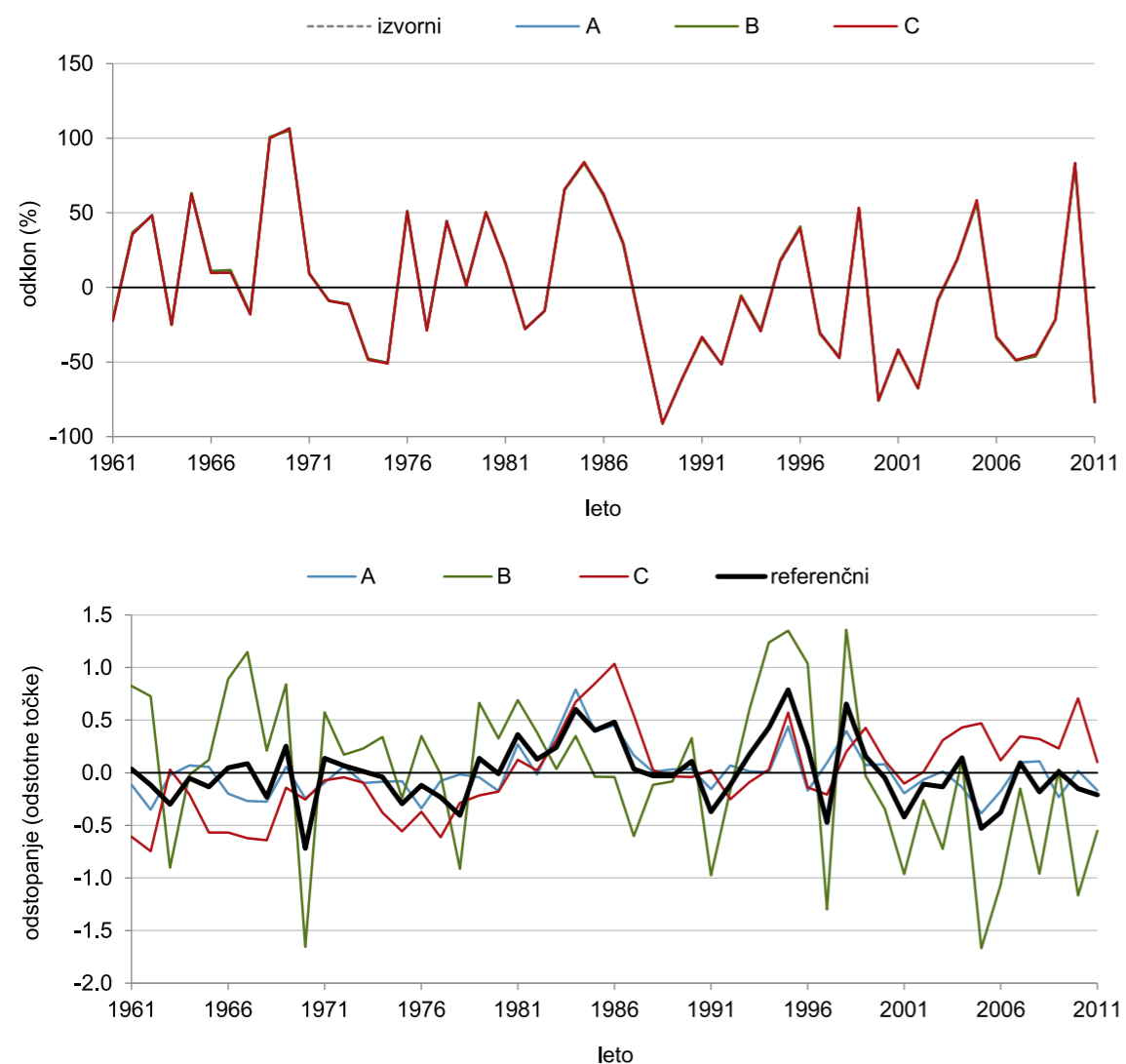


Slika 68. Povprečni trend mesečne višine padavin na državni ravni (levo, daljice prikazujejo 95-odstotni interval zaupanja za zbirko referenčnih homogeniziranih podatkov) in odstopanje trenda na homogeniziranih podatkih od izvornih podatkih (desno).

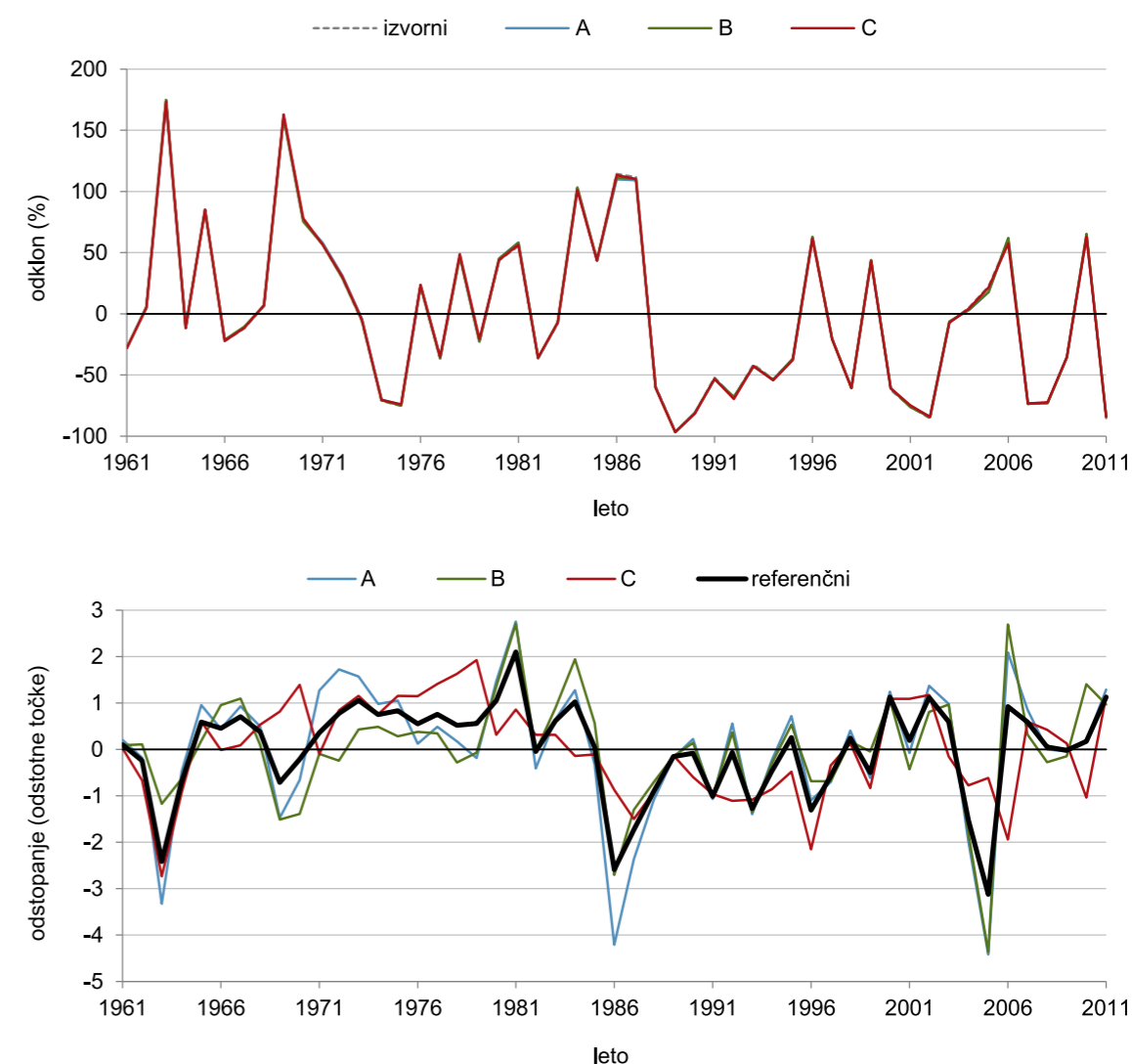
Višina novega snega in snežne odeje

Višini novega snega in snežne odeje na državni ravni kažeta močno medletno spremenljivost, mnogo večjo kot pri višini padavin (sliki 69 in 70). Homogenizacijski popravki so na državni ravni

večinoma zelo majhni, nekaj desetink odstotne točke (ena odstotna točka je en odstotek povprečne vrednosti v obdobju 1961–2011). Le v posameznih letih popravke doseže nekaj odstotnih točk.



Slika 69. Letno povprečje višine novega snega na izvornih podatkih in homogeniziranih podatkih treh strokovnjakov: odklon od povprečja obdobja 1961–2011 (zgoraj) in odstopanje homogeniziranih podatkov od izvornih podatkov (spodaj). Prikazane vrednosti so relativne glede na povprečje podatkov vsake podatkovne zbirke za obdobje 1961–2011.



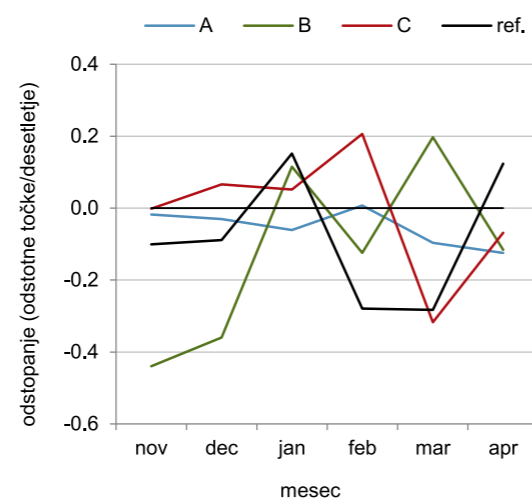
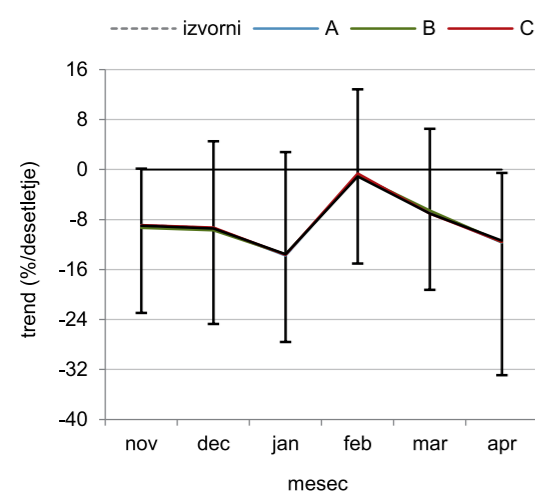
Slika 70. Letno povprečje višine snežne odeje na izvornih podatkih in homogeniziranih podatkih treh strokovnjakov: odklon od povprečja obdobja 1961–2011 (zgoraj) in odstopanje homogeniziranih podatkov od izvornih podatkov (spodaj). Prikazane vrednosti so relativne glede na povprečje podatkov vsake podatkovne zbirke za obdobje 1961–2011.

Pri analizi trenda višine novega snega in snežne odeje smo se omejili le na postaje, kjer je bila v večini let ali posameznega meseca v letu znotraj obravnavanega obdobja izmerjena snežna odeja. V mesecih z dokaj pogostim sneženjem in snežno odejo vsaj v hribovitem svetu, to je od novembra do aprila, so trendi na homogeniziranih in izvornih nizih zelo podobni, razlika med njimi znaša le nekaj desetink odstotne točke (sliki 71 in 72). V drugih mesecih leta je sneženje v večjem delu Slovenije tako redko, da je težko oceniti dolgoletni trend. Odstopanje trendov pri obeh spremenljivkah kaže različen medletni potek. Velikost trenda na mesečnih podatkih je mnogo večja od odstopanja

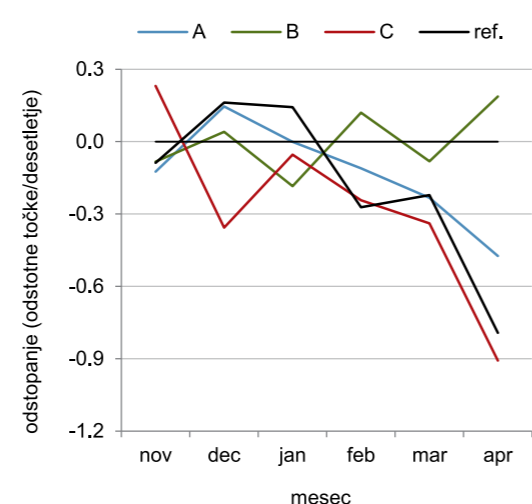
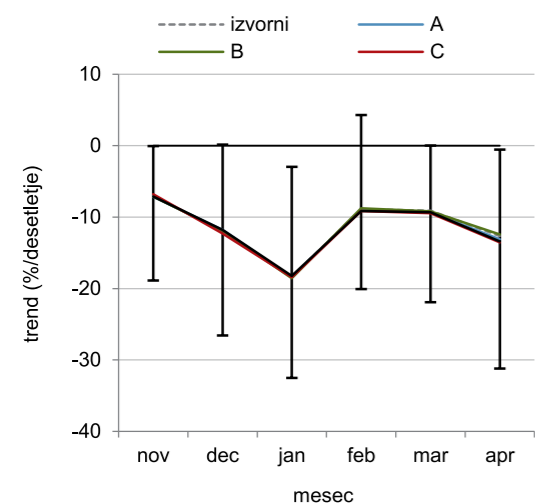
trenda in večinoma znaša nekaj odstotkov na desetletje. Statistična negotovost trenda zaradi spreminjanja snežnih razmer iz leta v leto je prav tako velika in znaša na mesečnih podatkih okoli 13 odstotnih točk pri 95-odstotni intervalu zaupanja. Tako je navidezno velik negativni trend pri novem snegu na meji statistične značilnosti le januarja in aprila, sicer ni statistično značilen. Le nekoliko bolj zanesljiv je predznak trenda višine snežne odeje. Negotovost je nekoliko manjša pri letnih podatkih; 95-odstotni intervala zaupanja pri novem snegu je od –20 odstotkov do –2 odstotka na desetletje in pri snežni odeji od –24 odstotkov na desetletje do –2 odstotka na desetletje.

Preglednica 15. Povprečno odstopanje trenda višine novega snega in snežne odeje (v odstotnih točkah na desetletje) na homogeniziranih nizih od trenda na dopoljenih izvornih nizih

| Podatkovna zbirka | Novi sneg | Snežna odeja |
|-------------------|-----------|--------------|
| A | 0,00 | 0,06 |
| B | -0,33 | 0,08 |
| C | 0,20 | 0,06 |
| referenčna | 0,03 | -0,23 |



Slika 71. Povprečni trend mesečne vsote novega snega na državni ravni (levo, daljice prikazujejo 95-odstotni interval zaupanja za zbirko referenčnih homogeniziranih podatkov) in odstopanje trenda na homogeniziranih podatkih od trenda na izvornih podatkih (desno)

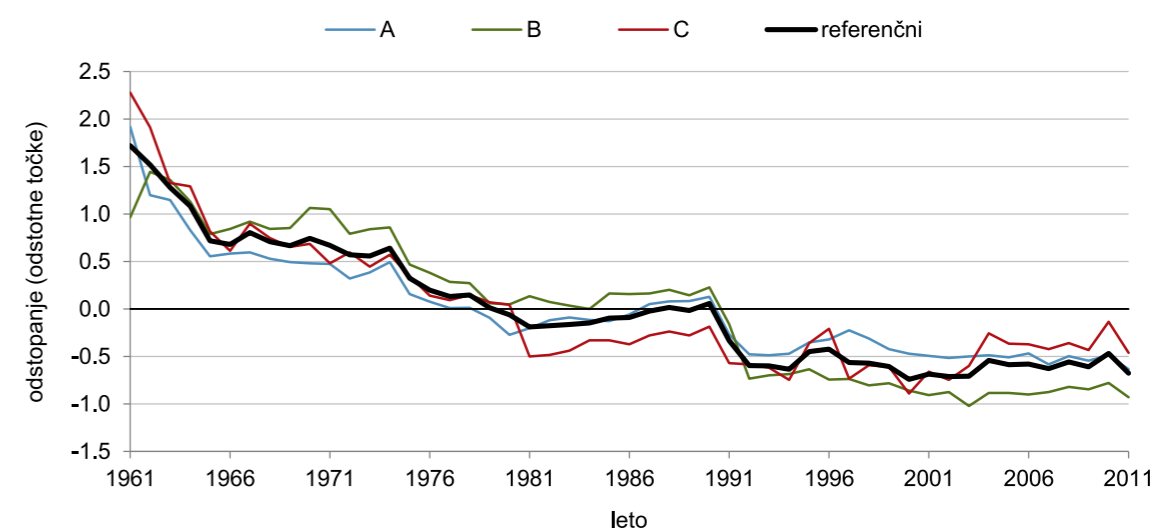
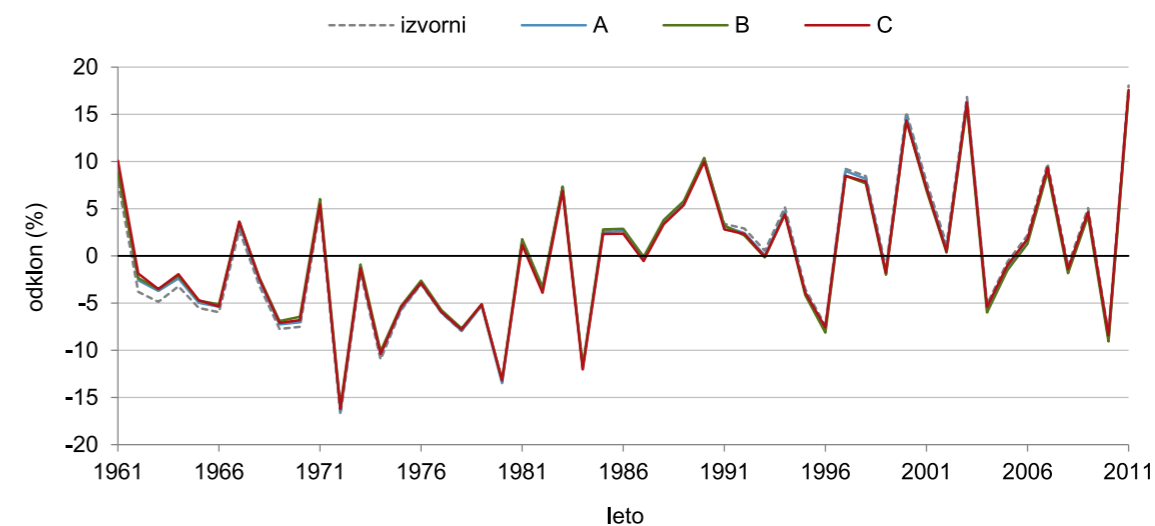


Slika 72. Povprečni trend mesečnega povprečja višine snežne odeje na državni ravni (levo, daljice prikazujejo 95-odstotni interval zaupanja za zbirko referenčnih homogeniziranih podatkov) in odstopanje trenda na homogeniziranih podatkih od trenda na izvornih podatkih (desno).

Trajanje sončnega obsevanja

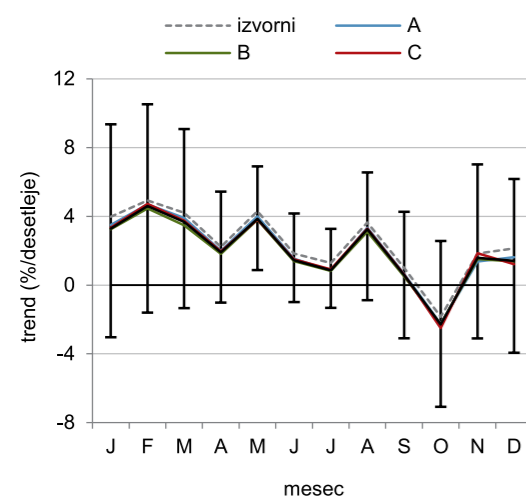
Trajanje sončnega obsevanja se iz leta v leto spreminja tudi za 10 % in več, homogenizacijski popravki pa so mnogo manjši (slika 73). V nasprotju s prej obravnavanimi spremenljivkami

je pri trajanju sončnega obsevanja predznak homogenizacijskih popravkov izrazito odvisen od časovnega obdobja (slika 73). V prvih 20 letih so popravki večinoma pozitivni, v zadnjih 20 letih pa prevladujejo negativni popravki.

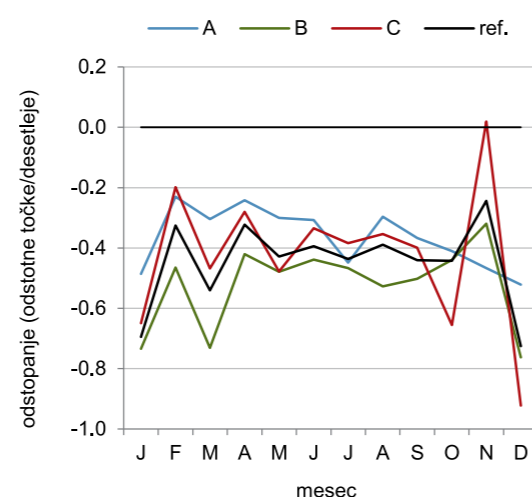


Slika 73. Letno povprečje trajanja sončnega obsevanja na izvornih podatkih in homogeniziranih podatkih treh strokovnjakov: odklon od povprečja obdobja 1961–2011 (zgoraj) in odstopanje homogeniziranih podatkov od izvornih podatkov (spodaj). Prikazane vrednosti so relativne glede na povprečje podatkov vsake podatkovne zbirke za obdobje 1961–2011.

Odstopanje trenda je zaradi izrazite časovne odvisnosti popravkov znatnejše kot pri višini padavin in snega (74). Na letnih podatkih, kjer trend znaša okoli 2 odstotka na desetletje, je odstopanje od $-0,5$ do $-0,3$ odstotne točke na desetletje. Odstopanje trenda čez leto niha, a homogenizirani nizi v vseh mesecih kažejo manjši trend kakor izvorni podatki (izjema je le zbirka



homogeniziranih podatkov C za november), a je velikost trenda v večini mesecev nekajkrat večja od odstopanja trenda. Tudi statistična negotovost trenda zaradi spreminjanja mesečnega trajanja sončnega obsevanja iz leta v leto je mnogo večja od odstopanja trenda, razpon 95-odstotni intervala zaupanja znaša od 5 do 13 odstotnih točk.

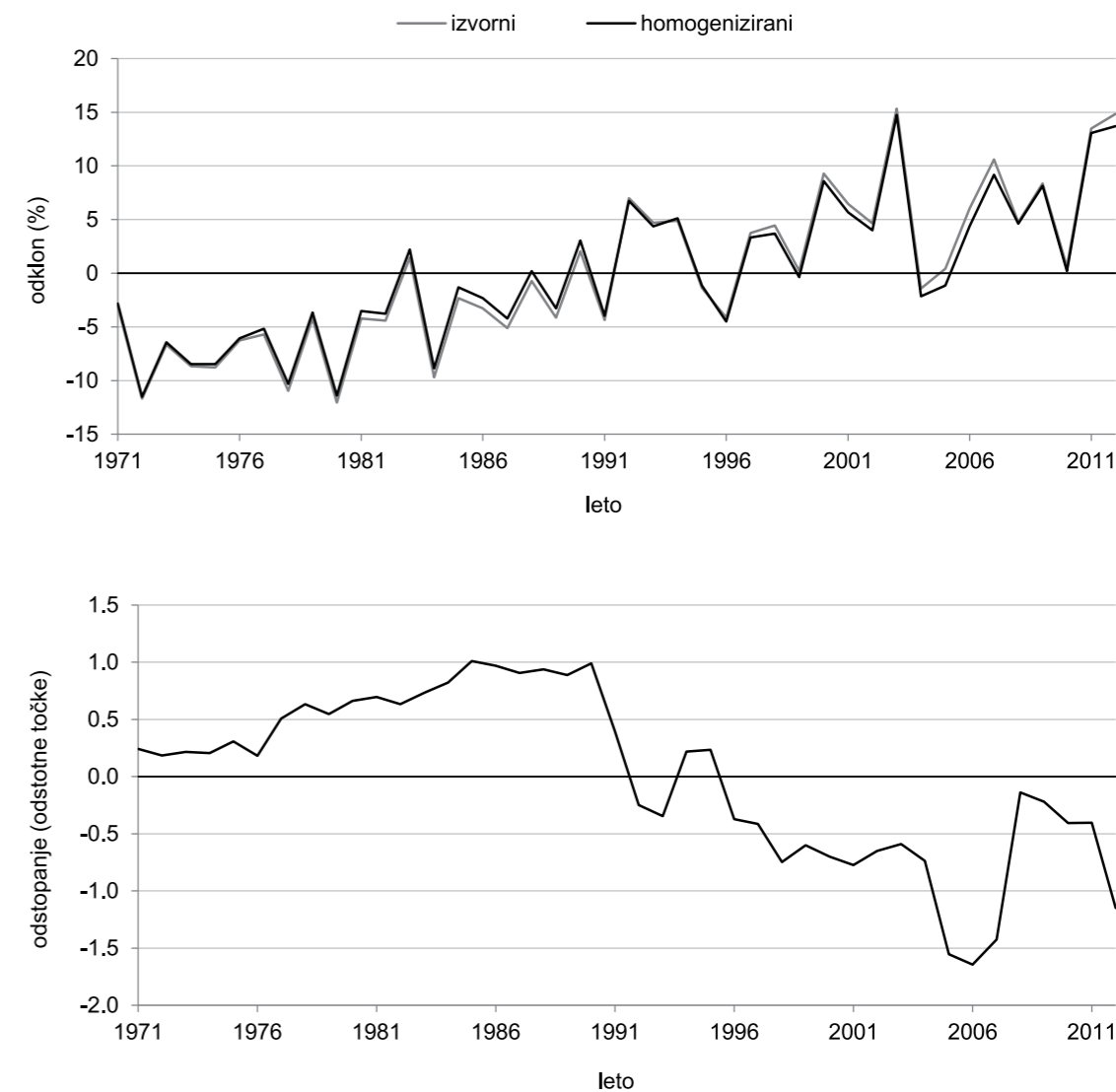


Slika 74. Povprečni trend mesečne vsote trajanja sončnega obsevanja na državni ravni (levo, daljice prikazujejo 95-odstotni interval zaupanja za izvorne podatke) in odstopanje trenda na homogeniziranih podatkih od trenda na izvornih podatkih (desno).

Referenčna evapotranspiracija

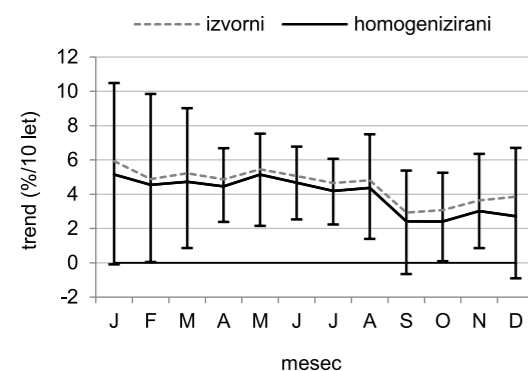
Časovni niz letne referenčne evapotranspiracije v obdobju 1971–2012 kaže izrazito naraščanje, velika pa je tudi medletna spremenljivost, ki znaša okoli 10 % (slika 75). Učinek homogenizacije na

ta časovni niz je zelo majhen, saj sprememba izvornih vrednosti znaša okoli ene odstotne točke (slika 75). V prvi polovici obdobja so vrednosti po homogenizaciji nekoliko zvišane, v drugi polovici obdobja pa nekoliko znižane.

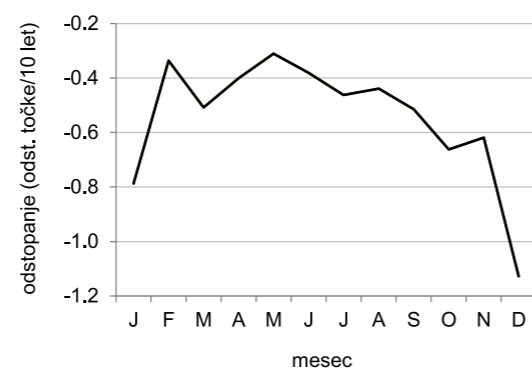


Slika 75. Letno povprečje referenčne evapotranspiracije na izvornih in homogeniziranih podatkih: odklon od povprečja obdobja 1971–2012 (zgoraj) in odstopanje homogeniziranih podatkov od izvornih podatkov (spodaj). Prikazane vrednosti so relativne glede na povprečje podatkov vsake podatkovne zbirke za obdobje 1971–2012.

Linearni trend referenčne evapotranspiracije se je po homogenizaciji zmanjšal ne le na letni, temveč tudi na mesečni ravni. Sprememba je velika nekaj desetink odstotne točke, največja je decembra (slika 76). Na letni ravni se je trend po



homogenizaciji zmanjšal s prvotnih 4,7 odstotka na desetletje na 4,3 odstotka na desetletje. Velikost trenda in njegova statistična negotovost sta na letni in mesečni ravni za velikostni red večji od odstopanja trenda.



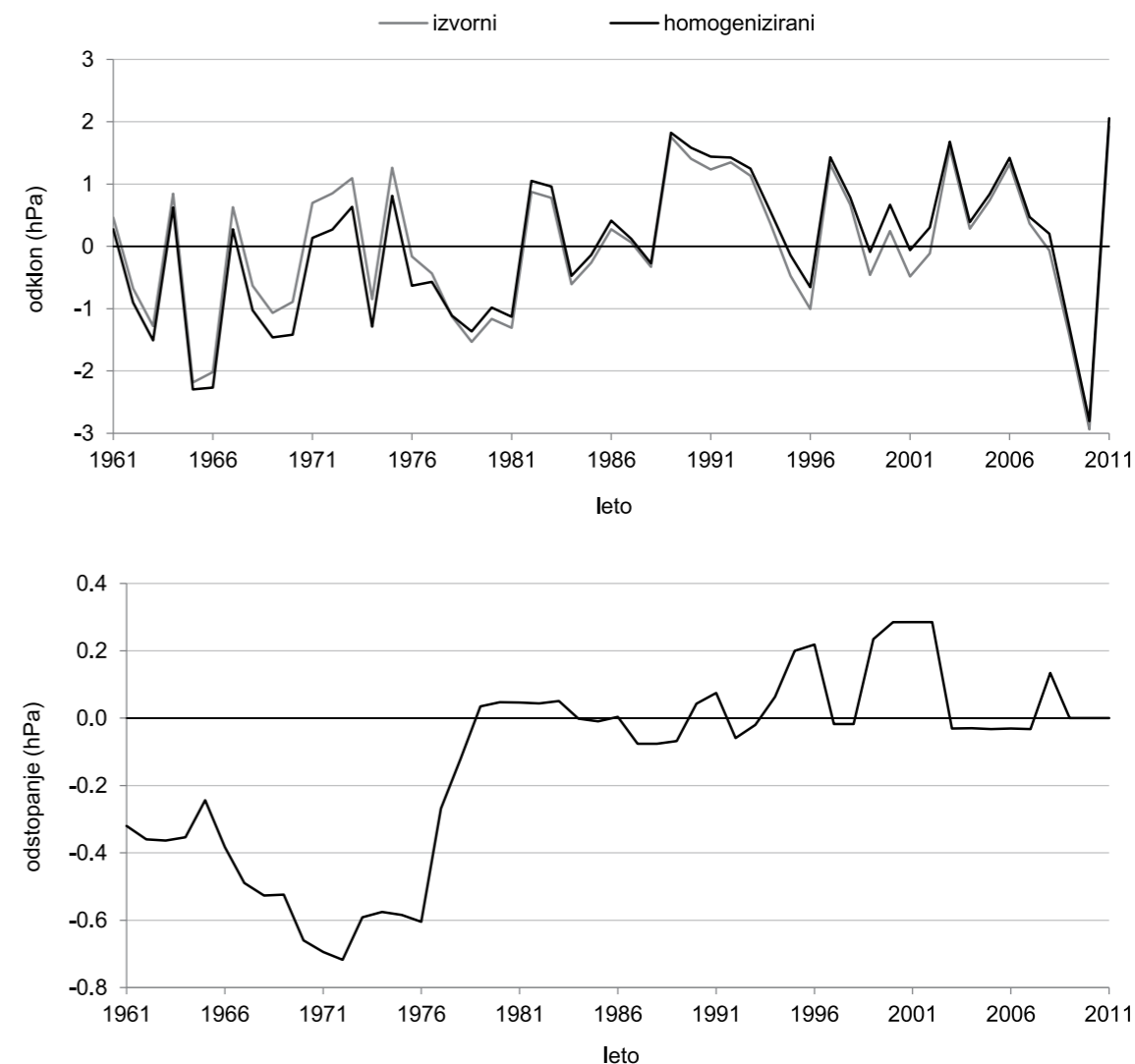
Slika 76. Povprečni trend referenčne evapotranspiracije na državni ravni (levo, daljice prikazujejo 95-odstotni interval zaupanja za izvirne podatke) in odstopanje trenda na homogeniziranih podatkih od trenda na izvirnih podatkih (desno). Trend je izračun za obdobje 1971–2012.

Zračni tlak

Vpliv homogenizacije na trend zračnega tlaka je zaradi značilnosti meritev bistveno drugačen kot na druge spremenljivke. Nadmorska višina barometra je daleč najpomembnejši dejavnik pri meritvah, vpliv okolice merilnega mesta pa je zanemarljiv, zato s homogenizacijo pravzaprav prilagodimo meritve na enako nadmorsko višino. Trije časovni nizi (za Bilje, Letališče Portorož in

Celje) so zlepljeni podatki merilnih mest z različno nadmorsko višino, zato smo jih iz analize vpliva homogenizacije na trend izločili.

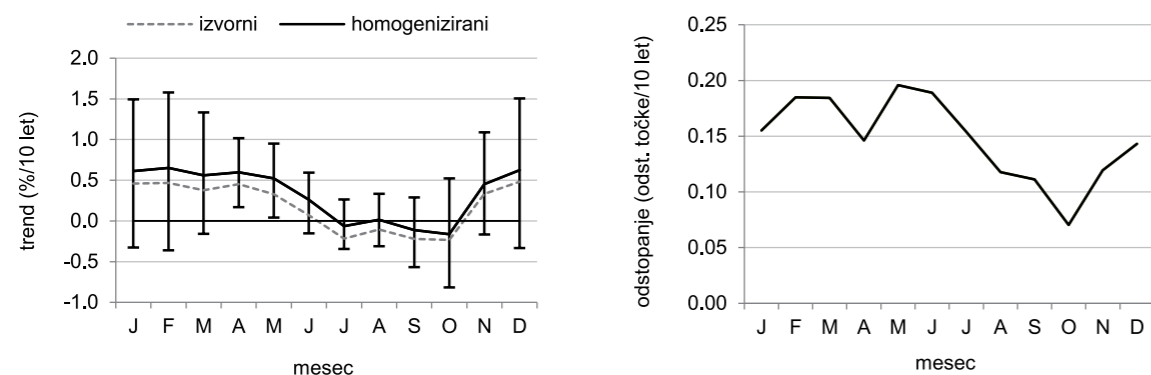
Na letni ravni zračni tlak niha do nekaj hektopaskalov, s homogenizacijo pa smo posamezne vrednosti spremenili za en velikostni red manj (slika 77). Največji učinek homogenizacije je do leta 1976, nato je večino let neznatno.



Slika 77. Letno povprečje zračnega tlaka na izvirnih in homogeniziranih podatkih: odklon od povprečja obdobja 1961–2011 (zgoraj) in odstopanje homogeniziranih podatkov od izvirnih podatkov (spodaj). V izračun niso zajeti merilni nizi Letališča Portorož, Bilj in Celja, ker so združeni z nizi okoliških meteoroloških postaj.

Dolgoletni trend zračnega tlaka na državni ravni se je po homogenizaciji spremenil predvsem zaradi znatnih popravkov v prvih 16 letih analiziranega obdobja (slika 78). Na izvirnih letnih podatkih znaša trend 0,21 hPa na desetletje, po homogenizaciji se poveča na 0,36 hPa na

desetletje. Odstopanje trenda je čez leto dokaj stalno, le od avgusta do novembra je manjše. V primerjavi z mesečnimi vrednostmi trenda je odstopanje trenda v nekaterih mesecih precejšnje, a hkrati mnogo manjše od statistične negotovosti (velikosti 95-odstotnega intervala zaupanja).



Slika 78. Povprečni trend zračnega tlaka na državni ravni (levo, daljice prikazujejo 95-odstotni interval zaupanja za izvirne podatke) in odstopanje trenda na homogeniziranih podatkih od trenda na izvornih podatkih (desno).

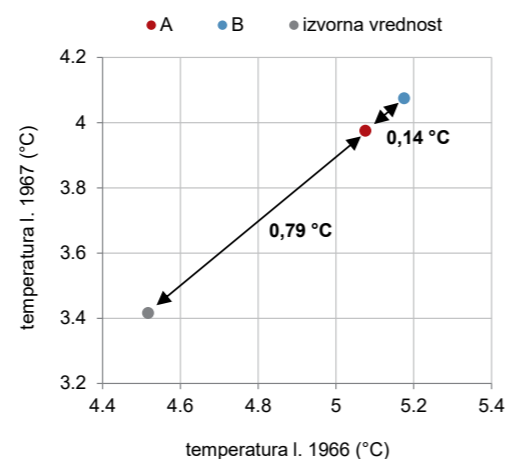
Skladnost homogeniziranih nizov med strokovnjaki

V uvodu smo omenili, da lahko s homogenizacijo zmanjšamo vpliv nepodnebni dejavnikov na časovni niz meritev, a povsem homogenega niza s tem postopkom ne moremo dobiti. Na točnost homogeniziranih nizov lahko posredno sklepamo prek primerjave med homogeniziranimi in izvornimi časovnimi nizi. Bolj kot so si podobni homogenizirani nizi različnih strokovnjakov med seboj kot pa glede na izvirne nize, bolj lahko zaupamo homogeniziranim nizom oziroma homogenizacijskim popravkom.

Primerjavo podatkovnih zbirk smo opravili na mesečnih in letnih vrednostih homogeniziranih spremenljivk in pripadajočih dolgoročnih trendih. Temelj prve vrste primerjave je koren povprečnega kvadrata razlike (okrajšano KPKR) med dvema podatkovnima zbirkama. Gre za izračun kvadrata razlike med istoležnimi vrednostmi v različnih podatkovnih zbirkah, po vseh mesecih, letih in postajah. Ta statistika je analogna razdalji med dvema točkama na ravnini ali v prostoru (evklidska razdalja), le da so koordinate v tem primeru vrednosti temperature, dimenzije pa so postaje, leta in meseci. Namesto običajnega dvo-ali tridimenzionalnega prostora gre torej tu za namišljeni prostor s toliko dimenzijami, kolikor je vrednosti v posamezni podatkovni zbirki. Na sliki 79 je shematski prikaz te metode za primer dveh temperaturnih vrednosti. Evklidska razdalja med homogeniziranimi vrednostmi strokovnjakov A in B je precej manjša kakor med izvorno in posamezno homogenizirano vrednostjo. Skladnost med zbirkama A in B je tako precej večja kakor med posamezno homogenizirano in izvorno vrednostjo. V izračunu KPKR zajamemo vsa leta, mesece in postaje, kjer so na voljo izvorni podatki.

Podobno kot pri mesečnih in letnih vrednostih spremenljivk smo ravnali pri primerjavi linearnega trenda med podatkovnimi zbirkami. Za vsako postajo smo izračunali linearni trend v celotnem obdobju in nato KPKR trenda med dvema podatkovnima zbirkama.

Skladnost oziroma neskladnost, različnost med zbirkami homogeniziranih podatkov smo ovrednotili glede na zbirko izvornih podatkov. Izračunali smo t. i. stopnjo relativne različnosti dveh zbirk homogeniziranih podatkov glede na zbirko izvornih podatkov. Stopnja relativne različnosti je določena z razmerjem KPKR med zbirkama homogeniziranih podatkov in aritmetično sredino vrednosti KPKR med pari zbirke homogeniziranih in zbirke izvornih podatkov. V primeru na sliki 79 je to razmerje med 0,14 °C (KPKR med A in B) in aritmetično sredino vrednosti 0,79 °C (KPKR med A in izvorno vrednostjo) in 0,93 °C (KPKR med B in izvorno vrednostjo). Stopnja relativne različnosti znaša 0,16.



Slika 79. Letno povprečje najnižje temperature zraka v Celju v letih 1966 in 1967 v zbirkah homogeniziranih podatkov A, B in zbirki izvornih podatkov.

Stopnja relativne različnosti lahko sega od nič do dve. Prva skrajnost ustreza enakima zbirkama homogeniziranih podatkov; druga skrajnost ustreza primeru, ko so izvorni podatki na premici med homogeniziranimi podatki obeh zbirk. Pri naključnih homogenizacijskih popravkih bi stopnja relativne različnosti dosegla vrednost okoli 1,4.

Pri višini padavin, novega snega in snežne odeje ter pri trajanju sončnega obsevanja smo se zaradi velike spremenljivosti povprečnih razmer v prostoru osredotočili na relativne vrednosti glede na povprečje obravnavanega obdobja. Ker smo te spremenljivke homogenizirali z letnimi popravki, smo v analizo skladnosti podatkovnih zbirk zajeli le letne vrednosti. Letne vrednosti smo obravnavali v obliki razmerja glede na izvirne vrednosti, pri linearnem trendu pa smo letne vrednosti delili z aritmetično sredino celotnega obdobja.

Temperatura zraka

Pri povprečni temperaturi zraka znaša KPKR med posamezno zbirko homogeniziranih podatkov in zbirko izvornih podatkov okoli 0,20 °C pri mesečnih in 0,17 °C pri letnih podatkih. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov je na mesečnih podatkih okoli 67 % in na letnih podatkih okoli 55 % (preglednica 16). Izstopa zbirka D, ki se od drugih zbirk homogeniziranih podatkov razlikuje le malenkost manj, kot se razlikuje od zbirke izvornih podatkov; stopnja relativne različnosti se večinoma giblje od 80 do 90 odstotkov. Na splošno so si torej homogenizirani podatki medsebojno precej bolj podobni kakor z izvornimi podatki. Odtod lahko sklepamo tudi na veliko skladnost popravkov izvornih vrednosti v postopku homogenizacije. Ta ugotovitev nekoliko bolj velja za letne kakor za mesečne vrednosti – popravki letnih vrednosti so torej zanesljivejši od popravkov mesečnih vrednosti.

Preglednica 16. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov povprečne temperature (v %), posebej za mesečne in letne podatke.

Mesečni podatki

| | A | B | C | D | E | F |
|---|----|----|----|----|----|----|
| A | 0 | 62 | 58 | 90 | 69 | 62 |
| B | 62 | 0 | 47 | 85 | 50 | 53 |
| C | 58 | 47 | 0 | 84 | 60 | 47 |
| D | 90 | 85 | 84 | 0 | 80 | 85 |
| E | 69 | 50 | 60 | 80 | 0 | 71 |
| F | 62 | 53 | 47 | 85 | 71 | 0 |

Letni podatki

| | A | B | C | D | E | F |
|---|----|----|----|----|----|----|
| A | 0 | 47 | 50 | 83 | 50 | 48 |
| B | 47 | 0 | 35 | 82 | 42 | 38 |
| C | 50 | 35 | 0 | 80 | 46 | 41 |
| D | 83 | 82 | 80 | 0 | 56 | 84 |
| E | 50 | 42 | 46 | 56 | 0 | 47 |
| F | 48 | 38 | 41 | 84 | 47 | 0 |

Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov najnižje temperature je nekoliko manjša kot pri povprečni temperaturi, medtem ko je pri

najvišji temperaturi stopnja relativne različnosti nekoliko večja (preglednici 17 in 18).

Preglednica 17. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov najnižje temperature za letne podatke (v %)

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 47 | 40 |
| B | 47 | 0 | 41 |
| C | 40 | 41 | 0 |

Podobne ali celo nekoliko manjše vrednosti stopnje različnosti zbirk homogeniziranih podatkov kažejo izračuni za linearni trend (preglednice 19–21).

Preglednica 19. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov po trendu letnega povprečja temperature (v %), posebej za mesečne in letne podatke.

Mesečni podatki

| | A | B | C | D | E | F |
|---|----|----|----|----|----|----|
| A | 0 | 74 | 62 | 81 | 81 | 60 |
| B | 74 | 0 | 58 | 79 | 56 | 62 |
| C | 62 | 58 | 0 | 82 | 68 | 52 |
| D | 81 | 79 | 82 | 0 | 85 | 73 |
| E | 81 | 56 | 68 | 85 | 0 | 81 |
| F | 60 | 62 | 52 | 73 | 81 | 0 |

Letni podatki

| | A | B | C | D | E | F |
|---|----|----|----|----|----|----|
| A | 0 | 43 | 42 | 50 | 40 | 36 |
| B | 43 | 0 | 28 | 70 | 28 | 30 |
| C | 42 | 28 | 0 | 63 | 26 | 30 |
| D | 50 | 70 | 63 | 0 | 62 | 54 |
| E | 40 | 28 | 26 | 62 | 0 | 34 |
| F | 36 | 30 | 30 | 54 | 34 | 0 |

Preglednica 20. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov po trendu letnega povprečja najnižje temperature (v %)

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 27 | 33 |
| B | 27 | 0 | 20 |
| C | 33 | 20 | 0 |

Preglednica 18. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov najvišje temperature za letne podatke (v %)

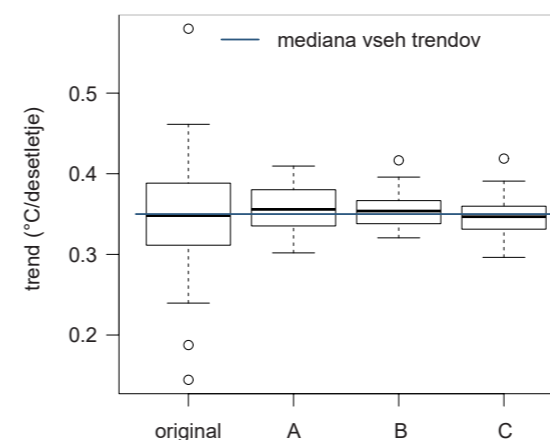
| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 62 | 64 |
| B | 62 | 0 | 76 |
| C | 64 | 76 | 0 |

Še posebej dobro je ujemanje zbirk najnižje temperature, kjer je stopnja relativne različnosti trenda na letnih podatkih le od 20 % do 33 %.

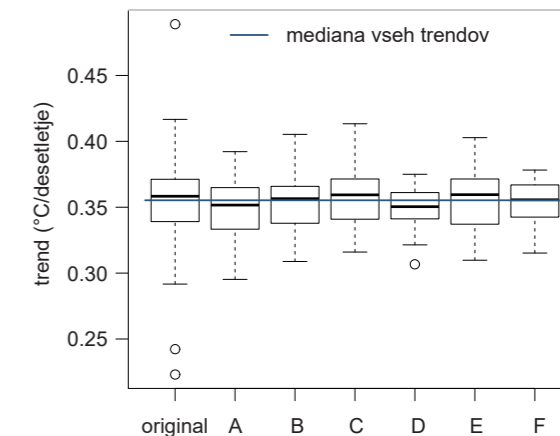
Preglednica 21. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov po trendu letnega povprečja najvišje temperature (v %)

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 39 | 76 |
| B | 39 | 0 | 86 |
| C | 76 | 86 | 0 |

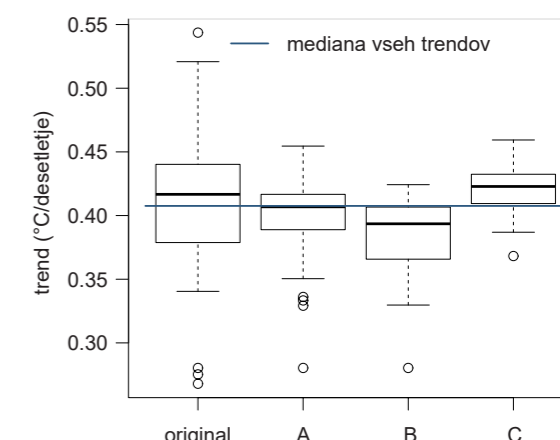
S homogenizacijo se je prostorska pestrost linearnega trenda temperature močno zmanjšala (slike 80–82). Posamezne močno odstopajoče vrednosti smo s homogenizacijo uskladili s prostorsko okolico, deloma pa se je zmanjšal tudi razpon med prvim in tretjim kvartilom. Mediana se je le malo oddaljila od prvotne vrednosti, torej so bile spremembe trendov v pozitivno in negativno smer precej uravnotežene. Podobno kakor pri KPKR za povprečno temperaturo zraka tudi tu izstopa zbirka homogeniziranih podatkov D, in sicer z najbolj enakomernim trendom po postajah. Pri najvišji temperaturi velja poudariti razliko med zbirkama B in C, pri katerih se kvartilna razpona ne prekrivata. To se odraža tudi na prostorski sliki trenda, kjer lahko opazimo precejšnjo razliko v severozahodni Sloveniji (slika 82).

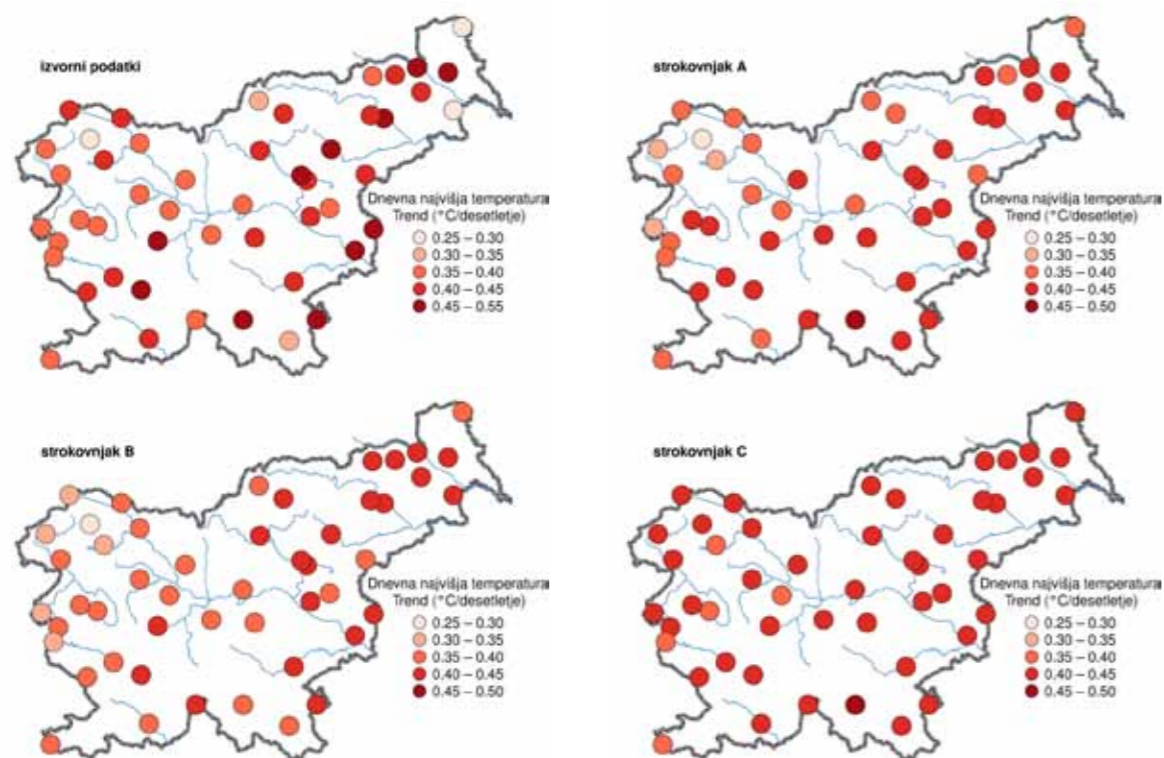


Slika 81. Razpon linearnega trenda za najnižjo (levo) in najvišjo (desno) temperaturo po postajah za različne strokovnjake



Slika 80. Razpon linearnega trenda za povprečno temperaturo po postajah za različne strokovnjake. Grafikon kvantilov prikazuje kvartilni razpon – od prvega do tretjega kvartila (pravokotnik), mediano (odebeljena črta v pravokotniku), 1,5-kratnik kvartilnega razpona stran od glavnine vrednosti (daljice iz pravokotnikov) in osamelce (krogci).





Slika 82. Trend pred homogenizacijo najvišje temperature in po njej za tri zbirke homogeniziranih nizov

Višina padavin

KPKR med zbirkami homogeniziranih in izvornih podatkov znaša okoli 3 % vrednosti dolgoletnega povprečja, med homogeniziranimi pa okoli 2 % vrednosti dolgoletnega povprečja. Stopnja relativne različnosti je od 53 % do 73 % (preglednica 22).

Preglednica 22. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov višine padavin za letne podatke (v %)

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 72 | 73 |
| B | 72 | 0 | 53 |
| C | 73 | 53 | 0 |

Nekoliko manjša je stopnja relativne različnosti pri trendu pod 50 % (preglednica 23). Podobno kakor pri temperaturi so torej zbirke homogeniziranih podatkov medsebojno mnogo bolj skladne kot z zbirko izvornih podatkov.

Preglednica 23. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov po trendu letne višine padavin (v %)

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 46 | 45 |
| B | 46 | 0 | 39 |
| C | 45 | 39 | 0 |

Višina novega snega in snežne odeje

Pri višini novega snega in snežne odeje so relativne razlike med zbirkami večje kakor pri višini padavin. Pri snežni odeji znaša KPKR okoli 8 % in pri novem snegu okoli 4 % vrednosti dolgoletnega povprečja. Zbirke homogeniziranih podatkov so medsebojno približno enako skladne kakor z

Preglednica 24. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov višine snežne odeje za letne podatke (v %). V izračun so zajete le tiste postaje, kjer je izvorna vrednost letne povprečne višine snega vsaj 0,2 cm.

| | A | B | C |
|---|-----|----|-----|
| A | 0 | 71 | 107 |
| B | 71 | 0 | 94 |
| C | 107 | 94 | 0 |

Preglednica 26. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov po trendu letnega povprečja višine snežne odeje (v %). V izračun so zajete le tiste postaje, kjer je dolgoletno povprečje izvorne vrednosti višine snežne odeje vsaj 0,2 cm.

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 61 | 94 |
| B | 61 | 0 | 88 |
| C | 94 | 88 | 0 |

Trajanje sončnega obsevanja

Skladnost podatkovnih zbirk trajanja sončnega obsevanja je mnogo boljša kakor pri višini padavin in snega. KPKR med zbirkami homogeniziranih podatkov in izvornih podatkov je približno 1,5 % vrednosti dolgoletnega povprečja.

Preglednica 28. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov trajanja sončnega obsevanja za letne podatke (v %)

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 54 | 51 |
| B | 54 | 0 | 52 |
| C | 51 | 52 | 0 |

izvorno zbirko podatkov, saj je stopnja relativne različnosti pri snežni odeji med 71 % in 107 % in pri novem snegu med 83 % in 98 % (preglednici 24 in 25). Stopnja relativne različnosti trenda med zbirkami homogeniziranih podatkov je podobna kot pri letnih vrednostih obeh snežnih spremenljivk (preglednici 26 in 27).

Preglednica 25. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov višine novega snega za letne podatke (v %). V izračun so zajete le tiste postaje, kjer je dolgoletno povprečje izvorne vrednosti letne višine novega snega vsaj 20 cm.

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 95 | 83 |
| B | 95 | 0 | 98 |
| C | 83 | 98 | 0 |

Preglednica 27. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov po trendu letne višine novega snega (v %). V izračun so zajete le tiste postaje in leta, kjer je dolgoletno povprečje izvorne vrednosti letne višine novega snega vsaj 20 cm.

| | A | B | C |
|---|-----|-----|-----|
| A | 0 | 106 | 71 |
| B | 106 | 0 | 104 |
| C | 71 | 104 | 0 |

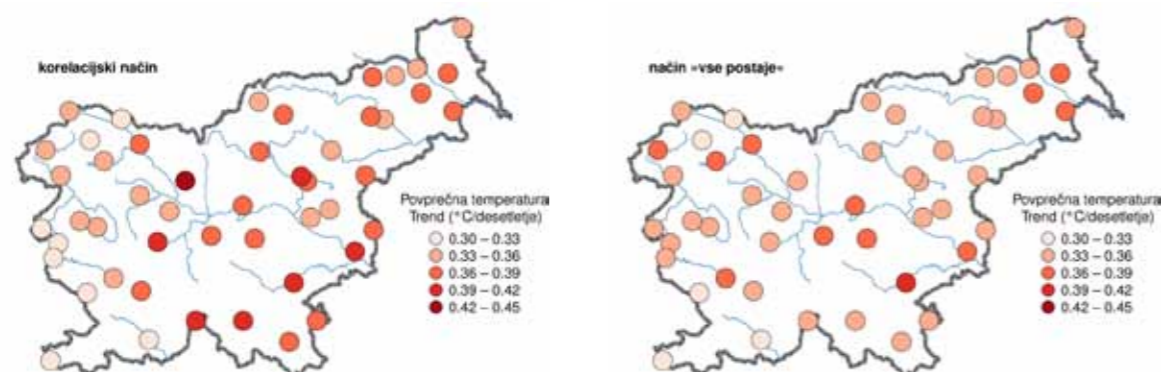
Stopnja relativne različnosti med zbirkami homogeniziranih podatkov znaša malo nad 50 % (preglednica 28). Nekoliko boljši rezultat za stopnjo različnosti dobimo pri analizi trenda (preglednica 29). Skladnost homogenizacijskih popravkov trajanja sončnega obsevanja je tako na približno enaki ravni kot pri temperaturi zraka.

Preglednica 29. Stopnja relativne različnosti zbirk homogeniziranih podatkov po trendu letnega trajanja sončnega obsevanja (v %)

| | A | B | C |
|---|----|----|----|
| A | 0 | 42 | 47 |
| B | 42 | 0 | 33 |
| C | 47 | 22 | 0 |

Ocena vpliva izbire primerjalnih postaj na izračunane trende

Med najpomembnejše korake v postopku homogenizacije sodi izbira primerjalnih postaj. Programsko orodje HOMER omogoča tri načine izbire primerjalnih postaj: geografski, korelacijski in vse postaje. Pri geografskem načinu določimo mejno oddaljenost primerjalne postaje od kontrolirane postaje, na primer 30 km. Pri korelacijskem načinu je merilo izbire korelacijski koeficient med nizoma kontrolirane in primerjalne postaje. Mejna vrednost, na primer 0,95, določa nabor primerjalnih postaj. Da v vseh primerih zagotovimo zadostno število primerjalnih postaj,



Slika 83. Linearni trend za letno povprečno temperaturo zraka (1961–2011) za tri različne načine izbire primerjalnih postaj pri enakem naboru prelomov.

moramo pri opisanih dveh načinih določiti še najmanjše število primerjalnih postaj. Pri tretjem načinu so vse postaje, razen kontrolirane, v vlogi primerjalne postaje.

Način izbire primerjalnih postaj vpliva tako na zaznavanje prelomov kakor tudi popravljanje časovnih nizov. Vpliv je močno odvisen tudi od obravnavane podnebne spremenljivke.

Za grob vtis, kako velik je lahko vpliv izbire primerjalnih postaj na izračun popravkov in posredno na izračunani trend zaradi različne korekcije, si oglejmo primerjavo rezultatov za povprečno temperaturo zraka. Opravili smo izračun za vse tri načine izbire primerjalnih postaj in vzeli nabor prelomov, ki jih je določil strokovnjak B po geografskem načinu (slika 83).

Po geografskem in korelacijskem načinu je prostorski gradient v trendu najbolj očiten, pri čemer so pri korelacijskem načinu tudi velike razlike v trendu med bližnjimi postajami (recimo Letališče JP Ljubljana in okolica). Če za primerjalne

postaje vzamemo vse postaje, se prostorska pestrost opazno zmanjša, zlasti upade razlika med vzhodnim in zahodnim delom Slovenije. Pri tem načinu je velikost korekcije za posamezni prelom odvisna od nizov vseh postaj, zato je razumljivo, da trendi postanejo prostorsko precej enotni. Pri geografskem načinu smo izločili neposredni vpliv medsebojno oddaljenih podnebnih območij (na primer Primorske in severovzhodne Slovenije), zato je prostorska pestrost večja. Pri korelacijskem načinu so običajno močnejše povezane postaje v istem višinskem pasu (npr. nižine ali gorati svet), saj je medletna spremenljivost močno vezana na pogostost vremenskih situacij (npr. megleno vreme, jugozahodni tip vremena, burja ipd.). Ker smo želeli ugotoviti regionalne razlike v spremenljivosti in časovnem trendu, je izbira geografskega ali korelacijskega načina primernejša od izbire načina »vse postaje«.

Zanesljivost homogeniziranih podatkov in izračunanih trendov

Temperatura zraka

Pri zaključkih na podlagi statistične obdelave rezultatov homogenizacije moramo biti pozorni na različne vire negotovosti, saj lahko izračunane dolgoročne spremembe podnebja deloma ali v celoti izvirajo iz različnih napak in vremenske spremenljivosti.

Na napako izmerjene vrednosti temperature zraka vpliva več dejavnikov. Najpomembnejši je vrsta zaklona, ki štiti termometer pred padavinami, sončnim (kratkovalovnim) in zemeljskim (dolgovalovnim) sevanjem. Pomen teh zunanjih dejavnikov je bil upoštevan že v drugi polovici 19. stoletja, ko je britanski inženir Thomas Stevenson razvil zaklon, ki se z manjšimi popravki še danes uporablja v številnih mrežah meteoroloških postaj po svetu. Temu zaklonu pravimo angleška ali meteorološka hišica. Primerjalne meritve so pokazale, da je napaka meritve trenutne temperature zraka znotraj takega zaklona večinoma manjša od 1 °C, napaka dnevne ali mesečne povprečne temperature zraka pa še manjša (Barnett, Hatton & Jones, 1988; Brandma & Meulen, 2008; Meulen & Brandsma, 2008; Lacombe in sod., 2011). Meritve najvišje oziroma najnižje temperature zraka zahtevajo večjo pazljivost pri njihovi obravnavi. V sončnem in mirnem vremenu se hišica nekoliko pregreva, v jasnih in mirnih nočeh pa se ohladi pod temperaturo okoliškega zraka. Hkrati velika toplotna vztrajnost hišice in zmanjšana prevetrenost blažita temperaturna nihanja. Temperatura zraka na višini 2 metra lahko tudi nad homogenimi, recimo travnatimi tlemi, niha za velikostni red 1 °C v nekaj minutah ali na razdalji nekaj metrov oziroma nekaj deset metrov. Pri razlagi meritev je tako pomembno upoštevati celotno odzivnost zaklona in termometra na vremenske spremembe v okolici.

Rezultati homogenizacije trajanja sončnega obsevanja so za obdobje 1961–2011 pokazali letno povečanje števila sončnih ur za okoli 10 %. Ta trend v sončnem obsevanju je premajhen, da bi bistveno vplival na trend mesečnih in letnih vrednosti povprečne, najnižje in najvišje temperature. V sončnem vremenu se notranost meteorološke hišice nekoliko »pregreje«, za okoli 1 °C, glede na okoliški zunanji zrak. Povečano trajanje sončnega obsevanja je po naši oceni pripomoglo k

dodatnemu izmerjenemu dvigu povprečja dnevne najvišje temperature za največ nekaj stotink stopinje Celzija v omenjenem 51-letnem obdobju. Učinek podaljšanega sončnega obsevanja je mnogo manjši pri povprečni temperaturi, pri najnižji temperaturi pa ga pravzaprav ni.

V obravnavanem obdobju meritev so se termometri večinoma menjali vsakih nekaj let. Spreminjala se je znamka termometrov, medtem ko je vrsta termometrov (tekočinski termometri) ostala enaka. Ker so bili termometri kontrolirani z referenčnimi instrumenti, ocenjujemo, da znaša njihova pristranskost na državni ravni v celotnem obdobju meritev manj kot 0,1 °C. Tako spremembe termometrov ne vplivajo znatno na končni rezultat izračunanih trendov po homogenizaciji.

Pomemben vir sistematične napake pri izračunu dnevne povprečne temperature je v skrajnih primerih tudi prezgodnje ali prepozno odčitavanje termometrov. V času jutranjega termina se zrak spomladi in poleti običajno hitro ogreva, v času večernega termina pa čez vse leto zmerno hitro ohlaja. Običajno opazovalci beležijo temperaturo ob časih, ki so kvečjemu nekaj minut stran od predpisanih terminov, in v tem primeru je sistematična napaka na mesečni in letni ravni manjša od 0,1 °C. Na nekaterih postajah pa prihaja tudi do polurnega ali še večjega odstopanja in s tem do sistematičnega odstopanja velikosti nekaj desetink stopinje Celzija pri jutranjem ali večernem terminu glede na predpisani termin.

V postopku poglobljene kontrole meritev smo pred homogenizacijo skupno popravili okoli tisoč vrednosti vsake od merjenih spremenljivk, treh terminskih in dveh dnevni ekstremnih temperatur. Približno do leta 1980 je bilo popravkov nekajkrat več kakor po letu 1995, saj se je z razvojem računalniške opreme in metod kontrole že sproti, takoj po vnosu meritev v zbirko podatkov, odkril večji delež napak. Delež popravljenih vrednosti je v vseh letih in za vse homogenizirane spremenljivke manjši od 1 %, v številnih letih le okoli 0,1 %. Povprečna velikost popravka v posameznem letu in pri posamezni spremenljivki je večinoma manjša od 0,3 °C. Popravki imajo torej na dolgoletni trend zanemarljiv vpliv, so pa včasih ključni pri analizi vremenskega stanja izbranega dneva ali ekstremnih vrednosti.

Povprečna temperatura zraka, izračunana na podlagi le treh dnevni izmerkov, je na mesečni do letni ravni zelo blizu dejanskemu povprečju temperature zraka, kot bi jo izračunali na podlagi pogostih in neprestanih meritev, na primer vsako

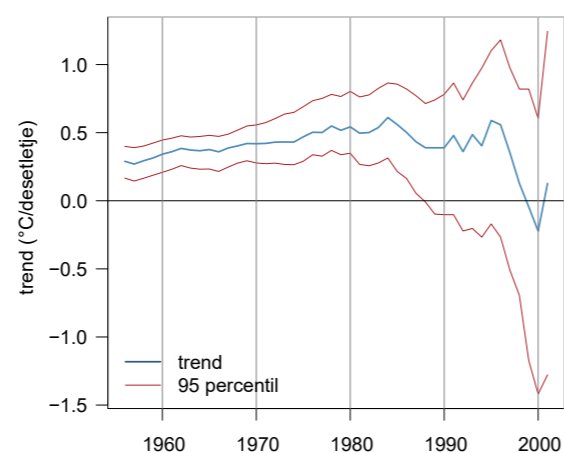
minuto. Primerjalna analiza na podlagi meritev samodejnih meteoroloških postaj v obdobju 1994–2011 kaže, da je na letni ravni razlika med obema statistikama večinoma manjša od 0,2 °C in se na posameznem merilnem mestu iz leta v leto spreminja le za nekaj stotink stopinje Celzija. Povprečni letni hod razlike ima na večini postaj vrh v decembru, januarju in juniju ter minimum v marcu, aprilu in septembru. V posameznem mesecu je pristranskost redkokdaj in redkokje večja od 0,3 °C. Standardni odklon razlik posameznega meseca je okoli 0,1 °C in ne kaže splošne odvisnosti od letnega časa. Razlika med povprečno temperaturo, izračunano iz meritev ob treh podnebnih terminih, in dejansko povprečno temperaturo se na mesečni ravni preslika v negotovost trenda obdobja 1961–2011 okoli 0,2 °C na stoletje.

Letne in sezonske vrednosti smo računali na sicer dokaj običajen, enostaven, a ne popolnoma točen način. V povprečenju mesečnih vrednosti smo privzeli enako utež za vse mesece, ne glede na njihovo dolžino. Strogo matematično bi morali pri izračunu aritmetične sredine mesečne vrednosti utežiti s številom dni v posameznem mesecu. Primerjava med obema metodama kaže majhne razlike, ki pa so zlasti pri izračunu časovnega trenda temperature zanemarljive. Le za posamezno zimo je včasih razlika med obema pristopoma večja od 0,1 °C, a običajno je v vseh letnih časih in celotnem letu ta razlika do nekaj stotink stopinje Celzija.

K negotovosti trendov, izračunanih na homogeniziranih nizih, prispevajo tudi neodkrite in neodpravljene nehomogenosti v merjenih nizih in popravki, ki so obremenjeni z manjšo ali večjo negotovostjo. Testiranje homogenizacijskih metod v projektu COST ES0601 na temperaturnih nizih z umetno vstavljenimi prelomi in trendi je pokazalo, da se kakovost nizov po homogenizaciji bistveno izboljša (Venema in sod., 2012). Ker se izračunani trend na podlagi interpoliranih nehomogeniziranih vrednosti in homogeniziranih vrednosti na državni ravni ne razlikuje niti za 0,1 °C/stoletje, menimo, da je ta dejavnik pomemben le pri posameznih mesečnih ali letnih vrednostih v posameznem merilnem nizu.

Ocenjujemo, da vsi zgoraj omenjeni viri napak skupaj pri izračunu povprečne temperature zraka prispevajo k negotovosti trenda manj od 0,5 °C/stoletje, saj so posamezne vrste napak med seboj bolj ali manj neodvisne. Bistveno večji vir negotovosti izračunanega trenda temperature zraka v obdobju 1961–2011 je

statistična negotovost izračunanega trenda zaradi vremenske spremenljivosti. Zaradi tega lahko iz meritev le deloma izluščimo podnebni signal, ki nas glede podnebnih sprememb najbolj zanima. Čim krajše je obravnavano obdobje, tem manjša je zanesljivost izračunanega časovnega trenda (slika 84). Pri hitrosti sprememb, ki smo jim priča v zadnjih desetletjih, je okoli 20 let podatkov ali manj premalo za statistično značilno oceno trenda. Za daljše obdobje podatkov se sicer negotovost izračunanega linearnega trenda zmanjša, a lahko dejanski podnebni signal že močno odstopa od linearnega poteka. Po naši oceni je linearni trend na obravnavanih podatkovnih nizih, daljših od 40 let, precej stabilen.



Slika 84. Linearni trend letne povprečne temperature zraka v Sloveniji do leta 2011 v odvisnosti od začetnega leta. Modra krivulja prikazuje srednjo vrednost trenda, rdeči črti pa njegov 95-odstotni interval zaupanja.

Višina padavin

Pri padavinah so končni podatki za osrednji del obravnavanega obdobja nekoliko manj zanesljivi, saj so v tem času številne višje ležeče postaje za merjenje višine padavin uporabljale višinski dežemer, ki ima presek 500 cm², kar je precej več od klasičnega dežemera z 200 cm² preseka. Vpliv vetra na izmerjeno višino padavin, zlasti pri sneženju, je različno močan pri obeh vrstah dežemerov, a primerjalni podatki žal niso dosegljivi. Opisani problem je verjetno bolj izražen pozimi in manj poleti, kar pomeni, da popravki na letni ravni verjetno ne odražajo najboljše dejanskih mesečnih razlik. Pri izračunu linearnega trenda v celotnem obravnavanem obdobju je problem manj pereč, saj na naklon regresijske premice najbolj vplivajo vrednosti v začetnih in končnih letih. Razmeroma pogost problem pri obdelavi višine padavin je počasno spreminjanje okolice (rast dreves, urbanizacija), ki vpliva na vetrne razmere ob dežemeru, kar je

pomembno zlasti ob sneženju z vetrom in ob dežju z močnim vetrom.

Drugi dejavniki pri merjenju višine padavin so bistveno manj pomembni pri izračunu dolgoletnega trenda. Med te dejavnike sodijo natančnost opazovalca pri pretakanju padavin v merilni valj in odčitavanju višine padavin, vestnost opazovalca glede časa meritve in pri meritvah padavin lepega vremena (rosa in slana), merilna napaka valja, temperaturno spreminjanje gostote vode, obrabljena krona (rob) dežemera idr.

Višina novega snega in snežne odeje

Pri merjenju višine snega prihaja do slučajnih in sistematičnih napak. Za statistiko daljšega obdobja so pomembnejše slednje. K njim uvrščamo nepravilno odčitavanje vrednosti na snegomeru, napačna postavitve stalnega snegomera (ničla se ne ujema s površjem), nepravilna raba deščice za novi sneg ali neprimerna deščica za novi sneg idr. Podobno kakor pri višini padavin lahko na dolgoletni trend vrednosti na posamezni postaji pomembno vpliva počasno spreminjanje okolice postaje.

Prostorska primerjava je pokazala, da posamezne homogenizirane ali interpolirane mesečne vrednosti višine novega snega in snežne odeje močno odstopajo od okoliških postaj ali strokovno ocenjenih vrednosti na podlagi višine padavin in temperature zraka. Do tega pride zaradi velike prostorske spremenljivosti (zlasti po nadmorski višini) in časovne spremenljivosti, ki je še večja kot pri višini padavin. Odstopanja med okoliškimi postajami so deloma posledica tudi ne najbolj ustrezne metode homogenizacije. V Homerju so nastavili računanje z razmerji, popravki pa so bili izvedeni na letni ravni. Iz podatkov izhaja, da so že v povprečju med posameznimi meseci ogromne razlike, poleg tega so popravki s korekcijskimi faktorji (na primer 20 % povečanje ali zmanjšanje izmerjene mesečne vrednosti) obremenjeni s precejšnjo negotovostjo. Posebej problematični so manjkajoči podatki na najvišje ležečih postajah na nekem območju, saj namesto interpolacije v tem primeru izvajamo ekstrapolacijo, ki je lahko zelo nezanesljiva. Zato je potrebna previdnost pri uporabi posameznih homogeniziranih in interpoliranih podatkov, predvsem pa ekstremnih mesečnih vrednosti.

Trajanje sončnega obsevanja

Podatki o trajanju sončnega obsevanja so obremenjeni s številnimi napakami, ki niso le slučajne in posamične, temveč se deloma nanašajo na več postaj ali kar celo mrežo hkrati. Na posameznih postajah se je zaradi selitev spreminjalo obzorje in s tem izpostavljenost heliografa, kar smo deloma popravili z redukcijo vseh časovnih nizov na matematično obzorje. V preteklih desetletjih je prišlo do številnih menjav tipa oziroma znamke heliografa in tipa trakov. Poleg tega se je sistematično spreminjal način branja trakov, ki je močno odvisen od posameznika. Ponovna digitalizacija trakov iz Rateč in Ljubljane za dve leti je pokazala, da je negotovost digitalizacije velikostnega reda 10 %, kar je primerljivo z medletno spremenljivostjo. To pomeni, da je tudi izračunani dolgoletni trend precej manj zanesljiv, kot bi sklepali samo iz statistične analize homogeniziranih nizov.

Referenčna evapotranspiracija

Referenčna evapotranspiracija je edina od obravnavanih spremenljivk, ki je neposredno ne merimo. Slovenska meteorološka služba za izračun referenčne evapotranspiracije uporablja Penman-Monteithovo metodo, ki jo je kot standard priporočila tudi Organizacija Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (Allen, 1998). Ta metoda upošteva odvisnost referenčne evapotranspiracije od temperature, vlage, hitrosti vetra in energije sončnega obsevanja, izračunava pa se za referenčno površino oziroma rastje. Privzeta referenčna površina je aktivno rastoča trava, ki popolnoma prekriva tla, je zadostno preskrbljena z vodo in ima višino 0,12 m.

Ker je vrednost referenčne evapotranspiracije odvisna od meritev štirih različnih spremenljivk, je napaka izračunane evapotranspiracije toliko večja, saj se napake posameznih vhodnih spremenljivk seštevajo. Poleg tega je prostorska gostota meritev hitrosti vetra in energije sončnega obsevanja zelo majhna, zato smo na nekaterih postajah z meritvami temperature in vlage v izračunu referenčne evapotranspiracije upoštevali ustrezno popravljene vrednosti vetra in energije sončnega obsevanja z referenčnih postaj. Na nekaterih postajah smo energijo sončnega obsevanja izračunali iz trajanja sončnega obsevanja po Angströmovi metodi (Angström, 1924). Vse to še dodatno vpliva na napako izračunanih vrednosti referenčne evapotranspiracije in hkrati tudi časovno

homogenost ter prostorsko primerljivost njenih nizov.

Izračunana referenčna evapotranspiracija je najbolj občutljiva za hitrost vetra. Prav meritve hitrosti vetra so obremenjene z največjo negotovostjo, predvsem zaradi njihove prostorske reprezentativnosti. Hkrati je zelo raznolika tudi zgodovina meritev vetra. Veter smo na slovenskih meteoroloških postajah začeli meriti postopno šele konec 80. let prejšnjega stoletja. Prvotno z ročnimi analognimi anemometri, le trikrat dnevno ob klimatoloških terminih, kasneje, sredi 90. let, pa so bile na nekaterih postajah vzpostavljene meritve vetra na samodejnih postajah z elektronskimi anemometri. Samodejne postaje so sporočale 10-minutne in polurne podatke o vetru. Od vzpostavitve meteoroloških meritev do sredine 80. let so hitrost in smer vetra meteorološki opazovalci ocenili na podlagi njegovih učinkov po Beaufortovi lestvici. Ti podatki o vetru so bili obremenjeni z veliko subjektivno napako (tudi več kot 100 %), razredov hitrosti je bilo glede na sedanje podatke zelo malo, na celodnevne podatke o vetru smo sklepali iz treh opazovanj dnevno in bili so prostorsko povsem neprimerljivi, vsaka menjava opazovalca pa je pomenila nehomogenost v časovnem nizu. Pred izračunom evapotranspiracije smo na podlagi prostorske primerjave in analize prekrivajočih nizov vse podatke o vetru homogenizirali in prilagodili na zadnje obdobje s samodejnimi meritvami vetra. Kljub temu so v nizih ostale napake in nehomogenosti, ki so vplivale na nehomogenost nizov referenčne evapotranspiracije in smo jih odstranili v poznejšem postopku homogenizacije referenčne evapotranspiracije.

Poleg hitrosti vetra je v izračunu referenčne evapotranspiracije dokaj nezanesljiva tudi relativna vlažnost zraka. V obravnavanem obdobju so bile pogoste napake ali sistematično slabe meritve z načeloma točnim psihrometrom, saj ravnanje s tem inštrumentom ni enostavno. Preprostejše meritve s higrometrom pa so obremenjene z večjo merilno napako zaradi sestave inštrumenta. Tako je napaka pet odstotnih točk ali več pri relativni vlažnosti zraka dokaj pogosta, tudi napaka za deset odstotnih točk ni zelo redka.

Analiza občutljivosti izračunane referenčne evapotranspiracije na posamezne vhodne spremenljivke je pokazala, da glede na negotovost vhodnih spremenljivk lahko pričakujemo napake do 10 %. To je enakega reda velikosti kot medletna spremenljivost referenčne evapotranspiracije, kar pomeni, da je izračunani dolgoletni trend manj zanesljiv, kot bi sklepali samo iz statistične analize homogeniziranih nizov.

Zračni tlak

Kontrola in homogenizacija časovnih nizov zračnega tlaka sta enostavni v primerjavi z drugimi podnebnimi spremenljivkami. Polje zračnega tlaka se v prostoru praviloma le počasi spreminja; celo v nekaj sto kilometrov oddaljenih krajih so nihanja na mesečni ali daljši časovni ravni pogosto podobna. Znotraj Slovenije so razdalje še manjše, zato je korelacijski koeficient nizov mesečnih vrednosti med postajami zelo velik, pogosto nad 0,98. To omogoča zanesljivo odkrivanje pomembnih prelomov v časovnih nizih, tudi takšnih, ki so veliki le nekaj desetink hektopaskala. Kljub majhnemu številu postaj zaradi dobrih lastnosti merilne naprave (barometra) in značilnosti zračnega tlaka v času in prostoru ocenjujemo, da je negotovost izračunanega 51-letnega linearne trenda na večini homogeniziranih nizov nekaj stotink hPa na desetletje. Nekoliko večja negotovost je le na postajah, ki se po nadmorski višini močno razlikujejo od okoliških postaj (Kredarica, Villacher Alpe/Dobrač in Lisca).

VIRI IN LITERATURA

Abbott, P.F. (1986). Guidelines on the quality control of surface climatological data, WMO/TD-No. 111. Ženeva, Švica: WMO

Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., & Wieringa, J. (2003). WMO Guidelines on climate metadata and homogenization, WCDMP 53. Ženeva, Švica: WMO

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rim, Italija: Food and Agriculture Organization of the United Nations

Angström, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 50, 121–125. doi:10.1002/qj.49705021008

Barnett, A., Hatton, D. B., & Jones, D. W. (1998). Recent Changes in Thermometer Screen Designs and their Impact. IOM 66 WMO/TD - No. 871. Ženeva, Švica: WMO

Brandsma, T., & Meulen, van der J. P. (2008). Thermometer screen intercomparison in De Bilt (the Netherlands), part II: Description and modeling of mean temperature differences and extremes. International Journal of Climatology, 28(3), 389–400. doi:10.1002/joc.1524

Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology, 58, 11–27.

Caussinus, H., & Mestre, O. 1996. New mathematical tools and methodologies for relative homogeneity testing. V Szalai, S. (ur.), Proceedings of the First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data (str. 63–82). Budimpešta, Madžarska: Hungarian Meteorological Service

Cegnar, T., Zupančič, B., & Dolinar, M. (2004). Klimatologija v zadnjih 35. letih. V Cegnar, T., Rakovec, J., Roškar, J., Petkovšek, Z., Hočvar, A. (ur.), Pol stoletja Slovenskega meteorološkega društva. Ljubljana: Slovensko meteorološko društvo

Conrad, V. (1925). Homogenitätsbestimmung meteorologischer Beobachtungsreihen. Meteorologische Zeitschrift, 42, 482–485.

Craddock, J. M. (1979). Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes. Weather, 34, 332–346.

Dolinar, M., Nadbath, M., Vičar, Z., Vertačnik, G., & Pavčič, B. (2008). Podnebni podatki v Sloveniji skozi zgodovino. Ljubljana: Agencija Republike Slovenije za okolje

Domonkos, P., Venema, V., Auer, I., Mestre, O., & Brunetti, M. (2012). The historical pathway towards more accurate homogenisation. Advances in Science and Research, 8, 45–52. doi:10.5194/asr-8-45-2012

Easterling, D. R., & Peterson, T. C. (1995). A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series. International Journal of Climatology, 15, 369–377.

Gams, I., & Krevs, M. (1990). Ali nam grozi poslabšanje podnebja? Ujma 4, 147–155.

Gavazzi, A. (1925). O meteoroloških postajah v Sloveniji. Geografski vestnik 1, 55–61.

González-Hidalgo, J. C., de Luis Arrillaga, M., Stepanek, P., & Lanjeri, S. (2008). Homogenization and validity controls for temperature trend estimates over Italy. V Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, WCDMP 71, WMO-TD 1493 (str. 55–74). Budimpešta, Madžarska: WMO

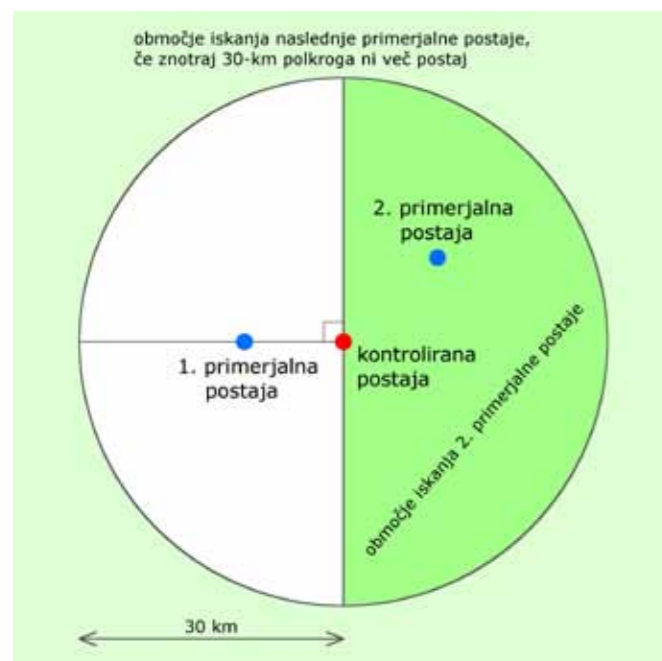
- Hartmann, D. L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y., ... Zhai, P. M. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. V Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... Midgley, P. M. (ur.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Združeno kraljestvo, in New York, NY, ZDA: Cambridge University Press
- Hawkins, D. M. (1972). On the choice of segments in piecewise approximation. *Journal of the Institute of Mathematics and its Applications*, 9, 250–256.
- HMZS (1991). *Klimatografija Slovenije. Sončno obsevanje na območju R Slovenije v obdobju 1961–1990*, 3. zvezek. Ljubljana: Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije
- Kajfež-Bogataj, L., Sušnik, A., Črepinšek, Z., Bergant, K., Kurnik, B., Matajč, I., ... Roškar, J. (2003). Ranljivost slovenskega kmetijstva in gozdarstva na podnebno spremenljivost in ocena predvidenega vpliva. Ljubljana: Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje
- Kastelec, D. (1998). Navodila za obdelavo meritev sončnega sevanja. Ljubljana: Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, 39 str.
- Kreil, K., (1854) (Hrsg). *Mehrjährige Beobachtungen in Wien vom Jahre 1775 bis 1850. V Jahrbücher der k. k. Central-anstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus* (1. zvezek, str. 35–74).
- Lacombe, M., Bousri, D., Leroy, M., & Mezred, M. (2011). WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments Ghardaia, Algeria, November 2008–October 2009. IOM 106 WMO/TD - No. 1579. Ženeva, Švica: WMO
- Lanzante, J. (1996). Resistant, robust and nonparametric techniques for the analysis of climate data: Theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*, 16, 1197–1226.
- Mekinda-Majaron, T., & Cegnar, T. (1995). *Klimatografija Slovenije. Temperatura zraka : obdobje 1961–1990*. Ljubljana: Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., ... Stepanek, P. (2013). HOMER: a homogenization software – methods and applications. *Időjárás*, 117(1), 47–67
- Meulen, van der J. P., & Brandsma, T. (2008). Thermometer screen intercomparison in De Bilt (the Netherlands), part I: Understanding the weather-dependent temperature differences, *International Journal of Climatology*, 28(3), 371–387. doi:10.1002/joc.1531
- MOPE (2004). *Klimatografija Slovenije. Trajanje sončnega obsevanja 1971–2012* (ured. Ovsenik-Jeglič, T.). Ljubljana, Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje
- Muri, B. (2010). *Projekcije podnebnih sprememb na območju Slovenije z modelom RegCM3: diplomski naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko
- Nadbath, M., Pavčič, B., & Vertačnik, G. (2008). Two cases of long-term climate data reconstruction. Poster na zaključni konferenci projekta Foralps v Trentu (Italija), 7. marec 2008. Ljubljana: Agencija Republike Slovenije za okolje
- Ovsenik-Jeglič, T. (ur.). (2000). *Klimatografija Slovenije. Število dni s snežno odejo 1961–1999*. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje
- Pristov, J. (1977). Kontrola meteoroloških podatkov v zvezi z avtomatsko obdelavo podatkov. *Razprave*, 21, simpozij: Avtomatizacija v meteorologiji, 81–85.
- Reya, O. (1937). Klima ljubljanske okolice. *Kronika slovenskih mest*, 4(2), 118–119.
- Szentimrey, T. (1996). Statistical procedure for joint homogenization of climatic time series. V Szalai, S. (ur.), *Proceedings of the First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data* (str. 47–62). Budimpešta, Madžarska: Hungarian Meteorological Service
- Štěpánek, P., & Zahradníček, P. (2008). Quantifying efficiency of homogenisation methods. V *Proceedings of the Sixth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, WCDMP 76, WMO-TD 1576* (str. 8–19). Budimpešta, Madžarska: WMO
- Trontelj, M. (1997). *Kronika izrednih vremenskih dogodkov XX. stoletja*. Ljubljana: Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije.
- Venema, V., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J. A., Domonkos, P., ... Brandsma, T. (2012). Benchmarking monthly homogenization algorithms. *Climate of the Past*, 8, 89–115. doi:10.5194/cp-8-89-2012
- Vertačnik, G., Dolinar, M., Bertalanič, R., Klančar, M., Dvoršek, D., & Nadbath, M. 2015. Ensemble homogenization of Slovenian monthly air temperature series. *International Journal of Climatology*, 35(13), 4015–4026. doi:10.1002/joc.4265
- Vičar, Z. (2004). Meteorološki podatki in arhiv. V Cegnar, T., Rakovec, J., Roškar, J., Petkovšek, Z., Hočvar, A. (ur.), *Pol stoletja Slovenskega meteorološkega društva*. Ljubljana: Slovensko meteorološko društvo
- Wan, H., Wang, X. L., & Swail, W. R. (2008). The RHTest package and future development. V *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, WCDMP 71, WMO-TD 1493* (str. 165–188). Budimpešta, Madžarska: WMO
- Wilcox, R. R. (2010). *Fundamentals of Modern Statistical Methods: Substantially Improving Power and Accuracy*, 2nd edition. New York: Springer
- Williams, C. N. jr., Menne, M. J., & Thorne, P. W. (2012). Benchmarking the performance of pairwise homogenization of surface temperatures in the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117, D05116. doi:10.1029/2011JD016761
- WMO. (2003). *Fourteenth World Meteorological Congress, Geneva, 5–24 May 2003, abridged final report with resolutions*. Ženeva, Švica: WMO
- WMO. (2011). *Guide to Climatological Practices*, WMO-No. 100. Ženeva, Švica: WMO
- Zupančič, B. (1995). *Klimatografija Slovenije. Količina padavin : obdobje 1961–1990*. Ljubljana: Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije

PRILOGA

Matematični opis kontrole podatkov v projektu Podnebna spremenljivost Slovenije

Kontrola višine padavin, novega snega in snežne odeje

Postajo, katere časovni niz podatkov kontroliramo, imenujemo kontrolirana postaja. Izmerke (ali izvedeno vrednost izmerkov) te postaje kontroliramo z izmerki do desetih primerjalnih postaj. Računalniški program primerjalne postaje išče po naslednji shemi. Izmed sosednjih postaj z izmerkom na kontrolirani dan poišče tisto, ki je najbližje kontrolirani postaji. Naslednja primerjalna



Slika 85. Shema iskanja primerjalnih postaj v računalniški prostorski kontroli višine padavin

postaja je najbližja od vseh postaj na nasprotni polobli od predhodno izbrane primerjalne postaje (slika 85). Če razdalja med potencialno primerjalno in kontrolirano postajo preseže 30 km (izkustvena vrednost), se pri določanju primerjalnih postaj upošteva le oddaljenost (slika 85). Tako program določi osnovni nabor desetih primerjalnih postaj, ki je dokaj enakomeren po smereh glede na kontrolirano postajo.

Program za kontrolirani mesec v letu izračuna razmerje povprečne višine padavin za vsak par kontrolirana postaja – primerjalna postaja. Časovno okno primerjave sega od 20 let pred do 20 let po kontroliranem mesecu (npr. od februarja 1965 do februarja 2005, če je kontrolirani mesec februar 1985), pri čemer kontrolirani mesec v izračun ni zajet.

Izmerke primerjalnih postaj normaliziramo na raven kontrolirane postaje, tako da je podnebno povprečje na vseh postajah enako. S tem zagotovimo boljšo primerljivost izmerkov. V primerjalnem obdobju mora biti vsaj 150 dni z izmerkom na obeh postajah, sicer kontrolirani postaji pripišemo vrednost podnebnega povprečja na primerjalni postaji. Normalizirane vrednosti nato z dodatkom in kubičnim korenomo preoblikujemo, tako da se njihova porazdelitev približa Gaussovi porazdelitvi:

$$P_P = \sqrt[3]{P_N + \epsilon}$$

kjer je P_N normalizirana in P_p preoblikovana dnevna višina padavin (v enotah $\text{mm}^{1/3}$). Z dodatkom ϵ , ki znaša 1 mm, zmanjšamo razlike pri zelo majhni višini padavin. Med preoblikovanimi vrednostmi na primerjalnih postajah poiščemo mediano in izločimo najbolj izstopajočo vrednost – ta se pri operativni kontroli nemalokrat izkaže za napačno. Iz preostalih devetih preoblikovanih vrednosti izračunamo njihov standardni odklon, σ_p , in

posamezne vrednosti primerjamo z aritmetično sredino $P_{p,povp}$. Če podatek primerjalne postaje zadošča pogoju

$$|P_P - P_{p,povp}| \leq a \sigma_P + b$$

postajo uvrstimo v končni nabor primerjalnih postaj. Vrednosti parametrov a (2) in b ($0,5 \text{ mm}^{1/3}$) smo določili izkustveno. Na ta način iz nadaljnjega izračuna izločimo nenavadno visoke in nizke vrednosti, ki utegnejo biti posledica napačnih meritev. Zaradi prej omenjenega preoblikovanja izmerjenih vrednosti lažje izločimo premajhne kakor previsoke vrednosti. S tem upoštevamo običajno prostorsko porazdelitev padavin s krajevnimi vrhovi padavin, ki so bodisi posledica konvekcije bodisi reliefa (zlasti hribovja). Nasprotni prostorski vzorec – z izrazitimi padavinskimi luknjami v polju enakomernih padavin – je namreč precej redkejši.

Program izračuna dve interpolirani vrednosti, eno z osnovnim in eno s končnim naborom primerjalnih postaj. Obe vrednosti sta uteženi vsoti normalizirane višine padavin s primerjalnih postaj. Uteži so obratno sorazmerne kvadratu razdalje med primerjalno in kontrolirano postajo. Preoblikovano interpolirano vrednost $P_{p,int}$ primerjamo s preoblikovano izmerjeno vrednostjo P_p na kontrolirani postaji. Če P_p ne zadostuje pogoju

$$|P_P - P_{p,int}| \leq c \sigma_P + d$$

ga program označi za sumljivega. Vrednosti parametrov c (2) in d ($0,5 \text{ mm}^{1/3}$) smo določili izkustveno. Dodatno mora za status sumljive vrednosti bodisi interpolirana bodisi izmerjena višina padavin meriti vsaj 5 mm.

Po opravljenih izračunih program v izhodno datoteko s sumljivimi vrednostmi zapiše izmerjene vrednosti na primerjalnih in kontrolirani postaji ter pripadajoče geografske podatke (nadmorska višina, oddaljenost in azimut primerjalne postaje glede na kontrolirano). V prvi vrstici preglednice sta izpisani obe interpolirani vrednosti. Kontrolor se odloči, katera od vrednosti je v obravnavanem primeru ustreznejša.

V repu izhodne datoteke je povzetek s seznamom dni s sumljivo vrednostjo: vrsta odstopanja, sumljiva vrednost, izmerke na morebitni samodejni meteorološki postaji na isti lokaciji, radarsko izmerjena in s postajnimi vrednostmi popravljena višina padavin ter predlog popravka. Predlog popravka je običajno enostavno popravljena

izmerjena vrednost, ki je blizu interpolirani. Pri tem upoštevamo znanje o napakah, ki so pogosto napačno postavljena decimalna vejica, manjkajoča vodilna številka in zamenjava podobnih števk. Kontrolor se lahko v skladu z drugimi podatki, na primer vremensko situacijo in zabeleženimi pojavi na postaji, odloči za drugačen popravek ali sprejme izmerjeno vrednost.

Seznam dni s sumljivimi vrednostmi in pripadajočimi podatki smo prenesli v datoteko programa microsoft excel in tam oblikovali izpis, ki je primeren za ročno kontrolo.

Samodejna kontrola prostorske skladnosti izmerkov temperature zraka

Postopek prostorske kontrole temperature je bil podoben kot pri višini padavin. Z računalniškim programom smo izpisali sumljive vrednosti s pripadajočo statistiko. Najbolj sumljive ali izstopajoče vrednosti smo ročno preverili.

Računalniški izbor sumljivih vrednosti temelji na intenzivni statistični obdelavi izmerkov kontrolirane in primerjalnih postajah v nekajletnem obdobju. Pri tem za vsak kontrolirani izmerk posebej upoštevamo časovno in prostorsko sliko več meteoroloških spremenljivk, poleg temperature lahko tudi relativne vlažnosti, stopnje oblačnosti in višine snežne odeje. Interpolirana ocena vrednosti za kontrolirani izmerk temelji na podatkih vremensko sorodnih dni tako kontroliranih kot primerjalnih postaj. S takšnim izborom primerjalnih podatkov izboljšamo interpolirano oceno v primerjavi z običajnim pristopom, v katerem upoštevamo vse podatke znotraj primerjalnega obdobja, ne meneč se za vremensko situacijo.

Primerjalno obdobje je vezano na dan kontroliranega izmerka. Upoštevamo dneve kontroliranega, predhodnega in naslednjega meseca v letu znotraj časovnega obdobja, ki sega od 10 let pred do 10 let po letu kontroliranega dne. Če na primer kontroliramo 25. maj 1994, sega primerjalno obdobje od aprila 1984 do junija 2004, pri čemer upoštevamo le aprilske, majske in junijske dneve.

Primerjalne postaje določimo podobno kakor pri padavinah (slika 85), le da pri računanju razdalje upoštevamo tudi nadmorsko višino. Zaradi močnega vpliva nadmorske višine na temperaturo je nadmorska višina pri izračunu razdalje močno utežena. Medsebojno razliko v nadmorski višini pomnožimo s 100 in nato izračunamo iz vseh

treh koordinat izračunamo evklidsko razdaljo. Najbližja od postaj je prva na novem seznamu 24 potencialnih primerjalnih postaj. Naslednja postaja je najbližja na nasprotni strani glede na kontrolirano postajo, razen če razdalja med njima presega 50 km (izkustvena vrednost). Postopek nadaljujemo do predpisanega števila potencialnih primerjalnih postaj.

S korelacijskim razmerjem (ang. »correlation ratio«) med kontrolirano spremenljivko na kontrolirani postaji in primerjalno spremenljivko na primerjalni postaji izračunamo stopnjo povezanosti med posameznimi časovnimi nizi. Močnejša ko je povezanost, večjo utež priredimo primerjalnemu nizu pri interpolacijski vrednosti kontrolirane spremenljivke.

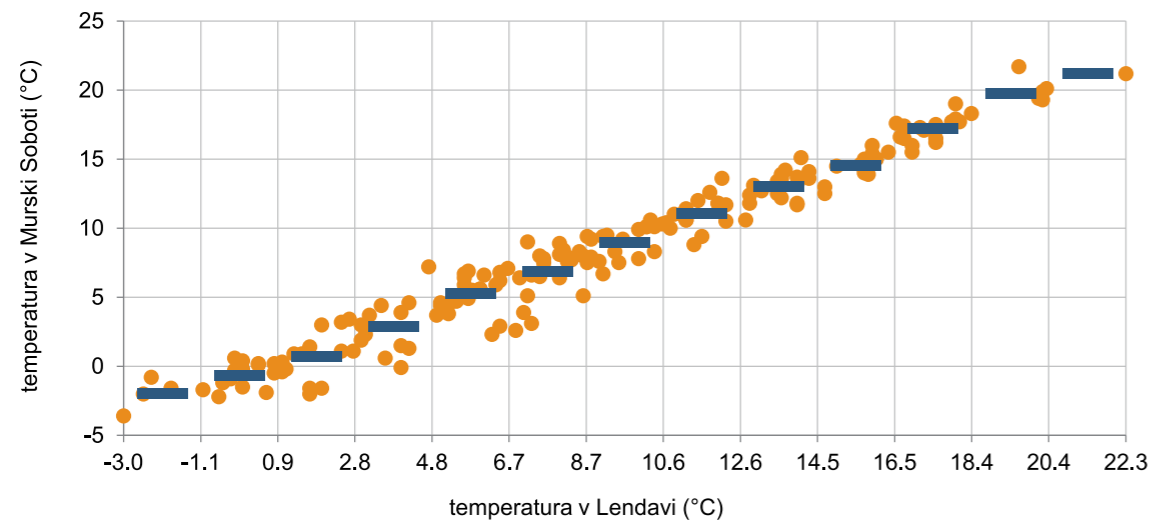
Korelacijsko razmerje izračunamo po naslednjem postopku. Izmerke kontroliranega niza razvrstimo po enako širokih razredih pripadajoče vrednosti primerjalne spremenljivke. Število razredov je kvadratni koren števila razpoložljivih meritev na kontrolirani in primerjalni postaji v primerjalnem obdobju. Povprečno število meritev

v posameznem razredu je tako zelo podobno ali enako številu razredov. Slika 86 prikazuje primer opisane razvrstitve po razredih.

Temelj izračuna korelacijskega razmerja, e , je primerjava razpršenosti aritmetične sredine vrednosti kontroliranega niza znotraj razredov r , in razpršenosti vseh vrednosti:

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{r \in R} n_r (\bar{y}_r - \bar{y})^2}{\sum_{d \in D} (y_d - \bar{y})^2}}$$

kjer je R množica razredov, y_d je posamezni izmerke kontroliranega niza znotraj primerjalnega obdobja D , \bar{y}_r aritmetična sredina n_r izmerkov kontroliranega niza v posameznem razredu in \bar{y} aritmetična sredina vseh izmerkov kontroliranega niza v primerjalnem obdobju. Pri tem je treba dodati, da vrednost e izračunamo za vsako kombinacijo primerjalne postaje in primerjalne spremenljivke (e_{ps}), saj ta kombinacija določa razvrstitev vrednosti kontroliranega niza po razredih.



Slika 86. Razsevni grafikon dnevne najvišje temperature zraka (oranžni krogci) v Murski Soboti v odvisnosti od dnevne najvišje temperature zraka v Lendavi. Zajeti so januarski, februarski in marčevski dnevi v letih 1998 in 1999. Razpon temperature v Lendavi je razdeljen na 13 delov – razredov, modre črtice prikazujejo aritmetično sredino vrednosti v Murski Soboti po posameznih razredih. Prikazani primer je le prikaz metode, saj smo v kontroli temperature zraka namesto dveh uporabili 21 let podatkov po tri mesece.

S korelacijskim razmerjem izračunamo uteži μ_{ps} , ki določajo vpliv primerjalne spremenljivke s , izmerjene na primerjalni postaji p v nadaljnjih izračunih:

$$\mu_{ps} = \frac{e_{ps}}{1 - |e_{ps}|}$$

Zaradi dokaj omejenih računalniških zmogljivosti vrednost uteži za posebej izbrano spremenljivko določimo z izbiro šestih najprimernejših primerjalnih postaj izmed 24 potencialnih primerjalnih postaj.

Nato izvedemo najbolj zapleten del celotnega postopka samodejne kontrole temperature – izračun nekakšne evklidske razdalje med vremenskim vzorcem dveh različnih dni, kontroliranega in primerjalnega (znotraj primerjalnega obdobja). Pri tem upoštevamo podobnost v časovnem in prostorskem vzorcu vremena na izbranih primerjalnih postajah, in sicer z nizi štirih določenih klasifikacijskih spremenljivk. Ena od teh je kontrolirana spremenljivka, ena ali dve drugi temperaturni spremenljivki in še višina snežne odeje ali relativna vlažnost v kombinaciji s stopnjo oblačnosti. Upoštevamo le tiste primerjalne dneve, kjer je na voljo vrednost kontrolirane spremenljivke na kontrolirani postaji.

Najprej izračunamo povprečni razmak $\bar{\delta}$ med vrednostmi kontroliranega dne d_k in primerjalnega

$$\bar{\delta}_{evk}(d) = k \sum_{p \in P_{ref}} \sum_{s \in S_{klas}} \mu_{ps} \left(\beta \left(\frac{y_{ps}(d) - y_{ps}(d_k)}{\sigma_{ps}} \right)^2 - \bar{\delta}(c, d) \right)^2 + (1 - \beta) \left(\frac{y_{ps}(d) - y_{ps}(d_k)}{\sigma_{ps}} \right)^2$$

Prvi od dveh členov v oglatem oklepaju opisuje razpršenost izmerkov okoli prej omenjenega povprečnega razmaka. Drugi člen prikazuje klasično evklidsko razdaljo med izmerki dveh dni.

dne d . Računamo ga po tipu klasifikacijske spremenljivke c (temperatura, relativna vlažnost, oblačnost, višina snežne odeje):

$$\bar{\delta}(c, d) = k \sum_{p \in P} \sum_{s \in S_{klas, c}} \mu_{ps} \frac{y_{ps}(d) - y_{ps}(d_k)}{\sigma_{ps}}$$

kjer se indeks p nanaša na primerjalno postajo in indeks s na klasifikacijsko spremenljivko v množici klasifikacijskih spremenljivk istega tipa ($S_{klas, c}$). Pred dvojno vsoto je normalizacijska utež:

$$k = \frac{1}{\sum_{p \in P} \sum_{s \in S_{klas, c}} \mu_{ps}}$$

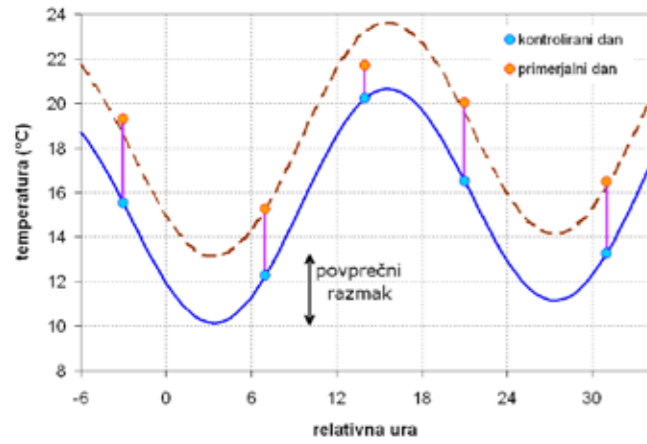
razliko med ustreznimi izmerki obeh dni pa normaliziramo s standardnim odklonom vrednosti pripadajočega niza v primerjalnem obdobju (σ_{ps}):

$$\sigma_{ps} = \sqrt{\frac{\sum_{d \in D} (y_{ps}(d) - \bar{y}_{ps})^2}{n - 1}}$$

Povprečni razmak $\bar{\delta}$ je mera za splošni razmik vrednosti primerjalnega in kontroliranega dne, na primer koliko je bil en dan toplejši od drugega.

Razdaljo med vrednostmi kontroliranega dneva d_k in primerjalnega dneva d izračunamo takole:

Vpliv posameznih členov določa parameter β (nastavljen na vrednost 0,5). Koncept različnih mer razdalje v opisanem izračune razdalje prikazuje slika 87.



Slika 87. Poenostavljeni prikaz koncepta dveh vrst razdalje: povprečni razmak vrednosti primerjalnega in kontroliranega dne (navpični razmak med krivuljama) ter klasična evklidska razdalja (na podlagi dolžine vijoličnih črt).

Primerjalne dneve razvrstimo po velikosti razdalje. Določeno število teh dni z najmanjšo razdaljo uporabimo v regresijskem izračunu vrednosti kontrolirane spremenljivke na kontrolirani postaji na kontrolirani dan – s tem dobimo interpolacijsko oceno za vrednost, ki jo kontroliramo. V linearni regresiji uporabimo vrednosti dveh pojasnjevalnih spremenljivk, pri čemer je ena od teh kontrolirana spremenljivka. Regresijsko zvezo izračunamo po metodi najmanjših kvadratov in za vsako primerjalno postajo posebej.

Najprej za vsako pojasnjevalno spremenljivko na posamezni primerjalni postaji preverimo stopnjo statistične povezanosti s kontrolirano spremenljivko na kontrolirani postaji. Nize pojasnjevalnih spremenljivk, ki so statistično značilno (stopnja zaupanja 99 %) povezani s kontroliranim nizom, vnesemo v regresijski izračun. Če nobena od pojasnjevalnih spremenljivk ni statistično značilno povezana s kontrolirano spremenljivko, izračunamo povprečno vrednost kontrolirane spremenljivke v izboru podobnih dni in to upoštevamo kot stalnico v regresijski zvezi. Regresijsko zvezo lahko matematično opišemo takole:

$$y_{int,p} = \sum_{s=0}^{n_{reg,p}} a_{sp} y_{sp}$$

kjer so a_{sp} regresijski koeficienti za vsako upoštevano pojasnjevalno spremenljivko in primerjalno postajo in y_{sp} pripadajoče vrednosti pojasnjevalne spremenljivke na primerjalni postaji. Število upoštevanih pojasnjevalnih spremenljivk v regresiji je označeno z $n_{reg,p}$

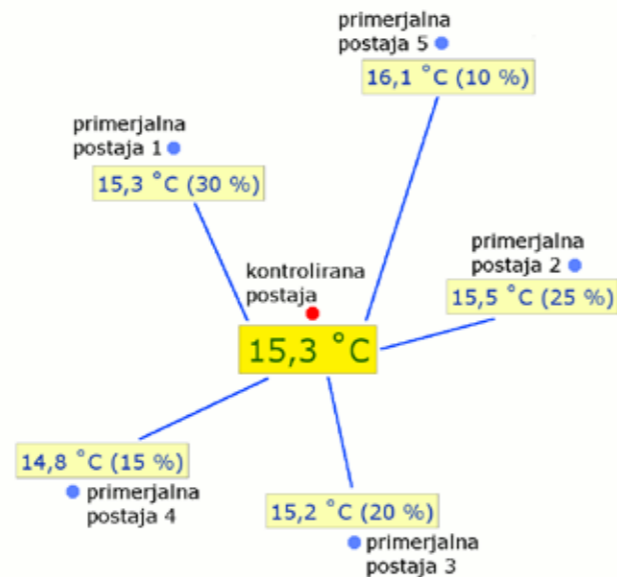
Interpolacijsko vrednost kontrolirane spremenljivke na kontrolirani postaji za kontrolirani dan izračunamo kot uteženo vsoto regresijskih vrednosti po primerjalnih postajah:

$$y_{int} = k_{int} \sum_{p \in P} y_{int,p}$$

kjer je P množica primerjalnih postaj, k_{int} normalizacijska utež, temelječa na deležu pojasnjene variance posamezne regresijske zveze (r_p^2):

$$k_{int} = \sum_{p \in P} \frac{r_p^2}{1 - r_p^2}$$

Interpolacijsko oceno primerjamo s fizikalnimi omejitvami in popravimo morebitne nefizikalne vrednosti (na primer negativno višino padavin ali hitrost vetra). Na sliki 88 je shematsko prikazan primer izračuna interpolacijske ocene iz posameznih regresijskih vrednosti.



Slika 88. Grafični prikaz primera izračuna interpolacijske vrednosti iz regresijskih vrednosti, ki smo ga uporabili pri samodejni prostorski kontroli temperature. Prikazane vrednosti ob modrih pikah so regresijske vrednosti na podlagi izmerkov primerjalne in kontrolirane postaje. Vrednosti v oklepaju pomenijo utež (delež) regresijskih vrednosti v interpolacijski vrednosti kontrolirane spremenljivke na kontrolirani postaji – osrednja vrednost ob rdeči piki.

Poleg vrednosti interpolacijske ocene izračunamo še dve oceni za napako interpolacijske ocene:

$$\sigma_{int,min} = \sqrt{k_{min} \sum_{p \in P} \left(\frac{r_p^2}{1 - r_p^2} \right)^2 \sigma_p^2}$$

$$\sigma_{int,max} = k_{max} \sum_{p \in P} \frac{r_p^2}{1 - r_p^2} \sigma_p$$

$$k_{min} = \sum_{p \in P} \left(\frac{r_p^2}{1 - r_p^2} \right)^2$$

$$k_{max} = \sum_{p \in P} \frac{r_p^2}{1 - r_p^2}$$

kjer je σ_p standardni odklon napake posamezne regresije in k_{min} ter k_{max} normalizacijska faktorja. Ocena minimalne interpolacijske napake ustreza primeru, ko so regresijske zveze medsebojno neodvisne, in je ocena maksimalne napake popolnoma enakim regresijskim zvezam. Dejansko stanje v našem primeru je nekje vmes, a pogosteje bliže oceni maksimalne napake.

Interpolacijsko vrednost in obe oceni njene napake ter izmerjeno vrednost kontrolirane spremenljivke program zapiše v posebno datoteko. Kontrolor pregleda le tiste primere, kjer izmerjena vrednost najbolj odstopa od interpolacijske vrednosti. Izbor teh primerov temelji na verjetnosti, da se interpolirana vrednost ob upoštevanju ocene maksimalne napake od izmerjene razlikuje za več kot 2,5 °C. Verjetnostni prag smo običajno postavili na 0,8. S tem smo v ročno kontrolo temperature zraka običajno zajeli nekaj deset, včasih pa tudi več kot 200 sumljivih vrednosti.

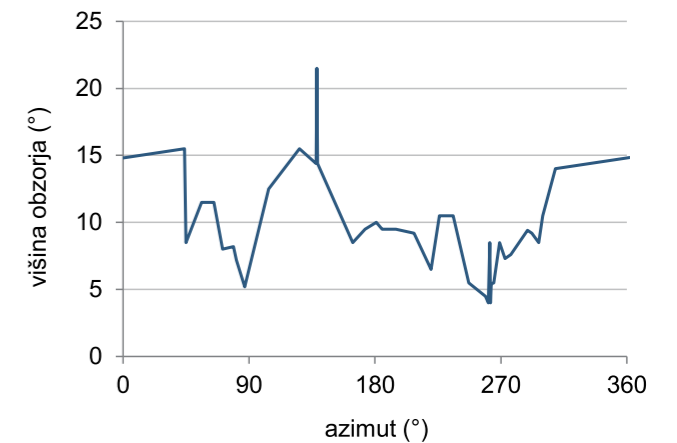
Preračun podatkov o trajanju sončnega obsevanja na matematično obzorje

Z računalniškim programom smo urne vrednosti trajanja sončnega obsevanja preračunali na matematično obzorje – obzorje, ki ustreza povsem ravni pokrajini. Na podlagi meritev smo določili empirično zvezo med najnižjim višinskim kotom α , kjer Sonce ob jasnem vremenu izžge sled na traku heliografa, zaporednim dnevom v letu j in nadmorsko višino postaje h :

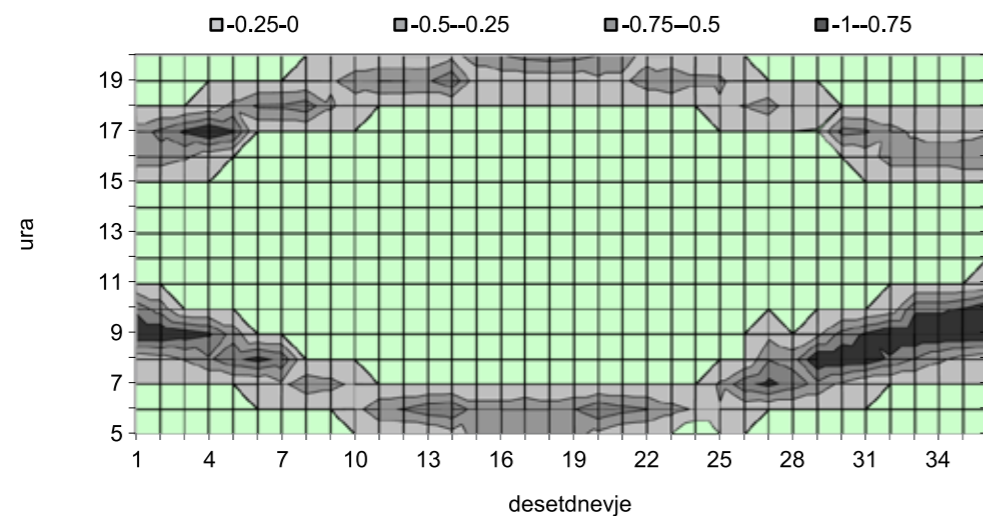
$$\alpha = \begin{cases} 2^\circ - 2^\circ \frac{h - 300 \text{ m}}{1200 \text{ m}} - \sin \left(2\pi \frac{j + 76}{365} \right) & \text{če } h < 1500 \text{ m} \\ -\sin \left(2\pi \frac{j + 76}{365} \right) & \text{če } h \geq 1500 \text{ m} \end{cases}$$

Na morski gladini se vrednost α spreminja od 1,5° januarja do 3,5° julija in na Kredarici od -1° januarja do 1° julija. Spreminjanje vrednosti α je posledica boljše prosojnosti ozračja na večji nadmorski višini in pogosto bolj prosojnega jasnega zimskega neba od poletnega.

Osrednji del programa izračuna statistiko urnega trajanja sončnega obsevanja za vsako postajo in desetdnevje v letu in uro dneva (matrike desetdnevje-ura) (slika 89). Na podlagi triletne statistike za isto desetdnevje in uro dneva ter vrednosti v sosednjih desetdnevnih za izbrano leto se iz meritev določajo ovire (slika 90). Tako izračunane ovire so zaradi bolj ali manj spremenljivega vremena le groba ocena dejanskega stanja, poleg tega trakovi niso vedno časovno usklajeni; razlika med pravim časom in navedenim na traku je lahko tudi pol ure.



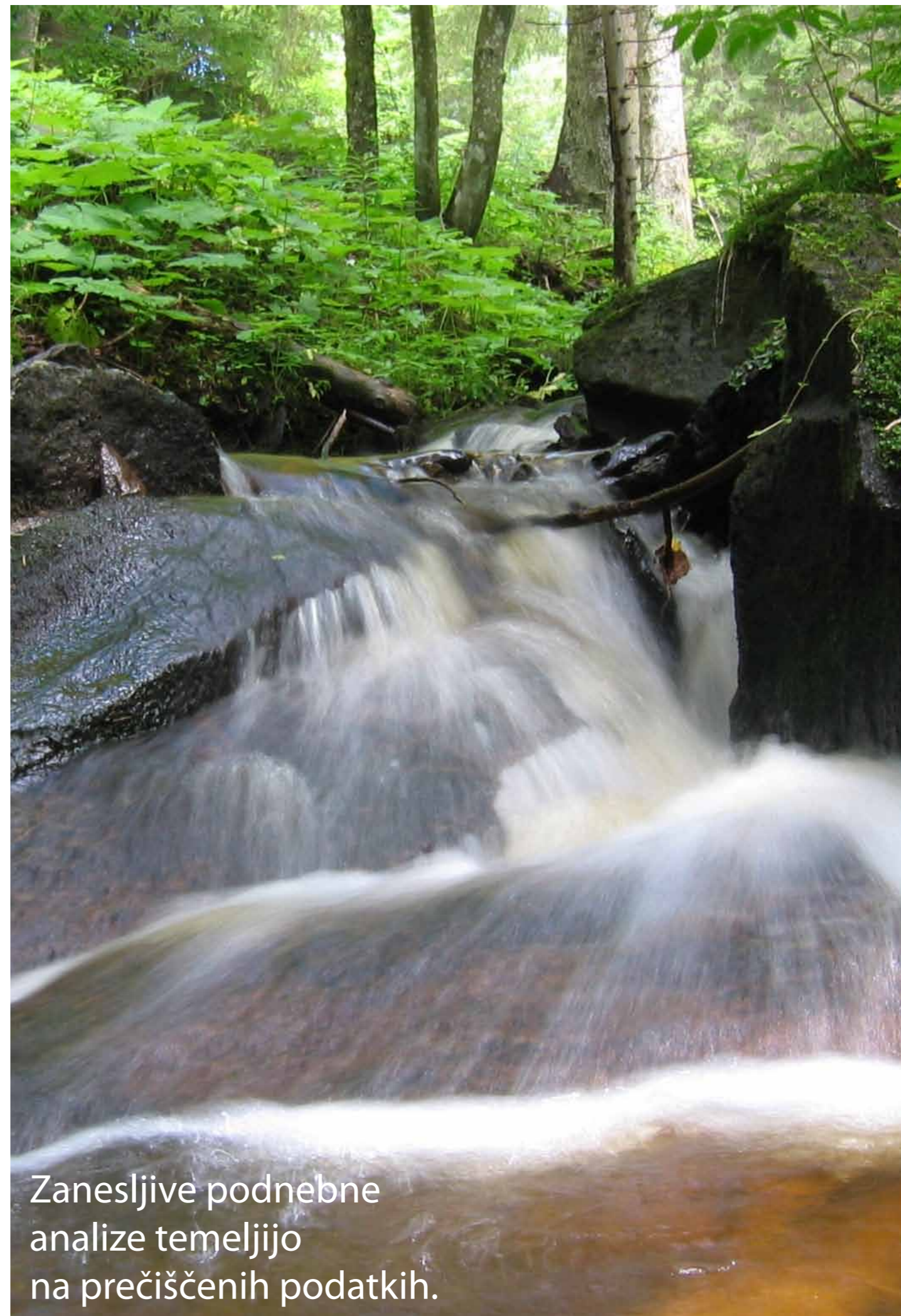
Slika 89. Izmerjeno obzorje za Bohinjsko Češnjo v letih 1993–1995. Azimut teče od severa (0°) prek vzhoda (90°) in juga (180°) do zahoda (270°). Najnižje obzorje je v smeri vzhoda in zahoda, precej visoko pa sega na severu in jugovzhodu. Navpična črta na jugovzhodu označuje telegrafski drog.



Slika 90. Razlika med največjo izmerjeno urno vrednostjo trajanja sončnega obsevanja v Bohinjski Češnjici v obdobju 1993–1995 po desetdnevjih in uri dneva ter največjo mogočo vrednostjo pri matematičnem obzorju. Največja razlika je v dopoldanskih urah okoli zimskega obrata, ker Sonce takrat dokaj pozno vziđe nad okoliškimi gorami. Tudi v ostalem delu leta zaradi geografske lege Sonce vziđe precej pozneje in zaide precej prej kakor na ravnini.

Interpolacija za termine z neprimernimi vrednostmi na izbrani postaji temelji na izmerkih drugih postaj v sosednjih poljih matrike, torej ob sosednjih urah v istem desetdnevju in sosednjih desetdnevjih ob isti uri dneva. Vpliv primerjalnih postaj je utežen s korelacijo matrike desetdnevje-ura med primerjalno in izbrano postajo ter razpoložljivostjo podatkov primerjalne postaje za interpolacijo na izbrani postaji. Interpolirano

vrednost primerjamo z največjo teoretično možno vrednostjo (glej enačbo zgoraj) in izmerjeno vrednostjo. Če se interpolirana vrednost ne nahaja med obema, jo zavržemo. Interpolacija poteka iterativno, s postopnim polnjenjem »manjkajočih« vrednosti. Na koncu program izračunane vrednosti zapiše v datoteke v formatu, ki ga uporablja homogenizacijski program HOMER.



Zanesljive podnebne
analize temeljijo
na prečiščenih podatkih.

Izdajatelj: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana, e-naslov: gp.arso@gov.si, www.arso.gov.si

Urednica: Mojca Dolinar

Avtorji: Gregor Vertačnik, Renato Bertalanič, Zorko Vičar

Sodelavci: Urška Bajec, Miha Demšar, Mojca Dolinar, Damjan Dvoršek, Damijana Gartner, Matija Klančar, Dejan Kolarič, Mateja Nadbath, Maruša Mole, Boris Pavčič, Tadeja Ovsenik Jeglič

Lektoriranje: Nevenka Gajšek, Sektor za prevajanje, Generalni sekretariat vlade

Fotografija na naslovnici: Ledeno ivje - lepota in past vremenske spremenljivosti v gorah (foto: Iztok Sinjur)

Oblikovanje in tisk: SOLOS d.o.o.

Naklada: 100 izvodov

Ljubljana, november 2015



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
AGENCIJA REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE