

Spremembe vodne bilance v Sloveniji v obdobju 1961–2024

Igor Žiberna*

DOI: <https://doi.org/10.62409/czn.274>
CC BY-SA 4.0

UDK – UDC: 911.2:551.577.38(497.4)

Potrjeno – Accepted: 6. 12. 2024 | Objavljeno – Published: 20. 12. 2024

1.01 Izvirni znanstveni članek – 1.01 Original Scientific Article

Igor Žiberna: Spremembe vodne bilance v Sloveniji v obdobju 1961–2024. Časopis za zgodovino in narodopisje, Maribor 95=60(2024), 2–3, str. 89–107

V članku so prikazani stanje in trendi meteorološke(klimatološke) vodne bilance kot razlike med višino padavin in evapotranspiracijo. Analizirani so trendi višine padavin, potencialne evapotranspiracije in vodne bilance za dvanajst meteoroloških postaj v Sloveniji, in sicer za obdobje 1961–2023. Prikazani so vzroki zanje in posledice. Analizirane so tudi prostorske značilnosti razporeditve vodne bilance v Sloveniji na osnovi georeferenciranih rastrskih podatkov v bazi Chelsa Climate za obdobje 1981–2010.

Ključne besede: vodna bilanca, suša, podnebne spremembe, Slovenija.

Igor Žiberna: Changes in the water balance in Slovenia between 1961 and 2024. Review for History and Ethnography, Maribor 95=60(2024), 2–3, pp. 89–107

This article presents an analysis of the status and trends related to the meteorological (climatological) water balance, focusing on the differences between precipitation and evapotranspiration. It examines trends in precipitation, potential evapotranspiration, and water balance across twelve meteorological stations in Slovenia from 1961 to 2023. The article outlines both the causes and consequences of these observed trends. Additionally, it explores the spatial distribution characteristics of the water balance in Slovenia, utilizing georeferenced raster data from the Chelsa Climate database for the period of 1981 to 2010.

Keywords: water balance, drought, climate change, Slovenia.

* dr. Igor Žiberna, red. prof., (ORCID identifier 0000-0003-4796-4061), Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, Koroška cesta 160, 2000 Maribor, Slovenija, igor.ziberna@um.si – Igor Žiberna, PhD, Full Professor, (ORCID identifier 0000-0003-4796-4061), University of Maribor, Faculty of Arts, The Department of Geography, Koroška cesta 160, SI 2000 Maribor, Slovenia, igor.ziberna@um.si

UVOD

Podnebje se je na Zemlji spreminjalo v vsej njeni zgodovini. Večino časa so bili vzroki za podnebne spremembe astronomski (spremembe orbitalnih elementov našega planeta in spremembe naklona rotacijske osi, trki teles z Zemljo, spremembe Sončeve aktivnosti) in terestrični (tektonski procesi in vulkanizem, spremembe oblike in velikosti celin, morskih tokov, kemične sestave atmosfere itd.). Od začetka 19. stoletja naprej pa smo priča vedno večjim antropogenim vplivom na podnebje, predvsem preko spremembe energijske bilance našega planeta zaradi antropogenega vnosa toplogrednih plinov, na regionalnem in lokalnem nivoju pa zaradi spremenjene rabe tal (sekanje gozdov, širjenje pozidanih površin) (Provenziale, 2023). Če je bilo podnebje od zadnje ledene dobe dokaj stabilno, pa je dinamika spreminjanja podnebja v zadnjem stoletju bistveno intenzivnejša (Mann, 2023, str. 213–213). Posledice podnebnih sprememb se manifestirajo na različne načine. Temperature zraka naraščajo, intenzivneje se talita sneg in led, intenzivira se planetarni krogotok vode, povečuje se pogostost in intenzivnost neviht v tropskem in zmernem pasu, spreminjajo se vremenski vzorci, vročinski valovi se pojavljajo tudi v višjih geografskih širinah, večja se pogostost ekstremnih vremenskih dogodkov, spreminjajo se fenofaze rastlin itd. (Ahrens, C.D., Samson, P., 2024; Bonan, 2016). Posledice podnebnih sprememb so na Zemlji neenakomerno razporejene; ekstremni vremenski pojavi si včasih celo nasprotujejo: na dani lokaciji se v istem letu lahko pojavlja intenzivna suša, le nekaj mesecev kasneje pa katastrofalne poplave (v Sloveniji npr. leta 2012) (Cegnar, 2013; Sušnik, Valher, 2013).

Za pojav suše nimamo splošno sprejete definicije, saj je po eni strani njena opredelitev odvisna od stroke, ki se z njo ukvarja, po drugi strani pa k njene-mu nastanku botrujejo številni dejavniki: poleg višine padavin in izhlapevanja tudi hidrogeografske, pedogeografske, litološke, vegetacijske in reliefne razmere, ne nazadnje pa tudi delovanje človeka (Žibera, 2021). Pojav suše lahko obravnavamo z različnih zornih kotov. O meteorološki suši govorimo, ko je daljše obdobje razlika med višino padavin in evapotranspiracijo negativna. Za kmetijsko sušo je značilen primanjkljaj vlage za kulturne rastline, ki ne omogoča normalnega razvoja le-teh. Hidrološko sušo zaznamuje zmanjšanje količine vode v rečnih koritih, jezerih in znižanje gladine podtalnice. Odraža se tudi v zmanjšanem potencialu proizvodnje električne energije v hidroelektrarnah. O socioekonomski suši govorimo v primeru, ko pomanjkanje vode vpliva na oskrbo z vodo v naseljih in/ali na gospodarske dejavnosti (npr. na industrijo ali turizem) (Alahacoon, Edirisinghe, 2022; Krogulec et al., 2020). Parametri, ki opredeljujejo sušo, so trajanje suše, magnituda suše (višina vodnega primanjkljaja), intenzivnost suše (razmerje med magnitudo

suše in trajanjem suše), geografska (prostorska) razširjenost suše in pogostost pojavljanja suše (povratna doba suše). V našem članku se bomo omejili na pojav meteorološke (klimatološke) suše.

Ena od najizrazitejših posledic podnebnih sprememb je vse pogostejši pojav meteoroloških suš, kar je posledica spremenjene vodne bilance (Ipavec, Kajfež Bogataj 2008). Po poročilu Evropske okoljske agencije so trendi višanja temperatur v Evropi višji od svetovnega povprečja, v južni in vzhodni Evropi pa višji od povprečja v Evropi. Višje temperature vplivajo na višjo evapotranspiracijo. Trendi višine padavin so statistično manj pomembni, vendar so v južni Evropi (kamor po regionalizaciji Evropske okoljske agencije sodi tudi Slovenija) negativni (European Climate Risk Assessment, 2024, str. 63). Razpoložljivost vodnih zalog na prebivalca se je zaradi podnebnih sprememb v Evropi v obdobju 2000–2017 zmanjšala: v Avstriji z 11.298 m³/prebivalca leta 2000 na 8444 m³/prebivalca leta 2017, v Švici s 7728 na 4902, v Španiji s 4146 na 2042 in v Italiji z 2120 na 1320 (Water Resources ..., 2021, str. 82). Ocene kažejo, da bi se v južni Evropi ob dvigu temperatur za 2 °C glede na predindustrijsko obdobje delež populacije, ki bi bila izpostavljena nezanesljivi oskrbi z vodo dvignili na 58 %. Ranljiva bodo postala tudi urbana območja. Največje posledice zaradi deficita vlage bodo zaznavne v kmetijstvu (40 % – 60 % skupne škode, odvisno od regije), v hidroenergetskem sektorju (22 % – 48 % skupne škode) in v oskrbi s pitno vodo (9 % – 20 % skupne škode). Ekonomska škoda zaradi suše v Evropi bi pri trendu dviga temperatur za 1,5 °C glede na predindustrijsko obdobje (ta trend smo praktično že dosegli) letno v povprečju znašala 10 milijard EUR, pri dvigu temperatur za 2 °C 12 milijard EUR, pri dvigu temperatur za 3 °C pa okoli 17 milijard EUR. Pri tem bo najbolj ranljiva južna Evropa (European Climate Risk Assessment, 2024).

Območja zahodne Slovenije beležijo največ padavin v novembru ali oktobru. Višek padavin v vzhodni Sloveniji nastopa poleti in je pretežno posledica poletnih ploh. Trendi letne višine padavin od sredine 20. stoletja naprej v večini Slovenije niso statistično značilni, z izjemo Kočevja in Rateč, kjer je mogoče zaznati statistično značilno upadanje višine padavin za $-16 \text{ mm} \pm 10 \%$ oziroma za $-21 \text{ mm} \pm 14 \%$. Prav tako ni mogoče opaziti bistvenih sprememb padavinskega režima. Rahlo narašča le intenziteta nalivov (Bergant et al. 2004; Vertačnik, Bertalančič, 2017).

Eden od pokazateljev sušnih razmer je tudi klimatska vodna bilanca: razlika med višino padavin in evapotranspiracijo. Danes še vse postaje beležijo prebitek količine padavin nad evapotranspiracijo. Letni suficit je najvišji na Kredarici (1595, 3 mm), najmanjši pa v Murski Soboti (66,9 mm). Pomurje že sedaj zaznava deficit v pomladanskih in poletnih mesecih. Če k temu prištejemo še dejstvo, da je večina poljedelskih površin v Pomurju na plitvih

prodnatu peščenih tleh, ki imajo nižjo sposobnost zadrževanja vlage, je slika o vodni bilanci še manj ugodna.

Za zadnja desetletja je značilno pogostejše pojavljanje sušnih obdobj. Izrazite kmetijske suše se pojavljajo predvsem v jugozahodni in severovzhodni Sloveniji, in sicer v vegetacijskem obdobju (med aprilom in septembrom), ko kulturne rastline tudi sicer potrebujejo največ vlage. V zadnjih štiridesetih letih so se kmetijske suše v omenjenih dveh območjih pojavljale kar tridesetkrat, medtem ko je celotna Slovenija utrpela sušo v letih 1967, 1971, 1973, 1977, 1983, 1992, 1993, 1994, 2000, 2001, 2003, 2006, 2007, 2009, 2012, 2013 (Krajnik et al. 2015), 2019, 2020 in 2022. Naravne nesreče v Sloveniji v zadnjih letih povzročajo škodo v višini okoli 2 % BDP, od tega so suše leta 2000 predstavljale 70 %, leta 2001 57 % in leta 2003 celo 83 % BDP (Statistične informacije 378/2004). Suša leta 2003 je med vsemi naravnimi nesrečami povzročila 83,3 % celotne škode, gozdni požari, ki so bili ena od posledic visokih temperatur, pa nadaljnjih 8,1 %. Suša je največ škode naredila v podravski in pomurski regiji, medtem ko so gozdni požari najbolj oškodovali osrednje-slovensko, podravsko, savinjsko in goriško statistično regijo (Statistične informacije, 378/2004). Posledice sušnih obdobj se kažejo tudi v spremembi gladine podtalnice; govorimo o hidrološki suši. Hidrološka suša leta 2003 je predstavljala nadaljevanje sušnega obdobja, ki se je začelo že leta 2000. Prizadela je predvsem vodonosnike na prodnatih aluvialnih ravninah Prekmurja, Dravske in Ptujkega polja, kjer je trajala od januarja do novembra, v ostalih delih Slovenije pa se je pojavljala med junijem in septembrom. V Prekmurju so bile zabeležene najnižje gladine podzemne vode od sredine 20. stoletja. Veliko ročno izkopanih vodnjakov je presahnilo, nekateri prvič v celotni zgodovini obstoja. Vodnjaki so sicer presihali v Prekmurju, na Dravskem, Ptujskem polju ter v severnem delu Kranjskega polja. Vodnjaki na Kranjskem polju so presahnilo prvič po umetnem dvigu gladine podtalnice leta 1986 zaradi zajezitve Save za Hidroelektrarno Mavčiče (Mikulič et al. 2003).

METODOLOGIJA DELA

Meteorološka (klimatska) vodna bilanca je razlika med višino padavin in evapotranspiracijo (Ceglar, Kajfež Bogataj 2008, 408). V našem primeru smo uporabili podatke z naslednjih meteoroloških postaj: Kredarica, Vojsko, Bilje, Postojna, Ljubljana-Bežigrad, Novo mesto, Celje, Slovenske Konjice, Šmartno pri Slovenj Gradcu, Slovenske Konjice, Maribor, Murska Sobota in Lendava, in sicer za obdobje 1961–2023, le za meteorološko postajo Bilje so bili zaradi kasnejšega začetka delovanja uporabljeni podatki za obdobje 1963–2023 (Arhiv ARSO 2024). Podatke o evapotranspiraciji smo modelirali s pomočjo

Thornthwaitovega modela (Žiberna, 2021). Rezultate smo analizirali na mesečnem, sezonskem in letnem nivoju. Sezone smo določili v skladu z običajem v meteorologiji oz. klimatologiji: v čas zime so vključeni december, januar in februar, v pomlad marec, april in maj, v poletje junij, julij in avgust ter v jesen september, oktober in november.

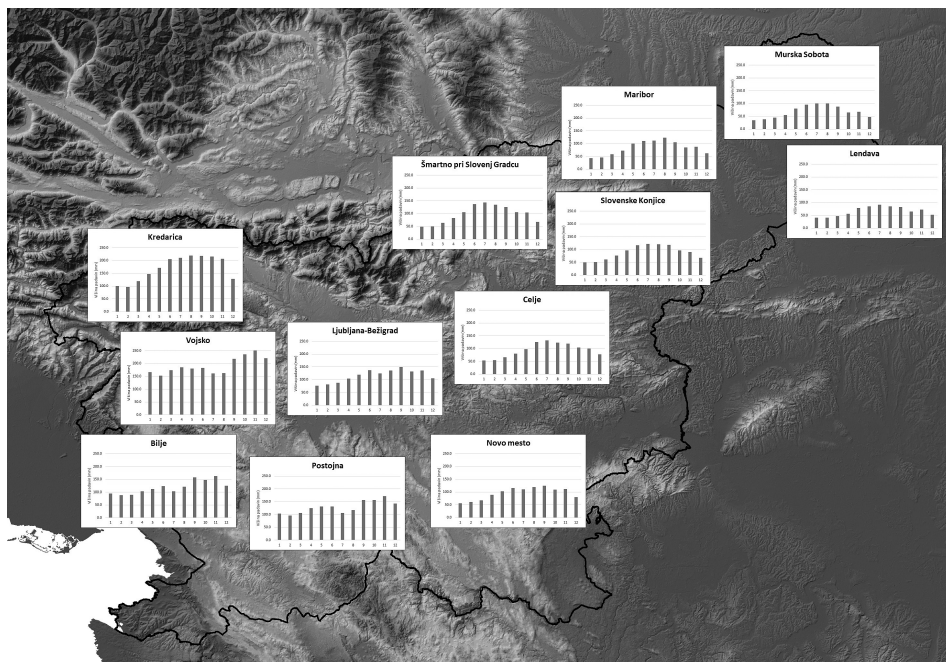
Pri prostorskem prikazu vodne bilance smo uporabili podatke iz baze Chelsa Climate (Chelsa Climate), in sicer za obdobje 1981–2010. V omenjeni bazi so podatki o višini padavin in evapotranspiraciji; s pomočjo GIS orodji smo izračunali razliko med obema slojema za leto in poletje in tako prišli do podatka o klimatski vodni bilanci. Georeferencirani podatki so prikazani v rastrskem formatu s prostorsko resolucijo $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$.

TRENDI VODNE BILANCE V SLOVENIJI

Višina padavin in trendi višine padavin

Za padavinski režim v Sloveniji je značilno, da ne pozna izrazito suhega ali vlažnega obdobja. V Sloveniji se pojavljata dva tipična letna režima padavin. V zahodni Sloveniji se primarni višek padavin pojavlja v jesenskih mesecih (ta je v veliki meri posledica ciklogeneze v Genovskem zalivu na prehodu iz poletja v zimo), sekundarni višek pa spomladi. Vmes se pojavlja minimum padavin v poletnih mesecih, ki je po količini skoraj izenačen z drugim minimumom padavin, ki se pojavlja pozimi. Na Kredarici se jesenski maksimum padavin združi s poletnim, ki pa je posledica labilizacije atmosfere v poletnih mesecih. Če so jesenske padavine frontalnega nastanka, so poletne pretežno konvektivnega nastanka, padavine pa nastopajo v obliki ploh. Za vzhodno Slovenijo je značilen primarni maksimum padavin v poletnih mesecih (gre za pretežno padavine iz konvektivnih oblakov v obliki ploh), sekundarni maksimum pa nastopa jeseni, a je precej slabše izražen kot v zahodni Sloveniji. V osrednji Sloveniji se oba režima prepletata (Slika 1). Porazdelitev padavin v Sloveniji kaže na velike prostorske in časovne razlike. Na to vplivata predvsem položaj Slovenije in njena reliefna razgibanost. Največ padavin pade, ko nad Slovenijo z jugozahodnimi vetrovi priteka vlažen zrak. Ta se ob gorskih pregradah dviga in ohlaja. Pojavijo se padavine, ki se najprej izločijo na alpsko-dinarski gorski pregradi. Orografske padavine se nato ponovijo ob Kamniško-Savinjskih Alpah, tretjič pa na Pohorju in Vzhodnih Karavankah. Severozahod Slovenije z nad 3000 mm letne višine padavin spada med bolj namočena območja Evrope (Žiberna, 2017). Meteorološka postaja Vojsko letno prejme 2354,9 mm, Kredarica pa 2035,0 mm padavin. Višina padavin proti severovzhodu pada in v Mariboru je v obdobju 1961–2023 letno padlo povprečno 1005,7 mm padavin,

v Murski Soboti 814,7 mm, v Lendavi pa le 797,8 mm padavin. Sezonski značaj padavin prav tako narašča proti severovzhodu Slovenije: če delež padavin v najmanj namočenem mesecu glede na najbolj namočenega v Biljah in Postojni presega 54 %, pa je ta delež v Mariboru 35 % ter v Šmartnem pri Slovenj Gradcu in v Murski Soboti le 34 %.

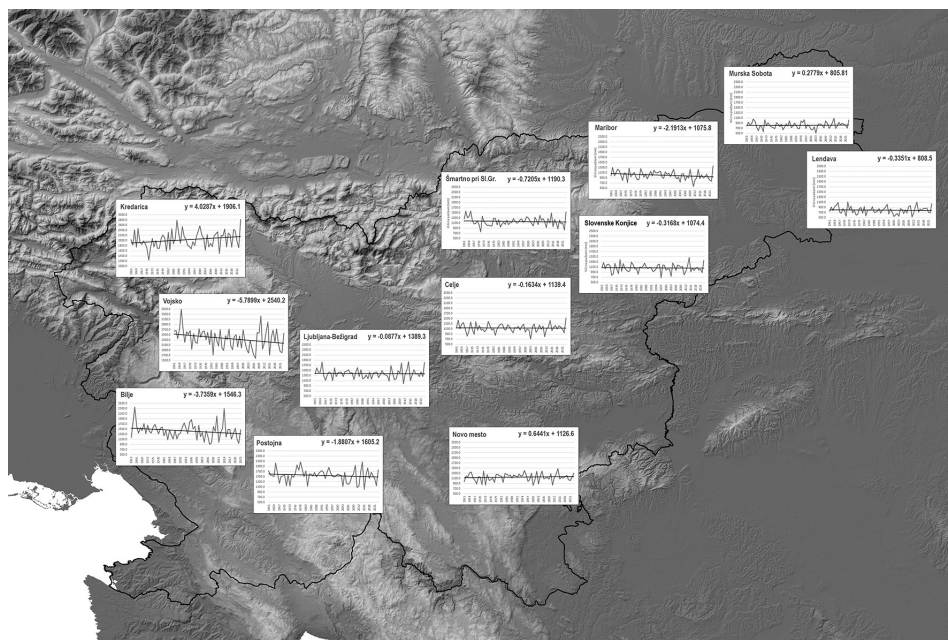


Slika 1: Letni režim višine padavin v Sloveniji v obdobju 1961–2023.

Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.

Trendi letne višine padavin so na večini obravnavanih meteoroloških postaj negativni, a statistično neznačilni. Na Vojskem je trend letne višine padavin $-5,8$ mm/leto, v Biljah $-3,7$ mm/leto in v Mariboru $-2,2$ mm/leto (Slika 2). Na ostalih meteoroloških postajah je letni trend med 0 in -1 mm/leto. Višina padavin na vseh meteoroloških postajah pada v poletnih mesecih, na večini postaj tudi spomladi, medtem ko so trendi v jesenskih in zimskih mesecih na večini postaj pozitivni, a z nizkimi vrednostmi. Pri tem naj omenimo še eno, za pojav suše pomembno dejstvo. Razen v visokogorju in visokem hribovju zaradi vedno višjih temperatur pozimi vedno več padavin pada v tekoči obliki (kot dež). V preteklosti so zimske padavine v obliki snega povzročile pojav snežnega zadržka (snežne retinence), kar je povzročilo, da so na začetku vegetacijske dobe kulturne rastline zaradi taljenja snega imele dovolj vlage v tleh. Pojav je vplival tudi na poudarjen snežno-dežni rečni režim rek, ki so imela povirja v visokogorju. Padavine v tekoči obliki pomenijo takojšen odtok

po vodotokih, kar po eni strani pospešuje erozijo v hribovju (rastline zunaj vegetacijske dobe nase namreč ne vežejo dosti vlage), po drugi strani pa višajo nevarnost poplav v nižje ležečih območjih.

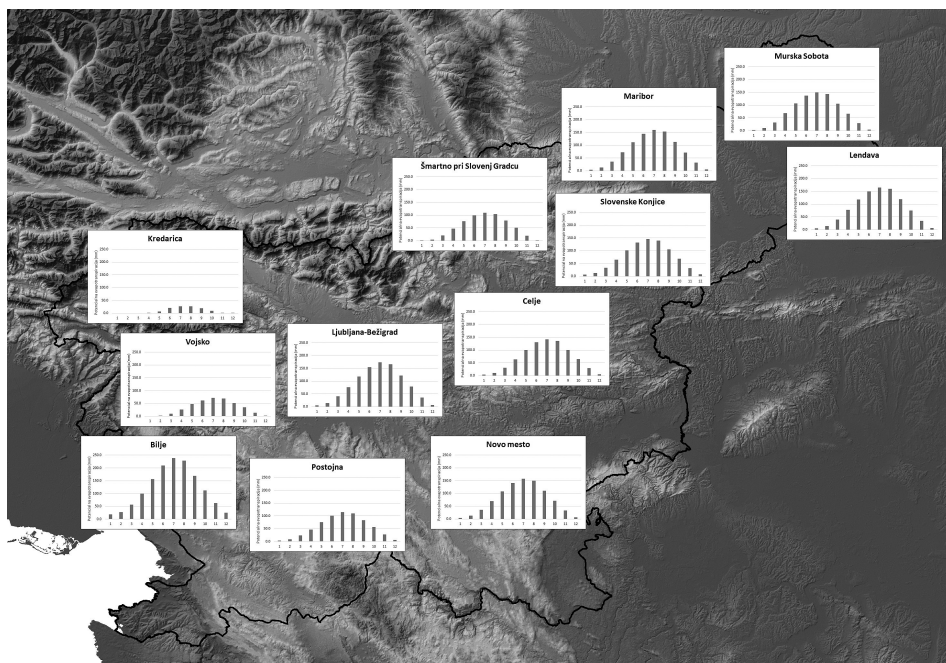


Slika 2: Trendi letne višine padavin v Sloveniji v obdobju 1961–2023.

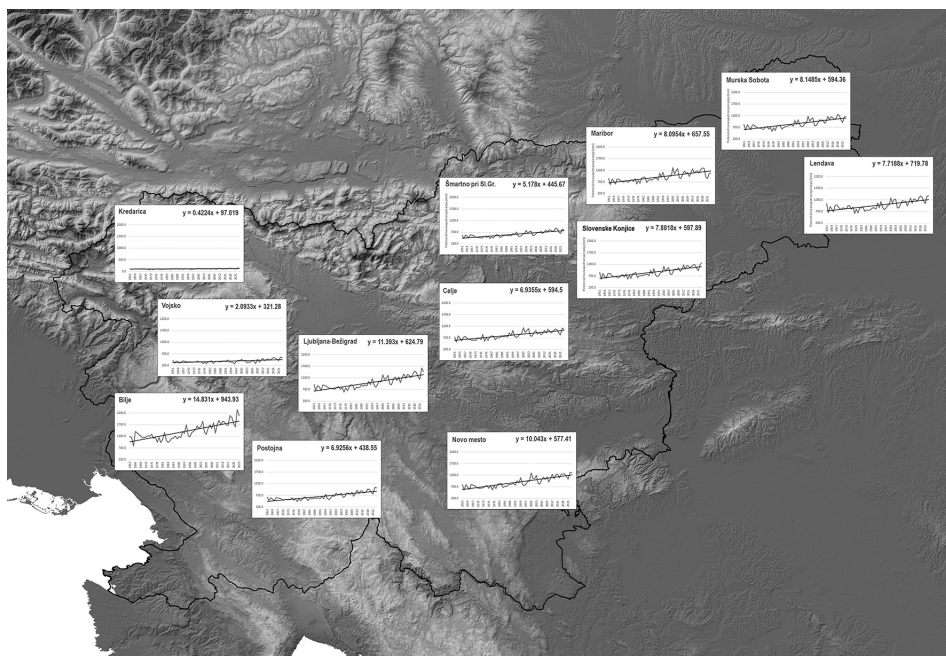
Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.

Potencialna evapotranspiracija in trendi potencialne evapotranspiracije

Potencialna evapotranspiracija je v neposredni odvisnosti od temperatur zraka: višje temperature pomenijo višjo evapotranspiracijo. Letni režim potencialne evapotranspiracije je zato pričakovan. Na vseh meteoroloških postajah se najvišja potencialna evapotranspiracija pojavlja poleti, praviloma julija, le na meteoroloških postajah Kredarica in Vojsko je avgustovska evapotranspiracija nekoliko višja od julijske. Najvišje letne vrednosti potencialne evapotranspiracije so v Bilju (1403,7 mm), v Ljubljani (989,4 mm), Lendavi (966,8 mm) in v Mariboru (916,6 mm), najnižje pa na Kredarici (le 110,5 mm) (Slika 3). V Ljubljani in Mariboru vrednosti potencialne evapotranspiracije nekoliko viša tudi pojav mestnega toplotnega otoka, zaradi velikega deleža pozidanih površin pa je dejanska evapotranspiracija nižja. Poletna evapotranspiracija v severovzhodni Sloveniji presega 400 mm, v osrednji in večjemu delu zahodne Slovenije je med 100 in 200 mm, v Biljah dobrih 200 mm, na Vojskem in na Kredarici pa pod 100 mm.



Slika 3: Letni režim potencialne evapotranspiracije v Sloveniji v obdobju 1961–2023.
Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.



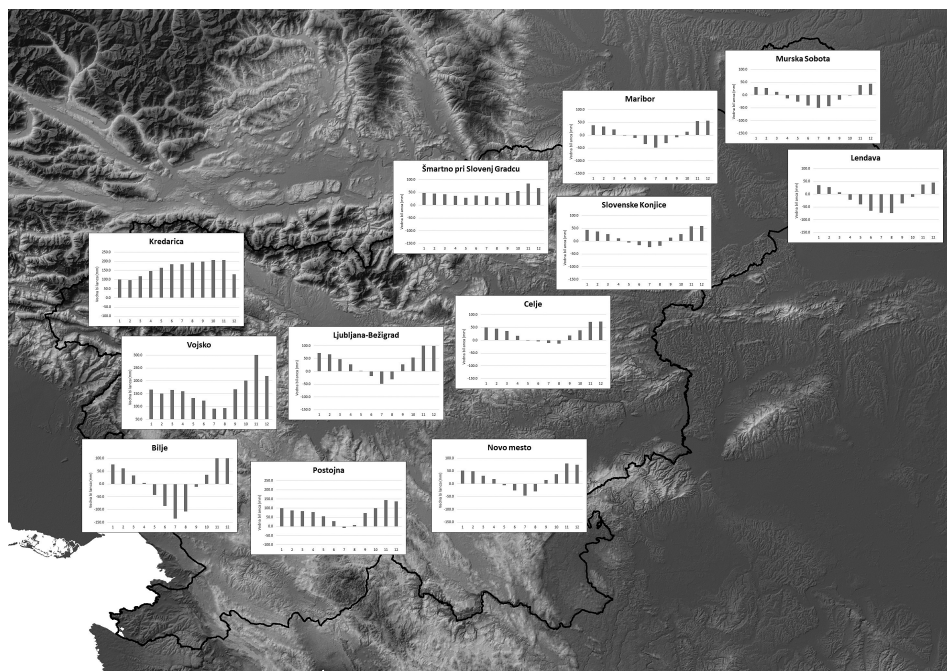
Slika 4: Trendi letne potencialne evapotranspiracije v Sloveniji v obdobju 1961–2023.
Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.

Trendi potencialne evapotranspiracije so na vseh postajah in v vseh mesecih pozitivni. Najvišji trendi letne potencialne evapotranspiracije so na meteoroloških postajah Bilje (14,8 mm/leto), Ljubljana-Bežigrad (11,4 mm/leto) in Novo mesto (10,0 mm/leto), medtem ko so v severovzhodni Sloveniji okoli 8 mm/leto (Slika 4). Pri interpretaciji vrednosti potencialne evapotranspiracije pa je seveda potrebno biti kritičen. Medletna nihanja so namreč velika: v Mariboru je bila v sušnem letu 2003 poletna potencialna evapotranspiracija 718 mm, v letu 2023 pa le 457 mm.

Vodna bilanca in trendi vodne bilance

Stanje vodne bilance in njen letni režim ima v Sloveniji močno prostorsko komponento. Najmanj ugodno stanje je v obsredozemski in obpanonski Sloveniji (jugozahodna in severovzhodna Slovenija), kjer je ta celo na letnem nivoju okoli ničle oziroma je ponekod že negativna. Poletna vodna bilanca je bila v obdobju 1961–2023 pozitivna le v visokogorju in v osrednji Sloveniji. Najvišje pozitivne vrednosti letne vodne bilance izkazuje Kredarica (+1924,5 mm) in Vojsko (+1966,7 mm), visoke pa so še v Postojni (+884,8 mm) in v Šmartnem pri Slovenj Gradcu (+555,9 mm). V Biljah je ta le +26,8 mm, v Mariboru +89,1 mm, medtem ko je v Murski Soboti –40,4 mm, v Lendavi pa celo –169,0 mm. Drugačna situacija je v poletnih mesecih: pozitivno vodno bilanco beležijo le Kredarica (559,1 mm), Vojsko (306,7 mm), Šmartno pri Slovenj Gradcu (102,0 mm) in Postojna (29,0 mm), na ostalih postajah pa je negativna, najbolj v Biljah (–328,6 mm), v Lendavi (–212,1 mm), Murski Soboti (–134,3 mm) in v Mariboru (–113,6 mm). Območja z negativno vodno bilanco so pomembna območja za poljedelstvo in sadjarstvo, zato je tako stanje z vidika kmetijstva neugodno. Na ravninskih območjih zlasti v severovzhodni Sloveniji negativne učinke neugodne vodne bilance potencira še dejstvo, da gre za območja s plitvejšimi prstmi, ki imajo slabšo sposobnost zadrževanja vode, kar je za kulturne rastline neugodno, saj so bolj izpostavljene pojavi suše. Neugoden je tudi prevladujoč letni režim vodne bilance. Z izjemo Kredarice, Vojskega in Šmartnega pri Slovenj Gradcu, kjer ni meseca z negativno vodno bilanco, so na preostalih meteoroloških najmanj trije meseci z negativno vodno bilanco. V Biljah nastopa negativna vodna bilanca med majem in septembrom, v Mariboru med aprilom in septembrom, v Murski Soboti in Lendavi pa med aprilom in oktobrom. Zaskrbljujoče je, da se negativna vodna bilanca pojavlja prav v vegetacijski dobi, ko kulturne rastline zlasti v vegetativni fazi potrebujejo veliko vlage. Najvišji deficit se pojavlja v Biljah (julija je vodna bilanca –135,2 mm, avgusta pa –107,6 mm). To si lahko razlagamo s sovpadanjem primarnega minimuma padavin in obdobja z najvišjo evapotranspiracijo.

V severovzhodni Sloveniji so najvišji deficiti julija in avgusta. V Lendavi je julijska vodna bilanca $-72,8$ mm, avgustovska pa $-74,2$ mm; v Murski Soboti je julijska $-49,4$ mm, avgustovska pa $-43,3$ mm; v Mariboru je julijska $-48,1$ mm, avgustovska pa $-30,8$ mm (Slika 5). Govorimo seveda o povprečni vodni bilanci za obdobje 1961–2023. V sušnih poletjih so deficiti še višji. Na meteorološki postaji Murska Sobota je v sušnem poletju 2003 junija znašal deficit $-182,4$ mm, julija $-126,7$ mm, avgusta $-174,6$ mm in julija 2013 $-183,9$ mm. Zadnje poletje s pozitivno vodno bilanco na tej meteorološki postaji je bilo leta 2005, pred tem pa leta 1989. Najvišji poletni deficit so zabeležili v letih 2003 ($-483,6$ mm), 2000 ($-414,7$ mm), 1992 ($-400,8$ mm), 2012 ($-385,4$ mm) in leta 2013 ($-346,3$ mm). V Mariboru so najvišji poletni deficit v vodni bilanci zabeležili v letih 2003 ($-517,0$ mm), 2012 ($-460,9$ mm) 2013 ($-458,6$ mm), 2017 ($-447,0$ mm) in 2000 ($-424,8$ mm). Deficit vlage zlasti v poletnih mesecih v severovzhodni in jugozahodni Sloveniji postaja običajno stanje.

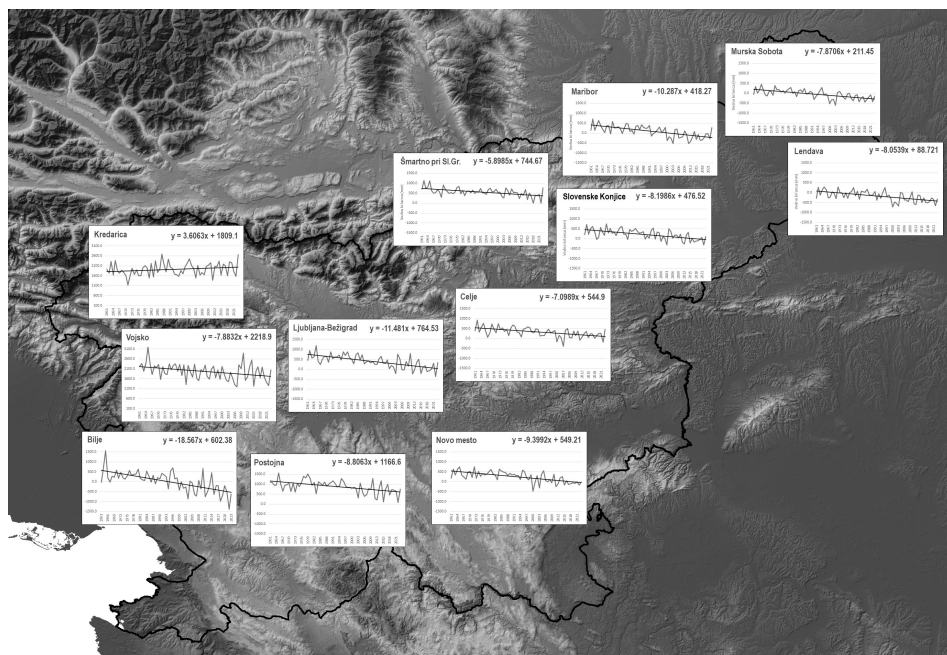


Slika 5: Letni režim vodne bilance v Sloveniji v obdobju 1961–2023.

Opomba: Y osi se zaradi velikih razlik v vodni bilanci na meteoroloških postajah Kredarica in Postojna razlikujejo od ostalih, vendar je razpon na vseh y oseh zaradi primerljivosti enak. Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.

Trendi letne vodne bilance so na večini obravnavanih meteoroloških postaj negativni, najvišje negativne vrednosti pa dosegajo v Biljah ($-18,5$ mm/leto), Ljubljani ($-11,5$ mm/leto), Mariboru ($-10,3$ mm/leto), v Novem mestu

(−9,4 mm/leto), v Murski Soboti in Lendavi pa okoli −8 mm/leto. Poleti trendi vodne bilance dosegajo najvišje negativne vrednosti v severovzhodni Sloveniji: v Mariboru −5,5 mm/leto, v Slovenski Konjicah −4,8 mm/leto, v Lendavi in v Murski Soboti pa −4,5 mm/leto. V osrednji in zahodni Sloveniji je najizrazitejši negativni trend v Biljah (−3,3 mm/leto) (Slika 6).

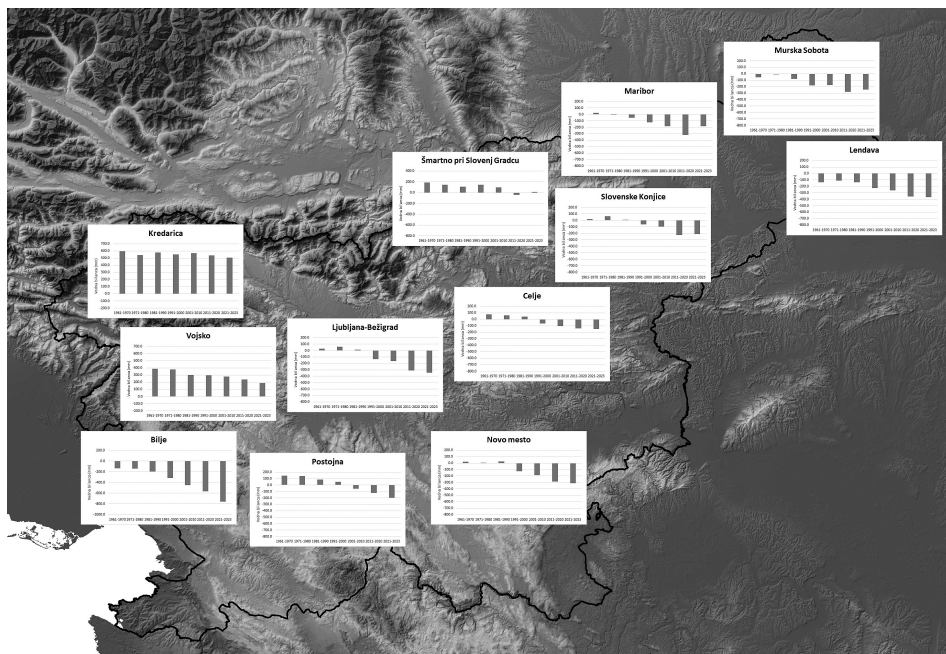


Slika 6: Trendi letne vodne bilance v Sloveniji v obdobju 1961–2023.

Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.

Zanimiva je tudi analiza sprememb vodne bilance po desetletjih. Vključili smo tudi obdobje 2021–2023, čeprav zaradi krajšega časovnega okna ni primerljivo z ostalimi desetletnimi obdobji. Na meteoroloških postajah Kredarica, Vojsko, Postojna, Ljubljana-Bežigrad, Celje in Šmartno pri Slovenj Gradcu je bila letna vodna bilanca po desetletjih vedno pozitivna. V Novem mestu in v Slovenskih Konjicah se neizrazita letna negativna vodna bilanca pojavlja v desetletju 2011–2020 in v obdobju 2021–2023. V Biljah in Mariboru je letna vodna negativna v desetletjih po letu 2000, v Murski Soboti v desetletjih po letu 1991, v Lendavi pa celotnem obravnavanem obdobju. V poletnih mesecih je stanje še slabše. Poletna vodna bilanca je v celotnem obdobju pozitivna le na meteoroloških postajah Kredarica in Vojsko, medtem ko je v celotnem obdobju negativna ali blizu ničle v Biljah, Novem mestu, Slovenskih Konjicah, Mariboru, Murski Soboti in Lendavi (Slika 7). Če je bila poletna vodna bilanca na Vojskem v 60. letih 20. stoletja še 386 mm, je v obdobju 2011–2020

padla na 238 mm. V Lendavi se negativna vodna bilanca pojavlja celo v pomladanskih mesecih, in sicer od 70. let 20. stoletja naprej, negativna jesenska vodna bilanca pa po letu 2000.

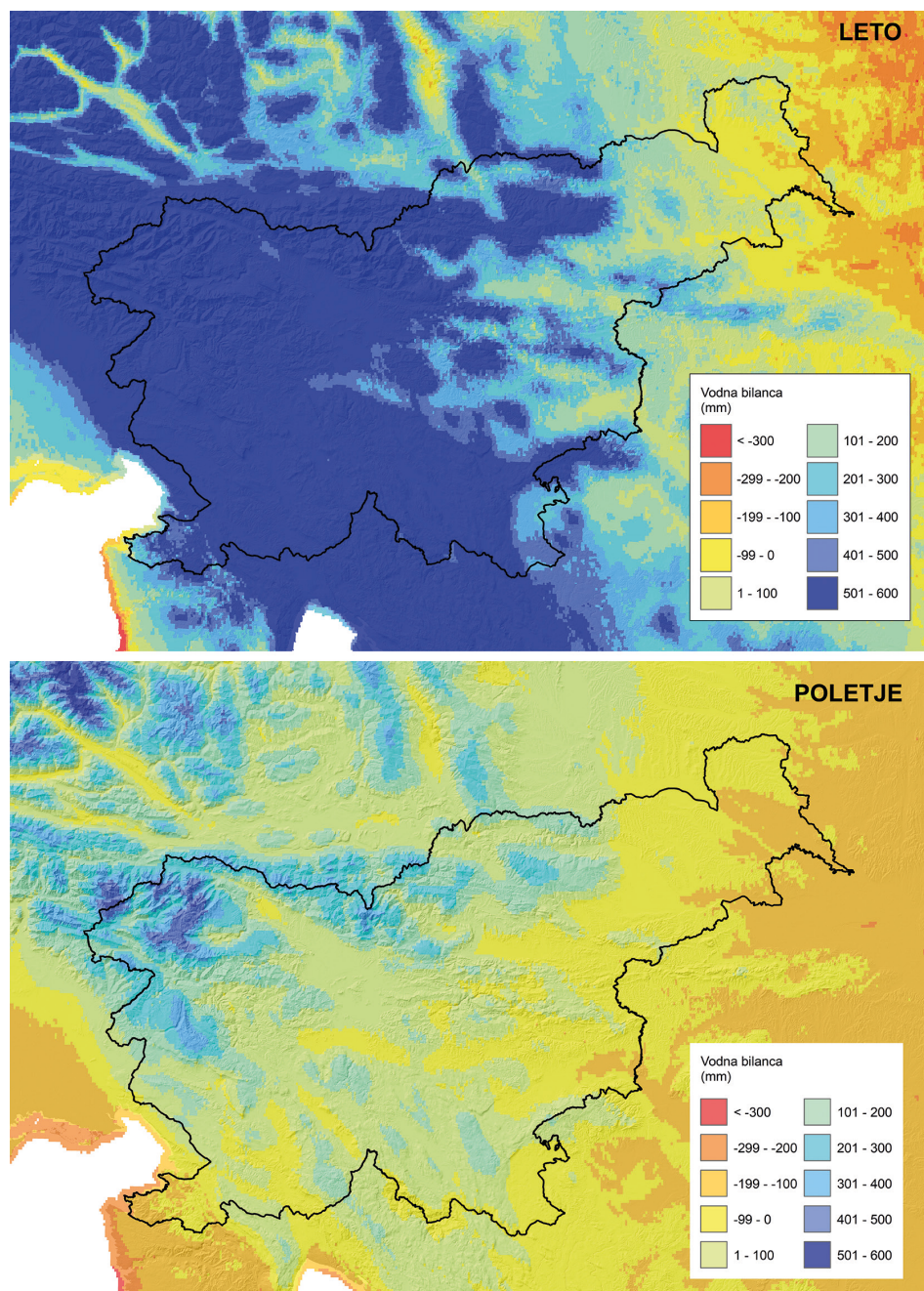


Slika 7: Poletna vodna bilanca v Sloveniji po desetletjih.

Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.

V dosedanji obravnavi smo stanje in procese spreminjanja vodne bilance prikazovali točkovno, na osnovi izbranih meteoroloških postaj v Sloveniji. Da bi natančneje prostorsko prikazali stanje vodne bilance, smo v analizo vključili tudi podatke iz baze georeferenciranih podatkov Chelsa Climate (Chelsa Climate, 2024), kot smo navedli v poglavju o metodologiji dela. Podatki prikazujejo povprečno vodno bilanco za leto in poletje. Prostorska analiza vodne bilance za Slovenijo pokaže, da se na letnem nivoju negativna vodna bilanca pojavlja na 4,5 % površja Slovenije. Gre za večji del Ravenskega in Dolinskega, Lendavske gorice, Spodnje Mursko polje, Središko polje in vzhodni del Ptujkega polja. V času poletja se negativna vodna bilanca pojavlja na 35,1 % površja Slovenije. Sem sodi celotna obpanonska severovzhodna Slovenija (območje vzhodno od Kozjaka in Pohorja), dolina Voglajne z vzhodnim in osrednjim delom Celjske kotline, vzhodni del Kozjanskega in celotno Posotelje, Krško-Brežiška kotlina, vzhodni del Krškega gričevja, Ljubljansko Barje, Ilirskobistriška kotlina, Pivka, Materijsko podolje in Koprsko primorje vse do Bržanije (Slika 8). Prikazani podatki seveda prikazujejo tridesetletno

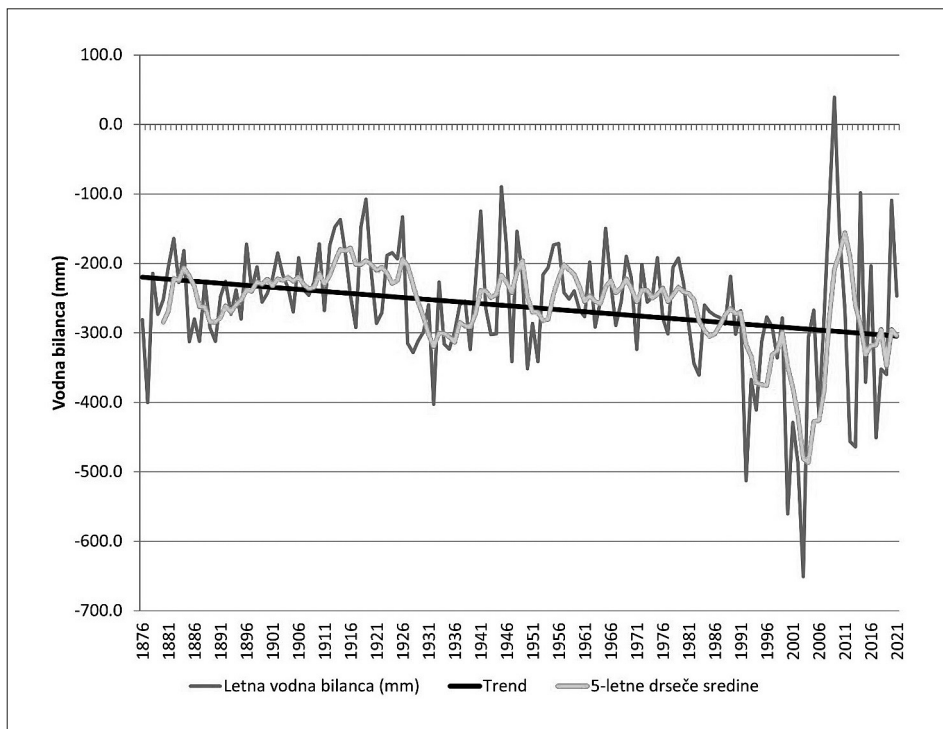
povprečje, v času intenzivnejših suš pa so območja z negativno vodno bilanci še večja.



Slika 8: Letna in poletna vodna bilanca v Sloveniji v obdobju 1981–2010.
Vir: Chelsa Climate, 2024; Lastni izračuni, 2024.

V bazi Chelsa Climate žal ni podatkov za obdobje po letu 2010, ko so se pri nas zlasti v poletnih mesecih pojavljale katastrofalne suše, a na osnovi zgoraj prikazanih trendov lahko sklepamo, da je današnje stanje še manj ugodno.

Pri interpretaciji stanja in trendov vodne bilance moramo zajeti celoten spekter vzrokov. Območje Panonske nižine sodi med tiste regije, ki imajo sicer največji deficit v vodni bilanci. Ta je v Evropi daleč najvišji v Sredozemlju (večina Španije in Grčije, jug Italije in Španije, širše območje Panonske nižine in območja ob Črnem morju). V tej luči torej vrednosti negativne vodne bilance v jugozahodni in severovzhodni Sloveniji ne presenečajo. Vodno bilanco pa je potrebno obravnavati tudi v časovni perspektivi. Predvsem zaradi pozitivnih trendov temperature zraka in posledično evapotranspiracije se deficit vlage s časom večja, širi pa se tudi časovno okno z negativno vodno bilanco, in sicer s poletnih na pomladanske in celo jesenske mesece. Če je v Lendavi v 70. letih 20. stoletja obdobje z negativno vodno bilanco v povprečju trajalo med majem in septembrom, se je v obdobju 2011–2020 razširilo na čas med marcem in oktobrom. Negativna vodna bilanca pa seveda ni nekaj novega; sušna poletja so poznali že v preteklosti. To dokazuje graf trenda poletne vodne bilance v Mariboru v obdobju 1876–2021.



Slika 9: Poletna vodna bilanca v Mariboru v obdobju 1876–2021.

Vir: Arhiv ARSO, 2024; Lastni izračuni, 2024.

Negativna vodna bilanca v poletnih mesecih je bila v Mariboru običajno stanje že ob koncu 19. stoletja, zaradi podnebnih sprememb pa se stanje le še slabša. Na Sliki 9 lahko opazimo še eno zanimivost: variacijski razmik vodne bilance se od 90. let 20. stoletja veča, kar pomeni, da poletna vodna bilanca bolj niha. To je posledica vse pogostejših ekstremnih dogodkov, ki so včasih celo nasprotujoči si: izraziti suši lahko sledi (pre)obilno namočeno obdobje. Tak primer smo imeli leta 2009, ko je bilo v Mariboru več obdobj z intenzivnimi padavinami. Tega leta je bilo v Mariboru kar pet dni, v katerih je 24-urna višina padavin presegala 50 mm (Maribor je v obdobju 1981–2010 letno prejel 893 mm padavin, v povprečju najbolj namočen mesec avgust pa 112 mm padavin). 4. avgusta 2009 je v Mariboru v 24 urah padlo 119 mm padavin (torej več kot v najbolj namočenem mesecu skupaj), dan kasneje pa 68 mm padavin. Veliko težav je tedaj povzročala kanalizacijska infrastruktura v mestu, ki ni bila načrtovana za tako intenzivne padavine. 4. avgusta 2023, ko smo v Sloveniji imeli zaradi obilnih padavin katastrofalne poplave, je v Mariboru v 24 urah padlo 66,2 mm padavin. Pojav negativne vodne bilance in pojava suš torej ne moremo obravnavati ločeno od ostalih ekstremnih vremenskih in podnebnih pojavov, pač pa ga moramo poskušati razumeti v svoji celovitosti. Vsekakor pa so vodne zaloge manj predvidljive kot v preteklosti.

ZAKLJUČEK

V članku smo analizirali stanje in trende meteorološke (klimatske) vodne bilance kot razlike med višino padavin in potencialno evapotranspiracijo v Sloveniji za obdobje 1961–2023. Rezultati kažejo, da trendi višine padavin niso izraziti, a vendarle nakazujejo rahlo padanje višine padavin: na devetih od dvanajstih analiziranih meteoroloških postaj so trendi višine padavin negativni. Zaradi višanja temperatur se na vseh meteoroloških postajah pojavlja izrazit pozitiven trend potencialne evapotranspiracije. Letni režim povprečne vodne bilance kaže, da se na večini meteoroloških postaj pojavlja vsaj v enem poletnem mesecu deficit vlage. Časovno okno z deficitom vlage se proti vzходу širi tudi na spomladanske in jesenske mesece: na meteoroloških postajah Murska Sobota in Lendava kar sedem mesecev beleži deficit vlage, v Mariboru in v Biljah pri Novi Gorici pa je takih mesecev šest. Na vseh meteoroloških postajah razen na Kredarici v obravnavanem obdobju beležimo izrazit negativni trend vodne bilance. Zelo povedni so tudi podatki o letni in poletni vodni bilanci po desetletjih. Povprečna desetletna poletna vodna bilanca je bila v celotnem obdobju pozitivna le na meteoroloških postajah Kredarica in Vojsko, medtem ko je v celotnem obdobju negativna ali blizu ničle v Biljah, Novem mestu, Slovenskih Konjicah, Mariboru, Murski Soboti in Lendavi.

Spekter posledic podnebnih sprememb je zelo širok. Neposredne posledice niso le v povezavi z višanjem temperatur, večanjem pogostosti ekstremnih dogodkov, kot so nalivi (in z njimi povezane poplave in zemeljski plazovi), pojav močnih vetrov in toče, pač pa spreminjajo tudi razmerje količino vlage, ki v nek sistem (pokrajino) vstopa v obliki padavin in jo zapusti v obliki izhlapevanja in transpiracije. Južna Evropa, na obrobju katere je tudi Slovenija, sodi v območje, kjer se v meteorološki vodni bilanci deficit vlage v splošnem povečuje. To se pri nas manifestira v pojavih meteoroloških, kmetijskih, hidroloških in socioekonomskih suš. Posredne posledice se torej dotikajo vsakega od nas na različne načine. Splošno prepričanje, da je Slovenija z vodnimi zalogami bogata država, sicer še vedno drži, vendar pa je temu atributu potrebno dodati še časovni vidik. Meteorološka vodna bilanca se spreminja v za nas neugodno smer. Antropogenega dela vzroka za spreminjanje podnebja – kot kaže naša izjemno slaba neodzivnost – čez noč ne bomo mogli zmanjšati ali celo odpraviti. Nujno bo potrebno z vodnimi viri, s katerimi razpolagamo, ravnati dosti bolj skrbno, in to ne le na deklarativni ravni. Zavedati se tudi moramo, da na Zemlji nismo edina vrsta in da s popolnoma nesprejemljivimi potezami, kot so preurejanje naravnih korit vodotokov ali njihovo onesnaževanje, preveč vplivamo ne le na količino, pač pa tudi kakovost vode v naravnih sistemih. S tem pa ne le slabšamo kvaliteto bivalnega okolja drugim rastlinskim in živalskim vrstam, pač pa si s takim ravnanjem hitro režemo vejo, na kateri sedimo.

LITERATURA

- Ahrens, C. D., Samson, P., (2024): *Extreme Weather & Climate*. Brooks/Cole. Belmont.
- Alahacoon, N., Edirisinghe, M., (2022): Novel Index for Hydrological Drought Monitoring Using Remote Sensing Approach: Standardized Water Surface Index (SWSI). *Remote Sensing*, 2022, 14, 5324. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14215324>
- Arhiv ARSO 2024.
- Bergant K. et al., (2004): *Spremembe podnebja in kmetijstvo v Sloveniji*, MOP, Ljubljana.
- Bonan, G., (2016): *Ecological Climatology. Concepts and Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Ceglar A., Kajfež Bogataj L., (2008): Obravnava meteorološke suše z različnimi indikatorji. *Acta agriculturae Slovenica*, 91 – 2. Biotehniška fakulteta. Ljubljana.
- Cegnar, T., (2013): Podnebne razmere v Sloveniji leta 2012. *Ujma*. Št. 27 (2013). Uprava RS za zaščito in reševanje Ministrstva za obrambo. Ljubljana.
- Chelsa Climate (https://envicloud.wsl.ch/#/?prefix=chelsa%2Fchelsa_V2%2FGLOBAL%2F). (10. 6. 2024)

European Climate Risk Assessment, (2024). European Environment Agency. Copenhagen. DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2800/8671471>

Ipavec T., Kajfež Bogataj L., (2008): Možni vplivi podnebnih sprememb na vodno bilanco tal v Sloveniji, *Acta agriculturae Slovenica*, 91 – 2. Biotehniška fakulteta. Ljubljana.

Krajnik M., Sušnik A., Gregorič G., Bokal S., (2015): Suša in Vodna direktiva, ARSO. Ljubljana.

Krogulec, E., Małecki, J., Porowska, D., Wojdalska, A., (2020): Assessment of Causes and Effects of Groundwater Level Change in an Urban Area (Warsaw, Poland). *Water*. 2020, 12, 3107. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12113107>

Mikulič Z., Andjelov M., Robič M., Trišč N., (2003): Nizka vodna stanja v aluvialnih vodonosnikih Slovenije, 14. Mišičev vodarski dan, VGB Drava, Maribor.

Mann, M., (2023): *Our Fragile Moment. How lessons from the Earth past can help us survive the climate crisis.* Scribe. Croydon.

Provenza, A., (2023): *History of Climate Change. From the Earth Origin to the Anthropocene.* Polity. Cambridge.

Statistične informacije 378/2004. Urad za statistiko RS, 2004.

Sušnik, A., Valher, A., (2013): Neugodni vplivi vremena na kmetijstvo leta 2012. *Ujma*. Št. 27 (2013). Uprava RS za zaščito in reševanje Ministrstva za obrambo. Ljubljana.

Sušnik A. et al., (2003): Ranljivost slovenskega kmetijstva in gozdarstva na podnebno spremenljivost in ocena predvidenega vpliva, ARSO, Ljubljana.

Vertačnik, G., Bertalančič, R., (2017): Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011. 3. Značilnosti podnebja v Sloveniji. ARSO. Ljubljana.

Žiberna, I., (2017): *Trendi vodne bilance v severovzhodni Sloveniji v obdobju 1961–2016.* Geografije Podravja. Univerzitetna založba. Univerza v Mariboru. Maribor.

Žiberna, I., (2021): *Vaje iz klimatogeografije.* Maribor: Filozofska fakulteta, 2021.

Water resources across Europe — confronting water stress: an updated assessment. European Environment Agency, 2021. DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2800/320975>

SPREMEMBE VODNE BILANCE V SLOVENIJI V OBDOBJU 1961–2024

Povzetek

Analizirali smo stanje in trende meteorološke (klimatološke) vodne bilance kot razlike med višino padavin in evapotranspiracijo za meteorološke postaje Kredarica, Vojsko, Bilje, Postojna, Ljubljana-Bežigrad, Novo mesto, Celje, Slovenske Konjice, Šmartno pri Slovenj Gradcu, Slovenske Konjice, Maribor, Murska Sobota in Lendava. Uporabili smo podatke za obdobje 1961–2023. Analizirali smo vzroke za trende vodne bilance in posledice. Predstavljene so tudi prostorske značilnosti razporeditve vodne bilance v Sloveniji na osnovi georeferenciranih rastrskih podatkov v bazi Chelsa Climate za obdobje 1981–2010.

Rezultati kažejo, da trendi višine padavin niso izraziti, a vendarle nakazujejo rahlo padanje višine padavin: na devetih od dvanajstih analiziranih meteoroloških postaj so trendi višine padavin negativni. Zaradi višanja temperatur se na vseh meteoroloških postajah pojavlja

izrazit pozitivni trend potencialne evapotranspiracije. Letni režim povprečne vodne bilance kaže, da se na večini meteoroloških postaj pojavlja vsaj v enem poletnem mesecu deficit vlage. Časovno okno z deficitom vlage se proti vzhodu širi tudi na spomladanske in jesenske mesece: na meteoroloških postajah Murska Sobota in Lendava kar sedem mesecev beleži deficit vlage, v Mariboru in v Biljah pri Novi Gorici pa je takih mesecev šest. Na vseh meteoroloških postajah razen na Kredarici v obravnavanem obdobju beležimo izrazit negativni trend vodne bilance. Povprečna desetletna poletna vodna bilanca je bila v celotnem obdobju pozitivna le na meteoroloških postajah Kredarica in Vojsko, medtem ko je v celotnem obdobju negativna ali blizu ničle v Biljah, Novem mestu, Slovenskih Konjicah, Mariboru, Murski Soboti in Lendavi. Prostorska analiza vodne bilance za Slovenijo kaže, da se na letnem nivoju negativna vodna bilanca pojavlja na 4,5 % površja Slovenije. Gre za večji del Ravenskega in Dolinskega, Lendavske gorice, Spodnje Mursko polje, Središko polje in vzhodni del Ptujkega polja. V času poletja se negativna vodna bilanca pojavlja na 35,1 % površja Slovenije. Sem sodi celotna obpanonska severovzhodna Slovenija (območje vzhodno od Kozjaka in Pohorja), dolina Voglajne z vzhodnim in osrednjim delom Celjske kotline, vzhodni del Kozjanskega in celotno Posotelje, Krško-Brežiška kotlina, vzhodni del Krškega gričevja, Ljubljansko Barje, Ilirskobistriška kotlina, Pivka, Materijsko podolje in Koprsko primorje vse do Bržanije.

CHANGES IN THE WATER BALANCE IN SLOVENIA BETWEEN 1961 AND 2024

Summary

We conducted an analysis of the status and trends in the meteorological (climatological) water balance, defined as the difference between precipitation and evapotranspiration, for various meteorological stations including Kredarica, Vojsko, Bilje, Postojna, Ljubljana-Bežigrad, Novo Mesto, Celje, Slovenske Konjice, Šmartno pri Slovenj Gradcu, Maribor, Murska Sobota, and Lendava. Our study utilized data spanning from 1961 to 2023. We examined the factors influencing water balance trends as well as their implications. Furthermore, we present an analysis of the spatial characteristics of water balance distribution in Slovenia, utilizing georeferenced raster data obtained from the Chelsa Climate database covering the period from 1981 to 2010.

The results indicate that the trends in precipitation height are subtle; however, there is evidence of a slight decrease, as nine of the twelve meteorological stations analyzed exhibit negative trends in this regard. Conversely, all meteorological stations demonstrate a significant positive trend in potential evapotranspiration, attributable to increasing temperatures. The annual average water balance regime reveals that a majority of the meteorological stations experience a moisture deficit during at least one month of the summer. This moisture deficit extends eastward into the spring and autumn months; for instance, the Murska Sobota and Lendava meteorological stations report a total of seven months of moisture deficit, while Maribor and Bilje near Nova Gorica experience six months of such deficits. Notably, all meteorological stations, with the exception of Kredarica, present a significant negative trend in the water balance throughout the analyzed period. The ten-year average summer water balance is positive solely at the Kredarica and Vojsko meteorological stations; in contrast, it is negative or near zero at Bilje, Novo mesto, Slovenske Konjice, Maribor, Murska Sobota, and Lendava during the entire observation period. A spatial assessment of the water balance across Slovenia indicates that a negative water balance occurs over 4.5% of the geographical area of Slovenia annually. This

encompasses regions such as most of Ravensko and Dolinsko, the Lendava gorice, Spodnje Mursko polje, Sredisko polje, and the eastern part of Ptujsko polje. During the summer months, a negative water balance is prevalent over 35.1% of Slovenia's surface area. This condition is observed in the entirety of northeastern Slovenia (the region east of Kozjak and Pohorje), the Voglajna valley along with the eastern and central sections of the Celje basin, the eastern part of the Kozjansko region, and the entirety of the Posotelje region. Additionally, areas affected include the Krško-Brežiška basin, the eastern segment of the Krško hills, the Ljubljana Marshes, the Ilirska Bistrica basin, the Pivka region, the Materija field, and the Koper coastal region extending to Bržanije.

VERÄNDERUNGEN DER WASSERBILANZ IN SLOWENIEN ZWISCHEN 1961 UND 2024

Zusammenfassung

Wir haben den Stand und die Trends der meteorologischen (klimatologischen) Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration für die meteorologischen Stationen Kredarica, Vojsko, Bilje, Postojna, Ljubljana-Bežigrad, Novo mesto, Celje, Slovenske Konjice, Šmartno pri Slovenj Gradcu, Slovenske Konjice, Maribor, Murska Sobota und Lendava analysiert. Dazu haben wir Daten für den Zeitraum 1961–2023 verwendet und die Ursachen und Folgen der Wasserbilanztrends analysiert. Außerdem werden die räumlichen Merkmale der Wasserbilanzverteilung in Slowenien auf der Grundlage von georeferenzierten Rasterdaten in der Chelsa Climate Database für den Zeitraum 1981–2010 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Trends bei der Niederschlagshöhe nicht ausgeprägt sind, aber sie deuten auf einen leichten Rückgang der Niederschlagshöhe hin: Neun der zwölf analysierten meteorologischen Stationen weisen negative Trends bei der Niederschlagshöhe auf. Alle meteorologischen Stationen zeigen einen stark positiven Trend bei der potenziellen Evapotranspiration aufgrund der steigenden Temperaturen. Die Wasserbilanz im Jahresmittel zeigt, dass die meisten meteorologischen Stationen in mindestens einem Sommermonat ein Feuchtigkeitsdefizit aufweisen. Das Feuchtigkeitsdefizit-Fenster erstreckt sich nach Osten in die Frühlings- und Herbstmonate: Die meteorologischen Stationen Murska Sobota und Lendava weisen sieben Monate Feuchtigkeitsdefizit auf, während Maribor und Bilje bei Nova Gorica sechs solche Monate aufweisen. Alle meteorologischen Stationen mit Ausnahme von Kredarica weisen einen deutlich negativen Trend in der Wasserbilanz während des Berichtszeitraums auf. Der 10-Jahres-Durchschnitt der sommerlichen Wasserbilanz war nur an den meteorologischen Stationen Kredarica und Vojsko positiv, während sie an Bilje, Novo mesto, Slovenske Konjice, Maribor, Murska Sobota und Lendava während des gesamten Zeitraums negativ oder nahe Null war. Eine räumliche Analyse der Wasserbilanz für Slowenien zeigt, dass auf Jahresbasis auf 4,5 % der Fläche Sloweniens eine negative Wasserbilanz zu verzeichnen ist. Dazu gehören der größte Teil von Ravensko und Dolinsko, die Lendava gorice, Spodnje Mursko polje, Sredisko polje und der östliche Teil von Ptujsko polje. Im Sommer wird auf 35,1 % der Fläche Sloweniens eine negative Wasserbilanz verzeichnet. Dazu gehören der gesamte Nordosten Sloweniens (das Gebiet östlich von Kozjak und Pohorje), das Voglajna-Tal mit dem östlichen und mittleren Teil des Beckens von Celje, der östliche Teil der Region Kozjansko und die gesamte Region Posotelje, das Gebiet Krško-Brežiška, der östliche Teil des Krško-Gebirges, das Sumpfbereich von Ljubljana, das Becken von Ilirska Bistrica, die Region Pivka, die Tallandschaft von Materija und die Küstenregion von Koper bis nach Bržanije.