

3 Vodna bilanca Kozjanskega

Peter Frantar, Mišo Andjelov, Florjana Ulaga, Veronika Strmšek

3.1 Uvod

Voda na Zemlji je v kroženju, v katerem spreminja svoja fizikalna stanja – od tekečega, plinastega do trdnega. Vodni krog je ena od najpomembnejših ekosistemskih storitev okolja, ki zagotavlja količinsko in kakovostno obnavljanje vodnih virov (Frantar in sod. 2021).

Slovenija leži na stiku štirih naravnogeografskih regij (Alp, Panonske nižine, Dinaridov in Sredozemlja). Posledica je naravnogeografska pestrost, kar se odraža tudi na vodni bilanci. Vsaka regija v Sloveniji ima tako regionalne posebnosti vodnega kroga, ki se odražajo prek podnebnih in pokrajinskih dejavnikov na samih značilnostih vodne bilance. Za trajnostno rabo vodnih virov v regiji je zato v prvi vrsti treba poznati regionalne razmere, saj so povprečne razmere v državi lahko precej drugačne. Pri regionalnih razmerah pa moramo poleg dolgoletne vodne bilance poznati tudi sezonske vzorce. V Sloveniji imamo namreč velike razlike v vodnih količinah v prostoru in času (Kolbezen in Pristov 1998; Frantar 2008; Frantar 2009; Frantar in sod. 2021).

Slika 3.1: Kroženje vode na Zemlji (USGS 2021).



3.2 Vodna bilanca

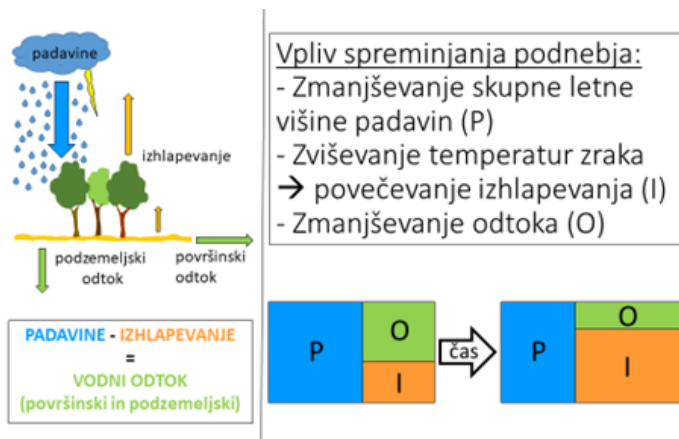
Vodna bilanca je razmerje med dotokom in odtokom vode na določenem območju v določenem času, izraženo v odstotkih ali v milimetrih (Bat in sod. 2005). Enota izraža količino vode v litrih, ki pade na kvadratni meter v izbranem časovnem intervalu (letno, sezonsko, dnevno ...). Ocena količin vodne bilance je vedno poenostavljen prikaz dejanskih razmer vodnega kroga, smiselna pa je, če zajame bistvene bilančne komponente in pravilno poda razmerja med njimi (Ulaga 2003; Frantar 2008).

Osnovna enačba vodne bilance temelji na kroženju vode med ozračjem in površjem Zemlje (Van Abs in sod. 2000; Kolbezen in Pristov 1998; Frantar 2008; Frantar 2009):

padavine (P) = odtok (Q) + izhlapevanje (I) + sprememba zalog (dS)

Na glavne komponente vodnega kroga najbolj vplivata količina padavin in temperatura zraka (Frantar in sod. 2021). V modelskem sistemu so padavine vnos, iznos pa so izhlapevanje (v največji meri odvisno od količine vode v tleh in temperature zraka), vodni odtok (površinski ali podzemni) ter sprememba zaloge vode. Na vse tri komponente vodne bilance, odtok, izhlapevanje in spremembo zalog, pa vplivajo tudi drugi dejavniki okolja, kot so relief, kamninska podlaga, prsti, rastlinstvo, raba zemljišč ter raba vode. Za izdelavo klasične vodne bilance izbranega območja potrebujemo podatke vodomernih postaj, zato se ocenjevanje komponent nanaša na vodozbirno območje ali hidrometrično zaledje vodomerne postaje (Frantar in sod. 2021). Modelsko pa lahko izvedemo oceno vodne bilance na kateremkoli območju. Raziskave kažejo, da se komponente vodne bilance v zadnjih desetletjih izraziteje spreminjajo, še posebej opazne pa so sezonske spremembe, kar avtorji v največji meri povezujejo z antropogenimi spremembami podnebja ter spremembami pokrovnosti tal v porečjih. Poleg zmanjševanja skupne letne višine padavin, ki je za porečja v Sloveniji različno, se zmanjšujejo predvsem snežne padavine in zadržek vode v snežni odeji. Za večino porečij je značilno tudi povečano izhlapevanje, ki je posledica porasta temperatur. Rezultat opisanih sprememb je manjši vodni odtok in manj razpoložljive vode za različne namene (Kovačič 2016; Brečko in Kovačič 2022; Strgar in Frantar 2019; Frantar in sod. 2021).

Slika 3.2: Spreminjanje vodnega odtoka

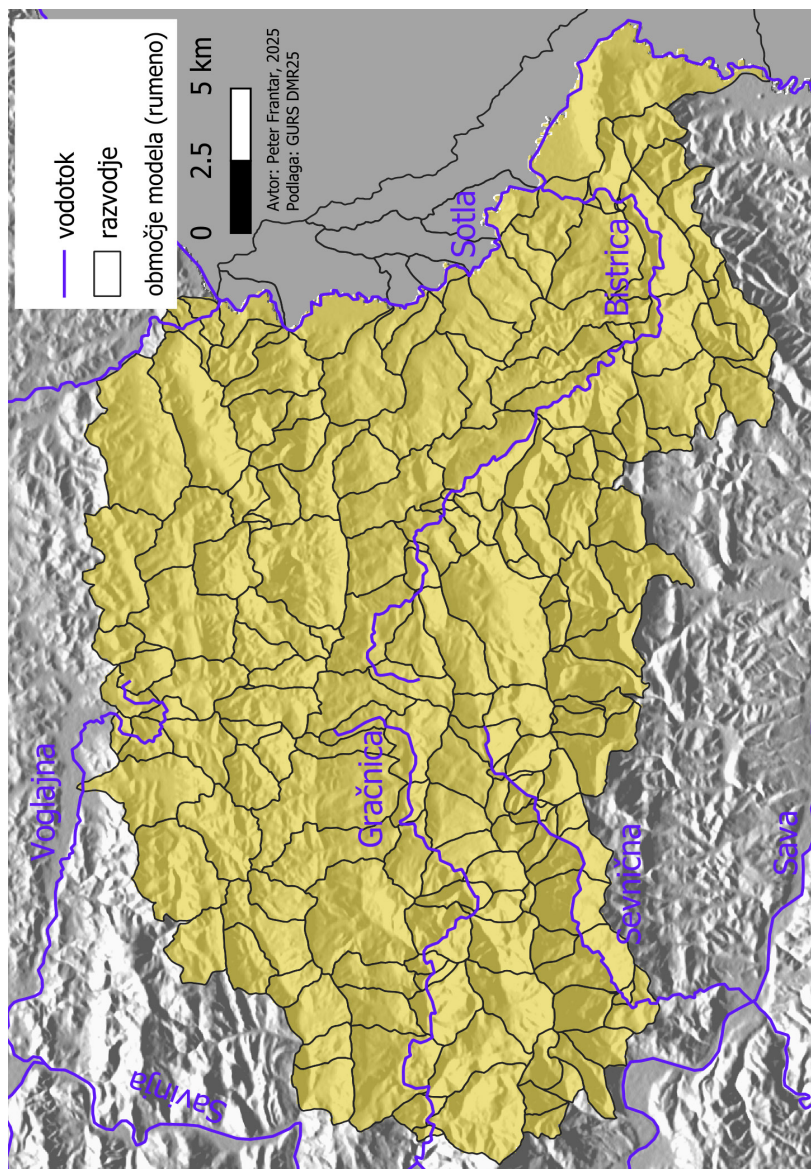


(Vir: Frantar, 2021, po Kovačič in Brečko Grubar 2019).

3.3 Opredelitev območja vodne bilance Kozjanskega

Omejitev območja Kozjanskega je relativno težka naloga, saj meje območja niso opredeljene v nobeni regionalizaciji Slovenije. Območje smo tako omejili z razvodnicami, ki so vezane na srednji del slovenskega porečja Sotle, porečja Bistrice, Sevnice in Gračnice ter povirne predele porečja Voglajne. Zajeli smo 531,5 km² veliko območje, omejeno z razvodnicami. Območje raziskave tako sega praktično od Savinje na zahodu, na jugu je meja večinoma vezana na južne predele ob grebenih Kozjanskega, na vzhodu smo območje omejili s Sotlo, na severu pa je meja južno od Voglajne.

Slika 3.3: Razvodnja na območju Kozjanskega, ki določajo območje modeliranja vodne bilance z modelom mGROWA-SI



(Vir: Frantar, 2024).

3.4 Model vodne bilance mGROWA-SI

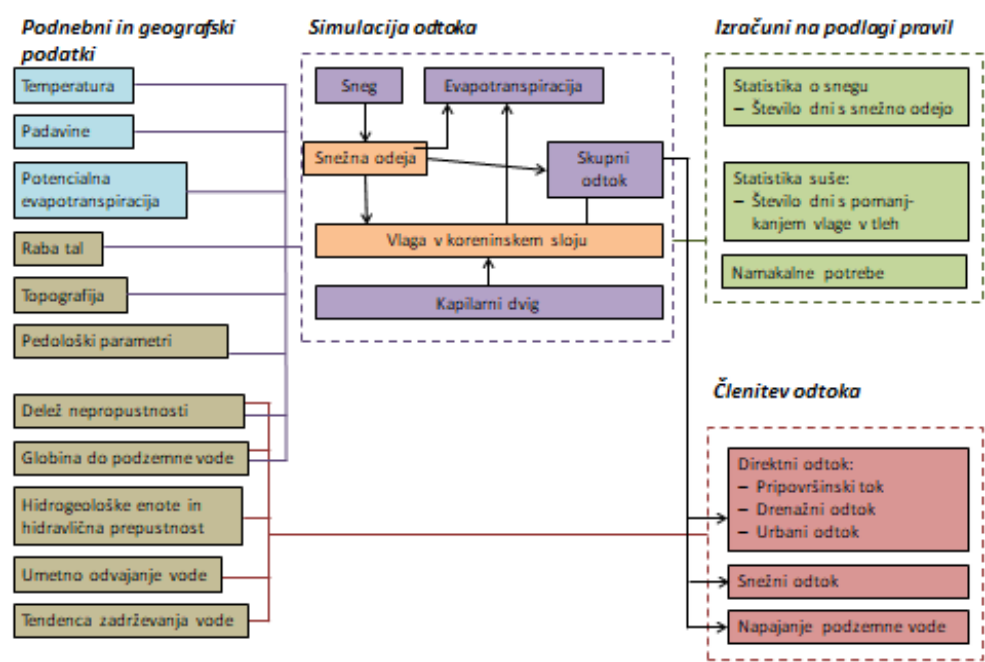
Model mGROWA-SI je determinističen rastrski model za modeliranje vodne bilance. Model deluje na mrežni osnovi – rastru, kjer v vsaki rastrski celici modela poteka modeliranje komponent vodne bilance prek različnih »modulov« (Herrmann in sod. 2013; Herrmann in sod. 2015; Frantar in sod. 2017; Frantar in sod. 2018).

Modeliranje vodnobilančnih komponent modela mGROWA-SI v Sloveniji poteka v 100-m rastrskih celicah. V modelu se na podlagi fizikalno podprtih enačb simulirajo poenostavljeni hidrološki procesi. Vhodne podatke za model lahko razvrstimo v tri kategorije. Geografski vhodni podatki za model so: raba zemljišč, topografija, geološka podlaga, pedohidrološke značilnosti, hidrogeologija, globina do podzemne vode, drenaža, zastajanje vode ... Ti podatki tvorijo osnovo modela, ki opredeljuje součinkovanje teh komponent na modelski tok vode med različnimi deli vodnega kroga. Dinamične sestavine predstavljajo klimatološki vhodni podatki: padavine in potencialno izhlapevanje ter meteorološki podatki s postaj za simulacijo snežne odeje, padavin, izhlapevanja. Tretja kategorija so podatki za potek najrazličnejših funkcij modela (koeficienti rastlin, koeficienti pokrovnosti idr.) (Frantar in sod. 2021).

Modeliranje vodne bilance poteka na osnovi omenjenih podatkov in bilančnih procesov v vsaki celici. Procesni so razdeljeni na ključna področja (slika 3.4). Voda v prsti se izračunava po nemškem modelu vodne bilance v prsti BOWAB. To je enodimenzionalni model, ki simulira vodo v prsti, po 30-cm slojih pedološkega horizonta. Vsak sloj predstavlja del profila prsti ter deluje na osnovi hidravličnih in pedoloških parametrov, ki so vključeni v model. Rezultat tega procesa je skupni odtok. Skupni odtok se v procesu separacije odtoka v grobem razdeli na površinski odtok in napajanje podzemne vode – glavni komponenti skupnega odtoka. Količina napajanja podzemne vode se ocenjuje glede na različne metodologije analize baznega odtoka (Herrmann in sod. 2015; Andjelov in sod. 2016). Na osnovi modela BOWAB in podatkov o pokrovnosti tal se modelira tudi dejansko izhlapevanje ter posledično korigira skupni odtok. Ocena dejanskega izhlapevanja se izdelava za površine z rastlinsko odejo, posebne analize pa se izvedejo za območja urbanih, snežnih, vodnih idr. površin. V okviru projekta vzpostavitve modela mGROWA-SI smo izdelali tudi poseben modul za simulacijo snežne odeje. Verifikacija glavnih hidroloških parametrov modela je bila izvedena z analizo primerjave merjenih in modeliranih obdobjnih vrednosti za odtok, napajanje podzemne vode in trajanje snežne odeje (Herrmann in sod. 2015; Frantar in sod. 2018; Frantar in sod. 2021).

Model deluje v dnevni časovni ločljivosti, izhodni podatki pa so v dnevni ali mesečni časovni skali. Zaradi tega je mogoče opravljati sezonske analize vodnobilančnih komponent za celotno območje Slovenije. Model mGROWA-SI omogoča tudi analize podnebnih sprememb, ki pa jih v tem poglavju nismo obravnavali.

Slika 3.4: Prikaz glavnih povezav in izračunov modela mGROWA-SI.



Ocena vodne bilance Kozjanskega temelji na podatkih iz obdobja 1971–2023, vključenih v model (preglednica 3.1). Uporabljen je bil zagon modela mGROWA-SI r165v2 (ARSO 2024). Opravili smo analizo izračunanih statističnih vrednostih za območje Kozjanskega, ki smo ga opredelili v predhodnem poglavju. Analiza je bila opravljena v programu r, podatki pa obdelani v MS Excelu. Izvedli smo oceno vodnobilančnih elementov, ki so navedeni v preglednici 3.2.

Preglednica 3.1: Glavni vodni podatki v modelu mGROWA-SI.

podatkovna baza in parameter	podatkovni vir
pokrovnost tal	Corine Land Cover Slovenia 2006
digitalni model terena	Digitalni model reliefa Slovenije – GURS
prsti	Profili tal – baza BF UL Digitalna karta tal BF UL
osuševalna območja	Karta vodotokov 1 : 25.000
hidravlična prevodnost	Hidrogeološka karta Slovenije, GeoZS
podnebni podatki	Agencija RS za okolje
hidrološki podatki	Agencija RS za okolje
meje vodnih teles površinske in podzemne vode, razvodnice	Agencija RS za okolje

(Vir: Frantar in sod. 2018a).

Preglednica 3.2: Komponente vodne bilance in oznake modela mGROWA-SI, uporabljene pri analizi vodne bilance Kozjanskega.

Kratika mGROWA-SI	komponenta vodne bilance in enota
P	padavine v mm
ETA	dejansko izhlapevanje v mm
NSWE	količina vode v snežnih padavinah v mm
QN	skupni odtok v mm
QRN	napajanje podzemne vode v mm

Vodnobilančne komponente smo agregirali na hidrološko leto (od novembra preteklega leta do oktobra aktualnega leta), agregacije po sezonah pa pri zimi vključujejo december preteklega leta. Tako je npr. pri zimi 1972 všteti december 1971, zato je obdobje sezonskih podatkov po zimi krajše za eno leto, saj manjka prva zima leta 1971. Po sezonah smo izvedli tudi analizo trendov obravnavanih komponent z enostavnim regresijskim Pearsonovim koeficientom korelacije in testom za statistično značilnost trenda z vrednostjo stopnje zaupanja nad 95 %. Obdobna povprečja smo izračunavali za aktualno referenčno obdobje, 1991–2020 (WMO 2024), trende pa glede na celoten obravnavani podatkovni niz, 1971–2023.

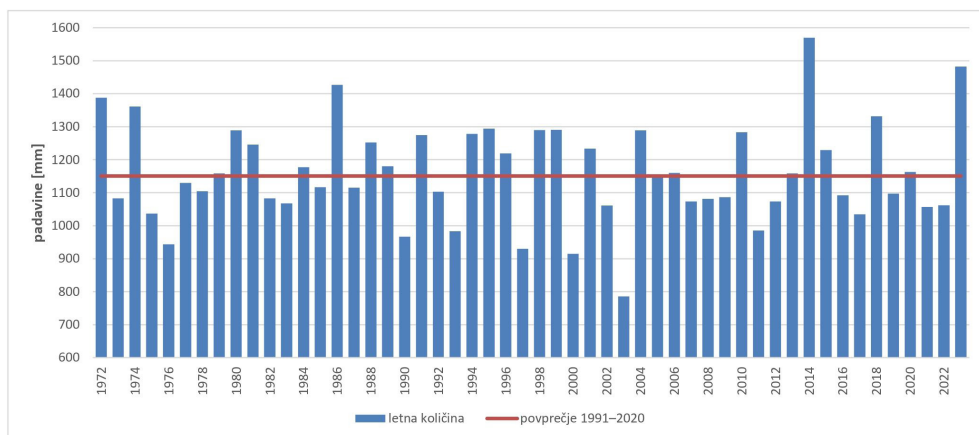
3.5 Komponente vodne bilance na območju Kozjanskega v referenčnem obdobju 1991–2020 in primerjava s povprečjem za Slovenijo

Preglednica 3.3: Srednje letne vrednosti glavnih komponent vodne bilance (v mm) za Slovenijo in Kozjansko v obdobju 1991–2020 (ARSO 2024).

območje	ETA	NSWE	P	QN	QRN
Slovenija	708	179	1453	745	294
Kozjansko	709	128	1151	442	121

Povprečna višina padavin (P) na območju Kozjanskega v obdobju 1991–2020 je znašala 1151 mm, kar je približno 300 mm manj od slovenskega povprečja. Ta razlika se izraža v nižjih vrednostih skupnega odtoka (442 mm) in napajanja podzemne vode (121 mm), medtem ko je dejansko izhlapevanje (709 mm) skoraj identično državnemu povprečju. Količina vode v snežnih padavinah na območju Kozjanskega (128 mm) je bistveno manjša od povprečja za Slovenijo (179 mm). Kozjansko lahko bilančno torej opredelimo kot manj namočeno območje v primerjavi s povprečjem v Sloveniji, kar pomeni, da lahko pričakujemo večji vpliv podnebnih sprememb na vodni krog. Trend letne količine padavin v obravnavanem obdobju ni značilen, količine pa se gibajo med 800 (hidrološko leto 2003) in 1600 mm (hidrološko leto 2014) (slika 3.5). Na sliki 6 se dobro opazijo sušnejša in bolj namočena hidrološka leta, med katerimi kot najbolj sušno izstopa leto 2003.

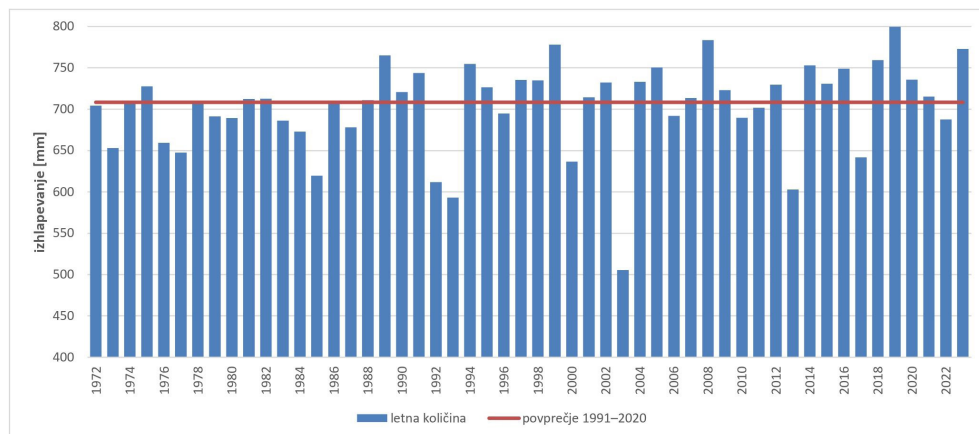
Slika 3.5: Letna količina padavin na Kozjanskem v obdobju 1972–2023 in povprečje obdobja 1991–2020



Vir: ARSO 2024.

Dejansko letno izhlapevanje (ETA), izračunano z modelom mGROWA-SI, se je gibalo v razponu med 500 in 800 mm na leto (slika 3.6). Linearni trend je sicer rahlo naraščajoč, ni pa statistično značilen (zanesljivost 92 %, $p = 0,08$). Povprečne vrednosti izhlapevanja so skladne z regionalnimi značilnostmi vegetacije in pokrovnosti tal. V sušnih letih je dejanskega izhlapevanja precej manj od potencialnega, saj v tleh ni na voljo dovolj vode za somatske funkcije rastlin. Kljub temu se po letu 1990 že kaže, da imamo veliko več hidroloških let z izhlapevanjem, večjim od referenčnega povprečja.

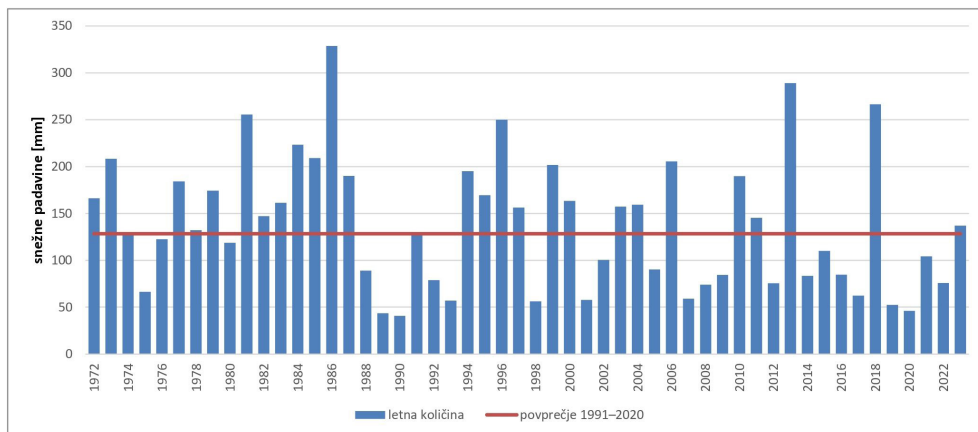
Slika 3.6: Letne višine izhlapevanja na Kozjanskem v obdobju 1972–2023 in povprečje obdobja 1991–2020.



Vir: ARSO 2024.

Količina vode v snežnih padavinah (NSWE), ki predstavlja pomemben sezonski za-držek vode, je na Kozjanskem v povprečju 128 mm na leto, kar je pod slovenskim povprečjem, ki je 179 mm. Letne vrednosti na Kozjanskem nihajo med okrog 40 in 330 mm (slika 3.7). Trend zmanjševanja količine snežnih padavin je prisoten, vendar ni statistično značilen (zanesljivost 93 %, $p = 0,072$), se pa po po osemdesetih letih prejšnjega stoletja kaže vedno več let s podpovprečno količino snežnih padavin.

Slika 3.7: Letne višine vode v snežnih padavinah na Kozjanskem v obdobju 1972–2023 in povprečje obdobja 1991–2020.

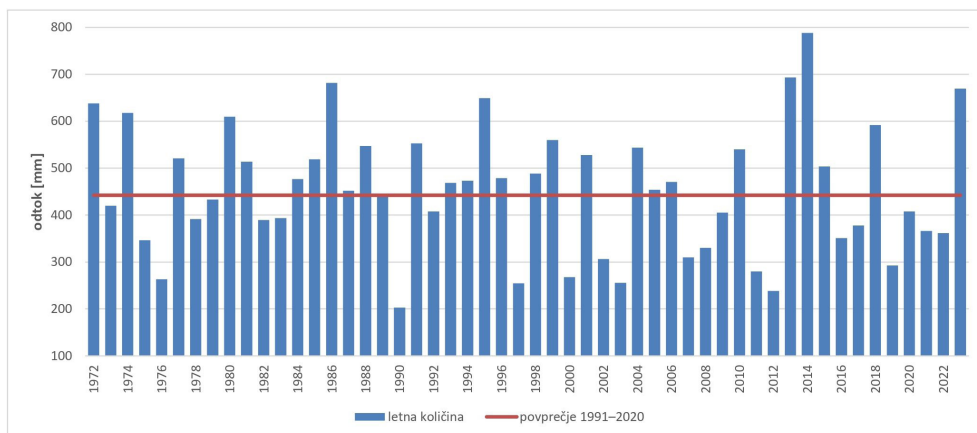


Vir: ARSO 2024.

Skupni odtok (QN) na Kozjanskem odraža precej nižje vrednosti v primerjavi s Slovenijo, kar je v prvi vrsti posledica manjše količine padavin in toplejše poletne sezone. Letna količina odtoka v referenčnem obdobju je s 442 mm skoraj pol manjša, kot je povprečno v Sloveniji (745 mm). Letne vrednosti skupnega odtoka v hidroloških letih se gibljejo med dobrih 200 in 800 mm (slika 3.8). Trend je rahlo padajoč in ni statistično značilen. Po letu 1990 pa imamo več podpovprečnih let in tudi nekaj več izredno namočenih.

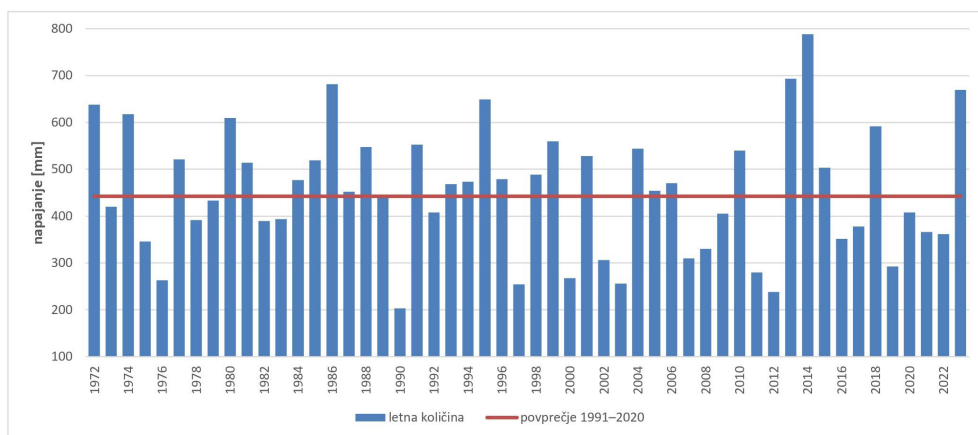
Napajanje podzemne vode (QRN), ključno za trajno oskrbo z vodo (tudi pitno), na Kozjanskem znaša povprečno 121 mm na leto, kar je več kot pol manj od državnega povprečja z 294 mm. Tudi tukaj so trendi negativni, ne kažejo pa statistične značilnosti. Podobno kot pri odtoku imamo v zadnjem obdobju več sušnih let z manj napajanja in tudi nekaj močnejše nadpovprečno namočenih let (npr. 2014, 2023) (slika 3.9).

Slika 3.8: Letne višine skupnega odtoka na Kozjanskem v obdobju 1972–2023 in povprečje obdobja 1991–2020.



Vir: ARSO 2024.

Slika 3.9: Letne višine napajanja podzemne vode na Kozjanskem v obdobju 1972–2023 in povprečje obdobja 1991–2020



Vir: ARSO 2024.

Skupni pregled kaže, da se komponente vodne bilance na območju Kozjanskega v obravnavanem obdobju niso bistveno spreminjale. Vse imajo negativne linearne trende, ki pa so neznačilni. Povsod pa se povečuje število sušnih hidroloških let po letu 1990, po tem letu je tudi več izredno namočenih let.

3.6 Sezonski pregled komponent vodne bilance na Kozjanskem

Z namenom pregleda sezonskih količin vode smo izvedli analizo vodnobilančnih komponent po sezonah. Izvedli smo agregacijo komponent vodne bilance za celotno območje Kozjanskega po letih ter primerjavo z referenčnim obdobjem 1991–2020 (WMO 2024).

3.6.1 Pomlad

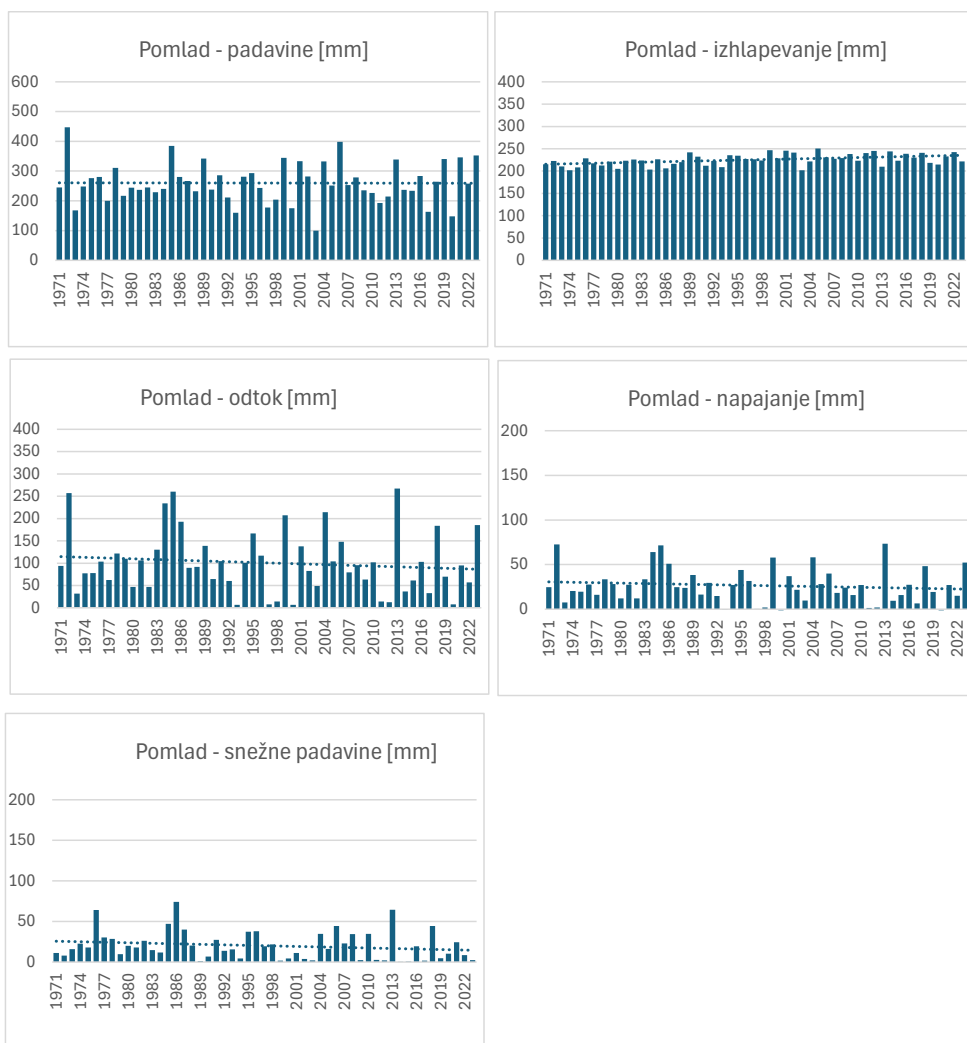
Pomlad je obdobje intenzivne rasti vegetacije in taljenja snega. Na Kozjanskem povprečna količina padavin v pomladanskem obdobju znaša 249 mm (v Sloveniji 312 mm), medtem ko povprečno dejansko izhlapevanje dosega 229 mm (v Sloveniji 219 mm). Količina vode v snegu spomladi je relativno majhna, povprečno 18 mm na Kozjanskem in 34 mm v Sloveniji. Skupni odtok za pomlad je na Kozjanskem 89 mm, v Sloveniji pa 176 mm. Napajanje podzemne vode znaša 23 mm na Kozjanskem, v Sloveniji pa 67 mm. Povprečne vrednosti veljajo za obdobje 1991–2020.

Vse komponente vodne bilance izkazujejo negativne trende, izjema je dejansko izhlapevanje, ki rahlo raste. Vsi linearni trendi razen izhlapevanja ($p = 0,005$) pa so statistično neznačilni. Kljub temu se povečuje število manj vodnatih let po letu 1990, opaznejša pa je manjša količina vode v snegu.

Preglednica 3.4: Komponente vodne bilance na Kozjanskem – pomlad (v mm) (ARSO 2024).

pomlad	Kozjansko			Slovenija		
[mm]	povprečje	min	max	povprečje	min	max
padavine	249	99	447	312	148	528
izhlapevanje	229	202	251	219	181	243
voda v snegu	18	0	74	34	8	101
skupni odtok	89	6	267	176	31	432
napajanje	23	0	73	67	9	170

Slika 3.10: Količine vodnobilančnih komponent (v mm) spomladi na Kozjanskem.



Vir: ARSO 2024.

Opomba: Črtkana črta je linearni trend, prikazan ne glede na statistično značilnost.

3.6.2 Poletje

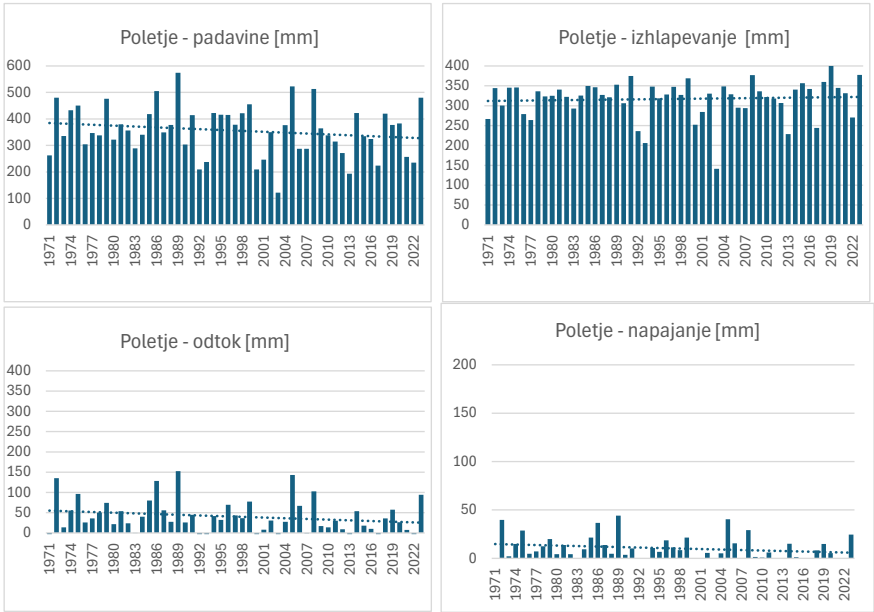
Poletje je čas največjega izhlapevanja. Povprečno dejansko izhlapevanje znaša 314 mm, kar je najvišja sezonska vrednost. Povprečna količina padavin na Kozjanskem znaša 342 mm (Slovenija 385 mm), skupni odtok pa je samo 32 mm (v Sloveniji 75 mm), saj velik del vode izhlapi. Napajanje podzemne vode je v povprečju majhno, le 5 mm (Slovenija 25 mm). Povprečne vrednosti veljajo za obdobje 1991–2020.

Vpliv snega je poleti zanemarljiv, vse druge komponente vodne bilance pa izkazujejo negativne trende, izjema je dejansko izhlapevanje, ki narašča. Vsi linearni trendi so statistično neznačilni, je pa opazno, da se povečuje število manj vodnatih let po letu 1990. Negativni trend napajanja podzemne vode poleti je 92-% značilen (ne pa statistično značilen pri $p = 0,05$, ki smo ga izbrali v osnovi).

Preglednica 3.5: Komponente vodne bilance na Kozjanskem – poletje (v mm) (ARSO 2024).

poletje	Kozjansko			Slovenija		
[mm]	povprečje	min	max	povprečje	min	max
padavine	342	122	574	385	228	631
izhlapevanje	314	141	402	323	237	380
voda v snegu	0	0	0	0	0	2
skupni odtok	32	0	152	75	0	215
napajanje	5	0	44	25	0	81

Slika 3.11: Količine vodnobilančnih komponent (v mm) poleti na Kozjanskem območju.



Vir: ARSO 2024.

Opomba: Črtkana črta je linearni trend, prikazan ne glede na statistično značilnost.

3.6.3 Jesen

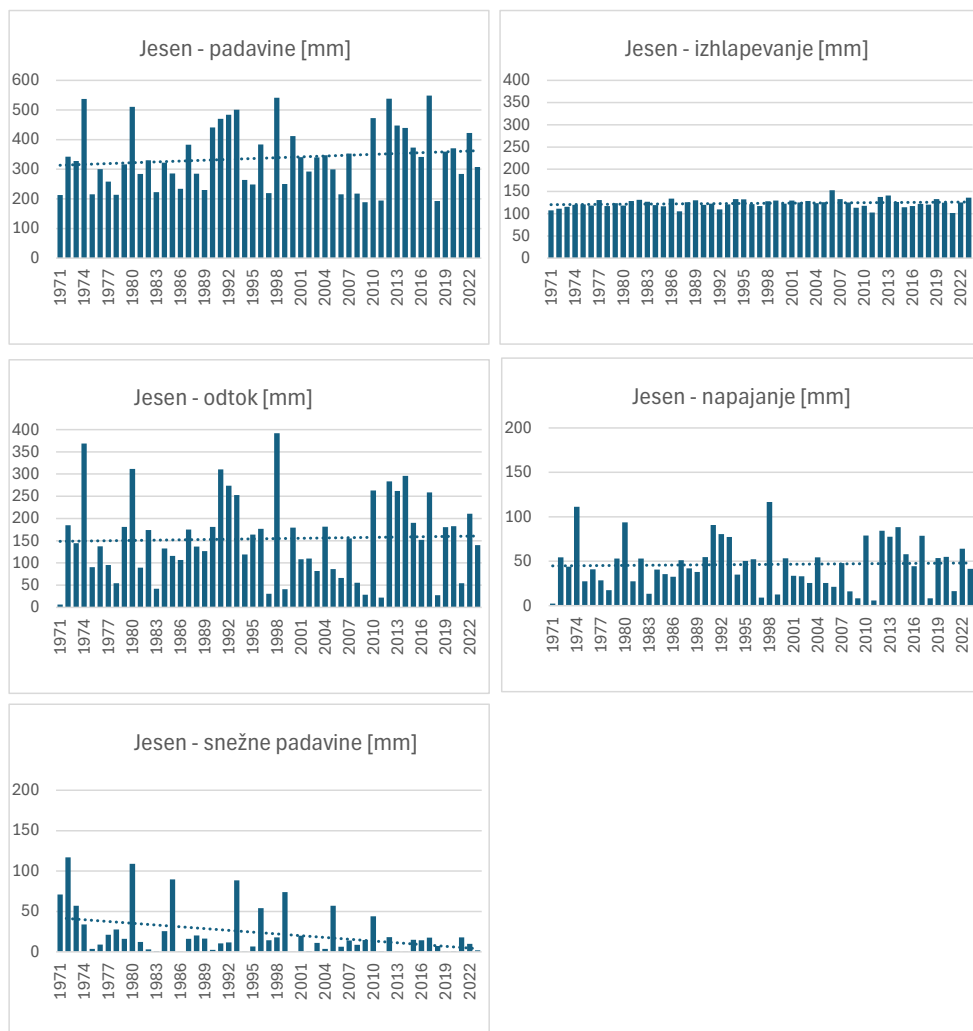
Jesen je na Kozjanskem drugi najbolj namočen letni čas. Povprečna količina padavin znaša 355 mm (Slovenija 473 mm), medtem ko je povprečno dejansko izhlapevanje manjše in znaša 125 mm. Skupni odtok dosega 164 mm (Slovenija 280 mm), napajanje podzemne vode pa 49 mm (Slovenija 116 mm). Količina snežnih padavin je 18 mm, kar je nekoliko manj, kot je slovensko povprečje z 28 mm. Povprečne vrednosti veljajo za obdobje 1991–2020.

Vse komponente vodne bilance izkazujejo rahlo pozitivne trende, padavine, odtok in napajanje. Linearni trendi pa z izjemo zmanjševanja količine snega jeseni ($p = 0,004$) niso statistično značilni. Čeprav se povečuje število bolj namočenih let, se po drugi strani večja izrazitost manj vodnatih let v zadnjih obdobjih. Opazna pa je manjša količina vode v snegu (snežne padavine), kar večja možnosti poplav na tem območju.

Preglednica 3.6: Komponente vodne bilance na Kozjanskem – jesen (v mm) (ARSO 2024).

jesen	Kozjansko			Slovenija		
[mm]	povprečje	min	max	povprečje	min	max
padavine	355	188	549	473	231	709
izhlapevanje	125	101	153	126	108	147
voda v snegu	18	0	117	28	5	140
skupni odtok	164	7	392	280	58	512
napajanje	49	2	117	116	23	214

Slika 3.12: Količine vodnobilančnih komponent (v mm) jeseni na Kozjanskem.



Vir: ARSO 2024.

Opomba: Črtna črta je linearni trend, prikazan ne glede na statistično značilnost.

3.6.4 Zima

Zima prinaša najnižje izhlapevanje, ki znaša povprečno 41 mm, kar je podobno slovenskemu povprečju. Snežne padavine imajo pomembno vlogo, saj povprečna količina vode v snegu znaša 93 mm (Slovenija 116 mm). Povprečna količina padavin v zimskem obdobju znaša 202 mm, skupni odtok pa je 156 mm (Slovenija 277 in 210 mm). Napajanje podzemne vode je v povprečju 43 mm, približno polovica slovenskega povprečja. Povprečne vrednosti veljajo za obdobje 1991–2020.

Linearni trendi vseh komponent so tu rahlo naraščajoči, izjema pa so snežne padavine, ki jih je manj (glede na večanje količine padavin se delež snega relativno še dodatno zmanjšuje). Tudi tu so linearni trendi neznačilni.

Preglednica 3.7: Komponente vodne bilance na Kozjanskem – zima (v mm) (ARSO 2024).

zima	Kozjansko			Slovenija		
[mm]	povprečje	min	max	povprečje	min	max
padavine	202	64	358	277	81	588
izhlapevanje	41	23	65	42	26	64
voda v snegu	93	18	224	116	32	246
skupni odtok	156	32	317	210	42	461
napajanje	43	9	88	85	17	184

Slika 3.13: Količine vodnobilančnih komponent (v mm) pozimi na Kozjanskem.



Vir: ARSO 2024.

Opomba: Črtkana črta je linearni trend, prikazan ne glede na statistično značilnost.

3.7 Sklep

Na podlagi rezultatov modela vodne bilance mGROWA-SI smo za območje Kozjanskega opravili pregled glavnih vodnobilančnih komponent. Analize letnih vrednosti obdobja 1971–2023 posredno potrjujejo segrevanje Zemlje zaradi podnebnih sprememb, ki se odražajo na komponentah vodne bilance. Analiza linearnih trendov ne kaže statistično značilnih sprememb, kar je posledica velike medletne variabilnosti in kljub vsemu relativno kratkih podatkovnih serij. Kljub temu so smeri linearnih premic skladne z ugotovitvami vpliva podnebnih sprememb: naraščanje temperatur, zmanjševanje snežnih padavin, spremembe padavinskih vzorcev, spremembe odtoka in napajanja. Konkretne analize bi lahko osvetlili še z obravnavo rezultatov podnebnih scenarijev modela mGROWA-SI, kar je nedvomno potrebno upoštevati pri prilagajanju območja na vplive podnebnih sprememb (Dolinar 2018).

Splošna ugotovitev glede letnih trendov je, da so večinoma neznačilni in negativni. Izjema sta letno izhlapevanje in sneg, kjer so trendi zanesljivejši. Sezonsko se kažeta upad snežnih padavin in naraščanje izhlapevanja, prav tako pa so večinoma neznačilni. Navkljub statistični neznačilnosti pa trendi izkazujejo skladnost s pričakovanimi spremembami vodnobilančnih komponent zaradi segrevanja Zemlje.