

Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja

Sintezno poročilo – prvi del



Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja

Sintezno poročilo – prvi del



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

KAZALO

Izdajatelj: Ministrstvo za okolje in prostor Agencija Republike Slovenije za okolje Vojkova cesta 1b, Ljubljana e-naslov: gp.arso@gov.si www.arso.gov.si	Lektorica: Tina Kralj, Sektor za prevajanje, Generalni sekretariat vlade
Urednica: Mojca Dolinar	Tehnična urednica: Živa Vlahovič
Avtorji besedila: Renato Bertalanič, Mojca Dolinar, Andrej Draksler, Luka Honzak, Mira Kobold, Katja Kozjek, Neža Lokošek, Anže Medved, Gregor Vertačnik, Živa Vlahovič, Ana Žust	Fotografija na naslovnici: Blaž Šter
Drugi sodelavci: Ana Car, Damjan Dvoršek, Peter Frantar, Nejc Gačnik, Gregor Gregorič, Katja Klančar, Boštjan Muri, Jaka Plečko, Barbara Simonič, Andreja Sušnik, Ajda Valher, Aleksandar Vujinovič	Tisk: SOLOS d.o.o.
	Naklada: 300 izvodov
	Ljubljana, november 2018

© 2018 Agencija Republike Slovenije za okolje
Razmnoževanje publikacije ali njenih delov ni dovoljeno. Objava besedila in podatkov v celoti ali deloma je dovoljena le z navedbo vira.

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

551.588.7(497.4)"20"

OCENA podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja : sintezno poročilo /
[avtorji besedila Renato Bertalanič ... [et al.] ; urednica Mojca Dolinar]. - Ljubljana :
Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, 2018-. - (ARSO vreme)

Dosedanja vsebina:
Del 1. - 2018

ISBN 978-961-6024-80-8 (zv. 1)
1. Bertalanič, Renato
297213184

BESEDA DIREKTORJA	6
NAMESTO UVODA	7
KLJUČNA SPOROČILA	8
SLOVAR IZRAZOV	10
KAKO BRATI POROČILO	12
1 O PODNEBNIH PROJEKCIJAH	14
1.1 Scenariji izpustov toplogrednih plinov po metodologiji IPCC	14
1.2 Negotovost podnebnih projekcij	16
1.3 Zgodovinski pregled izdelanih podnebnih projekcij za Slovenijo	18
2 PODNEBJE IN VODE V DOBI MERITEV	20
2.1 Temperatura zraka	20
2.2 Višina padavin	23
2.3 Referenčna evapotranspiracija	27
2.4 Višina snega	28
2.5 Sončno obsevanje	30
2.6 Veter	30
2.7 Zračni tlak	34
2.8 Rečni pretočni režimi	36
2.9 Pretoki rek	38
2.9.1 Trend srednjih sezonskih in letnih pretokov	38
2.9.2 Trend velikih pretokov	40
2.9.3 Trend malih pretokov	40
2.10 Temperatura vode	41
2.11 Hidrološka suša v vodonosniku	43
3 VHODNI PODATKI PROJEKTA OPS21	46
3.1 Meritve	46
3.1.1 Meteorološke meritve	46
3.1.2 Fenološka opazovanja	47
3.1.3 Hidrološke meritve	49
3.2 Podatki modelskih simulacij	50



REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR

Projekt je sofinanciran s strani Ministrstva za okolje in prostor v okviru sredstev Sklada za podnebne spremembe.

4	METODOLOGIJA PROJEKTA OPS21	52			
4.1	Meritve v pravilni mreži	52			
4.1.1	Metoda prostorske interpolacije	52			
4.1.2	Rezultati prostorske interpolacije	54			
4.2	Podnebna regionalizacija Slovenije	55			
4.3	Modelske simulacije podnebja	56			
4.3.1	Priprava modelskih podatkov regionalnih podnebnih modelov	56			
4.3.2	Izbor regionalnih podnebnih modelov	56			
4.3.3	Odprava pristranskosti regionalnih podnebnih modelov	58			
4.3.4	Podatkovne zbirke podnebnih scenarijev	68			
4.3.5	Analiza modelskih podatkov	68			
4.4	Hidrološki model	70			
4.5	Vodno-bilančni model GROWA-SI	72			
4.6	Izpeljani podatki	73			
4.6.1	Referenčna evapotranspiracija	73			
4.6.2	Temperaturni kazalniki	74			
4.6.3	Padavinski kazalniki	76			
4.6.4	Vodni primanjkljaj	77			
4.6.5	Temperaturne razmere za rast rastlin	77			
4.6.6	Pozeba	79			
4.6.7	Hidrološki kazalniki	80			
4.7	Analiza izjemnih vrednosti	80			
4.7.1	Meteorološke spremenljivke	80			
4.7.2	Hidrološke spremenljivke	83			
4.8	Skladnost modelskih simulacij	84			
5	REZULTATI PROJEKTA OPS21	86			
5.1	Metodologija predstavitve rezultatov	86			
5.2	Spremembe temperature	89			
5.2.1	Spremembe temperature zraka	89			
5.2.2	Spremembe kazalnikov izjemnih temperaturnih razmer	94			
5.2.2.1	Kazalniki izjemne vročine	94			
5.2.2.2	Kazalniki izjemnega mraza	96			
5.2.3	Spremembe rastnih razmer	98			
5.2.3.1	Spremembe temperature tal	98			
5.2.3.2	Fenološka faza prvih listov	100			
			5.2.3.3	Dolžina, začetek in konec rastne dobe	102
			5.2.3.4	Pozeba	105
			5.3	Spremembe padavin	110
			5.3.1	Spremembe povprečnih padavinskih razmer	110
			5.3.2	Spremembe kazalnikov izjemnih padavinskih dogodkov	115
			5.3.2.1	Suha in mokra obdobja	115
			5.3.2.2	Spremembe višine padavin ob močnejših nalivih	115
			5.3.2.3	Spremembe števila padavinskih dni	116
			5.3.3	Spremembe povratnih nivojev izjemnih padavin	122
			5.3.3.1	Izjemne enodnevne padavine	122
			5.3.3.2	Izjemne tridnevne padavine	124
			5.3.3.3	Izjemne petdnevne padavine	125
			5.4	Povezave med spremembami temperature in padavin	128
			5.5	Spremembe vodne bilance	132
			5.5.1	Spremembe referenčne evapotranspiracije	132
			5.5.2	Spremembe vodnega primanjkljaja	136
			5.5.3	Spremembe povratnih nivojev največjega vodnega primanjkljaja	139
			5.5.4	Spremembe povprečnega letnega napajanja podzemne vode	141
			5.6	Spremembe hidroloških spremenljivk	143
			5.6.1	Spremembe srednjih pretokov	143
			5.6.2	Spremembe velikih pretokov	146
			5.6.3	Spremembe malih pretokov	148
			5.6.4	Spremembe povratnih dob največjih pretokov	150
			VIRI IN LITERATURA		152

BESEDA DIREKTORJA

Spoštovani,

spreminjanje je splošna značilnost podnebja, vendar je hitrost spreminjanja v zadnjem stoletju izjemna. Na podlagi dolgoletnega spremljanja podnebja smo na ARSO ugotovili, da se to v Sloveniji spreminja še nekoliko hitreje kot na svetovni ravni.

Zaradi reliefne in podnebne pestrosti Slovenije lahko na posameznih območjih naše države pričakujemo različne podnebne spremembe. Teh iz podnebnih projekcij, ki so bile pripravljene za Evropo, ne moremo razločiti. Zato smo pripravili podnebne projekcije posebej za Slovenijo.

Ker podnebnih sprememb ne moremo več ustaviti, tudi z zelo drastičnimi omejitvami izpustov toplogrednih plinov ne, se moramo nanje prilagoditi. Zato potrebujemo vedenje o tem, na kakšne razmere se bomo morali prilagajati. To je bil glavni motiv, da smo leta 2016 začeli obsežen projekt priprave podnebnih projekcij za Slovenijo, ki smo ga poimenovali Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo v 21. stoletju – OPS 21.

V poročilu smo se osredotočili na tiste spremembe, ki so v okviru scenarijev izpustov toplogrednih plinov znatne ter zanesljive in bodo pomembno vplivale na nekatera področja našega življenja. Dodali smo poglavja z razlago, kako smo prišli do rezultatov. V dodatku, ki je zaradi obsežnosti le v elektronski obliki, so prikazani rezultati tudi za tiste podnebne lastnosti, pri katerih ne pričakujemo bistvenih sprememb.

Poročilo lahko služi kot katalog vsebin, za katere imamo pripravljene še podrobnejše podatke in so na voljo uporabnikom, če bi jih želeli.

Upamo, da se bomo, opremljeni s kakovostnimi podatki o podnebjju, lahko hitreje in učinkoviteje odzvali na potrebe naše družbe ter prispevali k večji varnosti in blaginji ljudi, zaščiti okolja, narave in premoženja, trajnostni oskrbi z naravnimi viri ter učinkovitejšemu gospodarstvu.

Joško Knez,
generalni direktor Agencije
Republike Slovenije za okolje



NAMESTO UVODA

Podnebne spremembe so že tu, meritve kažejo na znaten trend dvigovanja temperature zunanega zraka, priča smo tudi bolj pogostim in širše izraženim ekstremnim vremenskim dogodkom. Po ocenah znanstvenikov skoraj zagotovo ne bomo dosegli cilja Pariškega sporazuma o omejitvi dviga globalne temperature znatno pod 2 °C do leta 2050 v primerjavi s predindustrijsko dobo. To pomeni, da lahko v prihodnje pričakujemo še večje in bolj izražene spremembe podnebja. Slovenija, ki je dežela raznolikih pokrajin in podnebnih tipov, ocene o izraženosti posameznega vpliva podnebnih sprememb zato še toliko bolj potrebuje. Hkrati pa so podnebne projekcije zaradi velike podnebne raznolikosti tudi bolj negotove kot v nekaterih drugih območjih Evrope in sveta.

Projekt Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo v 21. stoletju tako nudi informacije o tem katere so spremembe podnebja, ki jih pričakujemo na območju Slovenije, v kolikšni meri se bodo izrazile ter ob kakšnih predpostavkah in s kolikšno negotovostjo jih ocenjujemo. Te ocene predstavljajo ključno podlago za načrtovanje prihodnjega razvoja posameznih sektorjev (kmetijstva, gozdarstva, turizma in drugih od podnebja odvisnih sektorjev) in ukrepov obvladovanja tveganj za nesreče (kot so poplave in suše). Pomembno je vedeti kako bo dvig temperature zraka vplival na pojavljanje vročinskih valov in v kolikšni meri se bo sprememba padavinskih vzorcev odrazila na pretokih rek. Rezultati projekta omogočajo raziskave vplivov podnebnih sprememb za načrtovalce politik, ukrepov in projektov.

Rezultati projekta so posebej pomembni v luči priprave na programiranje ukrepov v okviru nove finančne perspektive EU po letu 2020, v kateri bo po predlogu Evropske komisije še več sredstev kot do sedaj (25 %) moralo izkazati prispevek k podnebnim ciljem. Poleg tega predlog uredbe Komisije predvideva, da se že ob sami izbiri naložb v infrastrukturo zagotovi odpornost na podnebne spremembe. V Sloveniji bodo rezultati projekta služili za pripravo boljše in bolj celovite presoje vplivov podnebnih sprememb, ki se izvajajo v okviru presoj vplivov na okolje v skladu z Direktivo 2014/52/EU ter celovitih presoj vplivov na okolje. Na eni strani bo tako mogoče okrepiti programiranje ukrepov, vključno z načrtovanjem politik in ukrepov iz integralnega proračuna. Na drugi strani pa bo potrebno okrepiti odpornost na podnebne spremembe vseh obstoječih politik, infrastrukturnih in drugih projektov in investicij. Na ta način projekt podpira izvajanje nacionalnih strategij, med njimi Strategije razvoja Slovenije in Strateškega okvira prilagajanja podnebnim spremembam, ki ga je

kot prvi korak k razvoju celovitega medsektorskega procesa prilagajanja sprejela Vlada decembra 2016.

V pričujoči publikaciji so vsi rezultati projekta prvič sistematično, pregledno in celovito zbrani na enem mestu in predstavljeni na poljuden način z namenom doseči kar najširšo javnost. Želimo si, da se zavedanje o pričakovanih vplivih podnebnih sprememb v Sloveniji razširi, ter da prihodnje načrtovanje temelji na podlagi poznavanja rezultatov podnebnih projekcij. Potrebna je nadaljnja priprava rezultatov podnebnih projekcij za posamezne vidike sprememb podnebja (kot je npr. potencial sončne energije) ter priprava ocen vplivov podnebnih sprememb na podlagi teh rezultatov, kot so ocene vplivov podnebnih sprememb na morje in na zdravje ljudi. Ob vse večjem zavedanju in žal tudi vse bolj izraženih vplivih podnebnih sprememb bodo tudi potrebe po podnebnih storitvah vse večje. Podnebne storitve, tj. zagotavljanje in posredovanje informacij o podnebnih razmerah in pričakovanih spremembah podnebja, ki so prirejene za specifični namen uporabnikov in oblikovane v uporabnikom prijazni obliki, ki omogoča enostavno nadaljnjo uporabo, bodo namreč ključne za mnoge načrtovalce politik, ukrepov in projektov. Ti bodo ob predstavljenih informacijah lažje pristopili k zasnovi načrta potrebnih aktivnosti za prilagajanje in pripravi posamezne ocene tveganj oziroma ranljivosti sektorja na vplive podnebnih sprememb, s tem pa zmanjševali izpostavljenost in občutljivost Slovenije na vplive podnebnih sprememb ter večali odpornost in prilagoditveno sposobnost, kar je ključni cilj politike načrtnega prilagajanja podnebnim spremembam.

Za konec pa še najpomembnejše – zahvala ključnim ljudem, ki so v zadnjih letih omogočili postopno pripravo in izpeljavo projekta OPS21. Brez poguma, predanosti ter pripravljenosti na dodatno delo, usklajevanje in premišljevanje, hkrati pa velike prilagodljivosti ob iskanju najboljših načinov, tudi med kolegi v tujini, projekta ne bi mogli izpeljati. Zahvala gre tako predvsem mag. Mojci Dolinar kot glavni koordinatoriki zunanjih sodelavcev in notranjih usklajevanj z vodstvom ARSO in Ministrstvom za okolje in prostor, na katerem smo v okviru sredstev Sklada za podnebne spremembe skozi leta zagotavljali sredstva za izvajanje projekta, ter njeni ekipi sodelavcev, ki so kot glavni avtorji tudi pripravili to poročilo. Čestitke in srečno tudi v nadaljevanju!

Barbara Simonič
Ministrstvo za okolje in prostor



KLJUČNA SPOROČILA

SPREMEMBE TEMPERATURE

- Povprečna temperatura zraka se je v obdobju 1961–2011 dvignila za 1,7 °C. Trend naraščanja temperature zraka je nekoliko večji v vzhodni kot v zahodni polovici države. Najbolj so se ogreela poletja in pomladi, nekoliko manj zime. Jeseni se niso ogrele.
- Temperatura površinskih voda se je v obdobju 1953–2015 zviševala s trendom 0,2 °C na desetletje, temperatura podzemnih voda v obdobju 1969–2015 pa s trendom 0,3 °C na desetletje.
- Naraščanje temperature zraka se bo v Sloveniji v 21. stoletju nadaljevalo, velikost dviga pa je zelo odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov. V primeru optimističnega scenarija izpustov RCP2.6 bo temperatura do konca stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 zrasla za približno 1,3 °C, v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov RCP4.5 za približno 2 °C, v primeru pesimističnega scenarija izpustov RCP8.5 pa za približno 4,1 °C. Verjetno bo najbolj zrasla temperatura pozimi, le nekoliko manj poleti in jeseni, najmanj pa spomladi.
- Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev. V primeru optimističnega scenarija izpustov se bo število vročih dni v Sloveniji do konca stoletja povečalo za približno 6 dni, v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov za približno 11 dni, v primeru pesimističnega scenarija izpustov pa za približno 27 dni. V vseh scenarijih izpustov se bo povečalo število in trajanje vročinskih valov. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov bomo imeli konec stoletja povprečno vsaj en vročinski val letno, ki bo po jakosti primerljiv ali hujši od vročinskega vala, ki smo ga imeli poleti 2003.
- Skladno z dvigom temperature zraka se bo ogreval površinski sloj tal, oboje pa bo vplivalo na fenološki razvoj rastlin in dolžino rastne dobe. Spomladanski fenološki razvoj rastlin bo zgodnejši. V primeru srednje optimističnega scenarija izpustov bo olistanje gozdnega drevja približno dva tedna, v primeru pesimističnega scenarija izpustov pa celo do približno 40 dni zgodnejše kot v primerjalnem obdobju 1981–2010. Dolžina rastne dobe se bo podaljševala skladno z dvigom temperature, zgodnejši bo njen začetek spomladi in kasnejši zaključek jeseni.
- Pogostost spomladanskih pozeb bo ostala na podobni ravni kot v primerjalnem obdobju 1981–2010.

SPREMEMBE PADAVIN

- Višina padavin se je v obdobju 1961–2011 na letni ravni zmanjšala za okoli 15 % v zahodni polovici države, nekoliko manj (10 %) v vzhodni polovici države, kjer spremembe niso statistično značilne. Najbolj se je višina padavin zmanjšala spomladi in poleti, a upad večinoma ni bil statistično značilen.
- Skupna višina snežne odeje se je v obdobju 1961–2011 zmanjšala za približno 55 %. Višina novozapadlega snega se je zmanjšala za približno 40 %.
- Višina padavin na letni ravni in pozimi se bo po zmerno optimističnem in pesimističnem scenariju izpustov sredi ali konec 21. stoletja znatno povečala. V primeru obeh scenarijev izpustov bo povprečno povečanje letnih padavin konec stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 do 20 %. Še bolj se bodo padavine povečale pozimi, nekoliko bolj na vzhodu države. Že v sredini stoletja se bodo v vzhodni Sloveniji zimske padavine povečale do 40 %, do konca stoletja pa bo v primeru pesimističnega scenarija izpustov tudi več kot 60 % več zimskih padavin. V ostalih letnih časih je smer in velikost spremembe padavin zelo odvisna od scenarija izpustov in deloma modela, spremembe pa so večinoma manjše od naravne spremenljivosti padavin. Kazalniki, s katerimi merimo izjemne padavine, kažejo, da se bosta povečali tako jakost kot pogostost izjemnih padavin, povečanje pa bo najbolj izrazito v primeru pesimističnega scenarija izpustov.

SPREMEMBE VODNE BILANCE

- Izhlapevanje se je v obdobju 1971–2012 povečalo za okoli 20 %, najbolj na račun povečanja spomladi in poleti.
- Skladno z rastjo temperature zraka se bo v Sloveniji do konca stoletja nadaljevala tudi rast referenčne evapotranspiracije. V primeru optimističnega scenarija izpustov bo porast referenčne evapotranspiracije v mejah njene naravne spremenljivosti. V zmerno optimističnem scenariju izpustov bo v primerjavi z obdobjem 1981–2010 referenčna evapotranspiracija v slovenskem povprečju zrasla za približno 8 %, v pesimističnem scenariju izpustov pa za približno 16 %. Porast referenčne evapotranspiracije po Sloveniji ne bo enakomeren, različen bo tudi med letnimi časi.
- Šestdesetdnevni vodni primanjkljaj se bo v zmerno optimističnem scenariju izpustov v primerjavi z obdobjem 1981–2010 povečal le v sredini stoletja, v poletnem in jesenskem času, do 70 mm. Proti koncu stoletja se bo nato zopet zmanjšal na nivo primerjalnega obdobja. V pesimističnem scenariju izpustov se bo primanjkljaj povečal šele ob koncu stoletja, prav tako poleti in jeseni, ko bodo spremembe ponekod tudi večje od 70 mm.
- Ne glede na scenarij izpustov toplogrednih plinov se bo povprečno letno napajanje podzemne vode v primerjavi z obdobjem 1981–2010 do konca stoletja povečalo v povprečju do 20 %. Izstopa severovzhodna Slovenija, kjer lahko povečanje preseže 30 %.

SPREMEMBE PRETOKOV REK

- Srednji pretoki rek v Sloveniji se od šestdesetih let prejšnjega stoletja zmanjšujejo. Največji upad srednjih pretokov je zaznan spomladi in poleti.
- Po drugi strani se je pogostost velikih pretokov ponekod v osrednjem in v vzhodnem delu države povečala.
- Večjih sprememb srednjih letnih pretokov v Sloveniji v primerjavi z obdobjem 1981–2010 po vseh scenarijih izpustov ni pričakovati, z izjemo severovzhoda, kjer bi se pretoki v zmerno optimističnem scenariju izpustov do konca stoletja lahko povečali do 30 %. V primeru pesimističnega scenarija izpustov bo lahko v sredini stoletja na severovzhodu povečanje do 40 %.
- Srednje letne konice se bodo po vseh scenarijih izpustov v primerjavi z obdobjem 1981–2010 povečale povsod po državi, v povprečju od 20 do 30 %. Povečanje se od bližnje prihodnosti proti koncu stoletja stopnjuje. Največje povečanje konic bo na severovzhodu države, kjer bo v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov znašalo do približno 30 %. V primeru pesimističnega scenarija izpustov bo povečanje proti koncu stoletja med 20 in 40 % na skoraj vseh vodomernih postajah.
- Po zmerno optimističnem in pesimističnem scenariju so spremembe srednjih malih pretokov prostorsko neenotne in le ponekod v severni polovici Sloveniji kažejo na značilno povečanje za približno 20 %.

SLOVAR IZRAZOV

podnebne spremenljivke	statistične spremenljivke, ki opisujejo vreme v določenem časovnem obdobju (na primer dnevu, mesecu, letu, desetletju, ...)
podnebna regionalizacija	razdelitev nekega območja v regije s podobnimi podnebnimi značilnostmi
homogenizirani nizi podnebnih spremenljivk	časovni nizi podatkov o podnebnih spremenljivkah, iz katerih so bili deloma ali v celoti odstranjeni umetni vplivi, ki ne predstavljajo podnebnega signala
preračun v lokalno skalo	postopek uporabe informacije, znane v večji skali, za napoved v manjši, lokalni skali
primerjalno obdobje	izhodiščno časovno obdobje (pogosto dolžine 30 let), glede na katerega računamo (podnebne) spremembe ali ugotavljamo pristranskost modelov
projekcijsko obdobje	časovno obdobje (pogosto dolžine 30 let) projekcije podnebnih sprememb, za katerega izračunamo podnebne značilnosti (običajno v prihodnosti)
podnebni model	matematično-fizikalni model podnebnega sistema (ozračje, tla, morje, kriosfera, pogosto tudi biosfera), s katerim simuliramo fizikalne (pogosto tudi kemijske in biološke) procese na Zemljinem površju in ozračju
regionalni podnebni model	podnebni model, ki simulira podnebni sistem na regionalni, običajno celinski ravni
globalni podnebni model	podnebni model, ki simulira podnebni sistem celotne Zemlje
simulacija podnebnega modela	izračuni procesov v podnebnem sistemu. Rezultate izračunov pogosto prikažemo v obliki prostorsko-časovnega spreminjanja vrednosti podnebnih spremenljivk.
simulirane podnebne spremenljivke	vrednosti podnebnih spremenljivk, ki so izračunane s podnebnim modelom
(vodoravna) ločljivost modela	(vodoravna) razdalja med računskimi točkami modela
negotovost podnebnih simulacij	velikost razlik med izračuni različnih podnebnih modelov
scenariji izpustov toplogrednih plinov	časovni poteki izpustov in vsebnosti toplogrednih plinov (ogljikov dioksid, metan, didušikov oksid itd.), aerosolov in kemično aktivnih plinov v ozračju ter rabe tal in tipa površja v 21. stoletju. Temeljijo na družbeno-gospodarskem razvoju sveta v 21. stoletju. Štirje scenariji so bili izbrani za proučevanje podnebnih sprememb in uporabljeni v Petem poročilu Medvladnega odbora za podnebne spremembe.
sistematična napaka modela	odstopanje z modelom simuliranih podnebnih spremenljivk od izmerjenih vrednosti zaradi različnih omejitev modela
podnebne projekcije	simulirani odzivi podnebnega sistema glede na scenarije izpustov toplogrednih plinov

mediana modelskih vrednosti	srednja vrednost v porazdelitvi rezultatov simulacij več različnih modelov. Polovica rezultatov je nad in polovica pod to vrednostjo.
metoda preslikave kvantilov	računska metoda, v kateri najprej s prenosno funkcijo po centilih povežemo dve različni porazdelitvi, običajno meritev in modelskih izračunov. S prenosno funkcijo nato popravimo modelske izračune v podnebnih projekcijah.
metoda preslikave kvantilov odklonov	računska metoda, v kateri najprej s prenosno funkcijo po centilih povežemo dve različni porazdelitvi odklonov od povprečja, običajno meritev in modelskih izračunov. S prenosno funkcijo nato popravimo modelske izračune v podnebnih projekcijah.
metoda odpravljanja pristranskosti	računska metoda, s katero odstranimo povprečno napako modelskih izračunov glede na meritve
izjemni vremenski dogodek	zelo redek dogodek, ki se v statistični porazdelitvi običajno nahaja v levem ali desnem repu (pri najmanjših ali največjih vrednostih). Definicija izjemnega vremenskega dogodka je vezana na podnebje kraja ali območja.
vodni primanjkljaj	največji šestdesetdnevni vodni primanjkljaj, ki je razlika šestdesetdnevnih vsot dnevne referenčne evapotranspiracije in višine padavin
povratna doba	povprečen čas med dvema izjemnima dogodkoma nad povratnim nivojem. Enaka je recipročni vrednosti verjetnosti dogodka v posameznem letu ali časovni dobi, v kateri se dogodek v povprečju pojavi enkrat.

KAKO BRATI POROČILO

V poročilu, ki je pred vami, so zbrani prvi rezultati projekta Ocena podnebnih sprememb za Slovenijo v 21. stoletju (OPS21). V okviru projekta smo ocenili povprečne spremembe najpomembnejših podnebnih spremenljivk in vpliv teh sprememb na rastne razmere in hidrološke spremenljivke. V nadaljevanju projekta, ki še vedno teče, ocenjujemo še vplive na nekatere druge pomembne vidike podnebnega sistema. Ti rezultati bodo objavljeni v drugem delu poročila.

Rezultati projekta so zelo obsežni. V tem poročilu smo izpostavili samo spremembe, ki se bodo ob določenih pogojih zgodile z veliko gotovostjo. Pripravili pa smo še dodatek, kjer so v obliki različnih grafičnih prikazov in preglednic zbrani vsi dosednji rezultati projekta.

Ko govorimo o prihodnjih podnebnih razmerah, moramo najprej vedeti, da bodo te v veliki meri odvisne od uspeha človeštva pri omejevanju izpustov toplogrednih plinov. V projektu smo ocenili spremembe podnebja za tri različne značilne poteke vsebnosti (in izpustov) toplogrednih plinov (RCP, v nadaljevanju scenariji izpustov), ki temeljijo na predpostavkah o razvoju družbe in gospodarstva v 21. stoletju. Scenarije so pripravile mednarodne strokovne skupine in so podlaga za pripravo poročil Medvladnega odbora za podnebne spremembe (IPCC). Pri tako imenovanem optimističnem scenariju izpustov (RCP2.6) predvidevamo, da bo politika omejevanja izpustov zelo hitra in uspešna. Pri zmerno optimističnem scenariju izpustov (RCP4.5) predvidevamo, da se bodo izpusti toplogrednih plinov sprva še počasi povečevali, nato pa sredi in proti koncu 21. stoletja zmanjševali, vendar bodo ostali sorazmerno veliki. Pesimističen scenarij izpustov (RCP8.5) večjih uspehov pri omejevanju izpustov ne predvideva, zato se po tem scenariju izpusti skozi celotno 21. stoletje hitro povečujejo. S temi tremi scenariji smo zajeli večino razpona možnega razvoja podnebja v prihodnosti. Za optimistični scenarij RCP2.6 je bilo na voljo zelo malo modelskih simulacij, zato so rezultati manj zanesljivi. Kljub temu smo jih predstavili, predvsem za primerjavo velikosti sprememb med scenariji.

Kakšno bo naše podnebje v prihodnosti, ne moremo napovedati. Poleg negotovosti, ki izvira iz nepoznavanja konkretnih izpustov toplogrednih plinov v prihodnosti, so simulacije prihodnjega podnebja obremenjene še z dvema vrstama negotovosti. Prva izvira iz lastnosti podnebja – njegove naravne spremenljivosti. Druga negotovost je posledica orodja, ki ga uporabljamo za raziskovanje prihodnjega podnebja, to so podnebni modeli. Zato ne govorimo o napovedih podnebja ampak

o podnebnih projekcijah. Projekcije kažejo možen razvoj podnebja, odvisen od poti, ki jo bo izbralo človeštvo pri omejevanju izpustov toplogrednih plinov. Kažejo nam smer sprememb podnebnih spremenljivk in nakazujejo velikostno stopnjo teh sprememb. Informacija, ki jo podajamo pri podnebnih projekcijah, je sestavljena iz treh delov. Najprej moramo vedeti, za kateri scenarij izpustov toplogrednih plinov je bila projekcija narejena. Potem podamo velikost in smer pričakovane spremembe po tem scenariju. Zelo pomemben del informacije pa je tudi, kako zanesljiva je ta sprememba.

Negotovost podnebnih projekcij je torej sestavljena iz treh delov in vseh ne znamo natančno oceniti. V pričujoči publikaciji smo izbrali različne načine za prikaz negotovosti projekcij oziroma njihove zanesljivosti. Pri časovnih potekih in nekaterih zemljevidih prikazujemo interval pričakovanih sprememb, zraven pa podajamo tudi srednjo vrednost. Tak način prikaza podaja negotovost, ki izhaja iz nepopolnosti podnebnih modelov in razlik med njimi. Zanesljivost sprememb v primerjavi z negotovostjo pa moramo ocenjevati s statističnimi testi. Ker je ta vrsta informacije zahtevna za razumevanje, smo jo združili in poenostavili v trisopenjsko lestvico zanesljivosti sprememb. Tako pri enem od načinov prikaza podajamo srednjo vrednost pričakovane spremembe in njeno zanesljivost z eno od treh stopenj. Prva od treh stopenj zanesljivosti označuje tiste spremembe, ki smo jih sicer zaznali, vendar so premajhne, da bi jih lahko z visoko statistično zanesljivostjo ločili od naravne spremenljivosti obravnavane spremenljivke. To pomeni, da je velikost zaznane spremembe manjša ali primerljiva z naravno spremenljivostjo. Takšne spremembe za odločevalce in načrtovalce niso pomembne. Druga stopnja zanesljivosti označuje visoko zanesljive spremembe. Te spremembe so večje od naravne spremenljivosti obravnavane spremenljivke in jih tudi s statističnimi testi lahko potrdimo. Poleg tega pa je večina simulacij različnih podnebnih modelov skladna glede statistične značilnosti in predznaka spremembe. Zadnja, za odločevalce in načrtovalce najbolj neprijetna, je nizka stopnja zanesljivosti sprememb. Spremembe pri tej stopnji so večje od naravne spremenljivosti, vendar pa si simulacije različnih modelov nasprotujejo v predznaku spremembe. Del jih predvideva zmanjšanje, del pa povečanje obravnavane spremenljivke. Te spremembe so za odločevalce najbolj zahtevne in jih ne smemo enačiti s kategorijo »ni spremembe«. V tem primeru so namreč spremembe lahko zelo velike, vendar ne moremo predvideti njihovega predznaka. Na primer, sprememba padavin označena z nizko stopnjo zanesljivosti pomeni, da lahko s precejšnjo verjetnostjo pričakujemo bodisi veliko povečanje

bodisi zmanjšanje padavin. Metodologija izračuna stopnje zanesljivosti je podrobneje opisana v poglavju *Skladnost modelskih simulacij*.

Podnebne projekcije so podane z velikostjo spremembe podnebne spremenljivke in ne z njeno absolutno vrednostjo v prihodnjem obdobju. Pri tem moramo biti pozorni, za katero obdobje so spremembe podane. Vsi rezultati projekta OPS21 so podani v obliki sprememb glede na primerjalno obdobje 1981–2010. To je obdobje, ki ga za referenčno obdobje priporoča Svetovna meteorološka organizacija. Ko opisujemo današnje podnebje, podajamo povprečne vrednosti za to obdobje. Tudi izpeljane in projektne podnebne spremenljivke, ki se uporabljajo v različnih panogah, so običajno izračunane za veljavno referenčno obdobje, ki je danes 1981–2010. Z uporabo tega obdobja za primerjalno smo uporabnikom skušali olajšati uporabo projekcij, predvsem v inženirske namene. Večina podnebnih projekcij za Evropo in svet podaja spremembe glede na enega od zadnjih referenčnih obdobj. Pri primerjavi rezultatov za Slovenijo z drugimi projekcijami moramo biti pozorni na primerjalno obdobje, ki ni vedno enako našemu izboru. Predvsem pa moramo biti previdni, ko vrednotimo izdelane podnebne projekcije za Slovenijo z vidika ciljev omejevanja izpustov, kjer se na primer dvig temperature večinoma vrednoti glede na izhodišče v predindustrijski dobi (na primer omejitev dviga pod 2 °C na svetovni ravni). V praksi je zaradi pomanjkanja podatkov kot približek izhodišču pogosto uporabljena druga polovica ali konec 19. stoletja. Pri tem je potrebno upoštevati, da se je ozračje od takrat do primerjalnega obdobja že znatno segrelo.

Poročilo je razdeljeno na pet poglavij. V prvem poglavju razložimo, kaj podnebne projekcije so, kako so odvisne od izpustov toplogrednih plinov in kako je z njihovo negotovostjo. Dodali smo tudi kratek pregled v preteklosti izdelanih podnebnih projekcij za Slovenijo. Sledi nekoliko obsežnejše poglavje, kjer so opisane že zaznane spremembe podnebja v Sloveniji, ki smo jih izračunali na podlagi meritev. Nato pa sledijo poglavja, ki so namenjena izključno projektu OPS21. Tako so v tretjem poglavju podrobno opisani vsi podatki, ki smo jih pri izdelavi projekcij uporabljali. Za vse uporabnike, ki jih zanima metodologija priprave projekcij, je ta podrobno opisana v četrtem poglavju. Tu je opisana tudi metodologija, ki smo jo uporabili za določanje zanesljivosti ocenjenih sprememb.

V petem poglavju so opisani rezultati. Za predstavitev rezultatov smo uporabili pet različnih načinov grafičnih

predstavitev. Vsak od njih osvetli določen vidik rezultatov (časovni, prostorski, ...), nekateri od njih podajajo tudi informacijo o zanesljivosti rezultatov. Grafični prikazi so razloženi na začetku poglavja. Sledijo podpoglavja, razdeljena po glavnih spremenljivkah. V njih so opisani časovni in prostorski vidiki zanesljivih sprememb, ki so za odločevalce in načrtovalce pomembne. Spremembe, ki so majhne in primerljive z naravno spremenljivostjo, grafično nismo posebej izpostavljali, so pa vse izračunane spremembe objavljene v dodatku. Prav tako v primeru točkovnih rezultatov (na primer pri rastnih razmerah) niso prikazani grafični rezultati za vse postaje, ampak le za eno od njih, ki služi kot primer. Bralec mora za take primere grafične podatke poiskati v dodatku. Zaradi majhnega števila modelskih simulacij so rezultati za optimistični scenarij RCP2.6 sorazmerno negotovi, zato jih v glavnem delu poročila nismo izpostavljali. Večjo težo smo v poročilu dali rezultatom za bolj verjetna zmerno optimistični in pesimistični scenarij izpustov, ki kažeta na večje spremembe podnebja.

Dodatek z vsemi rezultati je zelo obsežen in je dodan v obliki ploščka ter v obliki elektronske knjige objavljen na spletni strani <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/change/>. Zasnovan je na enak način kot poglavje z rezultati. Začne se z razlago grafičnih prikazov in nadaljuje s poglavji po glavnih spremenljivkah. Ta so naprej razdeljena glede na način grafičnega prikaza. Za nekatere spremenljivke in kazalnike so priložene tudi preglednice, kjer so s števkami podane spremembe in njihova negotovost po podnebnih regijah. Na spletni strani je tudi vmesnik, ki omogoča uporabniku prijazen pregled rezultatov.

Še enkrat poudarjamo, da podnebne projekcije niso deterministični podatki za prihodnost, saj so bistveno odvisne od številnih težko napovedljivih družbenih in naravnih dejavnikov. V tem projektu smo uporabili trenutno najboljše razpoložljive modelske simulacije, ki pa imajo še vedno pomanjkljivosti. Svetovna znanstvena skupnost si močno prizadeva za izboljšave podnebnih modelov, zato pričakujemo, da bomo lahko že v nekaj letih izboljšali zanesljivost podnebnih projekcij tudi za Slovenijo. Podobno velja tudi za vrednotenje vplivov podnebnih sprememb, kjer smo prav tako odvisni od popolnosti modelov in razvoja znanosti na tem področju. Tako smo na primer pri ocenjevanju vplivov podnebnih sprememb na nizke pretoke ugotovili, da jih izbrani hidrološki model ne simulira najbolje, saj določenih stanj, ki se pojavijo v prihodnosti, v današnjem podnebnju, na katerem je model umerjen, ni. Tudi na tem področju si prizadevamo za izboljšave, ki bodo zagotovile večjo kakovost projekcij prihodnjega podnebja.

1 O PODNEBNIH PROJEKCIJAH

Ko govorimo o podnebnju v prihodnosti, ne podajamo natančnih vrednosti podnebnih spremenljivk v prihodnosti, na primer kakšna bo povprečna temperatura zraka v Ljubljani leta 2050. Zaradi številnih negotovosti in predpostavk, ki jih vsebujejo simulacije prihodnjega podnebja, podnebja v prihodnosti ne moremo napovedovati kot vreme prihodnjih nekaj dni. Za prihodnje podnebje pripravljamo **projekcije**, ki temeljijo na določenih predpostavkah in scenarijih. Podnebne projekcije tako poleg informacije, v kakšnem intervalu lahko pričakujemo spremembe podnebnih spremenljivk, podajajo tudi informacijo o tem, kako zanesljiva je ta predvidena sprememba ter ob kakšnih predpostavkah in scenarijih prihodnjih družbenih sprememb velja.

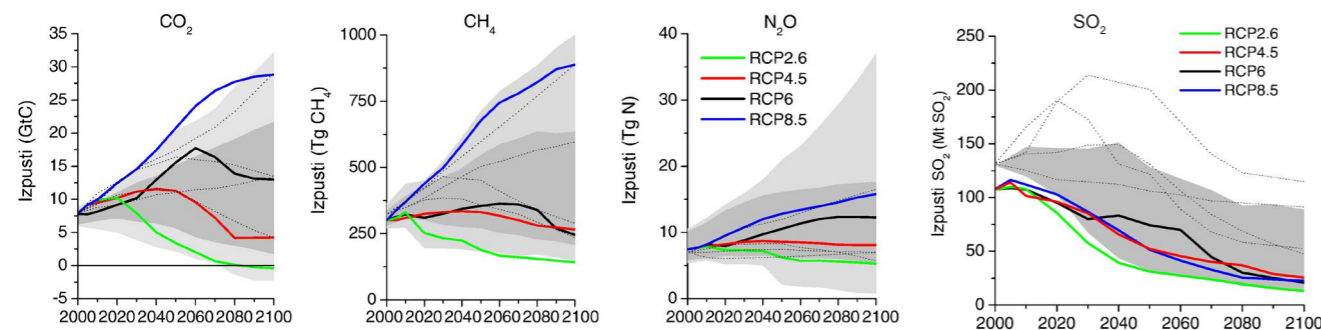
deterministične napovedi stanja v prihodnosti, temveč opisujejo vrsto verjetnih stanj ozračja in podnebnega sistema. Namenjeni so raziskovanju ranljivosti naravnih in družbenih sistemov na podnebne spremembe, oblikovanju ukrepov za zmanjšanje ranljivosti in prilagajanje na podnebne spremembe ter raziskovanju posledic sedanjih in prihodnjih podnebnih politik.

Znanstveni napredek pri razumevanju procesov v podnebnem sistemu, izboljšani podnebni modeli in prenovljeni scenariji izpustov toplogrednih plinov, ki so vhodni podatki za simulacije prihodnjega podnebja, omogočajo pripravo verjetnejših projekcij možnih antropogenih podnebnih sprememb ter s tem natančnejše proučevanje njihovih vplivov in z njimi povezanih tveganj.

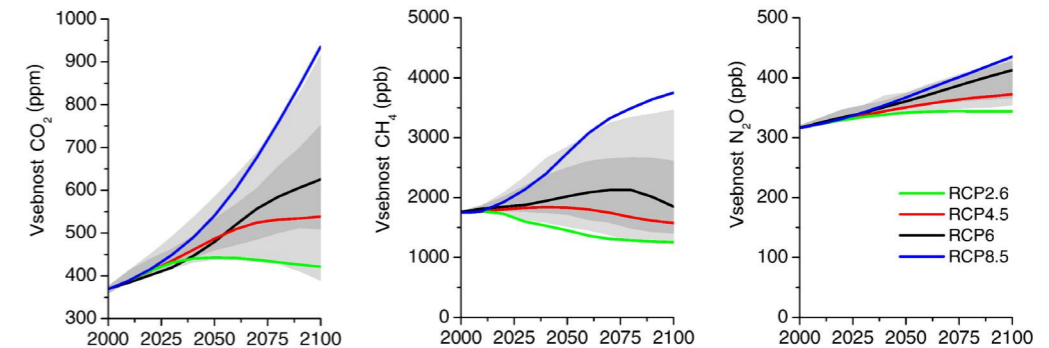
V letih 2007–2010 je svetovna znanstvena skupnost določila štiri scenarije značilnih potekov vsebnosti toplogrednih plinov (RCP – *Representative Concentration Pathways*, Van Vuuren in sod., 2011), ki so nadgradnja preteklih scenarijev izpustov (SRES – *Special Report on Emission Scenarios*, Nakicenovic in sod., 2000). Ti zagotavljajo dosledno rabo začetnega stanja podnebnega sistema, zgodovinskih podatkov in projekcij vsebnosti toplogrednih plinov v različnih raziskovalnih skupinah in zato omogočajo dopolnjujoče, predvsem pa primerljive rezultate raziskav prihodnjega podnebja. Scenariji značilnih potekov vsebnosti se uporabljajo kot vhodni podatki za kratkoročno in dolgoročno modeliranje podnebja, modelski rezultati pa so podlaga za presojo človekovega vpliva na podnebje in ugotavljanje možnosti za njegovo ublažitev ter s tem povezanih stroškov. V nasprotju s preteklimi scenariji izpustov, ki niso ustrezno proučili možnosti, kot so blažitev podnebnih sprememb, ranljivost in prilagajanje nanje, scenariji značilnih potekov vsebnosti toplogrednih plinov (v nadaljevanju scenariji izpustov) vključujejo posodobljene podatke o nedavnih izpustih in upoštevajo vpliv

1.1 SCENARIJI IZPUSTOV TOPLOGREDNIH PLINOV PO METODOLOGIJI IPCC

Ocena podnebnih sprememb v prihodnosti zahteva podatke o prihodnjih izpustih in posledični vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju do konca 21. stoletja. Naraščanje njihove vsebnosti namreč velja za ključni dejavnik sprememb podnebja vse od industrijske revolucije. Ti podatki so izraženi v obliki različnih scenarijev, ki temeljijo na človekovi dejavnosti ter z njo povezanih izpustih CO₂, CH₄, N₂O, aerosolov in drugih onesnaževalcev zraka (sliki 1.1 in 1.2). Vsak scenarij izpustov je pravzaprav odvisen od svetovnih družbeno-gospodarskih dejavnikov, kot so stopnja naraščanja prebivalstva, bruto domači proizvod in tehnološki razvoj v 21. stoletju. Ti neposredno vplivajo na porabo primarne energije in spremembo rabe tal. Niti scenariji izpustov niti projekcije prihodnjih podnebnih sprememb ne veljajo za



Slika 1.1 | Časovni potek izpustov glavnih toplogrednih plinov in SO₂ za scenarije RCP. Sivo območje prikazuje 98. (svetlo siva) in 90. (temno siva) centil scenarijev v uporabljeni literaturi. Pikčaste črte označujejo štiri pretekle scenarije izpustov SRES (Van Vuuren in sod., 2011).



Slika 1.2 | Časovni potek vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju za štiri scenarije izpustov RCP. Sivo območje označuje 98. (svetlo siva) in 90. (temno siva) centil študije scenarijev nadzora podnebnih sprememb EMF-22 (Van Vuuren in sod., 2011).

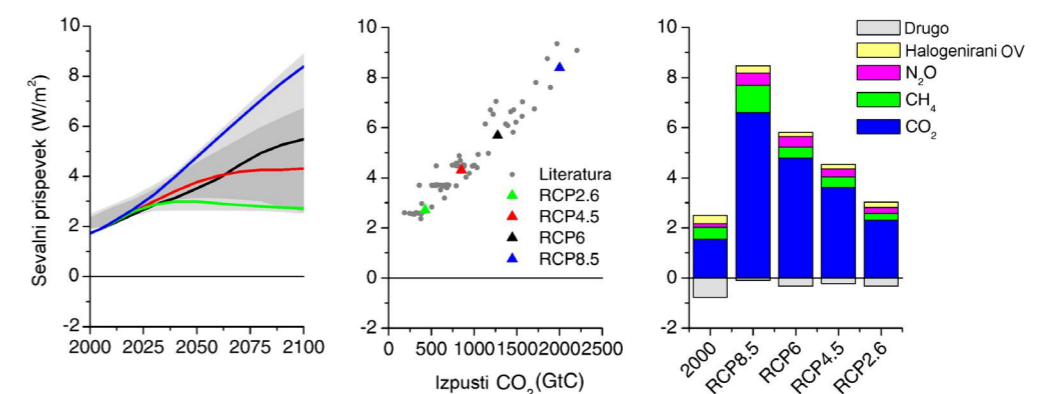
različnih podnebnih politik na poteke vsebnosti v 21. stoletju. Ločimo jih po številčni oznaki skupnega sevalnega prispevka leta 2100, ki pomeni merilo spremembe Zemljinega energetskega ravnovesja glede na predindustrijsko dobo (oziroma podnebje okrog leta 1750). To merilo je pribitek neto sevanja na vrhu Zemljinega ozračja. Scenariji izpustov skupaj obsegajo razpon možnih vrednosti sevalnega prispevka v letu 2100, od 2,6 do 8,5 W m⁻² (slika 1.3). Višja ko je vrednost sevalnega prispevka, večje spremembe v podnebnem sistemu lahko pričakujemo, saj se podnebni sistem na velike motnje v energijskem ravnovesju odziva izrazi teje kot na manjše. Pozitiven sevalni prispevek vodi k segrevanju in negativen k ohlajanju najnižje plasti ozračja – troposfere.

CO₂ v ozračju vsaj za od pet do šest velikostnih redov večja. Prav dolga življenjska doba toplogrednih plinov je razlog za večanje njihove vsebnosti v ozračju tudi po zmanjšanju izpustov (sliki 1.1 in 1.2). Toplogredni plini tako učinkujejo še dolgo po popolnem prenehanju izpustov, saj nakopičeni plini ostanejo v ozračju (kot v scenariju RCP2.6).

Scenariji izpustov RCP temeljijo na celotnem razponu možnih podnebnih strategij v 21. stoletju, povzetih po uporabljeni literaturi: scenarij z vključenim hitrim in izrazitim blaženjem podnebnih sprememb (RCP2.6), dva stabilizacijska scenarija (RCP4.5 in RCP6.0) in scenarij z zelo visokim izpustom toplogrednih plinov (RCP8.5).

Oglikov dioksid (CO₂) je zaradi svoje visoke in hitro naraščajoče vsebnosti najpomembnejši antropogeni toplogredni plin. Njegova življenjska doba je od 50 do 200 let, zato je za njegovo naravno odstranitev iz ozračja potrebnega veliko časa. Drugi dobro premešani toplogredni plini z dolgo življenjsko dobo (metan (CH₄), dušikov oksid (N₂O) in halogenirani ogljikovodiki) imajo sicer večje toplogredne zmogljivosti, vendar je vsebnost

Scenarij **RCP2.6** predvideva aktivno politiko blaženja podnebnih sprememb in posledično zelo nizke izpuste toplogrednih plinov, z viškom na začetku 21. stoletja in kasnejšim postopnim upadom. Skladno s tem sevalni prispevek doseže vrh v prvi polovici 21. stoletja pri 3,0 W m⁻², do konca stoletja pa upade na 2,6 W m⁻². Za dosego te ravni sevalnega prispevka bi bilo potrebno takojšnje občutno zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov.



Slika 1.3 | Časovni poteki sevalnega prispevka (levo), sevalni prispevek v odvisnosti od skupnih izpustov CO₂ v 21. stoletju (sredina) in sevalni prispevki posameznih toplogrednih plinov leta 2100 (desno). Sivo območje na levi sliki označuje 98. (svetlo siva) in 90. (temno siva) centil vseh scenarijev v uporabljeni literaturi. Pike v srednjem grafu predstavljajo posamezne

študije, na podlagi katerih so bili izbrani značilni poteki vsebnosti (RCP). Sevalni prispevek je izračunan glede na vrednosti v predindustrijski dobi in ne vključuje prispevka spremembe rabe tal, puščavskega prahu in nitratnih aerosolov (Van Vuuren in sod., 2011).

Stabilizacijski scenarij **RCP4.5**, ki na podlagi trenutnega stanja velja za zmerno optimističnega, z začetkom druge polovice 21. stoletja predvideva postopno zmanjševanje izpustov in ustalitev sevalnega prispevka kmalu po letu 2100, ob koncu stoletja pa ta znaša $4,5 \text{ W m}^{-2}$. Podobno se tudi pri stabilizacijskem scenariju **RCP6.0** sevalni prispevek z uporabo različnih tehnologij in strategij za zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov ustali kmalu po letu 2100, ob koncu stoletja pa doseže vrednost $6,0 \text{ W m}^{-2}$.

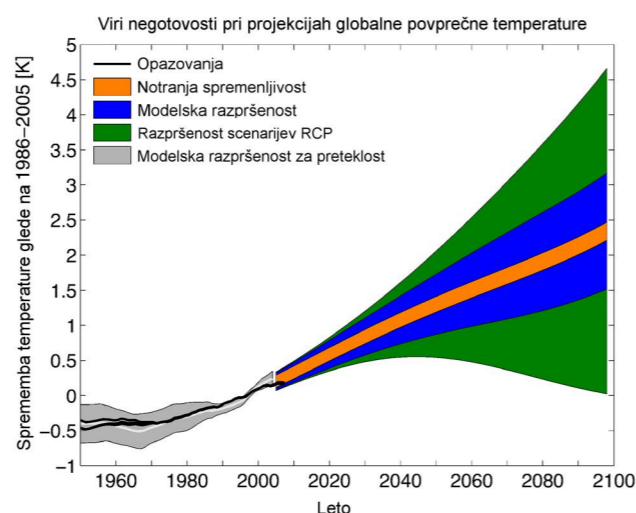
Najskrajnejši oziroma pesimistični scenarij, brez predvidenega blaženja podnebnih sprememb, je **RCP8.5**, ki predvideva visok izpust toplogrednih plinov in posledično naraščanje njihove vsebnosti tudi po letu 2100, ob koncu stoletja pa sevalni prispevek znaša $8,5 \text{ W m}^{-2}$. Scenarij je energetsko intenziven, kar je posledica predvidene visoke rasti prebivalstva in nižje stopnje tehnološkega razvoja.

V poročilu so zajete podnebne projekcije za tri različne scenarije značilnih potekov vsebnosti, RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5, s poudarkom na zmerno optimističnem RCP4.5, ki v drugi polovici 21. stoletja predvideva postopno zmanjševanje emisij in stabilizacijo sevalnega prispevka kmalu po letu 2100. Izbrani scenariji podajajo celoten razpon možnih podnebnih sprememb v Sloveniji, dejanske spremembe pa bodo odvisne od družbenogospodarskega razvoja in podnebnih politik v 21. stoletju na svetovni ravni.

1.2 NEGOTOVOST PODNEBNIH PROJEKCIJ

Negotovost pri oceni podnebnih sprememb se pojavlja na vseh stopnjah procesa priprave projekcij sprememb podnebja. Izvira iz negotovosti scenarijev izpustov, negotovosti simulacij podnebnih modelov in naravne podnebne spremenljivosti. Razmerja med deleži pripisanih izvorov negotovosti se spreminjajo glede na časovno in prostorsko raven projekcij, močno so odvisna tudi od podnebne spremenljivke (slike 1.4, 1.5 in 1.6, Kirtman in sod., 2013).

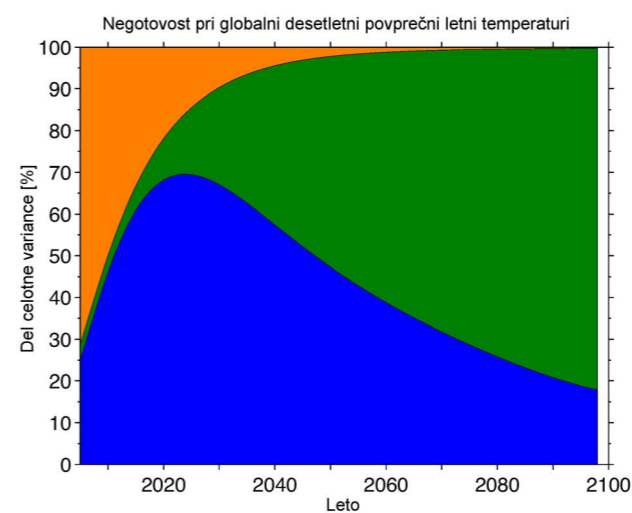
Na daljši časovni ravni največja negotovost temperature zraka izvira iz negotovosti emisijskih scenarijev, saj so družbeno-gospodarski razvoj in z njim povezani izpusti toplogrednih plinov in drugih onesnaževalcev



Slika 1.4 | Viri negotovosti pri projekcijah odklona desetletnega svetovnega povprečja temperature (glede na obdobje 1986–2005), izraženi z relativnim prispevkom k skupni negotovosti. Senčeni deli pomenijo 90-odstotni interval zaupanja projekcije temperature (Kirtman in sod., 2013).

zraka dolgoročno najbolj nepredvidljivi. Izbrani scenariji poteka vsebnosti toplogrednih plinov, ki se uporabljajo kot vhodni podatki za modeliranje podnebja, nudijo razpon možnih izidov med dvema skrajnostma (RCP2.6 in RCP8.5), vključno z vmesno vrednostjo (RCP4.5), prihodnje podnebne spremembe pa lahko sledijo kateri koli trajektoriji znotraj razpona. Izbira emisijskega scenarija je pomembna predvsem za scenarije temperature na večdesetletni časovni ravni. Življenjska doba toplogrednih plinov je v povprečju precej daljša od 10 let in njihova vsebnost bo v naslednjih nekaj desetletjih zato pri različnih scenarijih izpustov še zelo podobna, saj bodo v ozračju še vedno prisotni plini, ki smo jih v ozračje izpustili v preteklih desetletjih (slika 1.2). Zato je v začetnem napovednem obdobju vpliv scenarija izpustov pričakovano majhen in je negotovost primerljiva z negotovostjo podnebnih modelov, od srede 21. stoletja pa bo velikost predvidenih sprememb že postala precej odvisna od izbire scenarija izpustov toplogrednih plinov.

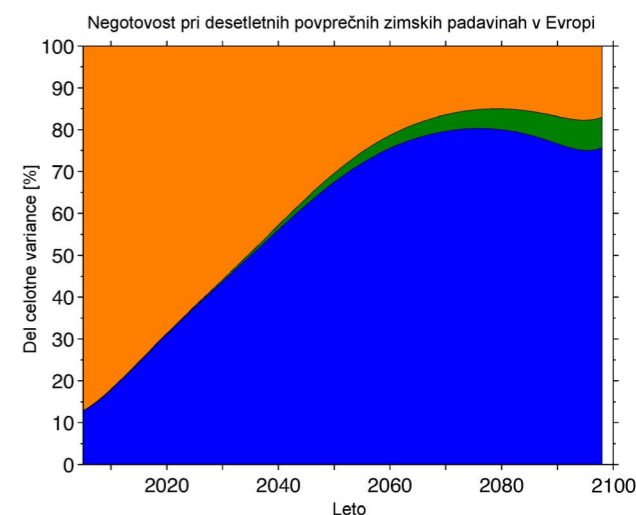
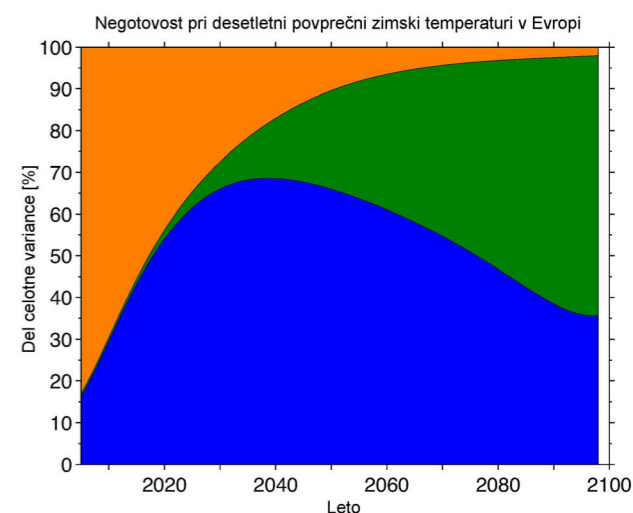
Podnebni modeli v obliki matematičnih zapisov fizikalnih zakonov so zgolj približek resničnega stanja podnebnega sistema. Prostorska in časovna ločljivost podnebnih modelov sta omejeni z računsko zmogljivostjo današnjih računalnikov, hkrati pa vseh fizikalnih procesov znotraj podnebnega sistema ni mogoče matematično opisati in simulirati. Nekaterih zato, ker se dogajajo na manjši prostorski ravni, kot je prostorska ločljivost modelov, drugih pa zato, ker jih še ne poznamo dovolj dobro. Takšni procesi so npr. turbulenca, mikrofizikalno



Slika 1.5 | Razmerje virov negotovosti pri projekcijah odklona desetletnega svetovnega povprečja (levo) in evropskega zimskega povprečja temperature (desno) od povprečja obdobja 1986–2005, prikazano kot relativni del celotne negotovosti (Kirtman in sod., 2013). Barvna lestvica ustreza tisti na sliki 1.4.

dogajanje v oblakah, nastanek konvektivnih padavin in prenos sevanja. Navedene omejitve zahtevajo poenostavitve v modelih, te pa vodijo k modelski negotovosti in so lahko izvor sistematičnega odstopanja simuliranega od resničnega podnebja. Zaradi slabe prostorske ločljivosti in nepopolnega opisa fizikalnih procesov v podnebnih modelih neposredni modelski rezultati ne opišejo ustrezno vseh posebnosti podnebne spremenljivosti na območju Slovenije. Ovrednotenje modelske negotovosti je torej izrednega pomena za pripravo temperaturnih in padavinskih projekcij na vseh časovnih ravneh. Namreč do neke mere to modelsko negotovost lahko ovrednotimo in jo tudi popravimo z uporabo modelskih simulacij preteklega podnebja z dejanskimi meritvami.

Naravna spremenljivost podnebja v večjem obsegu vpliva na negotovost podnebnih projekcij predvsem kratkoročno (od nekaj let do nekaj desetletij) in na celinski ravni. Vključuje notranjo spremenljivost, kot so letna do desetletna nihanja, odvisna pa je tudi od naravnih podnebnih dejavnikov, kot so Sončeva aktivnost in ognjeniški izbruhi. Absolutni delež negotovosti, pripisan naravni spremenljivosti, je pri projekcijah podnebnih sprememb stalen, relativni delež pa se zaradi naraščanja modelske negotovosti in negotovosti izpustov z odmikom v prihodnost zmanjšuje (sliki 1.4 in 1.5). Podnebni scenariji z razlogom prikazujejo odstopanje 30-letnih povprečnih razmer v prihodnosti v primerjavi s primerjalnim obdobjem v preteklosti (1981–2010). Uporaba 30-letnih obdobj namreč preprečuje zamenjavo kratkoročne naravne spremenljivosti podnebja (npr.



Slika 1.6 | Razmerje virov negotovosti pri projekcijah odklona desetletnega povprečja zimskih padavin od povprečja obdobja 1986–2005, prikazano kot relativni del celotne spremenljivosti (Kirtman in sod., 2013). Barvna lestvica ustreza tisti na sliki 1.4.

letno ali desetletno nihanje) z dolgoročnim podnebnim signalom sprememb. Del negotovosti podnebnih projekcij izvira tudi iz preteklih meritev, čeprav je bila večina nizov meritev, ki smo jih uporabili pri pripravi podnebnih projekcij, predhodno homogenizirana.

Modelske simulacije podnebja v prihodnosti, ki jih zajema poročilo, so zasnovane na povprečnih simulacij različnih regionalnih podnebnih modelov, šestih za scenarija RCP4.5 in RCP8.5 ter dveh za scenarij RCP2.6. Nabor rezultatov različnih modelov omogoča

vrednotenje modelske negotovosti in opredelitev možnih razponov prihodnjih sprememb. V povezavi z meritvami je pri modeliranju prisotna tudi negotovost poznavanja preteklega podnebja in vremena zaradi omejenega števila izmerjenih in z merilno negotovostjo obremenjenih podatkov. Modelske simulacije padavin so manj zanesljive od simulacij temperature zraka, in sicer zaradi večjih omejitev podnebnih modelov pri simulaciji padavin ter zaradi večje naravne spremenljivosti padavin v prostoru in času, ki dodatno otežuje prepoznavanje podnebnega signala. Prepoznavanje signala spremembe padavin in ovrednotenje negotovosti na celinski ali na lokalni ravni sta namreč otežena zaradi manjšega razmerja med signalom spremembe in notranjo spremenljivostjo v primerjavi s svetovno ravni. Modelska negotovost pa se tako za temperaturo kot za padavine z odmikom v prihodnost povečuje.

1.3 ZGODOVINSKI PREGLED IZDELANIH PODNEBNIH PROJEKCIJ ZA SLOVENIJO

Slovenija je majhno območje v Evropi in v preteklosti so uporabniki v študijah vplivov podnebnih sprememb v veliki meri uporabljali scenarije podnebnih sprememb, ki so bili pripravljene za Evropo, na svetovni in kasneje tudi že regionalni ravni. Večina teh scenarijev je bila pripravljena na ravni Evrope pod okriljem Evropske okoljske agencije (EEA, 2004, 2008, 2012, 2017) ali celo na svetovni ravni, v okviru rednih poročil Medvladnega odbora za podnebne spremembe (IPCC) (Christensen in sod., 2007; IPCC, 2017). Čeprav majhna, je Slovenija podnebno izjemno raznolika. Pri študijah vplivov podnebnih sprememb se je pogosto izkazalo, da je regionalna raven podnebnih scenarijev pregroba. K temu prispeva tudi lega Slovenije, saj leži na prehodu sredozemskega podnebja v gorsko in celinsko podnebje, kjer predvidene spremembe podnebnih spremenljivk, posebej padavin, pogosto menjajo predznak.

Prvi, ki se je začel ukvarjati s projekcijami podnebnih sprememb za Slovenijo na krajevni ravni je bil Klemen Bergant (Bergant in Kajfež-Bogataj, 1999; Bergant, 2003, 2007; Bergant in sod., 2006). Z uporabo metode empiričnega zmanjševanja prostorske ravni je na podlagi rezultatov simulacij globalnih modelov splošne cirkulacije (GCM) z uporabo preteklih meritev meteoroloških spremenljivk pripravil scenarije podnebnih

sprememb na krajevni ravni. Scenarije je pripravil za izbrana mesta, kjer so na voljo dolgoletni nizi glavnih podnebnih spremenljivk in predstavljajo različna podnebna območja Slovenije. Obravnaval je predvsem srednjo mesečno temperaturo zraka in višino padavin (Bergant in sod., 2006; Bergant, 2007), poleg tega pa skušal oceniti tudi spremembe temperature rosišča, referenčne evapotranspiracije in pogostosti padavin (Bergant, 2003). Projekcije prihodnjega podnebja, ki jih je pripravil, upoštevajo različne scenarije izpustov toplogrednih plinov, ki jih je zasnoval Medvladni odbor za podnebne spremembe (IPCC) in so bili združeni pod kratico SRES (Nakićenović in sod., 2000).

Konec prejšnjega desetletja se je z razvojem regionalnih podnebnih modelov uveljavilo dinamično zmanjševanje prostorske ravni, kjer so se rezultati globalnih podnebnih modelov na regionalno raven prenesli z uporabo gnezdenja regionalnih podnebnih modelov v globalnih. Rezultate takega regionalnega podnebnega modela (RegCM3) je v svojem diplomskem delu ovrednotil Boštjan Muri (2010). V okviru njegovega diplomskega dela je bil narejen tudi prvi poskus regionalnega dinamičnega modeliranja podnebja za Slovenijo s podnebno različico modela ALADIN. Za enega od scenarijev potekov izpustov toplogrednih plinov SRES (A1B) je v ločljivosti 10 km pripravil scenarije spremembe temperature in izjemnih padavinskih razmer. Ugotovil je, da pristranskost regionalnega podnebnega modela lahko bistveno vpliva na rezultate projekcij.

Negotovost, ki je posledica pristranskosti regionalnih podnebnih modelov (RCM), lahko ugotavljamo na podlagi rezultatov simulacij večjega števila različnih RCM. Ta način je uporabil Andrej Ceglar (2011), ki je nadaljeval delo Berganta. Uporabil je simulacije osmih RCM, gnezdenih v dva globalna modela. Simulacije so bile rezultat evropskega projekta dinamičnega zmanjševanja prostorske ravni ENSEMBLES (Hewitt, 2005). Podobno kot Bergant je za izbrana merilna mesta po Sloveniji rezultate regionalnih modelov priredil na krajevno raven. Za odpravo pristranskosti regionalnih modelov je uporabil metodi prilagajanja porazdelitve in kvantilnega prilagajanja porazdelitve. Poleg projekcij za temperaturo zraka in višino padavin je Ceglar izdelal tudi projekcije sprememb globalnega sončnega obsevanja, delnega tlaka vodne pare in hitrosti vetra, vse za scenarij izpustov toplogrednih plinov SRES A1B.

Konec leta 2013 so se s pripravo scenarijev podnebnih sprememb začeli ukvarjati na Agenciji Republike Slovenije za okolje. Obravnavali so simulacije 14 različnih

regionalnih podnebnih modelov, gnezdenih v 8 različnih globalnih modelih, skupaj 18 različnih simulacij iz baze evropskega projekta ENSEMBLES (Hewitt, 2005). Ocenili so spremembe temperature zraka, višine padavin in referenčne evapotranspiracije za območje celotne Slovenije na krajevni ravni z ločljivostjo 1 km do srede 21. stoletja. Podobno kot v predhodnih študijah je bil tudi v tem primeru obravnavan srednje optimističen scenarij izpustov toplogrednih plinov, SRES A1B.

2 PODNEBJE IN VODE V DOBI MERITEV

Prvi poizkusi spremljanja vremenskih razmer z merilnimi napravami so v posameznih krajih na območju današnje Slovenije potekali od konca 18. do srede 19. stoletja. V začetnem obdobju so meritve po obsegu in kakovosti nezadostne za zadovoljivo oceno podnebnih razmer v Sloveniji v primerjavi s podnebjem kasnejšega časa. V drugi polovici 19. stoletja se je meteorologija začela hitreje razvijati, zanimanje in zmožnosti za opazovanje in merjenje vremena so se povečali, zato je število meteoroloških postaj hitro naraščalo. S ciljem primerljivosti podatkov z različnih merilnih mest so metode merjenja postajale enotnejše, a je bila popolna standardizacija meritev uvedena šele sredi 20. stoletja. Ob koncu 19. stoletja je bilo pri nas že na desetine meteoroloških postaj, kar načeloma že omogoča dobro analizo podnebnih razmer. Na žalost je glavnina podatkov iz tega obdobja le v papirnati obliki, kar onemogoča sodobno obdelavo podatkov. V podobnem stanju so podatki do srede 20. stoletja, od leta 1961 pa so vsi podatki tudi v elektronski obliki. Zaradi razpoložljivosti podatkov imamo le za obdobje od leta 1961 do danes zelo dobro vedenje o podnebnju in podnebnih razmerah pri nas. V primerjavi s padavinami in temperaturo zraka imata spremljanje energije sončnega obsevanja in vetra sorazmerno kratko zgodovino; podrobnejše podatke imamo večinoma le za zadnjih 20 let.

Redna opazovanja vodostajev so se na nekaj lokacijah začela proti koncu 19. in na začetku 20. stoletja. Število vodomernih postaj se je v zgodovini spreminjalo in prilagajalo trenutnim potrebam in razvoju merilne opreme. Za pridobivanje natančnejših podatkov so merilna mesta začeli opremljati z napravami za zvezno beleženje vodnega stanja (limnigrafi). Meritve pretokov so postale redne in sistematične ter so omogočile izdelavo pretočnih krivulj in pretvarjanje vodostajev v pretoke. Po 2. svetovni vojni je število postaj naraščalo, kakovost merjenih podatkov se je izboljševala. Opazovanju vodostajev so predvsem v začetku 50-ih let prejšnjega stoletja na izbranih vodomernih postajah dodali meritve temperature vode. Največ postaj je delovalo v šestdesetih in prvi polovici sedemdesetih let prejšnjega stoletja, približno 350. V osemdesetih letih je bila izvedena racionalizacija hidrološke merilne mreže in veliko vodomernih postaj je bilo takrat ukinjenih. Večina podatkov je na voljo v elektronski obliki.

Trenutno sta za opis podnebjja posameznega kraja ali območja v splošni uporabi mednarodno določeni obdobji 1981–2010 in 1961–1990. Zaradi občutnih podnebnih sprememb pri nas prevladuje raba podatkov

iz novejšega obdobja. V nadaljevanju navajamo podnebnosti v Sloveniji v obdobju 1981–2010 in ugotovljene podnebnosti v obdobju 1961–2011. Kjer je analizirano obdobje zaradi omejenih podatkov drugačno, je to navedeno. Nekateri podatki so podani za meteorološke letne čase, ki so definirani kot:

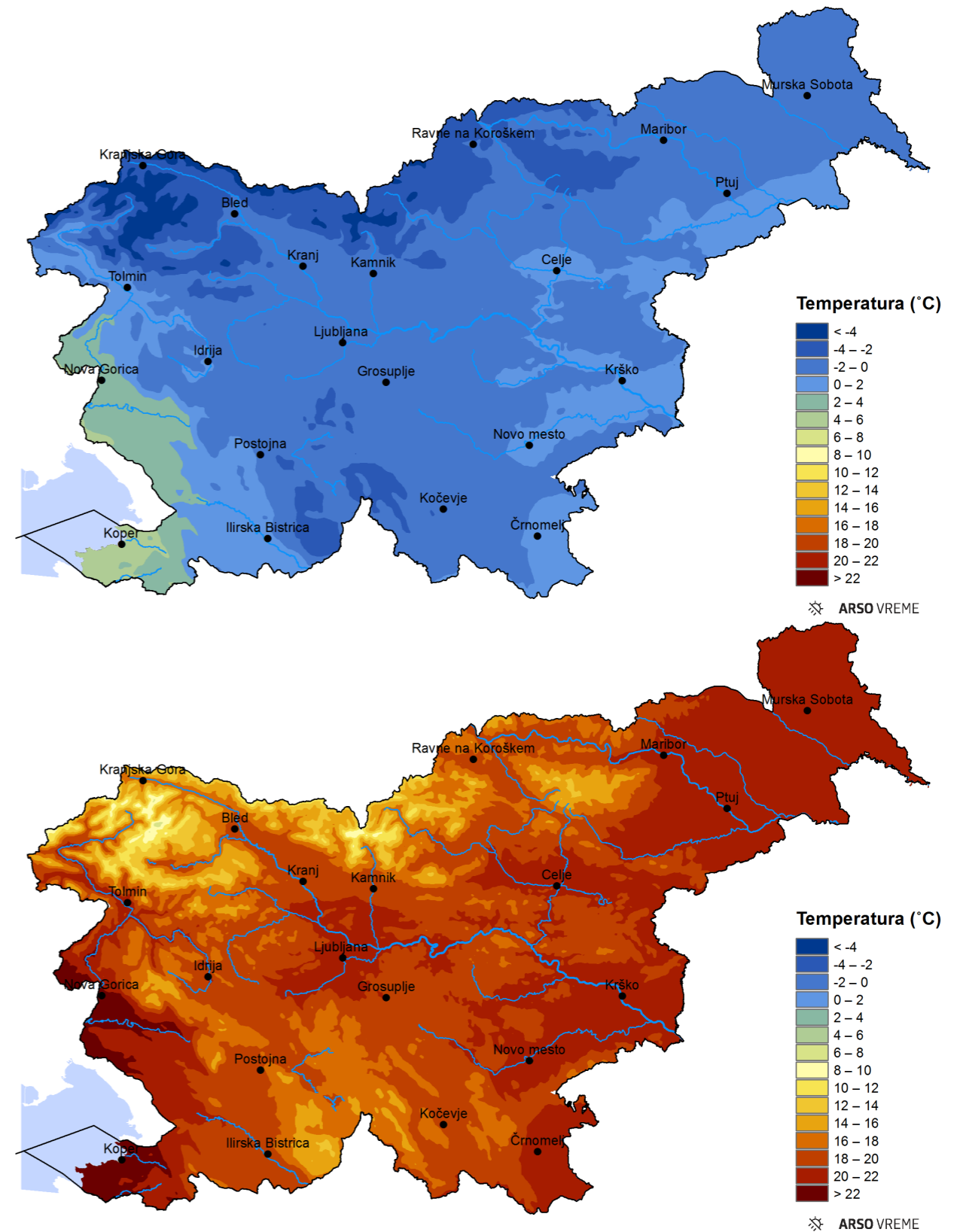
- zima: od 1. decembra do 28. ali 29. februarja,
- pomlad: od 1. marca do 31. maja,
- poletje: od 1. junija do 31. avgusta in
- jesen: od 1. septembra do 30. novembra.

Pri snegu je sezona čas od 1. avgusta do 31. julija naslednjega leta. Prikazani trendi podnebnih spremenljivk so izračuni z metodo Theila in Sena, hidroloških spremenljivk pa z metodo Mann-Kendall.

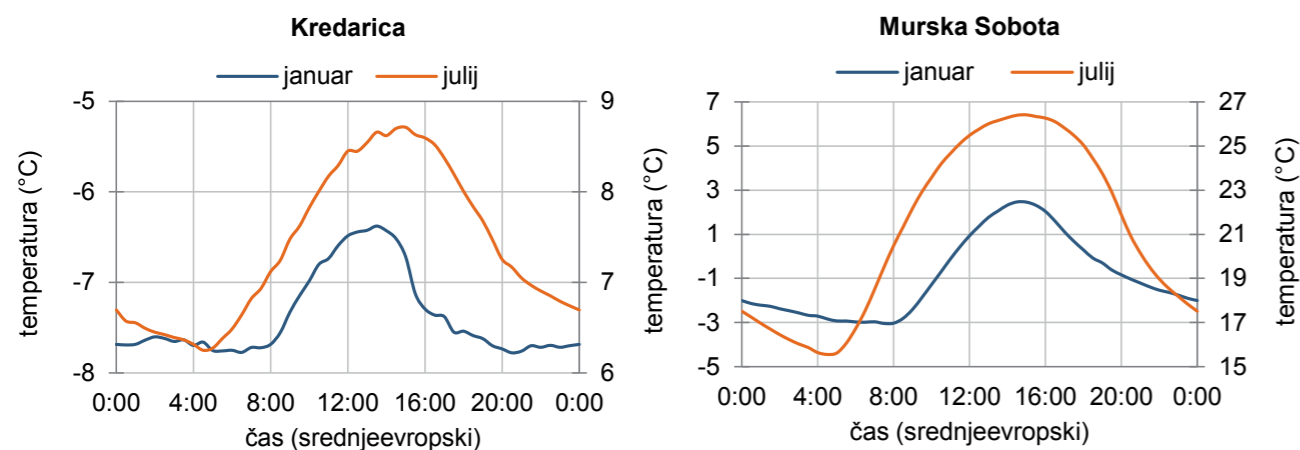
2.1 TEMPERATURA ZRAKA

Na temperaturo zraka v Sloveniji pomembno vpliva več dejavnikov. Letni časi so posledica nagnjenosti Zemljine osi glede na os kroženja Zemlje okoli Sonca – to povzroča veliko sezonsko nihanje osončenosti na zmernih in visokih geografskih širinah. Letno povprečje temperature zraka je v naših krajih najbolj odvisno od nadmorske višine; povprečno se temperatura zraka na vsakih 180 metrov dviga zmanjša za eno stopinjo Celzija. Med pomembne temperaturne dejavnike sodijo še bližina morja, oblikovanost površja in poselitev. Zaradi vseh navedenih dejavnikov sta Goriška in Koprsko primorje najtoplejši območja Slovenije z letno povprečno temperaturo 13 °C. V večjem delu Slovenije je letno povprečje temperature od 8 °C do 11 °C, v najvišjih delih visokogorja pa le približno 0 °C. V povprečju je skoraj povsod po Sloveniji najhladnejši mesec januar in najtoplejši julij. Razlika med obema mesecema je običajno približno 15–20 °C; najmanjša je v gorah in ob morju, največja pa v nižinah notranjosti Slovenije (slika 2.1).

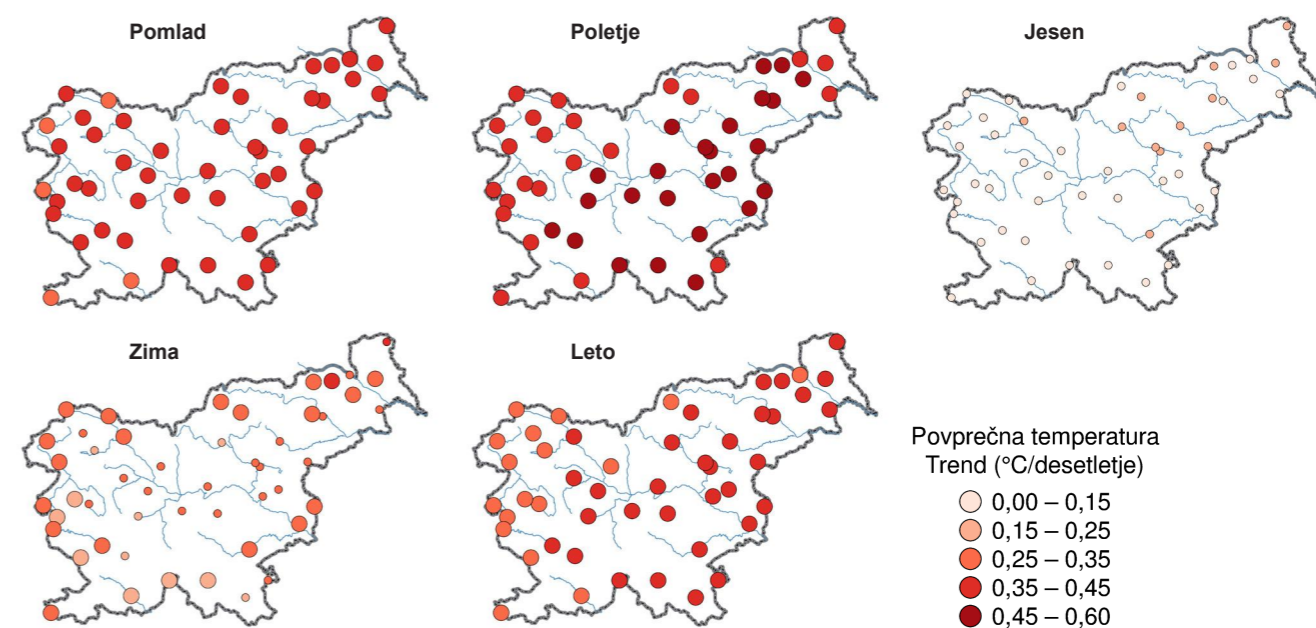
Poleg letnega hoda je za temperaturo zraka značilen dnevni hod – običajno je jutro za nekaj stopinj Celzija hladnejše od popoldneva. Razlika je večja v jasnem in mirnem vremenu, medtem ko se lahko v oblačnem ali vetrovnem vremenu temperatura čez dan spremeni le za kakšno stopinjo Celzija. V splošnem je amplituda dnevnega hoda večja poleti in v nižinah (slika 2.2).



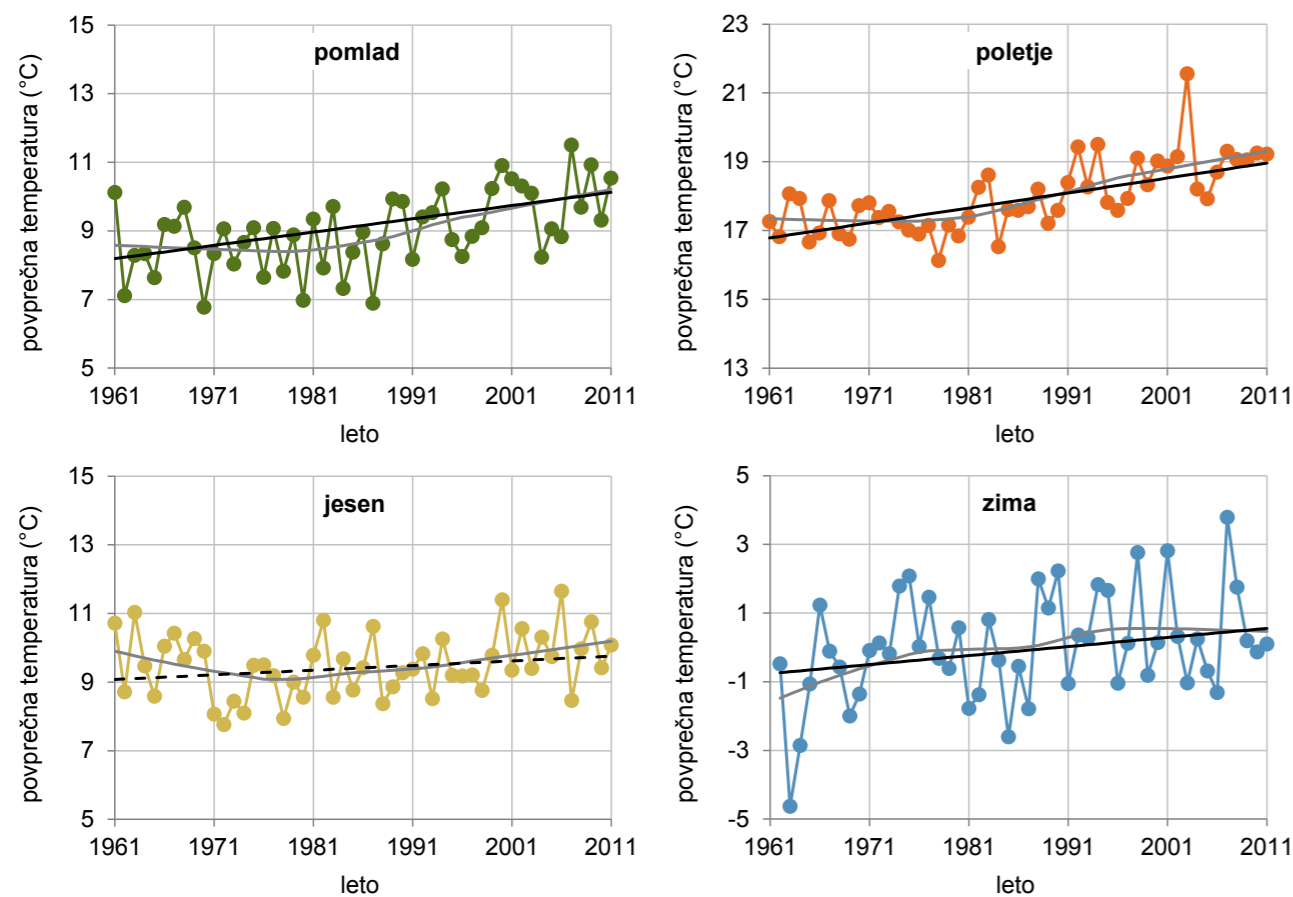
Slika 2.1 | Prostorska porazdelitev januarske (zgoraj) in julijske (spodaj) povprečne temperature zraka v obdobju 1981–2010



Slika 2.2 | Povprečni dnevni potek temperature zraka na Kredarici in v Murski Soboti v desetletnem obdobju 2001–2010. Os za januarske vrednosti je na levi in za julijske na desni strani grafikona.



Slika 2.4 | Linearni trend povprečne temperature zraka (°C/desetletje) v obdobju 1961–2011 (1961/62–2010/11 za zimo) na analiziranih merilnih mestih. Večji krogi prikazujejo statistično značilen trend.



Slika 2.3 | Potek povprečne temperature zraka v obdobju 1961–2011 (1961/62–2010/11 za zimo) po letnih časih (barvni krogi) za celotno Slovenijo. Krogec prikazuje sezonsko povprečje 49 slovenskih postaj. Siva krivulja prikazuje podnebni signal in črna daljica linearni trend. Statistično neznačilen trend je označen s prekinjeno črto. Za zimo se oznaka leta na vodoravni osi nanaša na konec zime.

Medletno (iz leta v leto) nihanje povprečne temperature je velikostnega reda nekaj desetink stopinje Celzija. Najbolj spremenljivi so meseci od januarja do marca, s standardnim odklonom odmika od podnebne signala od 2 do 2,5 °C. Od aprila do oktobra je nihanje za polovico manjše. Na sezonski ravni so tako s temperaturnega vidika poletja najbolj nespremenljiva, zime pa najbolj spremenljive (slika 2.3).

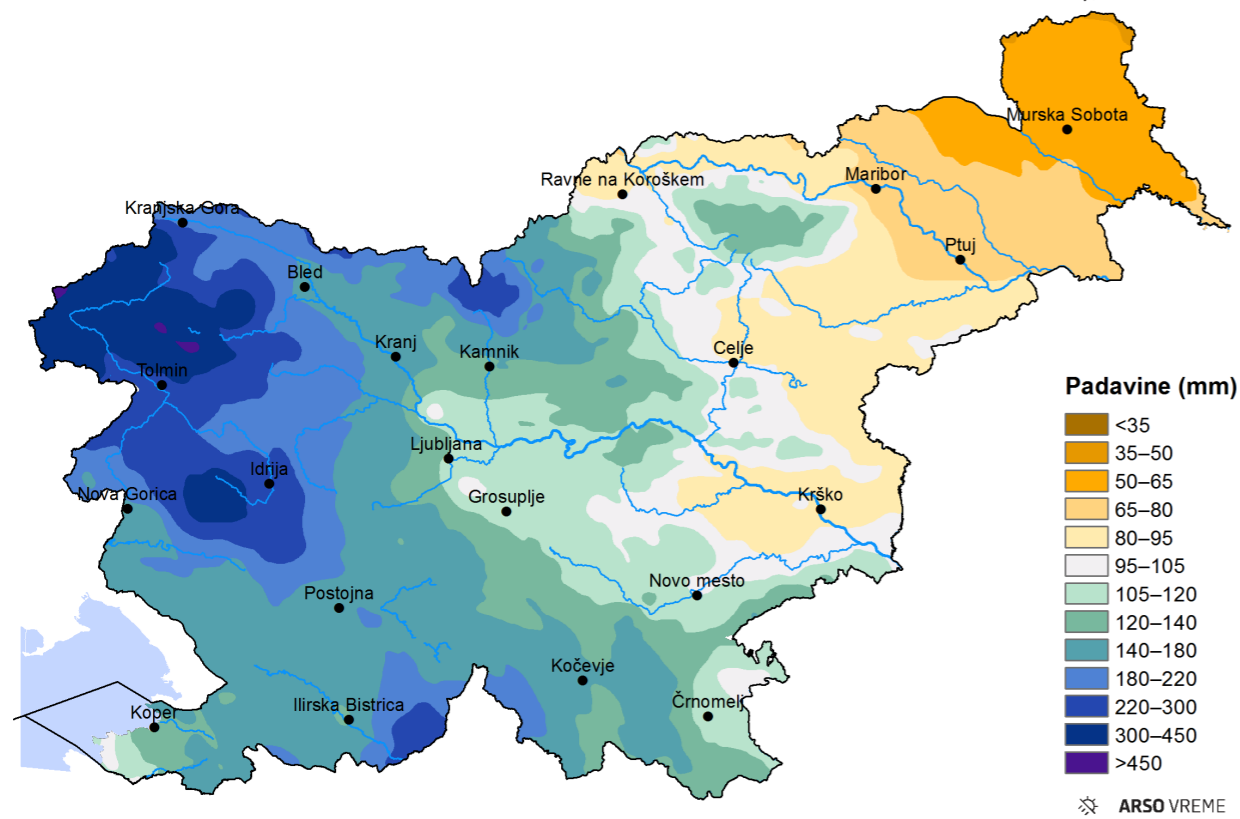
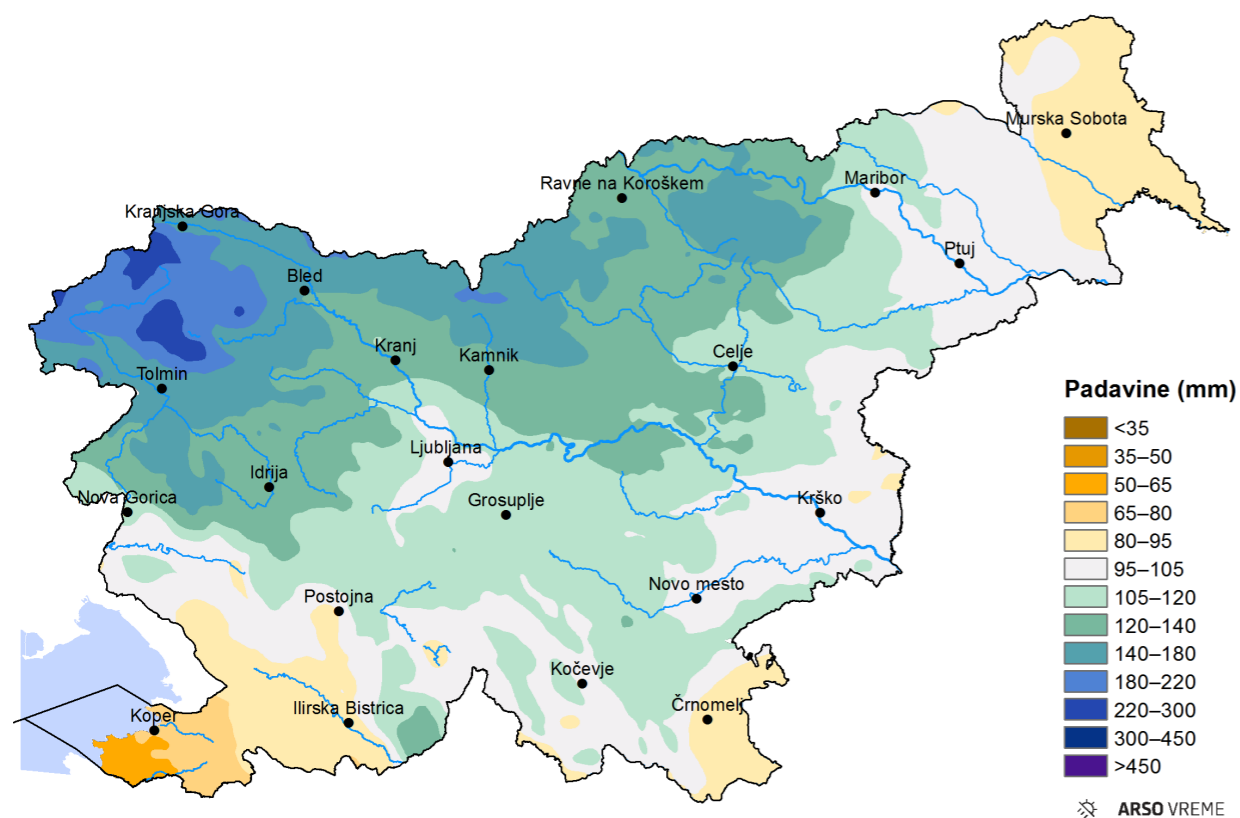
V obdobju 1961–2011 je najznačilnejša podnebna sprememba v Sloveniji dvig povprečne temperature zraka, in sicer za približno 0,36 °C na desetletje. Najočitnejše je segrevanje spomladi in poleti, v večjem delu Slovenije za približno 0,4 ali 0,5 °C na desetletje (slika 2.4). Nasprotno jesenska sprememba temperature ni statistično značilna. Dvig dnevne najvišje in najnižje temperature po letnih časih je podobno velik kot pri povprečni temperaturi. Zaradi splošnega dviga temperature zraka se je spremenila pogostost števila značilnih dni: povečalo se je število vročih in toplih dni, manj statistično značilno pa je upadlo število hladnih, mrzlih in ledenih dni.

2.2 VIŠINA PADAVIN

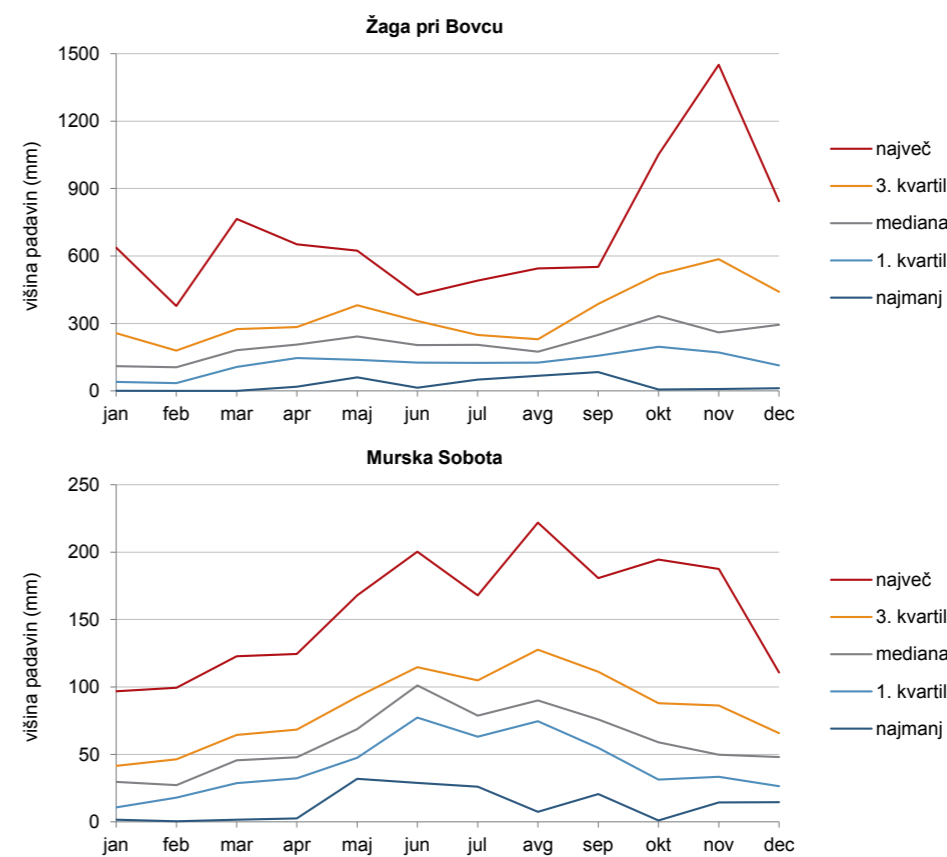
Slovenija je zaradi lege v zmernih geografskih širinah in bližine morja na zahodni strani celine sorazmerno dobro namočeno območje. Razlike med posameznimi območji Slovenije pa so zaradi razgibanega reliefa in različne oddaljenosti od morja zelo velike. V povprečno namočenem letu v Sloveniji pade od 700 mm padavin v delu Prekmurja do več kot 3.000 mm v Julijskih Alpah in še ponekod na alpsko-dinarski pregradi. Poletne padavine so pogosto v obliki nalivov, v hladnem delu leta pa prevladujejo orografske padavine (narivanje vlažne zračne mase na hribe in gore) in ciklonalne padavine (dviganje vlažnega zraka ob vremenskih frontah).

Letni padavinski režim se med območji po Sloveniji precej razlikuje. Za namočene dele zahodne Slovenije je značilen jesenski višek, proti vzhodu pa čedalje bolj narašča poletni višek padavin (slika 2.5), jesenski višek pa se spremeni v postopno upadanje padavin proti zimi. Zima je povsod najmanj namočen letni čas, kar je posledica nižje temperature ozračja, ki ima manjšo sposobnost zadrževanja in prenosa vodne pare ter s tem tudi nastanka padavin.

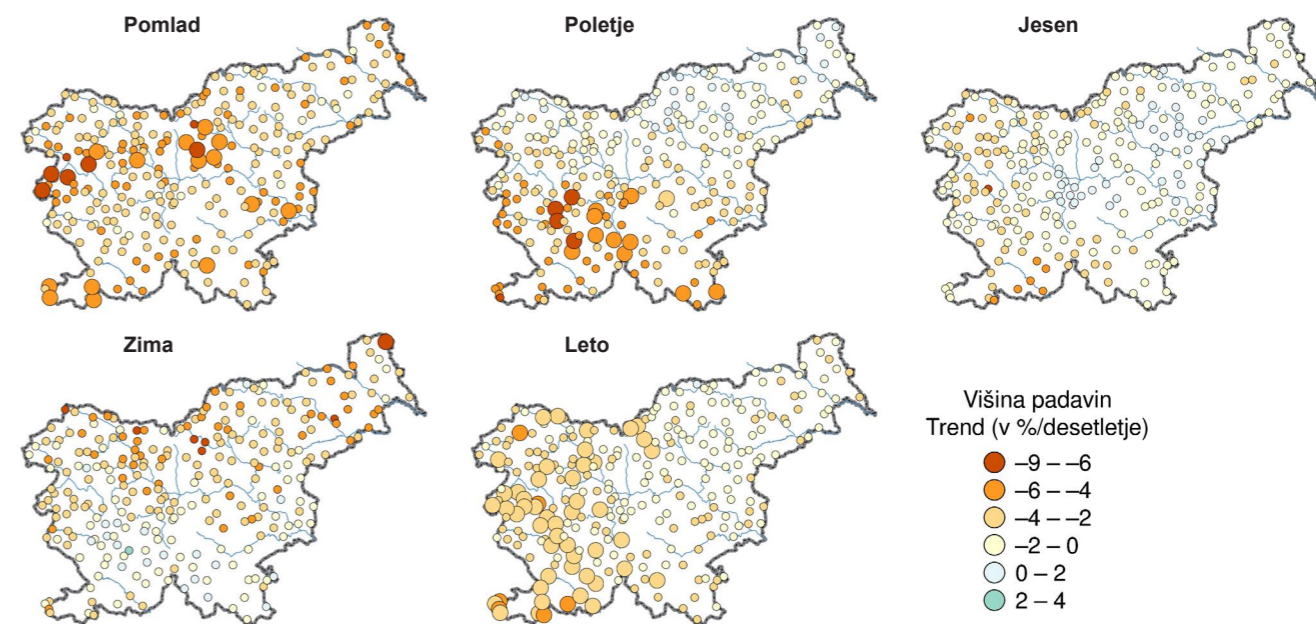
Medletna in medmesečna spremenljivost višine padavin je glede na povprečni letni cikel mnogo bolj izrazita kot pri temperaturi zraka. Tako je lahko



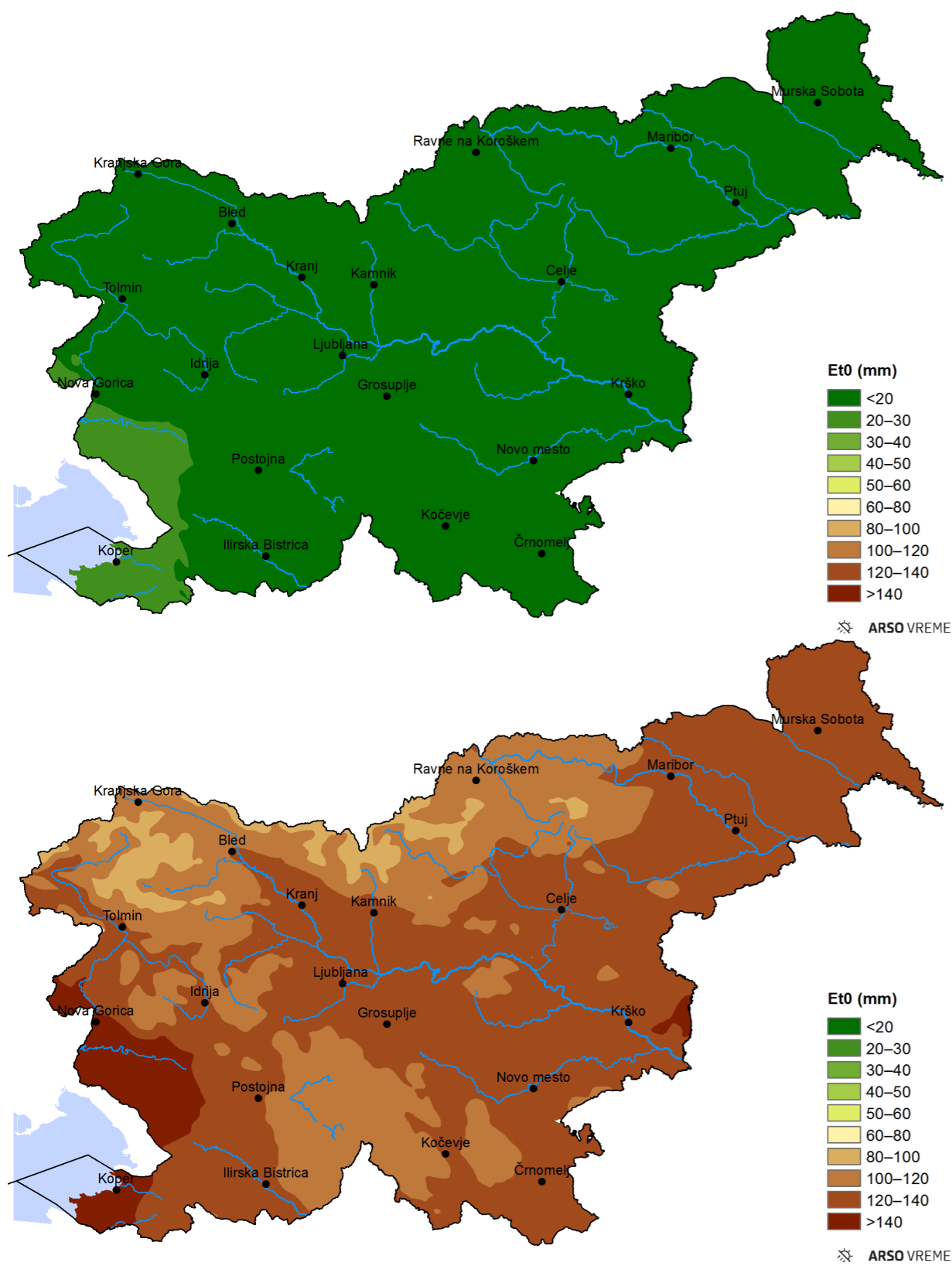
Slika 2.5 | Prostorska porazdelitev povprečne julijske (zgoraj) in novembrske (spodaj) višine padavin v obdobju 1981-2010



Slika 2.6 | Spremenljivost mesečne višine padavin v obdobju 1981-2010 v Žagi pri Bovcu (zgoraj) in v Murski Soboti (spodaj)



Slika 2.7 | Linearni trend višine padavin po letnih časih in za celo leto skupaj, obdobje 1961-2011 (1961/62-2010/11 za zimo) na analiziranih merilnih mestih. Večji krogi prikazujejo statistično značilen trend.



Slika 2.8 | Prostorska porazdelitev povprečne referenčne evapotranspiracije januarja (zgoraj) in julija (spodaj) v obdobju 1981–2010

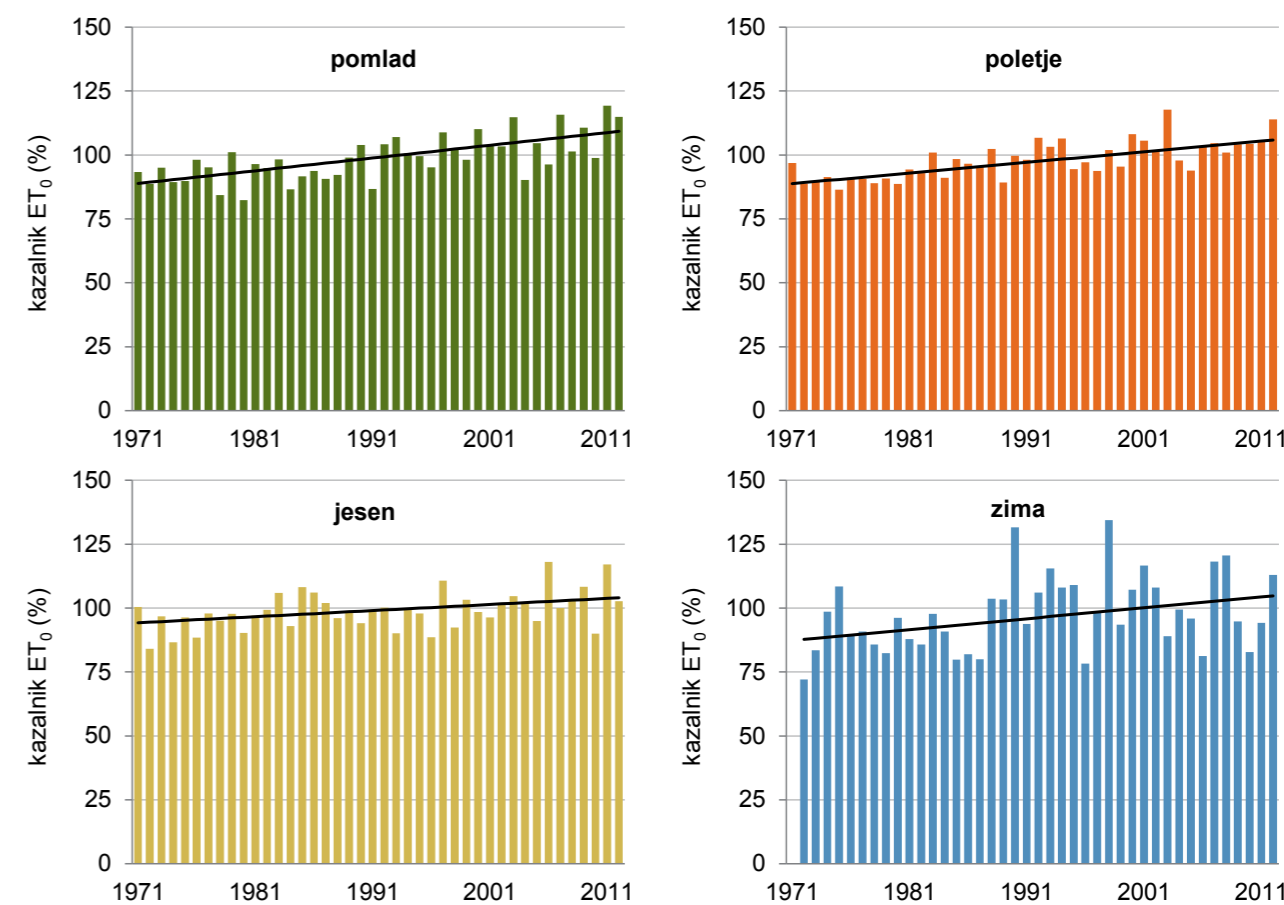
v posameznem letu ne glede na padavinski režim kateri koli mesec leta najbolj namočen in katerikoli najbolj suh (slika 2.6). Relativno gledano so padavine po količini najbolj spremenljive januarja in februarja, najmanj pa junija.

Trend letne višine padavin je v 51-letnem obdobju skoraj povsod po Sloveniji negativen in znaša do nekaj odstotkov na desetletje, a je le na zahodu statistično značilen (slika 2.7). K negativnemu trendu najbolj prispevata zmanjševanje padavin spomladi in poleti (na državni ravni približno –3 % na desetletje), medtem ko je jeseni in pozimi trend v večjem delu Slovenije neznačilen ali zelo negotov (slika 2.7). Manj značilne od trenda skupne višine padavin so spremembe v številu dni z obilnimi padavinami in največjo dnevno ali dvodnevno višino padavin. Med statistično značilnimi spremembami v teh statistikah prevladujejo tiste z negativnim trendom.

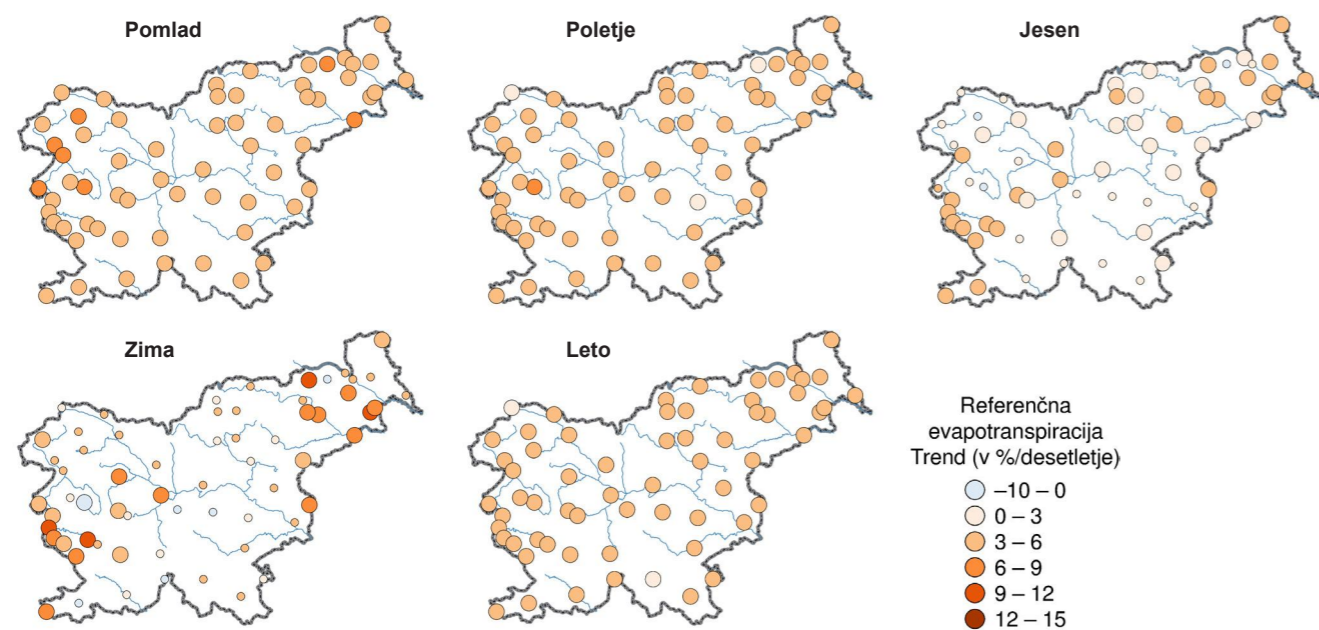
2.3 REFERENČNA EVAPOTRANSPIRACIJA

Izhlapavanje (evaporacija) z zemeljskega površja skupaj s transpiracijo rastlin sodi med pomembne dejavnike podnebne sistema. Meritve evapotranspiracije so težko izvedljive, zato evapotranspiracijo običajno ocenimo le kot največjo možno, referenčno vrednost na podlagi drugih meritev.

Referenčno evapotranspiracijo za referenčno travnato površino po metodi Penmana in Monteitha izračunamo na podlagi temperature in relativne vlažnosti zraka, hitrosti vetra in sončnega obsevanja. V dolgoletnem povprečju je v Sloveniji referenčna evapotranspiracija največja v toplih, prevetrenih in sončnih krajih ter doseže približno 1.000 mm na leto. V večjem delu notranjosti je referenčna evapotranspiracija od 600 do 800 mm, v goratem svetu pa manj.



Slika 2.9 | Kazalnik referenčne evapotranspiracije (ET_0) na državni ravni v obdobju 1971–2012, za zimo v obdobju 1971/1972–2010/2011. Kazalnik je izračunan kot aritmetična sredina kazalnika (razmerja med posamezno vrednostjo referenčne evapotranspiracije in pripadajočim povprečjem obdobja 1981–2010) na zajetih meteoroloških postajah. S črno črto je prikazan trend, ki je v vseh letnih časih statistično značilen.



Slika 2.10 | Linearni trend kazalnika referenčne evapotranspiracije po letnih časih in za celo leto skupaj, obdobje 1971–2011 (1971/72–2010/11 za zimo) na analiziranih merilnih mestih. Večji krogi prikazujejo statistično značilen trend.

Zaradi velike odvisnosti izhlapevanja od temperature zraka in sončnega obsevanja ima referenčna evapotranspiracija izrazit letni hod – decembra in januarja znaša od nekaj milimetrov do približno 30 mm, julija pa je v večjem delu Slovenije od 100 do 170 mm (slika 2.8).

Standardni odklon nihanja vrednosti referenčne evapotranspiracije iz leta v leto je nekajodstoten, na mesečni ravni večinoma od 7 do 15 %, le januarja in februarja približno 20 %. Pri absolutnih vrednostih (v milimetrih) je zaradi izrazitega letnega hoda evapotranspiracije slika nihanja skorajda obrnjena; najmanjše nihanje je novembra in decembra, največje pa avgusta. Po absolutnih vrednostih so tako najbolj spremenljive poletne in najmanj zimske vrednosti evapotranspiracije, relativno gledano pa je slika obrnjena (slika 2.9). Razlike v stopnji nihanja med posameznimi območji po Sloveniji so velike.

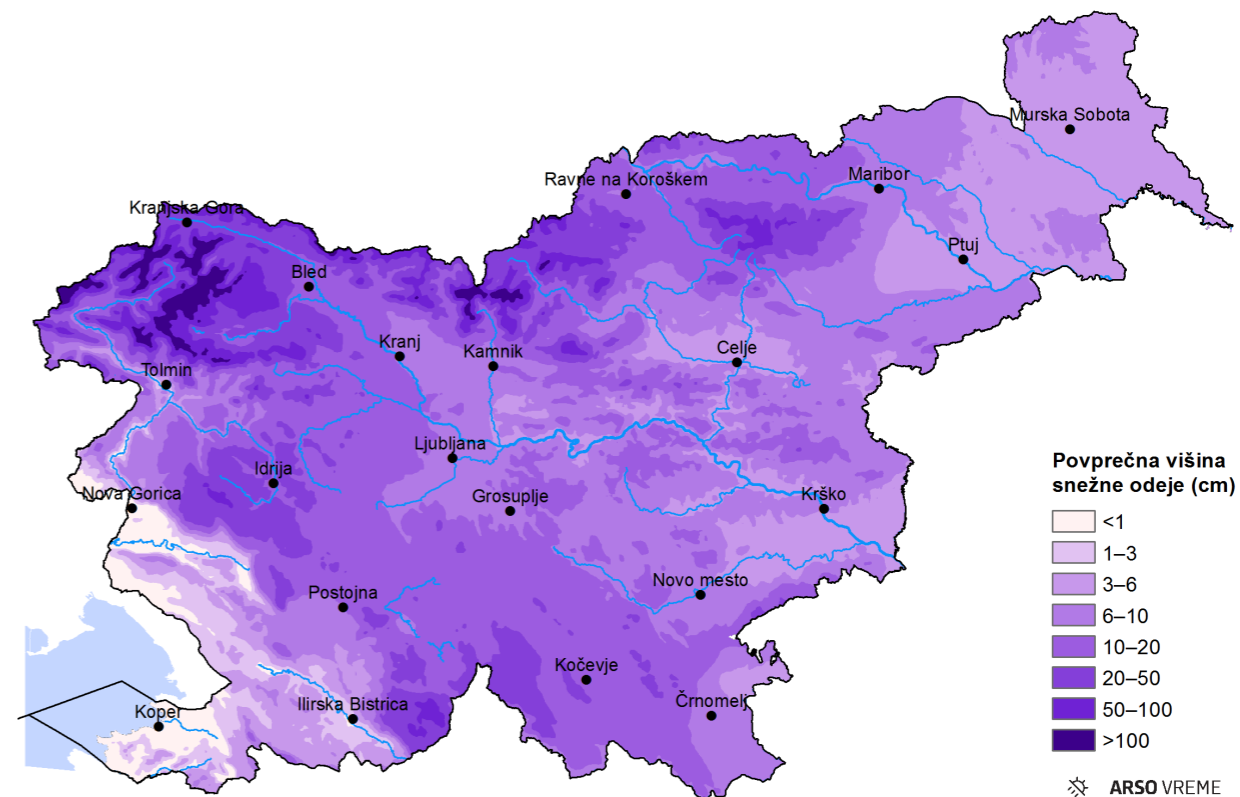
V skladu z značilnimi spremembami v temperaturi zraka in sončnem obsevanju se je v zadnjih desetletjih spremenila referenčna evapotranspiracija (slika 2.10). V obdobju 1971–2012 se je značilno, za približno 4–5 % na desetletje, povečala zlasti spomladi in poleti, v drugih dveh letnih časih pa je sprememba le ponekod statistično značilna.

2.4 VIŠINA SNEGA

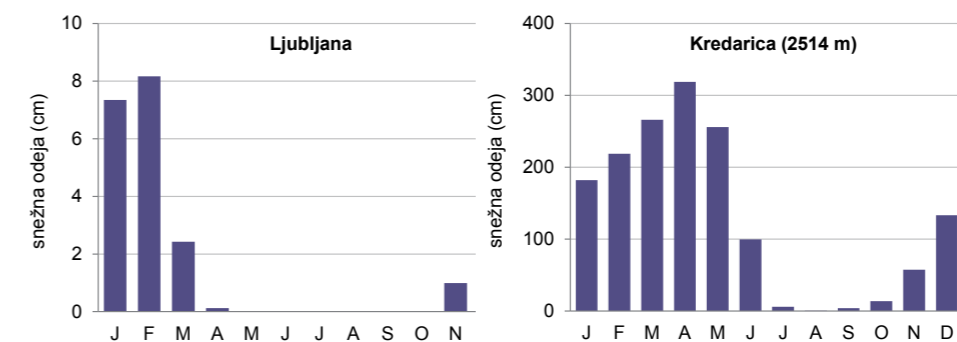
Sneg in snežna odeja sta v večjem delu Slovenije vsakoletni pojav, a so količina snežnih padavin, trajanje in debelina snežne odeje zelo spremenljivi v prostoru in času. Na splošno velja, da količina snega narašča z naraščajočo nadmorsko višino. Zaradi vpliva morja in alpsko-dinarske pregrade je snega na enaki nadmorski višini običajno več v notranjosti Slovenije kakor na Primorskem.

Največ snega ima v povprečju visokogorje Julijskih Alp, nekoliko manj pa vršni predeli Karavank in Kamniško-Savinjskih Alp (slika 2.11). V gorah lahko sneži v katerem koli delu leta. V alpskih dolinah je snega nekajkrat manj, še manj pa po nižinah v notranjosti države. Po nižinah se sneženje lahko pojavlja od oktobra do maja, najpogostejše pa je od decembra do februarja (sliki 2.12 in 2.13). V Ljubljanski, Novomeški in Celjski kotlini je letno povprečje novega snega približno en meter, na severovzhodu pa nekoliko manj. V nižjih predelih Goriške in na Obali je sneg redek pojav, saj marsikatera zima mine brez sneženja in snežne odeje.

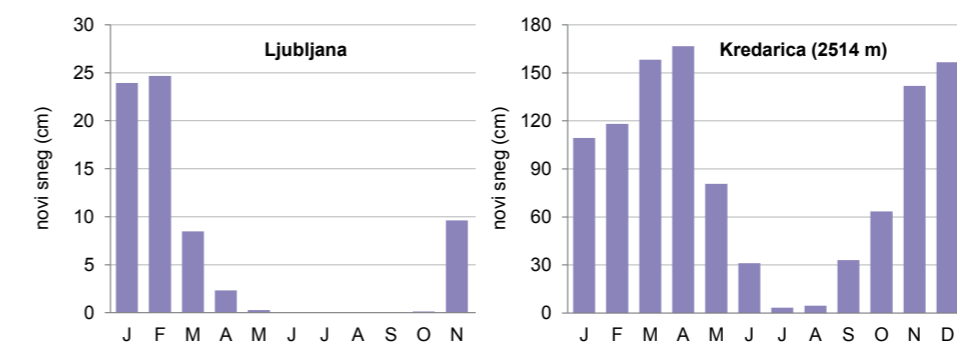
V precejšnjem delu Slovenije je trend višine snežne odeje in količine novega snega v obdobju 1961–2011 statistično značilno negativen (slika 2.14). Najbolj opazne so spremembe v nižje ležečih delih alpskega



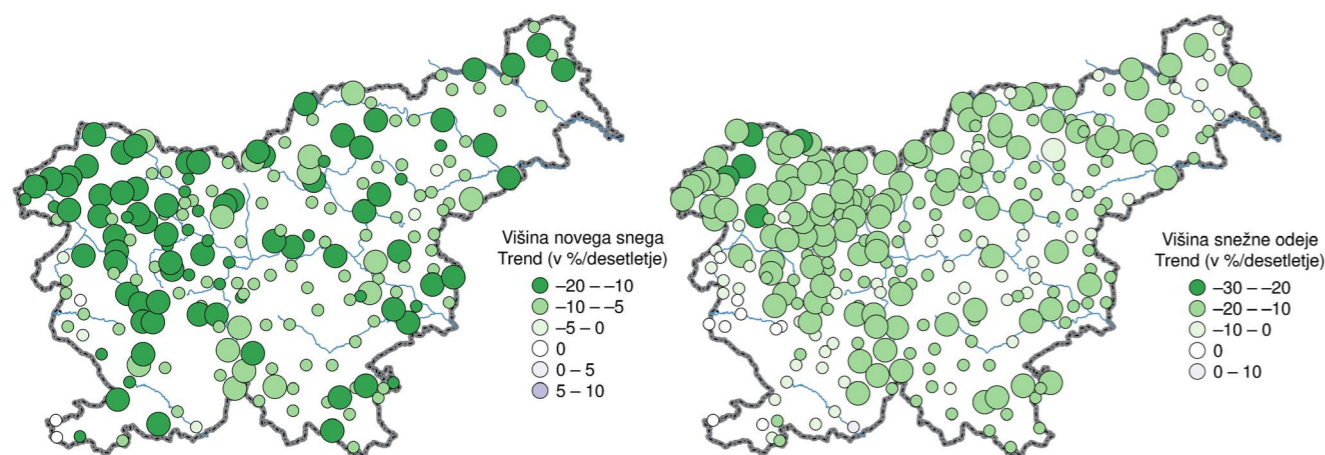
Slika 2.11 | Prostorska porazdelitev povprečne višine snežne odeje februarja v obdobju 1981–2010



Slika 2.12 | Mesečni povprečni potek višine snežne odeje v Ljubljani in na Kredarici



Slika 2.13 | Mesečni povprečni potek skupne višine novega snega v Ljubljani in na Kredarici



Slika 2.14 | Linearni trend kazalnika skupne višine novega snega (levo) in povprečne višine snežne odeje (desno) čez vse leto v obdobju 1961–2011 na analiziranih merilnih mestih. Večji krogi prikazujejo statistično značilen trend.

sveta, kjer srednja ocena trenda višine snežne odeje dosega tudi -20 % na desetletje, kar pomeni, da se je od začetka do konca obdobja višina snega več kot prepolovila. Pri tem je treba poudariti, da je statistična negotovost velikosti trenda precejšnja, saj je medletno nihanje pri snegu zelo veliko. Na državni ravni je srednja ocena za velikost trenda zimske povprečne višine snežne odeje -16 % na desetletje, 95-odstotni interval zaupanja pa sega od -35 do +4 % na desetletje.

voljo le kratke nize meritev, največ za obdobje dobrih dvajset let (za trajanje so nizi precej daljši; slika 2.16). Globalni obsev in trajanje sončnega obsevanja sta sicer na dnevni do letni ravni tesno povezana, saj praviloma ob sončnem vremenu tla prejmejo več sončne energije kot v oblačnem vremenu.

V večjem delu Slovenije je letni globalni obsev od 1100 do 1500 kWh/m² z nihanjem vrednosti iz leta v leto za nekaj odstotkov. Letni hod je bolj izrazit kot pri trajanju; decembrske vrednosti so približno 30 kWh/m², julijske pa približno 180 kWh/m² (slika 2.17).

Trajanje sončnega obsevanja se je v obdobju 1961–2011 spomladi in poleti v večjem delu občutno podaljševalo, s trendom približno 2–3 % na desetletje (slika 2.18). Tudi zimski trend je pozitiven, a le ponekod statistično značilen. Jeseni ni bilo opaznih sprememb. Na letni ravni znaša trend približno 2 % na desetletje, kar pomeni rast števila sončnih ur za približno 40 na desetletje.

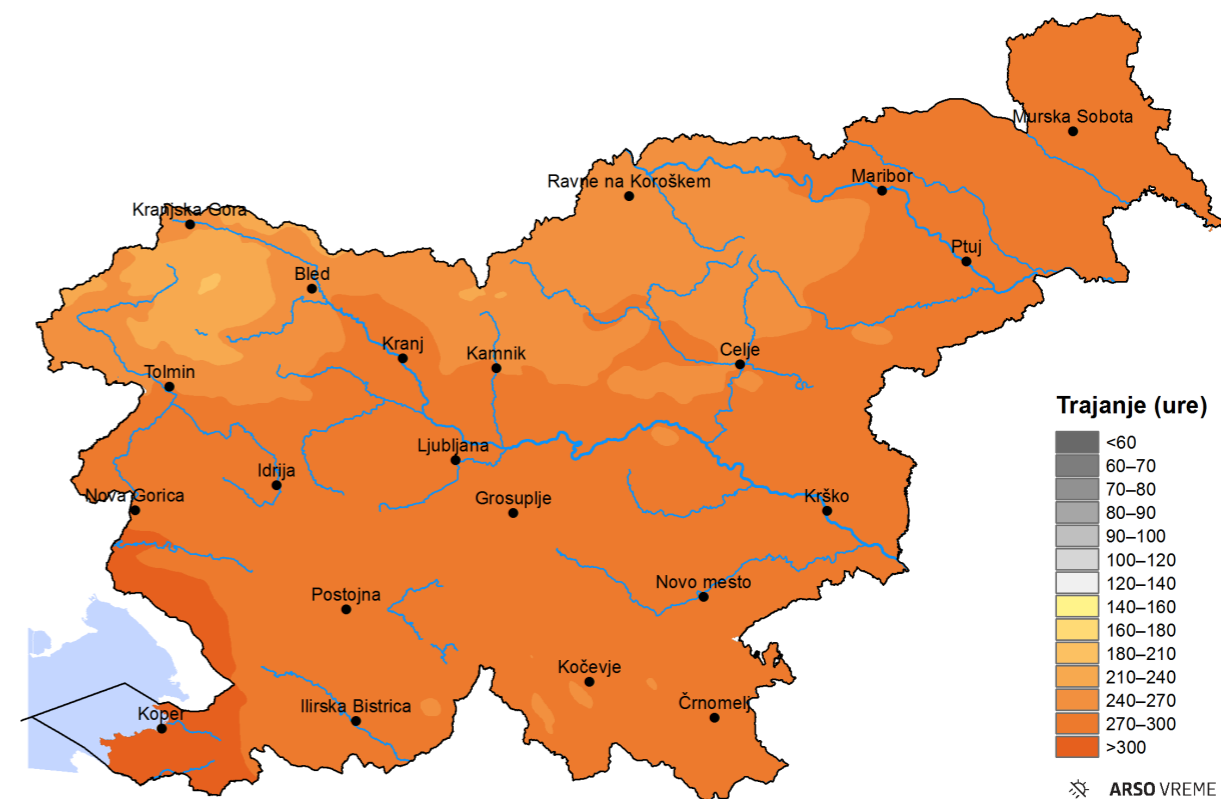
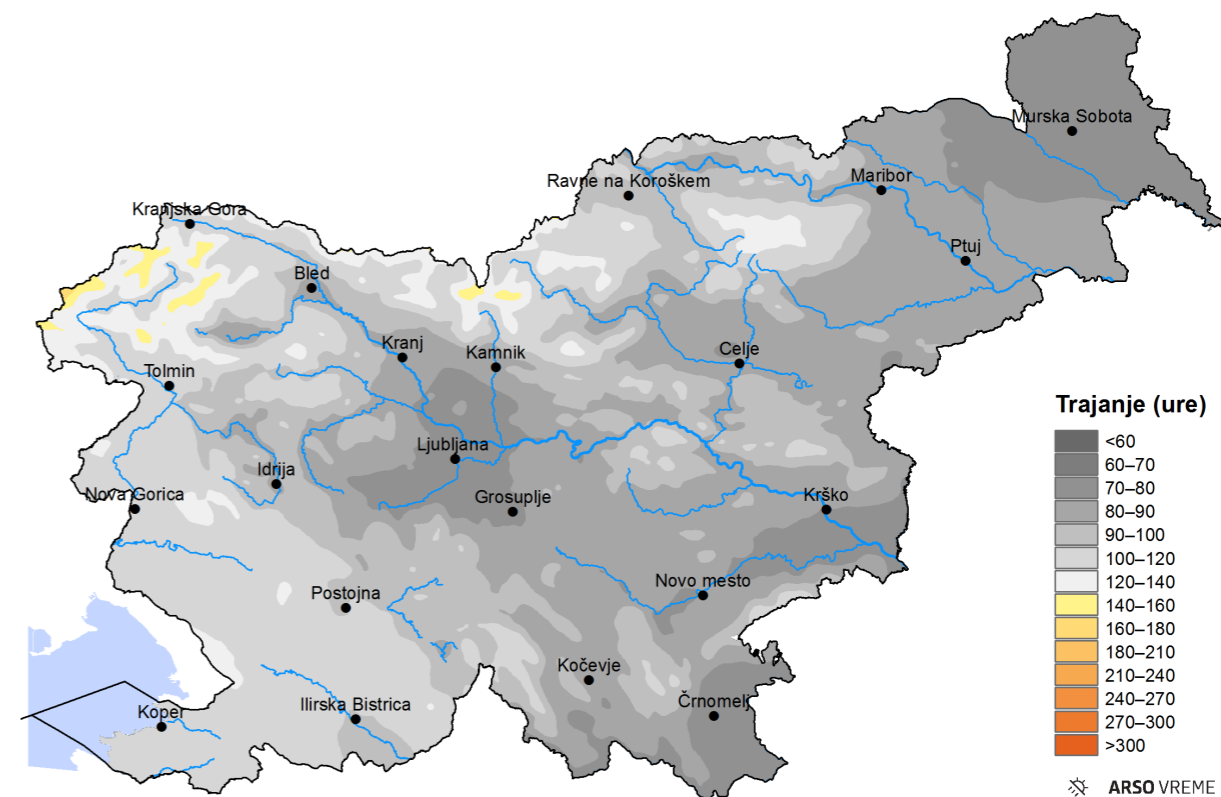
2.5 SONČNO OBSEVANJE

V Sloveniji je trajanje sončnega obsevanja zaradi reliefa in njegovega vpliva na vreme največje v delu Primorske (slika 2.15). Sorazmerno sončni so vsi letni časi, deloma zaradi burje, ki suši ozračje in s tem tudi morebitno oblačnost. V večjem delu Slovenije ima trajanje sončnega obsevanja izrazit letni hod. Zime so v višjih legah praviloma bolj osončene kakor v nižjih, kar je posledica pogoste megle ali nizke oblačnosti po nižinah. Pole-tja so najbolj sončna na Primorskem, nekoliko manj v notranjosti. Zaradi močnega sončnega obsevanja so poleti gore pogosto ovite v kopasto oblačnost, zato je v gorah poleti sonca komajda kaj več kakor februarja ali oktobra.

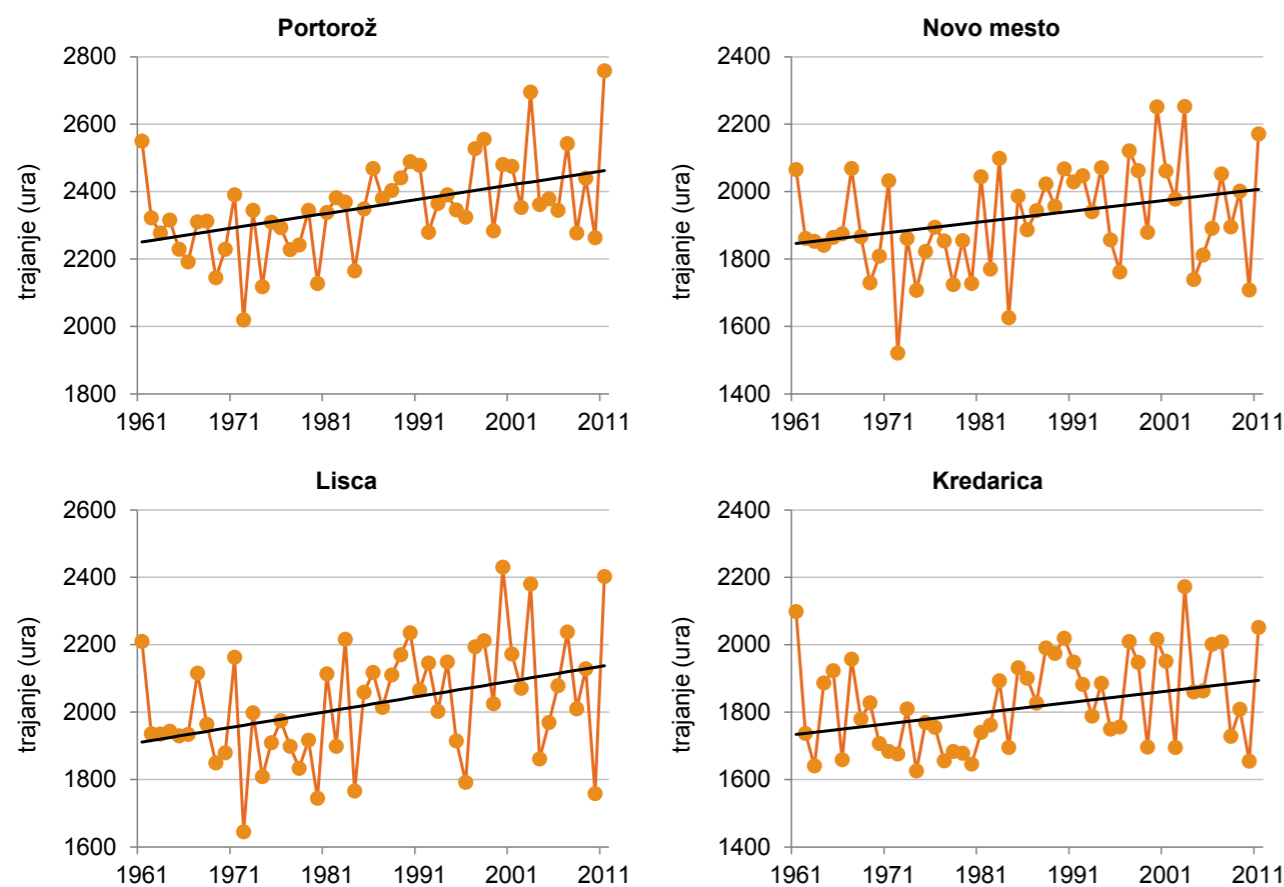
Medtem ko je trajanje sončnega obsevanja lažje meriti, je za številne uporabnike uporabnejši podatek gostota toka sončnega obsevanja. Za gostoto toka imamo na

2.6 VETER

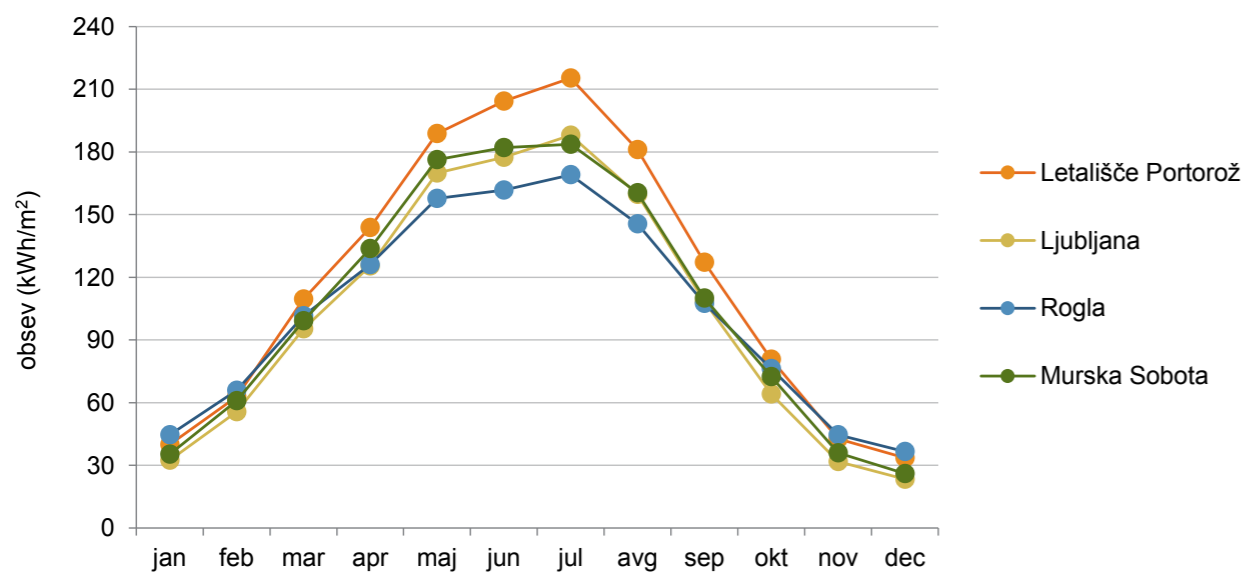
Podnebne značilnosti vetra so odvisne od geografske lege, zlasti od nadmorske višine, reliefa, rastja, bližine večjih vodnih teles, ovir v okolici kraja, stopnje urbanizacije in vremenskih dogajanj na večjem območju. Povprečna hitrost vetra je odvisna tudi od višine nad tlemi,



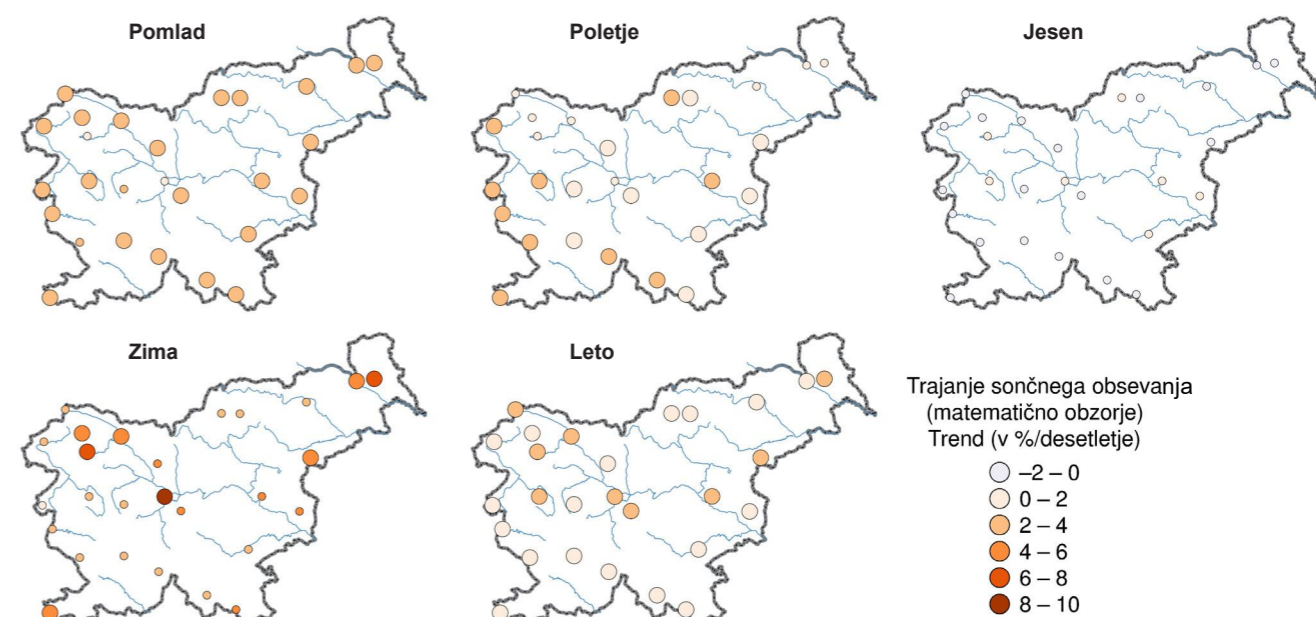
Slika 2.15 | Prostorska porazdelitev povprečnega trajanja sončnega obsevanja januarja (zgoraj) in julija (spodaj) v obdobju 1981–2010



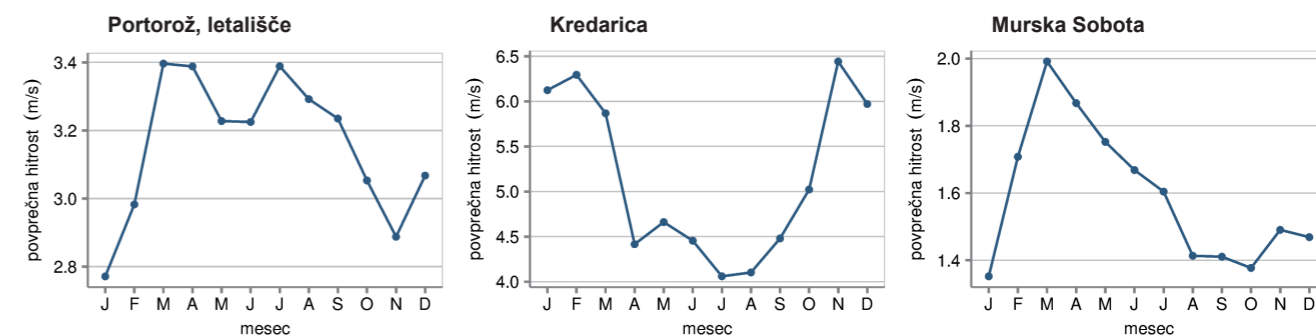
Slika 2.16 | Časovni potek letnega trajanja sončnega obsevanja v obdobju 1961–2011 v različnih predelih Slovenije. S črno črto je prikazan linearni trend, ki je povsod statistično značilen.



Slika 2.17 | Povprečni mesečni globalni obsev za štiri postaje v obdobju 1995–2013



Slika 2.18 | Linearni trend kazalnika trajanja sončnega obsevanja po letnih časih in za celo leto skupaj, obdobje 1961–2011 (1961/62–2010/11 za zimo) na analiziranih merilnih mestih. Večji krogi prikazujejo statistično značilen trend.



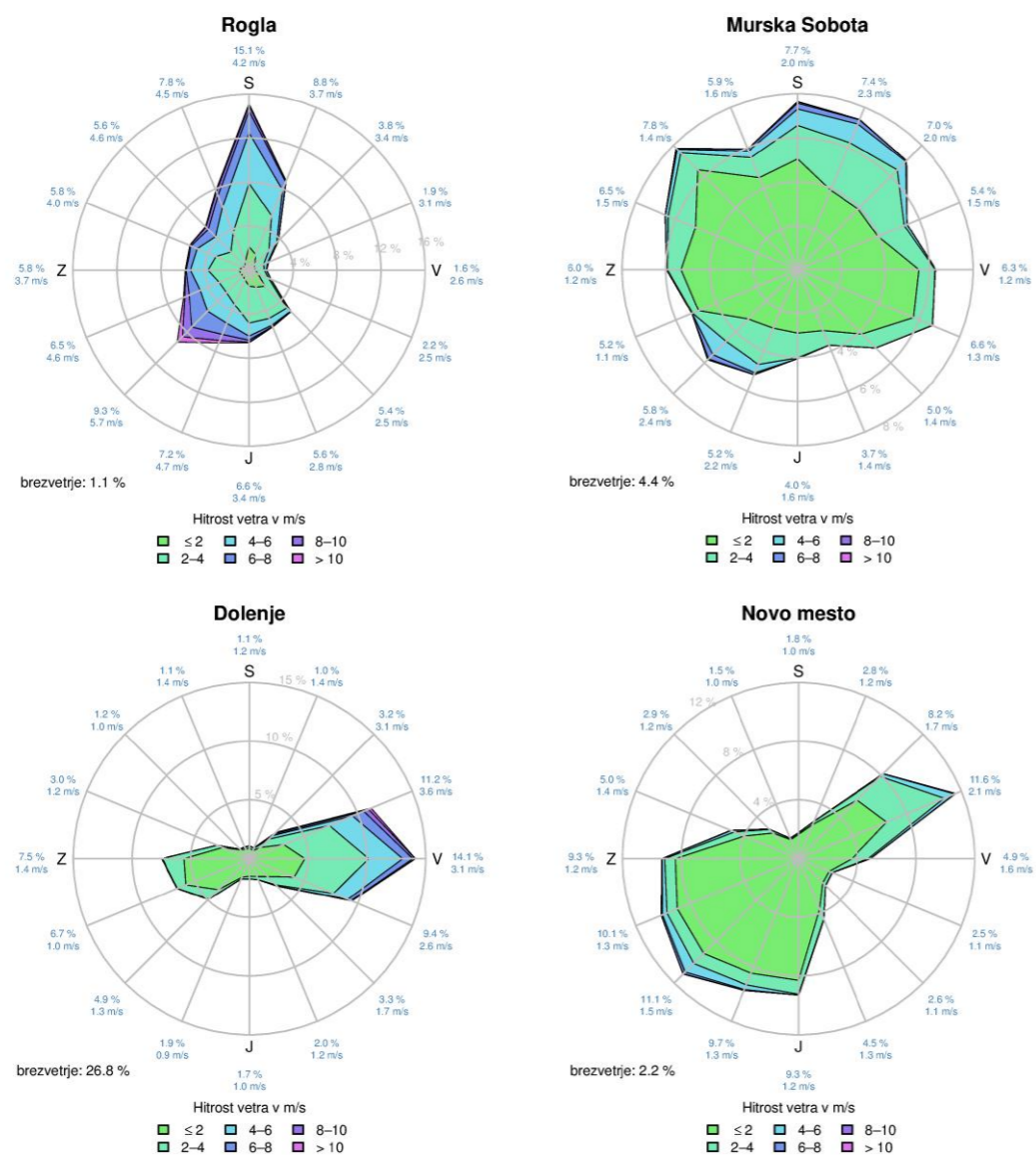
Slika 2.19 | Mesečne povprečne hitrosti vetra v Portorožu, na Kredarici in v Murski Soboti. Podatki so iz obdobja 2001–2010.

saj se pri tleh hitrost vetra zaradi trenja zmanjša. Zaradi primerljivosti meritev v različnih krajih veter običajno merimo 10 metrov nad tlemi. V grobem razlikujemo štiri območja s podobno povprečno hitrostjo vetra: visokogorje, Primorsko, nižinska območja notranjosti Slovenije ter izpostavljene in višje lege notranjosti Slovenije. Na splošno povprečna hitrost vetra narašča z nadmorsko višino, za približno 1,5 m/s na vsakih 1000 metrov. V najbolj prevetrenih delih Slovenije znaša dolgoletno povprečje hitrosti vetra približno 5 m/s (Kredarica 5,2 m/s, boja pred Piranom 4,5 m/s, Krvavec in Rogla 3,9 m/s), v srednje prevetrenih legah približno 3 m/s in po nižinah večinoma od 1 do 2 m/s. Hitrost vetra na danem merilnem mestu je nesimetrično porazdeljena, s pogostim šibkim vetrom in redkim močnim ali viharnim vetrom.

Letni hod povprečne hitrosti vetra na merilnih postajah ARSO kaže razlike med postajami v visokogorju, po nižinah v notranjosti Slovenije, na višjih, izpostavljenih legah v notranjosti Slovenije in na Primorskem (slika 2.19).

Hitrost vetra se podobno kot temperatura, le manj izrazito, spreminja tudi v dnevnem ciklusu. V višinah običajno močnejše piha ponoči in zjutraj, v nižinah čez dan.

Letna spremenljivost povprečne hitrosti vetra je velikostnega reda 10 %, mesečna spremenljivost pa večinoma od 20 do 30 %.



Slika 2.20 | Vetrna roža v štirih krajih po Sloveniji. Podatki so iz obdobja 2001–2010.

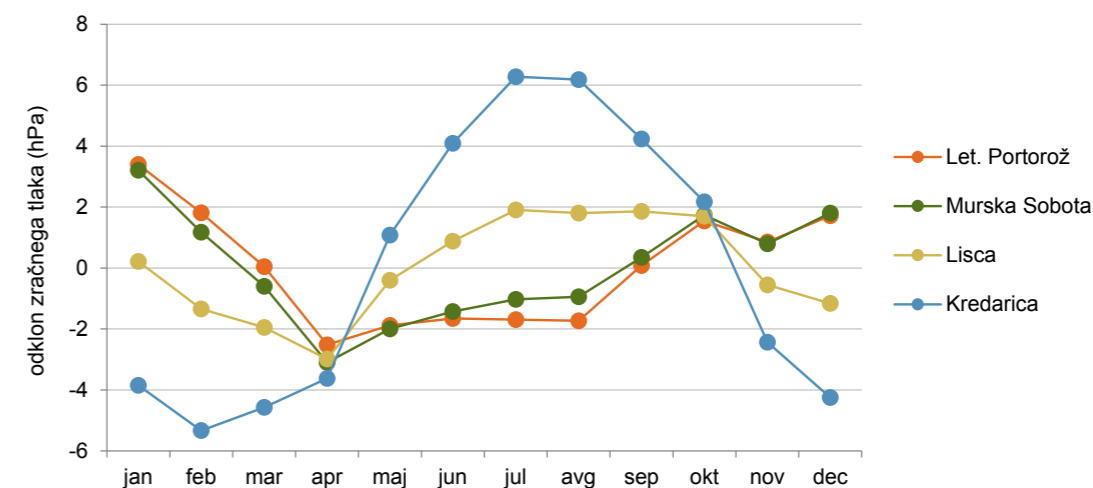
Prevladujoča smer vetra je med območji zelo različna, saj nanjo močno vplivata relief in ovire v bližnji okolici. Pogostost smeri vetra, običajno pa tudi hitrosti v različnih smereh, prikazujemo z vetrno rožo – krožnim diagramom. Ponekod močno prevladuje ena ali dve smeri vetra, drugje je pogost veter iz vseh smeri (slika 2.20).

Zaradi sorazmerno kratkih časovnih nizov in velikega števila dejavnikov, ki vplivajo na meritve hitrosti vetra, nimamo dobrih ocen o spreminjanju v daljšem, več desetletnem časovnem obdobju.

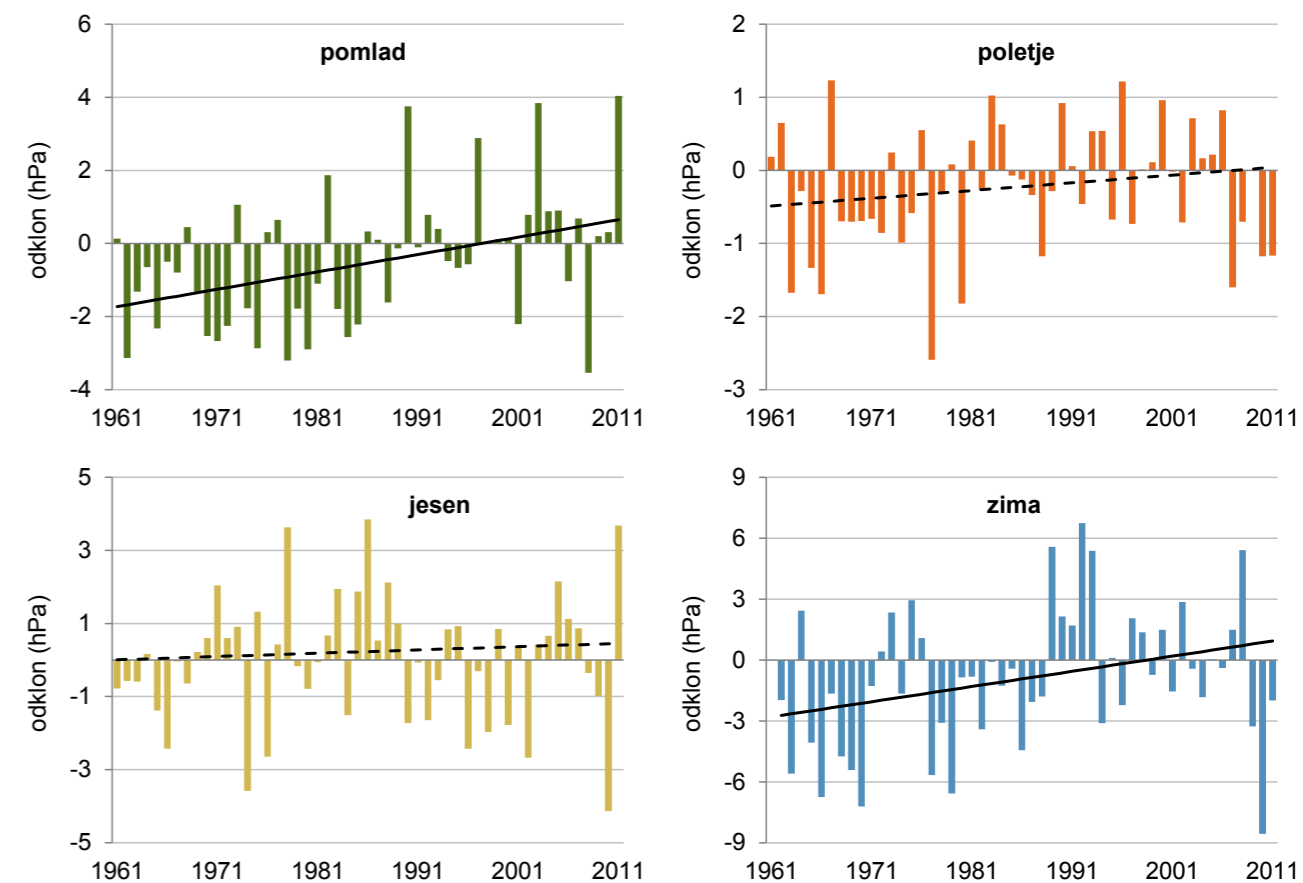
2.7 ZRAČNI TLAK

Zračni tlak je pomembna meteorološka spremenljivka za opis vremenskega dogajanja na večjem območju, medtem ko je na krajevni ravni manj informativna od prej obravnavanih spremenljivk. Kljub temu analiza meritev zračnega tlaka v daljšem časovnem obdobju pripomore k poznavanju podnebne spremenljivosti in podnebnih razmer.

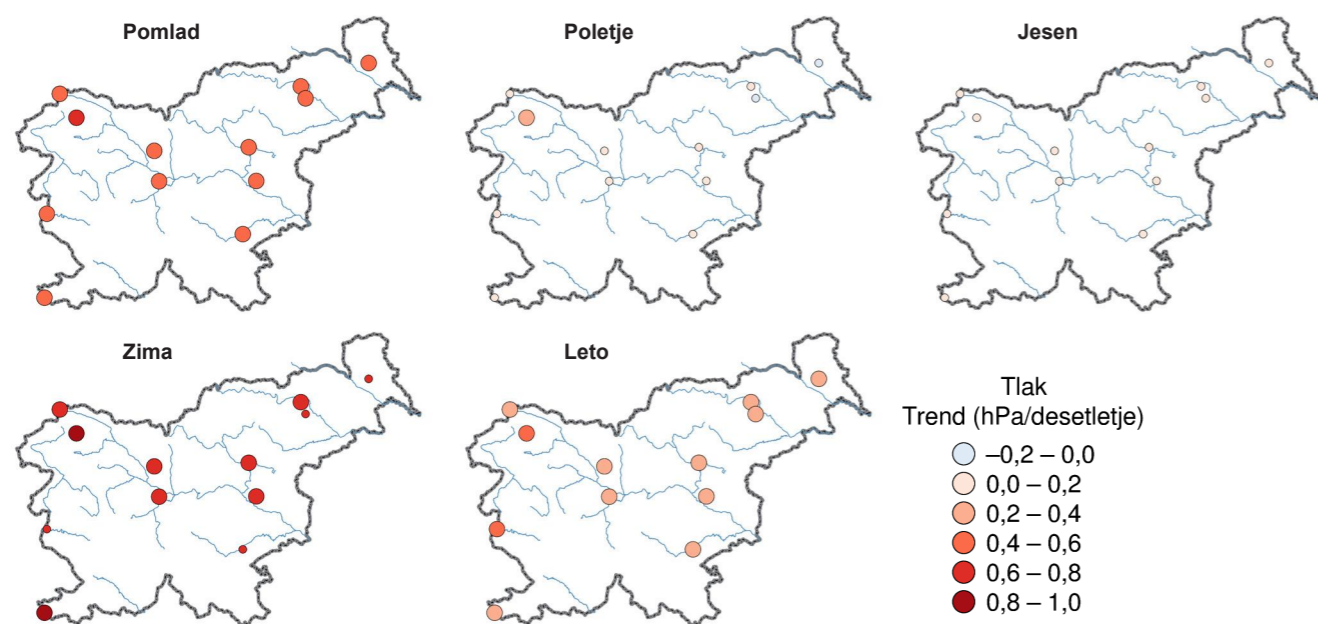
Zračni tlak je v Sloveniji daleč najbolj odvisen od nadmorske višine. Ob morju znaša povprečni tlak 1016



Slika 2.21 | Mesečni povprečni odklon zračnega tlaka od letnega povprečja na štirih postajah v obdobju 1981–2010



Slika 2.22 | Časovni potek odklona zračnega tlaka na državni ravni od dolgoletnega povprečja obdobja 1981–2010 po letnih časih. S črno črto je prikazan linearni trend (neznačilen trend je označen s prekinjeno črto), ki je spomladi in pozimi statistično značilen, poleti in jeseni pa statistično neznačilen.



Slika 2.23 | Linearni trend povprečnega zračnega tlaka po letnih časih in za celo leto skupaj v obdobju 1961–2011 (1961/62–2010/11 za zimo) na analiziranih merilnih mestih. Večji krogi prikazujejo statistično značilen trend.

hPa, na Kredarici (2515 m) pa le še 749 hPa. Medletni cikel temperature zračne mase pri tleh je glavni dejavnik nihanja zračnega tlaka čez leto. Po nižinah je povprečni tlak najnižji aprila in najvišji januarja, vendar amplituda ni velika, le približno 6 hPa (slika 2.21). Z naraščanjem nadmorske višine se januarski vrh znižuje in v sredogorju je najvišji tlak od julija do septembra. Še više, v visokogorju, je najnižji tlak februarja, najvišji pa julija in avgusta – medletni hod je zelo podoben temperaturnemu poteku. Velikost medletnega hoda je v visokogorju tudi največja, saj lahko preseže 10 hPa. Dnevni cikel nihanja zračnega tlaka je za velikostni red manjši od letnega ciklusa in je običajno nepomemben.

V obravnavanem obdobju 1961–2011 je časovni potek povprečnega tlaka na državni ravni (povprečje po vseh merilnih postajah) po letnih časih precej različen glede stopnje medletnega nihanja in dolgoletnega trenda (slika 2.22). Standardni odklon mesečnega povprečja zračnega tlaka je v zimskih mesecih približno 4 ali 5 hPa, od aprila do septembra pa približno 2 hPa.

V obdobju 1961–2011 kaže zračni tlak spomladi in pozimi večinoma statistično značilen trend, približno 0,5 oziroma 0,75 hPa na desetletje (slika 2.23). Poletni in jesenski trend sta sicer rahlo pozitivna, a statistično neznačilna (izjema je le Kredarica poleti). Na letni ravni je trend povsod statistično značilno pozitiven.

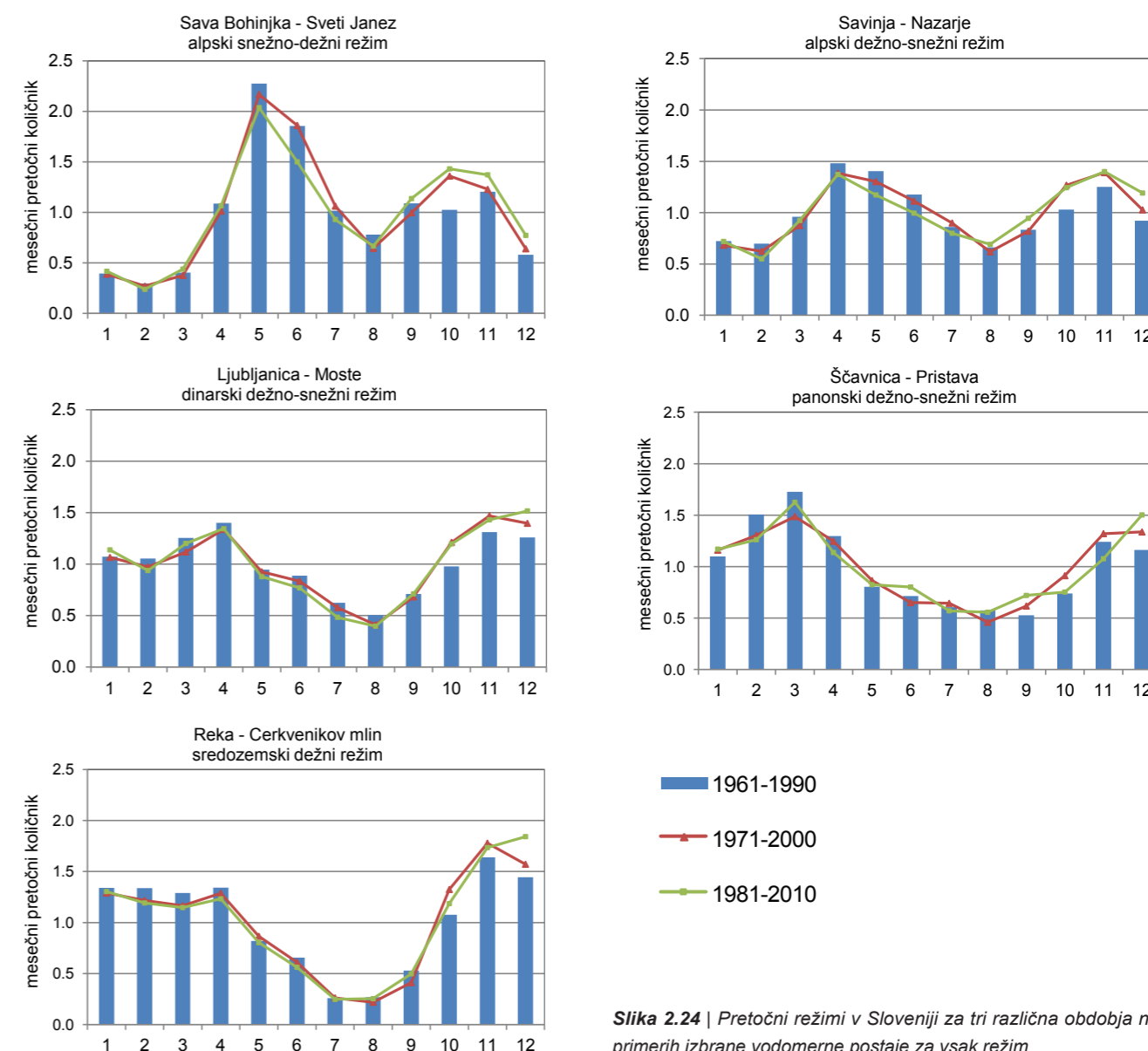
2.8 REČNI PRETOČNI REŽIMI

Spremembe podnebnih dejavnikov vodnega kroga se odražajo na pretočnih režimih. Zmanjševanje višine padavin, najbolj spomladi in poleti, spremembe trajanja in višine snežne odeje, rast povprečne temperature zraka in posledično povečana evapotranspiracija so glavni dejavniki, ki vplivajo na spreminjanje pretočnih režimov slovenskih rek.

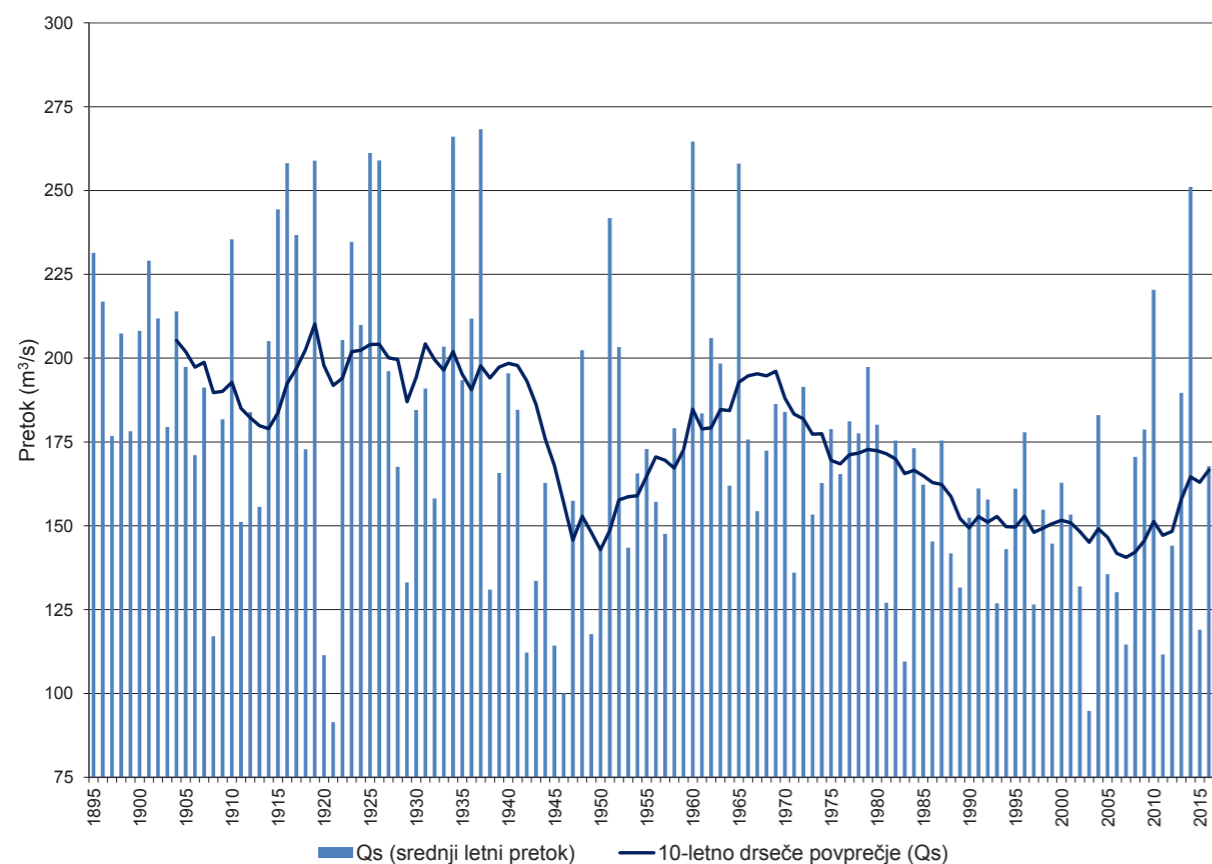
Primerjava pretočnih režimov obdobja 1971–2000 (Frantar in Hrvatin, 2008) z režimi za obdobje 1961–1990 (Hrvatin, 1998) kaže, da se je število pretočnih režimov v Sloveniji zmanjšalo (preglednica 2.1), kar je posledica zmanjšane vpliva taljenja snega. Spomladanski višek, ki je v glavnem odvisen od taljenja snežne odeje, se zato niža. Naraščanje temperature zraka pa pospešuje predvsem poletno izhlapevanje vode, kar vpliva na pretočni nižek poleti. Zaradi zmanjšane vloge zimskega snežnega zadržka in povečane vloge poletnega izhlapevanja se razlike med posameznimi pretočnimi režimi postopoma zmanjšujejo (slika 2.24). Pretočna nihanja slovenskih rek so si čedalje bolj podobna, zato je tudi število tipov pretočnih režimov manjše (preglednica 2.1), s čimer se hidrološka raznolikost Slovenije zmanjšuje.

Preglednica 2.1 | Primerjava tipov pretočnih režimov v obdobjih 1961–1990 in 1971–2000 (Frantar in Hrvatin, 2008)

Pretočni režimi 1961–1990	Pretočni režimi 1971–2000
alpski snežni režim	alpski snežno-dežni režim
alpski visokogorski snežno-dežni režim	
alpski sredogorski snežno-dežni režim	alpski dežno-snežni režim
alpski dežno-snežni režim	
dinarsko-alpski dežno-snežni režim	dinarski dežno-snežni režim
dinarski dežno-snežni režim	
panonski dežno-snežni režim	panonski dežno-snežni režim
sredozemski dežni režim	sredozemski dežni režim



Slika 2.24 | Pretočni režimi v Sloveniji za tri različna obdobja na primerih izbrane vodomerne postaje za vsak režim



Slika 2.25 | Srednji letni pretoki in pripadajoče 10-letno drseče povprečje Save na vodomerni postaji Litija

2.9 PRETOKI REK

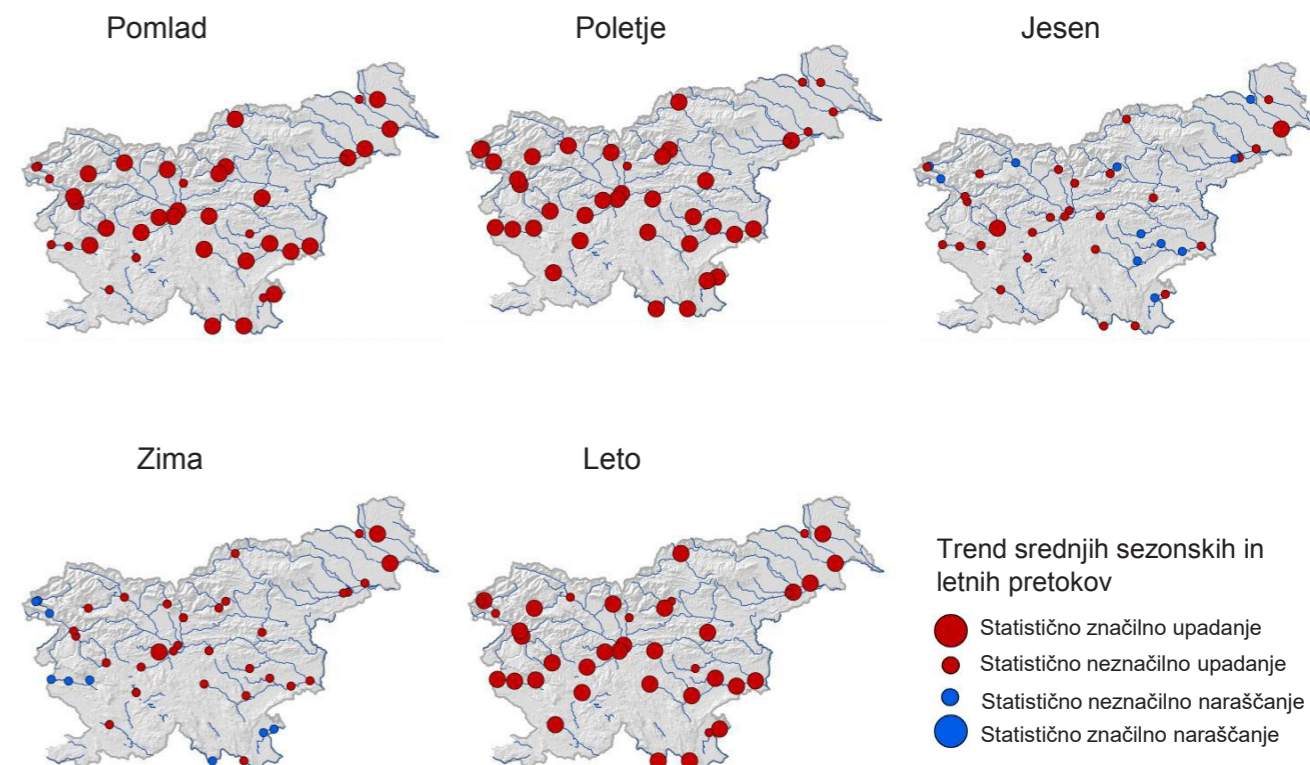
Trendi pretokov so pomembni kazalniki časovne spremenljivosti hidroloških pojavov. Z analizo časovnega zaporedja pretokov proučujemo dogajanje v preteklosti, ocenjujemo izrazitost in značilnost časovnega spreminjanja ter ugotavljamo spremembe v hidrološkem režimu. Nihanje srednjih letnih pretokov v zadnjih 122 letih je dobro vidno na reki Savi v Litiji (slika 2.25), kjer imamo neprekinjen niz podatkov od leta 1895. Konec 19. in v prvi polovici 20. stoletja so bila pretežno mokra leta, z izjemo posameznih sušnih let. V drugi polovici 20. stoletja pa se je vodnatost postopno zmanjševala, srednji letni pretoki so bili večinoma podpovprečni.

Na rezultate analiz močno vplivata obravnavano obdobje in dolžina časovnega niza podatkov. Predstavljeni rezultati so povzeti po Oblak (2017), ki je v analizi trendov pretokov obravnaval enotni 52-letni niz obdobja 1961–2013 za male, srednje in velike pretoke.

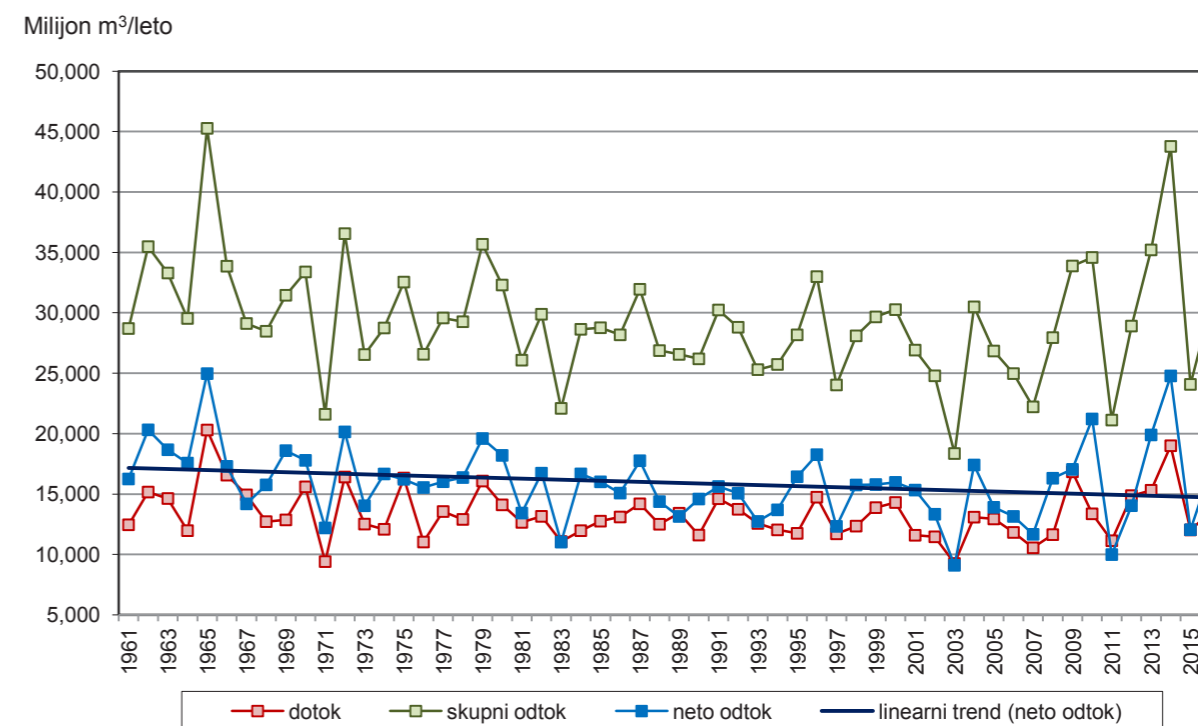
2.9.1 Trend srednjih sezonskih in letnih pretokov

Srednji letni pretoki upadajo na vseh postajah in na večini je trend za obdobje 1961–2013 statistično značilen (slika 2.26). So pa razlike med letnimi časi. Srednji pomladni in poletni pretoki upadajo povsod po državi. Pri večini postaj je zaznan statistično značilen upad pomladnih in poletnih pretokov. Srednji jesenski pretoki v glavnem nimajo statistično značilnih trendov, so pa v zahodni polovici države trendi večinoma negativni, v vzhodni pa pozitivni. Srednji zimski pretoki upadajo večinoma povsod po državi, razen na porečjih Soče, Vipave in Kolpe, kjer je trend pozitiven. Vendar pa trendi z izjemo treh vodomernih postaj niso statistično značilni.

Trend srednjih letnih pretokov kaže, da se letna količina razpoložljive vode v strugah vodotokov zmanjšuje, kar kaže tudi kazalnik okolja o letni rečni bilanci (slika 2.27) (ARSO, 2018). Bilanca rečnega pretoka je eden od temeljnih in bolj dinamičnih elementov vodne bilance Slovenije, ki jo sestavljajo še padavine, izhlapevanje,



Slika 2.26 | Trend srednjih sezonskih in letnih pretokov na vodomernih postajah po Sloveniji (povzeto po Oblak, 2017)



Slika 2.27 | Časovni potek letne rečne bilance Slovenije (neto odtok kot razlika med skupnim odtokom in dotokom)

sprememba zalog podzemnih voda in poraba vode. Upadanje pretokov je v glavnem posledica manjše letne količine padavin in porasta povprečne letne temperature zraka, ki vpliva na povečanje evapotranspiracije in posledično na zmanjševanje odtoka s porečij. Rečna bilanca je lahko dober kazalnik za oceno možnega vpliva podnebnih sprememb na količino razpoložljive vode.

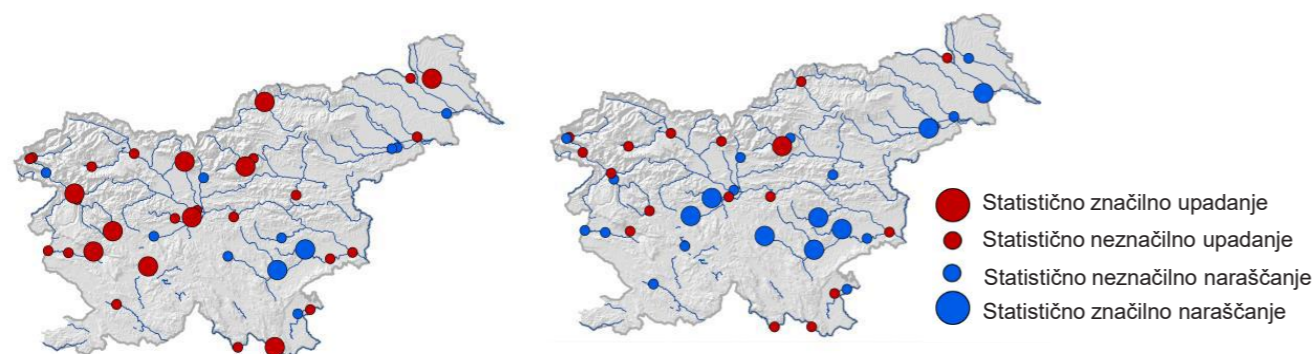
Trend pogostosti velikih pretokov (v povprečju trikrat na leto) kaže na večanje števila visokovodnih dogodkov zlasti v osrednjem in vzhodnem delu države, kjer je trend marsikje statistično značilen (slika 2.28). Upadajoči trend pojavljanja visokovodnih dogodkov je zaznan na postajah z gorskim zaledjem v severnem delu države in na porečju Kolpe, vendar ni statistično značilen.

2.9.2 Trend velikih pretokov

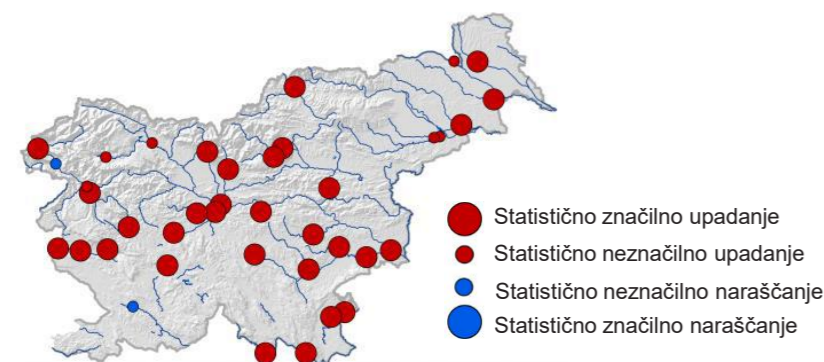
Trend največjih letnih srednjih dnevni pretokov (slika 2.28) izkazuje manjšo statistično značilnost kot trend srednjih letnih pretokov (slika 2.26). Na več kot polovici postaj je trend negativen, na nekaterih tudi statistično značilen. Postaje v vzhodni Sloveniji imajo večinoma pozitiven trend, ki pa v glavnem ni statistično značilen.

2.9.3 Trend malih pretokov

Pri malih pretokih je trend podoben kot pri srednjih letnih pretokih. Z izjemo dveh postaj je trend najmanjših 30-dnevni pretokov povsod po državi negativen. Na večini postaj je upadajoči trend za obdobje 1961–2013 statistično značilen (slika 2.29).



Slika 2.28 | Trend največjih letnih pretokov (levo) in trend pogostosti velikih pretokov v povprečju trikrat letno (desno) na vodomernih postajah po Sloveniji (povzeto po Oblak, 2017)



Slika 2.29 | Trend najmanjših letnih 30-dnevni pretokov na vodomernih postajah po Sloveniji (povzeto po Oblak, 2017)

2.10 TEMPERATURA VODE

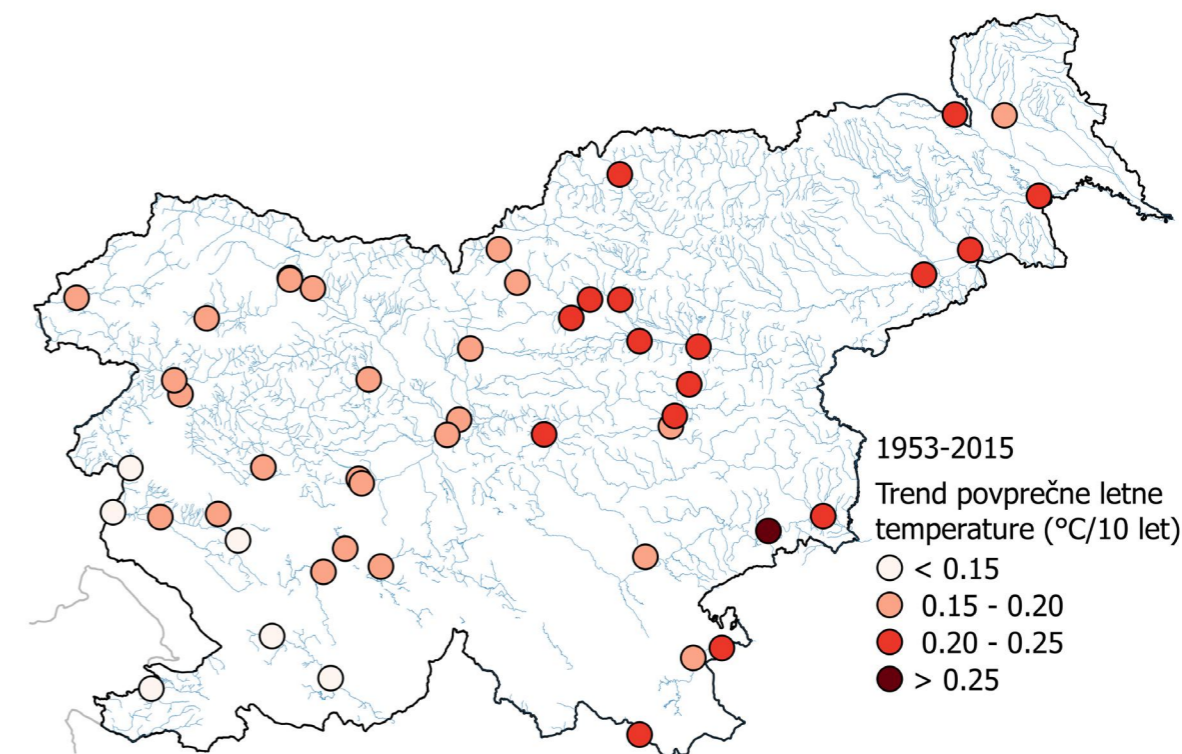
Trendi temperature voda so eden izmed kazalnikov vpliva podnebnih sprememb na temperaturni režim vode. Analiza trendov temperature voda je bila opravljena na dolgoletnih nizih podatkov vodomernih postaj na površinskih vodah, kamor prištevamo tudi morje, in na podzemnih vodah.

Za trend povprečne letne temperature na površinskih vodah in morju v obdobju 1953–2015 je značilno, da velikost narašča od zahoda proti vzhodu Slovenije (slika 2.30). Na vodomerni postaji na morju je trend rasti povprečne letne temperature najnižji in znaša 0,11 °C na desetletje. Na površinskih vodah se trend povprečne letne temperature giblje od 0,11 do 0,26 °C na desetletje, povprečje je 0,19 °C na desetletje.

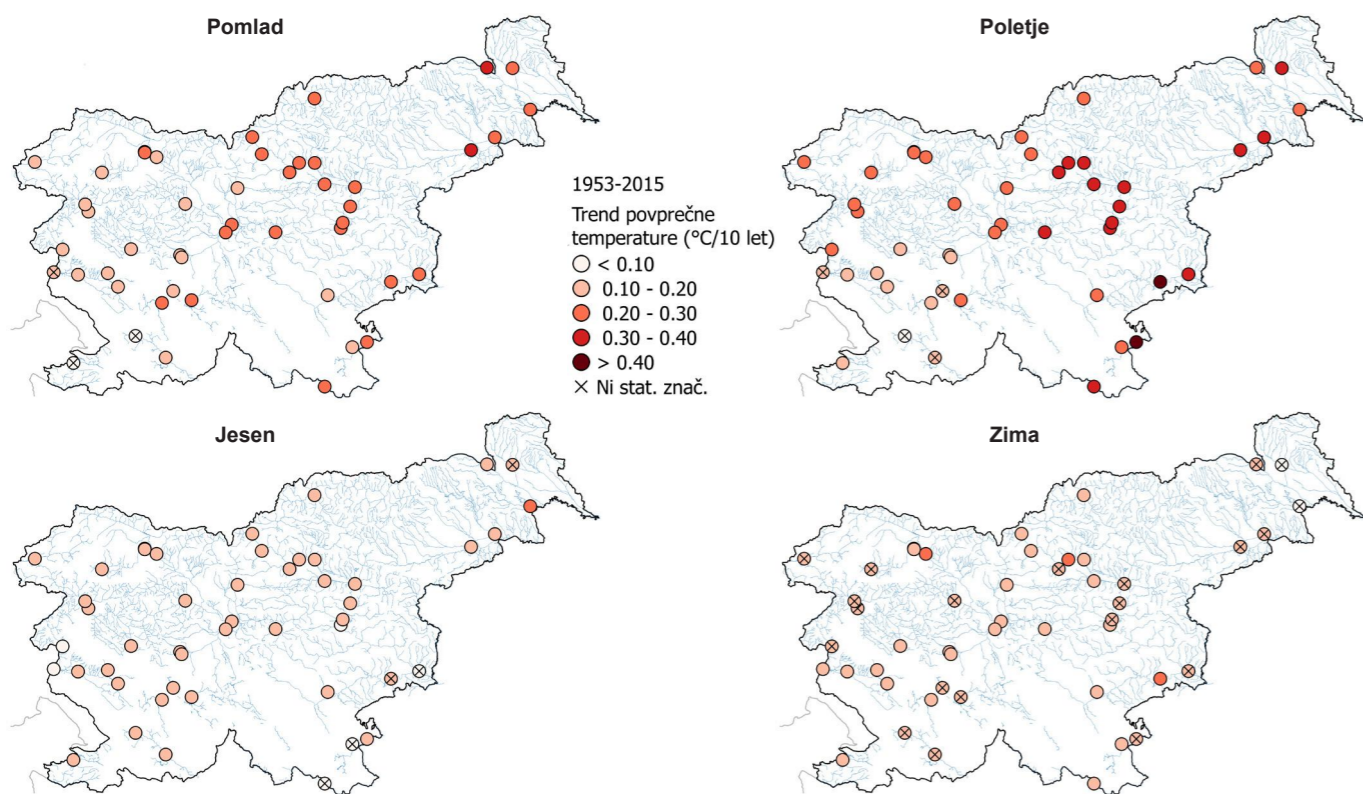
Statistično značilni sezonski trendi na površinskih vodah kažejo največjo rast temperature v poletnem in spomladanskem obdobju (slika 2.31). Geografska razporeditev poletnih in spomladanskih trendov je podobna

kot pri letnem trendu in narašča v smeri od zahoda proti vzhodu. Jesen in zima nimata izrazite geografske razporeditve.

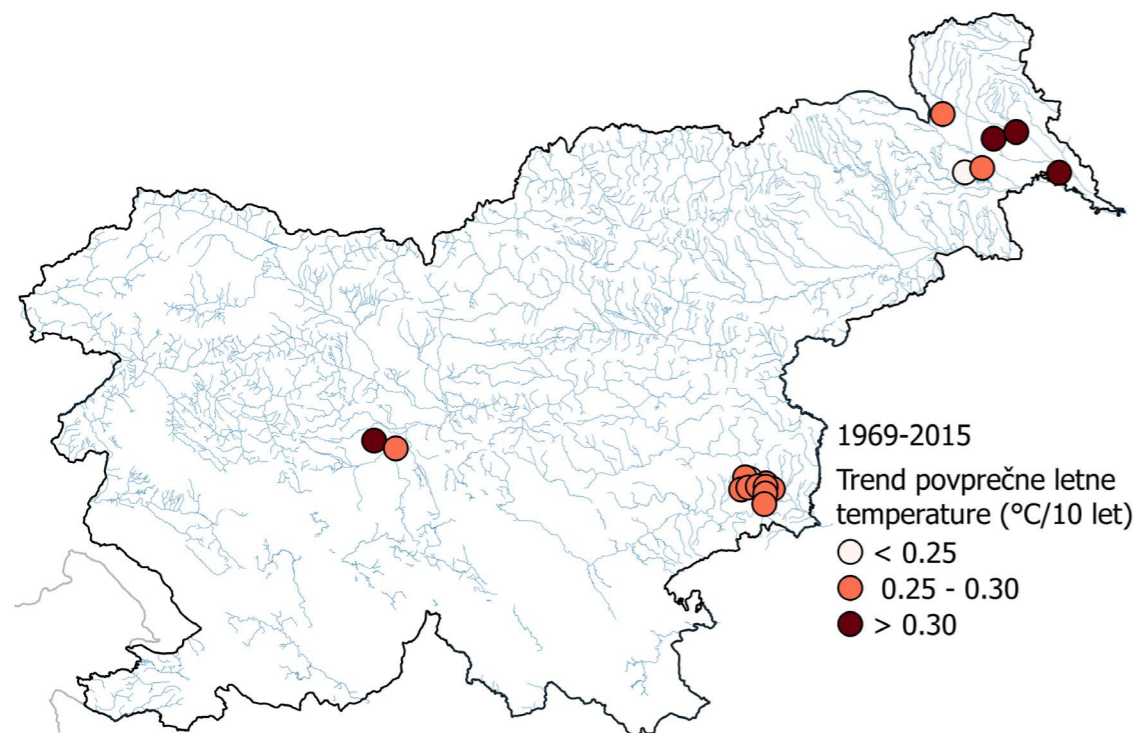
Na vodomernih postajah podzemnih voda v obdobju 1969–2015 je povprečni trend letne povprečne temperature podzemne vode 0,28 °C na desetletje (slika 2.32). Statistično značilni sezonski trendi vseh postaj kažejo na precej izrazitejši trend rasti temperature v poletnem in jesenskem obdobju kot v zimskem in spomladanskem obdobju.



Slika 2.30 | Trendi letne povprečne temperature vode na izbranih postajah površinskih voda in na morju



Slika 2.31 | Sezonski trendi na izbranih postajah površinskih voda in na morju



Slika 2.32 | Trendi povprečne letne temperature vode na izbranih postajah podzemnih voda

2.11 HIDROLOŠKA SUŠA V VODONOSNIKU

Zmanjšanje razpoložljivih količin podzemne vode lahko opredeljujemo tudi kot hidrološko sušo v vodonosniku, ki se ocenjuje kot nizko vodno stanje z uporabo statistične metode analize vodostajev na merilni mreži ARSO. Analiza dolgoletnih nizov meritev gladin podzemne vode omogoča določitev sušnih gladin na posameznih merilnih mestih.

Za kazalnik hidrološke suše podzemnih voda smo uporabili standardizirani kazalnik gladine podzemne vode (*Standardised Groundwater level index – SGI*), ki izhaja iz standardiziranega padavinskega kazalnika (*Standardised Precipitation index – SPI*) in je primeren za monitoring in analize sušnih stanj podzemnih voda. Kazalnik SGI obenem omogoča napovedovanje sušnih obdobj in sklepanje o pojavu suše tudi za pretekla obdobja, za katera je na voljo manjša količina podatkov o gladinah podzemne vode (Bloomfield in Marchant, 2013). Intenzivnost suše se razbere iz vrednosti kazalnika SGI in je določena na podlagi razredov (preglednica 2.2). Vrednost SGI = 0 pomeni srednje stanje gladine podzemne vode, bolj ko se vrednost SGI bliža –2 (ali jo preseže), bolj ekstremna je suša. Pozitivne vrednosti SGI pomenijo, da suše ni.

Kazalnik SGI je bil izračunan za 95 vodomernih postaj na različnih vodonosnikih na celotnem območju Slovenije za obdobje 1981–2010 (slika 2.33). Za 9 postaj

Preglednica 2.2 | Vrednosti kazalnika SGI in stopnja hidrološke suše

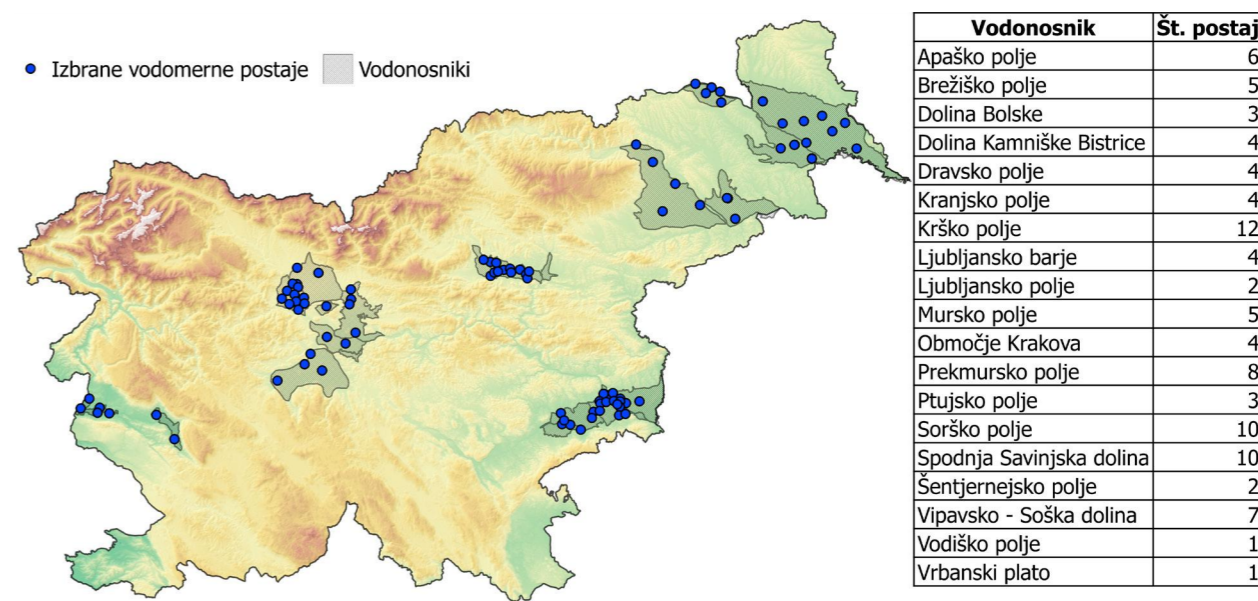
Vrednost SGI	Stopnja suše
–2 ali manj	Ekstremna suša
Od –1,5 do –1,99	Huda suša
–1,0 do –1,49	Zmerna suša
Od 0 do –0,99	Minimalna suša
Nad 0	Ni suše

na Sorškem polju in 2 postaji na Kranjskem polju, kjer beležijo dvig gladin podzemne vode ob izgradnji hidroelektrarne Mavčiče sredi osemdesetih let 20. stoletja, smo uporabili podatke od leta 1986 dalje.

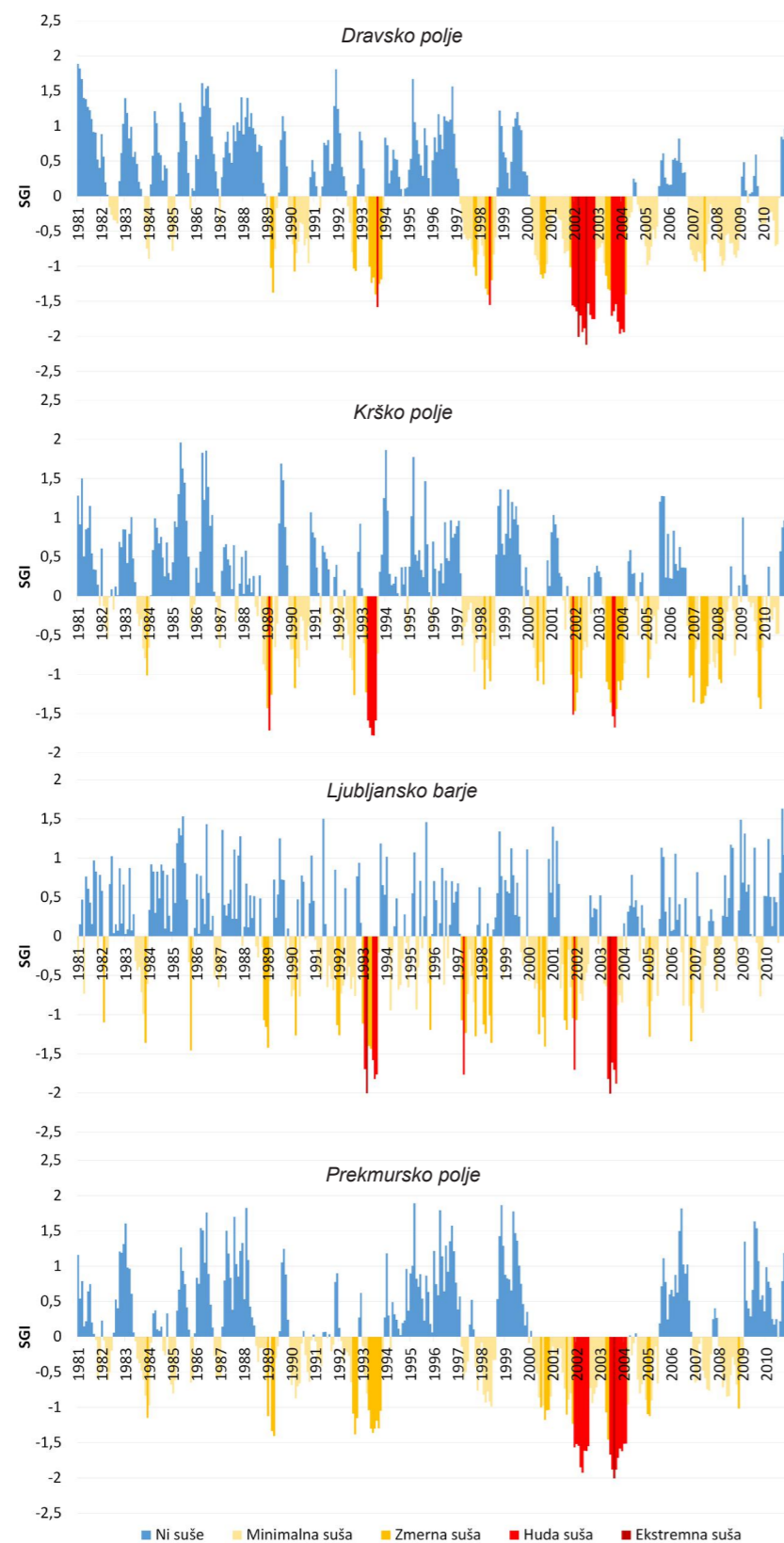
Primerjava vrednosti kazalnika SGI po vodomernih postajah in vodonosnikih je pokazala, da je bilo v obdobju 1981–2010 več daljših sušnih obdobj, ki so bila značilna za večje število vodonosnikov.

Po trajanju najbolj izstopa pet sušnih obdobj, ki so trajala 12 mesecev ali več (slika 2.34):

- od novembra 1989 do oktobra 1990, ko so bile povprečne vrednosti kazalnika SGI na 12 vodonosnikih od 19 nižje od 0, na 4 vodonosnikih je imelo več zaporednih mesecev kazalnik SGI nižji od –1;
- od aprila 1997 do junija 1998. V tem obdobju sicer niso bile zaznane ekstremno nizke negativne vrednosti SGI, vendar se je sušno obdobje v trajanju



Slika 2.33 | Vodomerne postaje z izračunanim kazalnikom hidrološke suše SGI



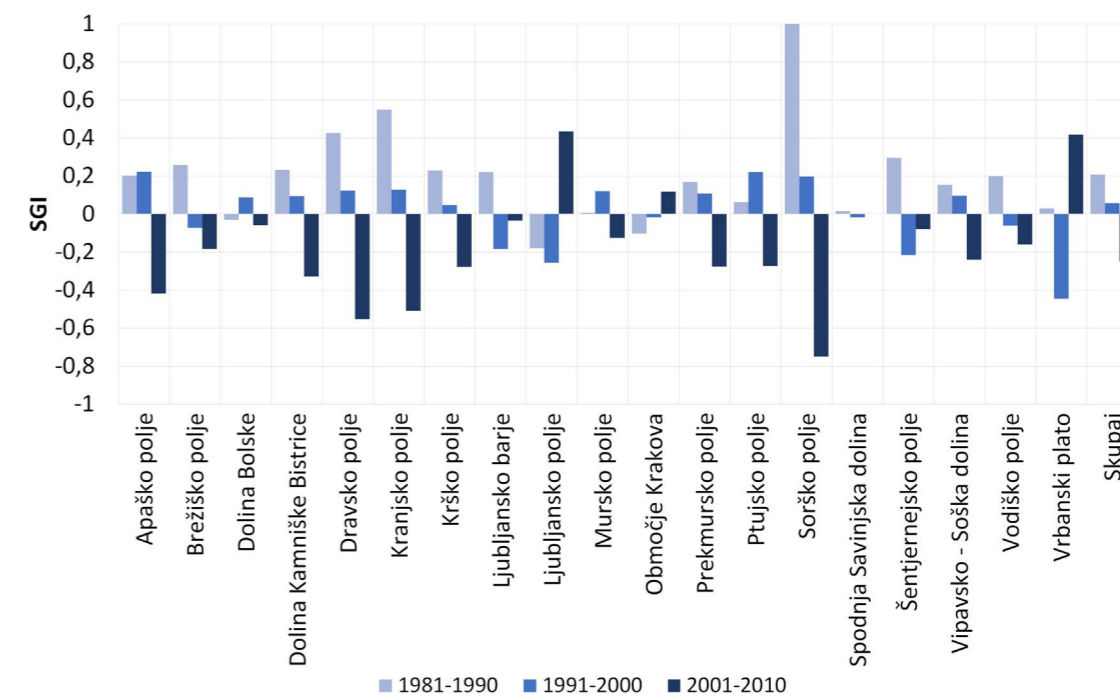
Slika 2.34 | Časovni potek mesečnih vrednosti SGI na Dravskem polju, Krškem polju, Ljubljanskem barju in Prekmurskem polju

- vsaj nekaj mesecev pojavilo na 17 vodonosnikih;
- sušni obdobji od julija 2001 do julija 2002 in od marca 2003 do februarja 2004 sta najbolj izraziti po intenzivnosti, na nekaterih vodonosnikih pa tudi po trajanju. Vsi obravnavani vodonosniki so imeli večmesečne zaporedne negativne povprečne vrednosti kazalnika SGI, na 10 vodonosnikih so se pojavile povprečne mesečne vrednosti SGI nižje od -2 , kar pomeni stopnjo ekstremna suša. Gladine podzemne vode so bile izjemno nizke (več zaporednih mesecev s $SGI < -1,5$) na vodonosnikih SV Slovenije že v letu 2002, stanje pa se je v širšem obsegu ponovilo leto kasneje. V letu 2003 se je povprečni mesečni SGI najmanj enkrat spustil pod $-1,5$ na 17 vodonosnikih od 19. Na vodonosnikih SV Slovenije so bile neprekinjene negativne povprečne vrednosti SGI od marca 2000 do marca 2004;
 - od oktobra 2006 do septembra 2007 so razvidne negativne povprečne vrednosti SGI na 13 vodonosnikih.

1989, ko se je na 4 vodonosnikih povprečni mesečni SGI vsaj enkrat spustil pod mejo ekstremne suše.

Primerjava med desetletji je pokazala, da so se najnižje vrednosti kazalnika sušnosti v večini vodonosnikov pojavile v zadnjem desetletju, torej obdobju 2001–2010 (slika 2.35). Na teh 13 vodonosnikih so bile torej gladine podzemnih voda najnižje v zadnjem desetletju in so bile pod povprečjem gladin celotnega obdobja 1981–2010. Negativnih povprečnih vrednosti na teh vodonosnikih v zadnjem desetletju ne smemo enačiti s stalnim pojavom suše, saj nanje vplivajo večkratni pojavi zelo nizkih negativnih vrednosti kazalnika SGI ob hudih sušah (na primer v letih 2002 in 2003). Zelo izrazit padec vrednosti kazalnika SGI je na Sorškem in deloma tudi na Kranjskem polju. Navedena zajezev Save nad hidroelektrarno Mavčiče je povzročila hiter dvig gladin podzemne vode leta 1986, temu pa je sledilo daljše obdobje postopnega upadanja, ki se odraža v nizkih vrednostih SGI v zadnjem desetletju.

Po intenzivnosti suše izstopajo leto 1993, ko se je na 6 vodonosnikih povprečni SGI vsaj v enem mesecu spustil pod -2 , ter navedeni obdobji med letoma 2001 in 2004 (10 vodonosnikov). Nekoliko krajše, a izrazito sušno obdobje je bilo tudi od novembra 1988 do aprila



Slika 2.35 | Povprečni SGI na vodonernih postajah vodonosnikov po desetletjih

3 VHODNI PODATKI PROJEKTA OPS21

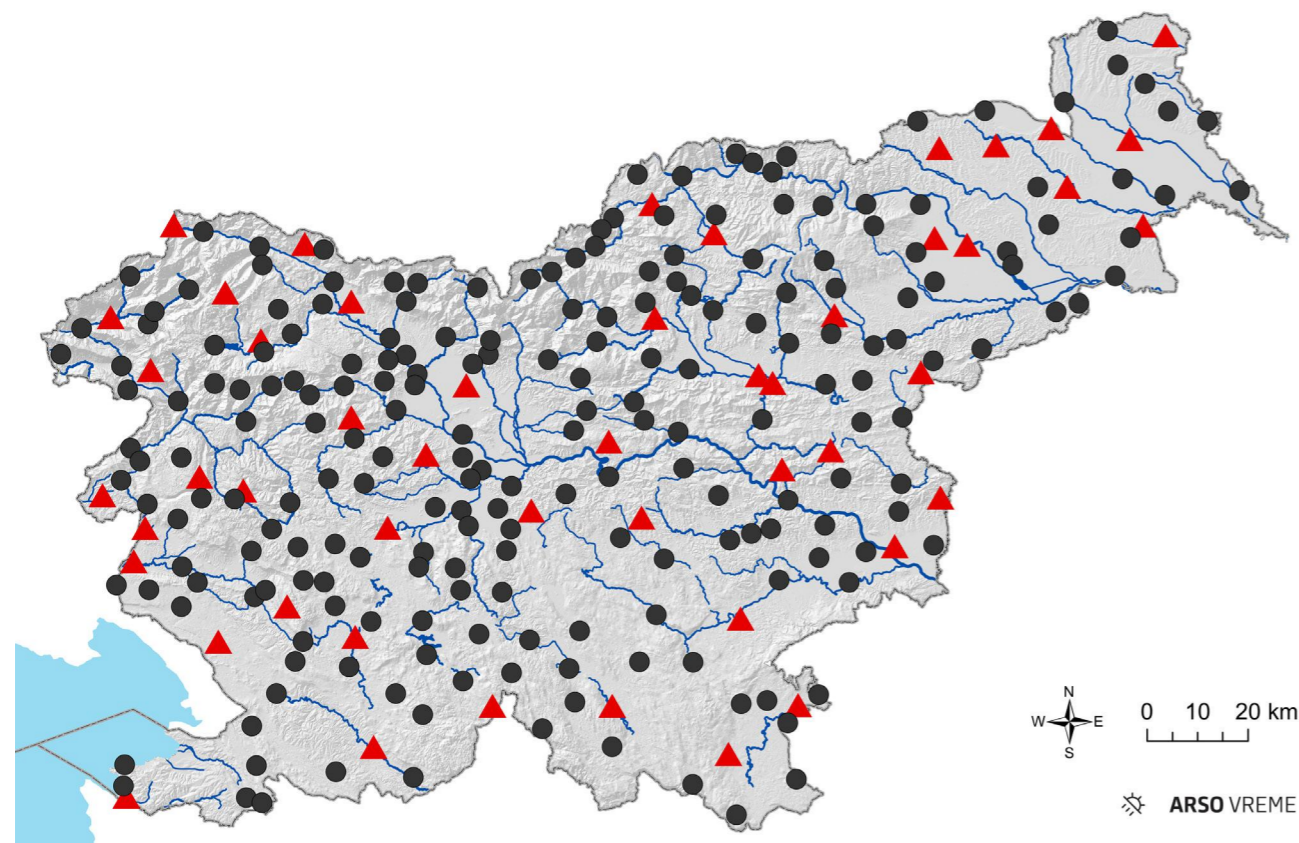
3.1 MERITVE

Temelj umerjanja izračunov podnebnih modelov na lokalno ali regionalno raven so kakovostne meritve, s katerimi lahko dobro opišemo vremensko in podnebno dogajanje v umerjevalnem obdobju. Prvi korak do tega cilja so bili v našem primeru prečiščeni in homogenizirani časovni nizi podatkov, izmerjenih na meteoroloških postajah. Rezultate dolgotrajnega postopka homogenizacije smo uporabili za pripravo podatkov v pravilni mreži z enako prostorsko in časovno ločljivostjo kot ju imajo rezultati izračunov regionalnih podnebnih modelov.

Za umerjanje hidroloških modelov so poleg podatkov meteoroloških meritev potrebni še podatki hidroloških meritev. Vsak model je treba za porečje, za katero ga postavljamo, umeriti na arhivskih izmerjenih podatkih.

3.1.1 Meteorološke meritve

Meritve na meteoroloških postajah so do začetka devetdesetih let 20. stoletja potekale ročno, v zadnjih 25 letih pa se vzpostavlja čedalje večja mreža samodejnih postaj, ki deloma nadomešča ročne meritve. V okviru projekta Podnebna spremenljivost Slovenije (PSS) smo kontrolirali in homogenizirali časovne nize številnih meteoroloških spremenljivk za obdobje 1961–2011 (2012) (Vertačnik in sod., 2015). Zaradi potrebne zadostne dolžine nizov smo se osredotočili le na nize ročnih meritev. Te so zapisane v poročila ali dnevnik opazovanj, ki jih sproti pregleduje kontrolor, in nato prepisane v digitalno obliko. Z razvojem računalništva in metod kontrole podatkov se je učinkovitost prepoznavne in odpravljanja napak v izmerkih močno povečala. V okviru projekta PSS smo zato ponovno, na sodoben in poenoten način, preverili kakovost meritev od leta 1961 naprej. Pomagali smo si s programskim orodjem za samodejni izpis sumljivih vrednosti, ki smo jih nato podrobneje ročno pregledali in po potrebi popravili. Pri pregledu smo uporabili različne vire podatkov (npr.



Slika 3.1 | Lokacije izbranih meteoroloških postaj. S trikotniki so prikazane postaje z meritvami temperature zraka in višine padavin, s pikami postaje z meritvami višine padavin.

zapis o pojavih, trakove s časovnimi poteki, meritve samodejne postaje na isti lokaciji, meritve okoliških postaj, radarske slike padavin) in pri tem upoštevali tudi skladnost vrednosti različnih spremenljivk. Delež popravljenih podatkov glede na vse podatke je bil sorazmerno majhen: pri dnevni višini padavin ena, pri temperaturi zraka dve tisočini. Ob tem je treba poudariti, da smo se osredotočili na večje napake, saj je majhno in nesistematično odstopanje posameznih vrednosti zelo težko odkriti.

Kontroli podatkov je sledilo ocenjevanje kakovosti izmerjenih časovnih nizov glede na število odkritih napak, metapodatke in medsebojno primerjavo različnih spremenljivk. Izločili smo dele nizov ali celotne nize slabe kakovosti in dodatno nize štirih merilnih postaj, kjer je bila okolica v času meritev močno urbanizirana. Podatke nekaterih bližnjih postaj smo združili v enoten, daljši časovni niz. Število zajetih postaj oziroma merilnih nizov je bilo odvisno od spremenljivke; pri temperaturi zraka smo upoštevali od 36 do 49 slovenskih postaj (slika 3.1), pri višini padavin 266 in pri referenčni evapotranspiraciji 63. Dodatno smo pri povprečni temperaturi zraka in višini padavin upoštevali 11 oziroma 22 postaj z obmejnih območij Hrvaške, Avstrije in Italije.

Za homogenizacijo časovnih nizov smo uporabili programsko orodje HOMER (*HOMogenization Software in R*), ki je bilo razvito v okviru evropskega projekta COST ES0601 (Mestre in sod., 2013). Orodje je interaktivno in deloma samodejno, namenjeno za homogenizacijo mesečnih in letnih podatkov o višini padavin in temperaturi zraka. Poleg homogenizacije omogoča zapolnitev manjkajočih podatkov v časovnem nizu. Pri homogenizaciji smo upoštevali metapodatke, s katerimi smo bolj zanesljivo in natančno določili prelome v nizih podatkov.

Končni rezultati homogenizacije so bili homogenizirani časovni nizi mesečnih vrednosti za obdobje 1961–2011 (temperatura in padavine) oziroma obdobje 1971–2012 (referenčna evapotranspiracija). Pri referenčni evapotranspiraciji so časovni nizi rezultat dela enega strokovnjaka, pri temperaturi zraka in višini padavin pa aritmetična sredina rezultatov treh strokovnjakov. Na podlagi homogeniziranih mesečnih podatkov smo izpejlali homogenizirane nize dnevni vrednosti. Časovne odseke brez meritev smo najprej zapolnili s prostorsko interpoliranimi vrednostmi, nato smo celotne nize dnevni podatkov uskladili s homogeniziranimi mesečnimi vrednostmi. Homogenizirani dnevni in mesečni podatki imajo tako za vsak mesec in leto enako aritmetično sredino.

3.1.2 Fenološka opazovanja

V primerjavi z instrumentalno izmerjenimi meteorološkimi podatki fenološki podatki temeljijo na opazovanju in oceni časa nastopa izbranih razvojnih (fenoloških) faz rastlin.

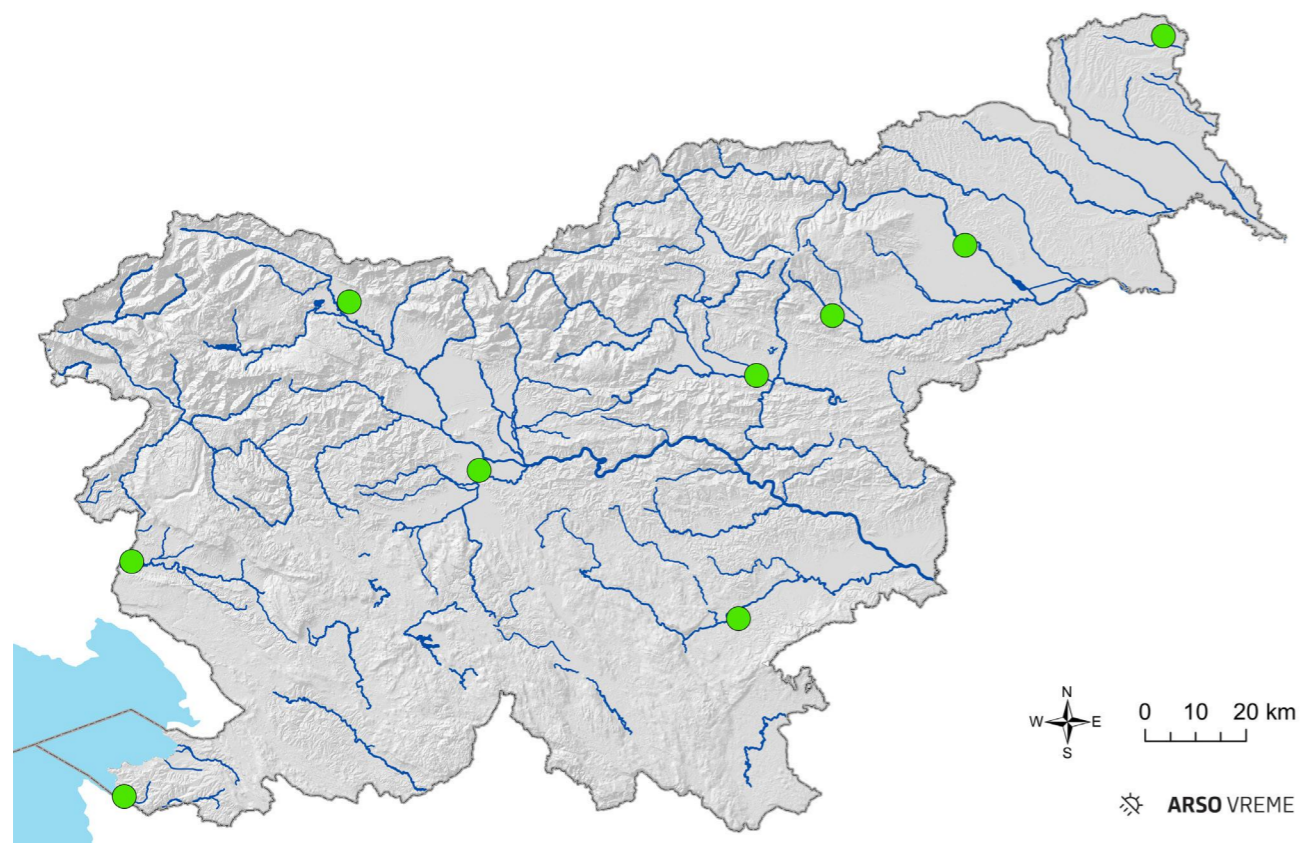
Mreža fenoloških postaj v Sloveniji je bila ustanovljena leta 1951. Program fenoloških opazovanj zajema sistematično opazovanje rastlin iz skupine negojenih zelnatih rastlin, gozdnega drevja in grmičevja, metuljnic, detelj in trav, poljščin, sadnega drevja in vinske trte. Rastline v programu fenoloških opazovanj so praviloma dobro zastopane v slovenskem prostoru in splošno prepoznavne. Fenološki podatki so shranjeni v arhivu fenoloških podatkov na ARSO in sestavljajo pomembno zbirko podatkov, ki so predmet številnih raziskav o vplivu vremena in podnebja na rastlinski svet.

Fenološke postaje so v mreži postaj razporejene po regionalnem podnebnem ključu. Fenološka opazovanja morajo potekati na mestu, ki je reprezentativno za širšo okolico kraja, v katerem je fenološka postaja. V letu 2018 se opazovanja izvajajo na 40 fenoloških postajah.

Fenološka opazovanja potekajo po navodilih za fenološka opazovanja (Žust in sod., 2015). Pojav fenološke faze je določen z dnevom njenega nastopa. Za znanstvene raziskave na mednarodni ravni je pomembna tudi primerljivost podatkov, zato so fenološke faze zapisane tudi s kodo mednarodne fenološke lestvice BBCH (po *Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie*, Meier in sod., 1997), ki predstavlja sistem za enotno kodiranje razvojnih faz rastlin. Kodiranje fenoloških faz po lestvici BBCH je v svojih navodilih za fenološka opazovanja priporočila tudi Svetovna meteorološka organizacija.

Fenološka opazovanja sledijo fenološkemu razvoju opazovanih rastlin v širši okolici fenološke postaje, vedno pa je pomemben fenološki podatek o datumu nastopa fenološke faze na točno izbranem drevesu oziroma lokaciji v primeru negojenih zelnatih rastlin. Izbira drevesa/lokacije ni prepuščena naključju, ampak upošteva pravila za izbiro fenoloških objektov, upoštevajoč nadmorsko višino, lego, prevladujočo vrsto tal itd.

Kontrola fenoloških podatkov je osredotočena na logično kontrolo, ki zajema odpravo logičnih napak v



Slika 3.2 | Lokacije izbranih fenoloških postaj

zapisovanju podatkov in pravilnega zaporedja opazovanih fenoloških faz, ter analitično kontrolo s primerjavo podatkov primerljivih postaj in tehtanja verodostojnosti izstopajočih ekstremnih vrednosti glede na opis rastnih razmer oziroma s preverjanjem pri fenološkem opazovalcu. Pri kontroli podatkov je treba upoštevati tudi vpliv subjektivne ocene fenološkega opazovalca.

Številne raziskave so na podlagi preteklih nizov fenoloških podatkov potrdile, da spomladanski fenološki razvoj postaja zgodnejši, kar je posledica spreminjanja temperature zraka, zato mu je že namenjena vloga biokazalnika podnebnih sprememb. Spremembe v fenološkem razvoju odsevajo tudi spremembe na začetku in posredno v dolžini letne rastne dobe ter tveganju za spomladansko pozebo gospodarsko pomembnih sadnih rastlin. Za proučevanje vpliva podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja na fenološki razvoj oziroma posredno na kmetijstvo in gozdarstvo smo se osredotočili na fenološko fazo pojava prvih listov oziroma olistanje divjega kostanja, lipe in bukve, ki so, z najmanjšim možnim vplivom človeka na njihov fenološki razvoj, dobro zastopani v

večjem delu Slovenije. Po pravilih za fenološka opazovanja fenološka faza olistanja nastopi na dan, ko se na opazovanem drevesu pojavi nekaj povsem odprtih in zravnanih listov, ti imajo za vrsto značilno obliko, nimajo pa še prave velikosti.

Osredotočili smo se na devet lokacij (slika 3.2), sedem je reprezentativnih za celinski del Slovenije (Celje, Lesce, Ljubljana, Novo mesto, Slovenske Konjice, Starše in Šalovci) in dve za južno Primorsko (Letališče Portorož in Bilje), z dolgim polnim nizom podatkov. Na naštetih lokacijah fenoloških postaj ali v njihovi neposredni bližini se merijo tudi meteorološke spremenljivke. Ker gre za obravnavo spomladanske fenološke faze pojava prvih listov, pri kateri je gonilni dejavnik temperatura zraka, smo predpostavili, da njen vpliv na dinamiko spomladanskega olistanja na izbranih lokacijah v grobem odraža tudi trende sprememb v širšem geografskem prostoru Slovenije.

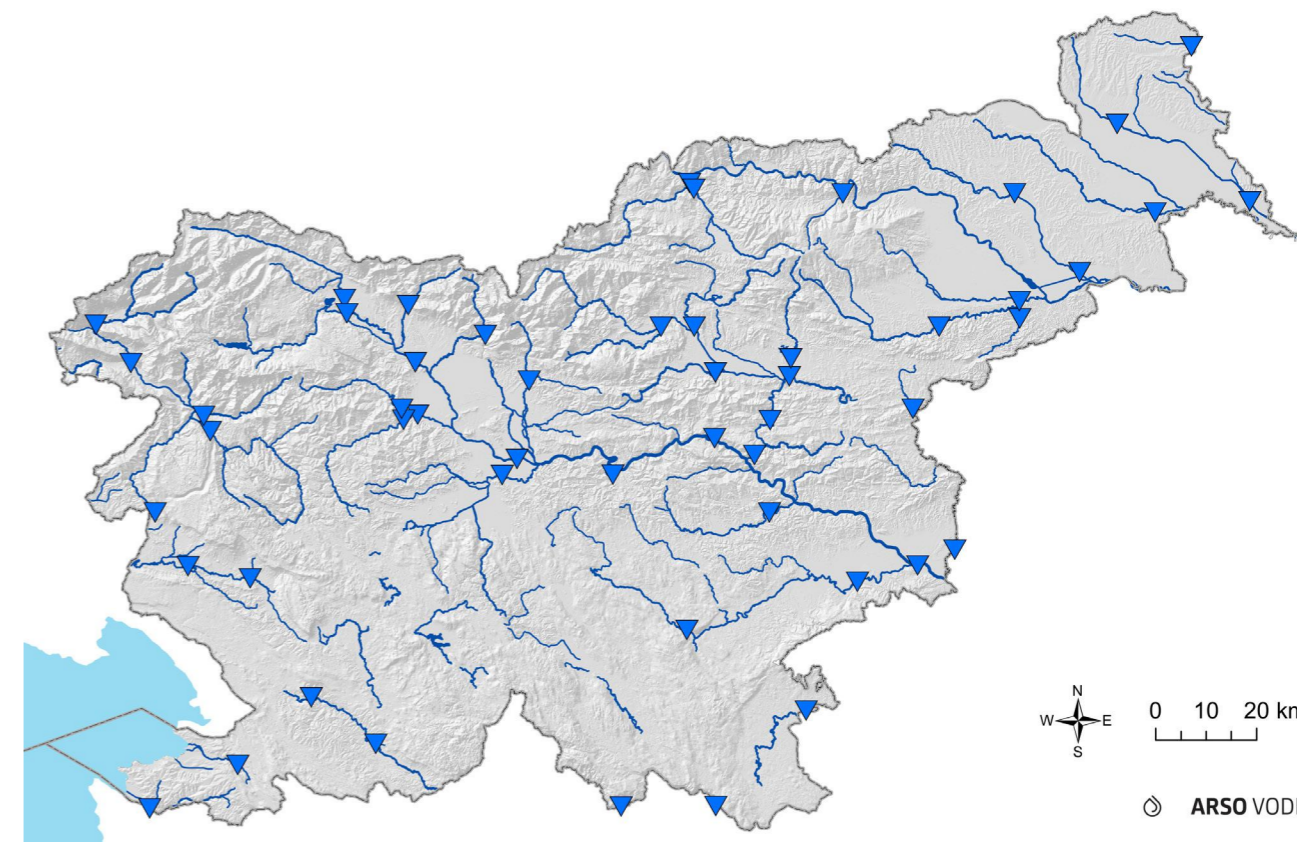
3.1.3 Hidrološke meritve

Meritve na hidroloških postajah segajo v drugo polovico 19. stoletja. V začetku so bila hidrološka opazovanja le občasna. Z razvojem merilne opreme so meritve postajale čedalje bolj sistematične, izboljševala se je kakovost merjenih podatkov. Za pridobivanje natančnejših podatkov so se merilna mesta opremljala z napravami za zvezno beleženje vodnega stanja, v okviru projekta BOBER (Vogrinič in sod., 2015), ki ga je agencija izvajala med letoma 2009 in 2016, pa se je skoraj celotna mreža hidroloških postaj nadgradila v samodejne merilne postaje. Kakovost podatkov se zagotavlja s kontrolnimi meritvami, ki se izvajajo vsaj enkrat tedensko in se uporabljajo za kontrolo podatkov za zagotavljanje točnih in verodostojnih podatkov.

Hidrološke meritve na površinskih vodah vključujejo meritve višine vodne gladine, hitrosti vode, pretoka, geometrijo merskih prevezov ter meritve temperature vode in vsebnosti suspendiranega materiala v vodi (ARSO, 2016). Izvajanje meritev poteka po priporočilih Svetovne meteorološke organizacije, zbranih v

priročniku Guide to hydrological practices (WMO, 2008), in uveljavljenih mednarodnih standardih. Kontrola podatkov se zagotavlja s tristopenjskim sistemom. Prvostopenjska kontrola je samodejna in zajema osnovne kontrole smiselnosti podatka in delovanja naprave. Drugostopenjska kontrola vključuje ročno kontrolo smiselnosti podatkov in kontrolo zagotavljanja sledljivosti. Po izvedbi drugostopenjskih kontrol se izvedejo višje obdelave podatkov, ki zajemajo dopolnitev (korelacijo) manjkajočih podatkov, izdelavo pretočnih krivulj, s katerimi določamo odnose med vodostaji in pretoki rek, ter vzdolžne bilančne izravnave.

Za izdelavo projekcij sprememb hidroloških razmer do konca 21. stoletja smo za potrebe umerjanja in preverjanja hidrološkega modela uporabili podatke o pretokih za obdobje 1981–2010 za vodomerne postaje, ki so ustrezale 81 podporečjem hidrološkega modela. Za analizo in vrednotenje vpliva podnebnih sprememb na pretoke rek pa je bilo izbranih 52 reprezentativnih vodomernih postaj po Sloveniji (slika 3.3), kjer je bil antropogeni vpliv na podatke zanemarljiv, izpad podatkov pa neznaten za obdobje umerjanja modela.



Slika 3.3 | Lokacije izbranih vodomernih postaj

3.2 PODATKI MODELSKIH SIMULACIJ

EURO-CORDEX (ang. *Coordinated Downscaling Experiment – European Domain*) je evropska veja mednarodne pobude CORDEX, projekta *Svetovni program za raziskave podnebja* (ang. *World Climate Research Programme*), ki naj bi organiziral mednarodno usklajeno mrežo za izračun regionalnih projekcij podnebnih sprememb za vse dele sveta. Rezultati pobude se uporabljajo in se bodo uporabljali za analize posledic podnebnih sprememb, prilagajanja nanje in njihovega blaženja za obdobje, ki ga zajema Peto poročilo (ang. *Fifth Assessment Report, AR5*) Medvladnega odbora za podnebne spremembe (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), in po njem.

Projekt EURO-CORDEX je prostovoljen. V njem sodelujejo vodilne ustanove na področju regionalnih podnebnih raziskav v Evropi. Cilj projekta je izboljšati podnebne projekcije in s tem omogočiti evropski družbi, da se bolje prilagodi na prihajajoče podnebne spremembe ter razvije učinkovitejše ukrepe za njihovo blaženje. V projektu so in še bodo izračunali ansambelske simulacije podnebja na množici dinamičnih in tudi empirično-statističnih podnebnih modelov, katerih vhodni podatki so izračuni globalnih podnebnih modelov (GCM) projekta *Primerjava sklopjenih modelov, 5. stopnja* (ang. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5*) do leta 2100.

Globalni podnebni modeli oziroma modeli splošne cirkulacije (ang. *Global Climate Model* oziroma *General Circulation Model, GCM*) so globalni numerični modeli podnebnega sistema, uporabni za proučevanje podnebnih sprememb na svetovni ravni. Opisujejo različne sestavine podnebnega sistema, njihove medsebojne nelinearne vplive in povratne vezi med njimi. Za izračun projekcij prihodnjega podnebja uporabljajo kot robne pogoje podatke izbranih scenarijev izpustov toplogrednih plinov, za simulacije preteklega podnebja pa v preteklosti izmerjene vrednosti meteoroloških spremenljivk. Računsko so ti modeli zelo zahtevni. Vodoravna prostorska ločljivost modelov je trenutno od 100 do 500 km, časovna ločljivost pa 6 ur. Zaradi sorazmerno grobe prostorske in časovne ločljivosti GCM niso dovolj za oceno podnebne spremenljivosti na regionalni in lokalni ravni. Za opis lokalnih posledic svetovne spremembe podnebja je potreben preračun rezultatov GCM na lokalno raven (ang. *downscaling*). Eden od načinov je dinamičen preračun z uporabo regionalnih podnebnih modelov (ang. *Regional Climate*

Models, RCM). Ti uporabljajo rezultate simulacij GCM kot vhodne podatke oziroma robne pogoje. Njihova vodoravna prostorska ločljivost je navadno približno 10–50 km. RCM nekatere pomembne procese upoštevajo neposredno (npr. parametrizacijske sheme, prilagojene večji ločljivosti, kroženje zraka v gorah, medsebojno vplivanje kopnega in morja), zato simulirajo podrobnejše značilnosti regionalnega in lokalnega podnebja.

Projekt EURO-CORDEX še poteka. Regionalne podnebne projekcije za Evropo so, ne glede na izbrani regionalni podnebni model, izračunane nad enotnim območjem, v enaki modelski mreži in v dveh vodoravnih ločljivostih:

- podrobnejša EUR-11 – pravilna mreža z razmikom med računskimi točkami 0,11° (na geografski širini Slovenije približno 12,5 km) in
- splošna EUR-44 – pravilna mreža z razmikom točk 0,44° (na geografski širini Slovenije približno 50 km).

Podatki so predstavljeni v geografski projekciji s premaknjenim polom (ang. *rotated pole coordinate system*). Modelska mreža zajema območje približno med 27° in 72° severne geografske širine ter od 22° zahodne do 45° vzhodne geografske dolžine. Simulacije upoštevajo novejša scenarija izpustov toplogrednih plinov RCP, opisane v poglavju *Scenariji izpustov toplogrednih plinov po metodologiji IPCC*. Časovno se modelske simulacije delijo na:

- simulacije z zgodovinskimi podatki (ang. *hindcast*) v obdobju 1989–2008. Vhodni zgodovinski podatki v regionalne modele so ponovne analize ERA-Interim;
- simulacije kontrolnega obdobja 1951–2005;
- simulacije za podnebne scenarije v obdobju 2006–2100.

V času priprave tega poročila (april 2018), so na voljo le izračuni simulacij dinamičnih regionalnih modelov, empirično-statistične simulacije pa so načrtovane v nadaljevanju projekta. Pri tem sodeluje 32 ustanov, do januarja 2018 je bilo opravljenih 27 kontrolnih simulacij, od teh so jih objavili 16, in 58 simulacij v ločljivosti 0,11°, od teh je bilo 22 objavljenih. Simulacije so dosegljive na spletu, v datotekah formata NetCDF, ki je razširjen format za izmenjavo in obdelavo (prostorskih) podnebnih podatkov. Na začetku projekta OPS21 je bilo na voljo po 14 simulacij za scenarija RCP4.5

in RCP8.5 ter veliko manj za scenarij RCP2.6. Med temi smo za analizo izbrali šest simulacij za scenarija RCP4.5 in RCP8.5 ter dve za scenarij RCP2.6. Simulacije za scenarij RCP6.0 niso bile na voljo.

Izračuni modelov v EURO-CORDEX se razlikujejo predvsem zaradi razlik v parametrizacijskih shemah, ki simulirajo fizikalne procese na ravni, manjši od prostorske ločljivosti modelov (npr. kratkovalovno sevanje ter nastanek oblakov in padavin). Pomembne so tudi razlike v modelski predstavitvi Zemljinega površja (npr. digitalni model višin, modeli značilnosti površja, informacije o rabi tal itd.), številu navpičnih nivojev, numeričnih shemah reševanja diferencialnih enačb itd.

Za oceno negotovosti podnebnih projekcij smo analizirali zbirko, ansambel izračunov različnih modelov. Zaradi zahtevnosti analize velikega števila podnebnih modelov in da nesorazmerna zastopanost različnih modelov ne bi popačila rezultatov analize, smo izbrali nekaj regionalnih modelov, ki prikazujejo podoben razpon odziva podnebnega sistema kot ansambel vseh modelov, ki so bili na voljo. Pri izboru je bilo pomembno tudi to, da so se rezultati posameznih modelov dobro ujemali z meritvami v primerjalnem obdobju 1981–2010. Od 14 kombinacij globalnih in regionalnih podnebnih modelov smo jih izbrali šest (preglednica 3.1). V izbranih ansamblih nastopa v različnih kombinacijah 5 globalnih in 5 regionalnih modelov.

Prostorska polja modeliranih spremenljivk, ki smo jih analizirali ali uporabili za izračun izvedenih vrednosti (npr. referenčne evapotranspiracije), so (v oklepajih so podani njihovo ime v angleščini, kratica v projektu EURO-CORDEX in merska enota):

- povprečna temperatura zraka tik nad površjem (ang. *near-surface air temperature, tas*, v K),
- dnevna najvišja in najnižja temperatura zraka tik nad površjem (ang. *daily maximum near-surface air temperature* in *daily minimum near-surface air temperature, tasmx* in *tasmin*, v K),
- višina padavin oziroma padavinski pretok (ang. *precipitation, pr*, v kg m⁻² s⁻¹),
- specifična vlažnost zraka tik nad površjem (ang. *near-surface specific humidity, huss*, brez enote),
- hitrost vetra tik nad površjem (ang. *near-surface wind speed, sfcWind*, m s⁻¹),
- gostota moči vpadnega kratkovalovnega sevanja na vodoravno površino (ang. *surface downwelling shortwave radiation, rsds*, v W m⁻²).

Polje referenčne evapotranspiracije smo izračunali iz polj temperature, specifične vlažnosti zraka, hitrosti vetra in gostote moči kratkovalovnega sevanja.

Preglednica 3.1 | Seznam simulacij, katerih izračune smo uporabili v analizi. Podana so imena globalnega (GCM) in regionalnega (RCM) modela. Če smo simulacijo za določeni scenarij RCP uporabili pri analizi, je v ustreznem polju križec.

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5-LR	CCLM4-8-17		x	x
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17		x	x
EC-EARTH	HIRHAM5	x	x	x
IPSL-CM5A-MR	WRF331F		x	x
HadGEM2-ES	RACMO22E	x	x	x
MPI-ESM-LR	RCA4		x	x

4 METODOLOGIJA PROJEKTA OPS21

4.1 MERITVE V PRAVILNI MREŽI

Za potrebe ovrednotenja rezultatov regionalnih podnebnih modelov smo potrebovali polja izmerjenih podnebnih spremenljivk v enaki mreži, kot so podani modelski rezultati. Pri primerjavi je pomembno, da prostorska povprečja simuliranih podnebnih spremenljivk primerjamo s prostorskimi povprečji izmerjenih vrednosti v enaki ločljivosti in ne zgolj z meritvami v točkah. V zadnjem primeru bi bil namreč del sistematične napake modela, ki pa ga ne znamo oceniti, tudi posledica nereprezentativnosti točkovne meritve za večje območje, kot je to modelska mrežna točka (npr. 14 km × 10 km). Predvsem za tiste podnebne spremenljivke, ki so odvisne od nadmorske višine, je pomembno tudi to, da primerjamo vrednosti na podobni nadmorski višini.

Prostorske porazdelitve spremenljivk so bile izračunane na homogeniziranih nizih dnevni meteoroloških podatkov v obdobju 1961–2010 (temperatura in padavine) oziroma 1981–2010 (evapotranspiracija) (Vertačnik in sod., 2015). Za interpolacijo so bile izbrane le merilne postaje z daljšim časovnim nizom meritev (več kot polovica obravnavanega obdobja), tako da časovna spremenljivost prostorske gostote merilnih mest ni imela prevelikega vpliva na časovno homogenost izračunanih polj. Poleg podatkov meritev slovenskih meteoroloških postaj smo pri prostorski interpolaciji uporabili tudi podatke meritev obmejnih postaj iz Avstrije, Hrvaške in Italije. Na ta način smo se izognili (pogosto nezanesljivi) ekstrapolaciji na obmejnih območjih Slovenije. Za padavine smo imeli na voljo meritve 182 postaj, za dnevno povprečno in najvišjo temperaturo 64 postaj, za dnevno najnižjo temperaturo 62 in za referenčno evapotranspiracijo 60 postaj (slika 3.1).

V pravilni mreži smo izračunali polja naslednjih spremenljivk:

- dnevne povprečne temperature zraka,
- dnevne najvišje temperature zraka,
- dnevne najnižje temperature zraka,
- dnevne višine padavin,
- dnevne evapotranspiracije.

4.1.1 Metoda prostorske interpolacije

Za prostorsko interpolacijo vseh spremenljivk smo uporabili metodo splošnega kriginga (Cressie, 1993), pri čemer smo v determinističnem delu modela upoštevali odvisnost od geografskih spremenljivk. Iz nabora nadmorske višine in polinomskih členov geografske dolžine in širine do druge stopnje smo s pomočjo regresijske analize za vsak dan posebej določili tiste, ki statistično značilno pojasnjujejo spremenljivost obravnavane spremenljivke. Model variograma sferične ali eksponentne oblike za stohastični del interpolacijskega modela je bil izbran samodejno, tako da se je čim bolj prilegal empiričnemu variogramu, ki je bil izračunan iz odstopanj meritev od regresijskega modela.

Interpolacijo izmerjenih podnebnih spremenljivk v pravilno mrežo regionalnih podnebnih modelov smo izvedli v dveh korakih. V prvem koraku smo izračunali prostorsko porazdelitev spremenljivke v pravilni mreži z ločljivostjo 1 km. Na ta način smo upoštevali vpliv velike spremenljivosti terena na to spremenljivko, hkrati pa so ta polja uporabna tudi za druge podnebne analize. V drugem koraku smo iz polja spremenljivke v ločljivosti 1 km s povprečenjem izračunali polja spremenljivke v mreži regionalnih podnebnih modelov (na območju 12°–17° E in 45°–48° N z ločljivostjo 0,125° v običajnem geografskem koordinatnem sistemu).

Pri interpolaciji temperature zraka v primeru temperaturnega obrata smo postopek prostorske interpolacije prilagodili. Ob temperaturnem obratu namreč ne velja, da temperatura pretežno pada z nadmorsko višino, temveč so jezera hladnega zraka v kotlinah hladnejša od okoliških višje ležečih območij. Poleg tega je prostorska spremenljivost temperature v vodoravni smeri še večja kot običajno. Predvsem na mejah jezer hladnega zraka imamo zelo velik temperaturni gradient, ki ga z dano gostoto meritev ne moremo dobro izmeriti.

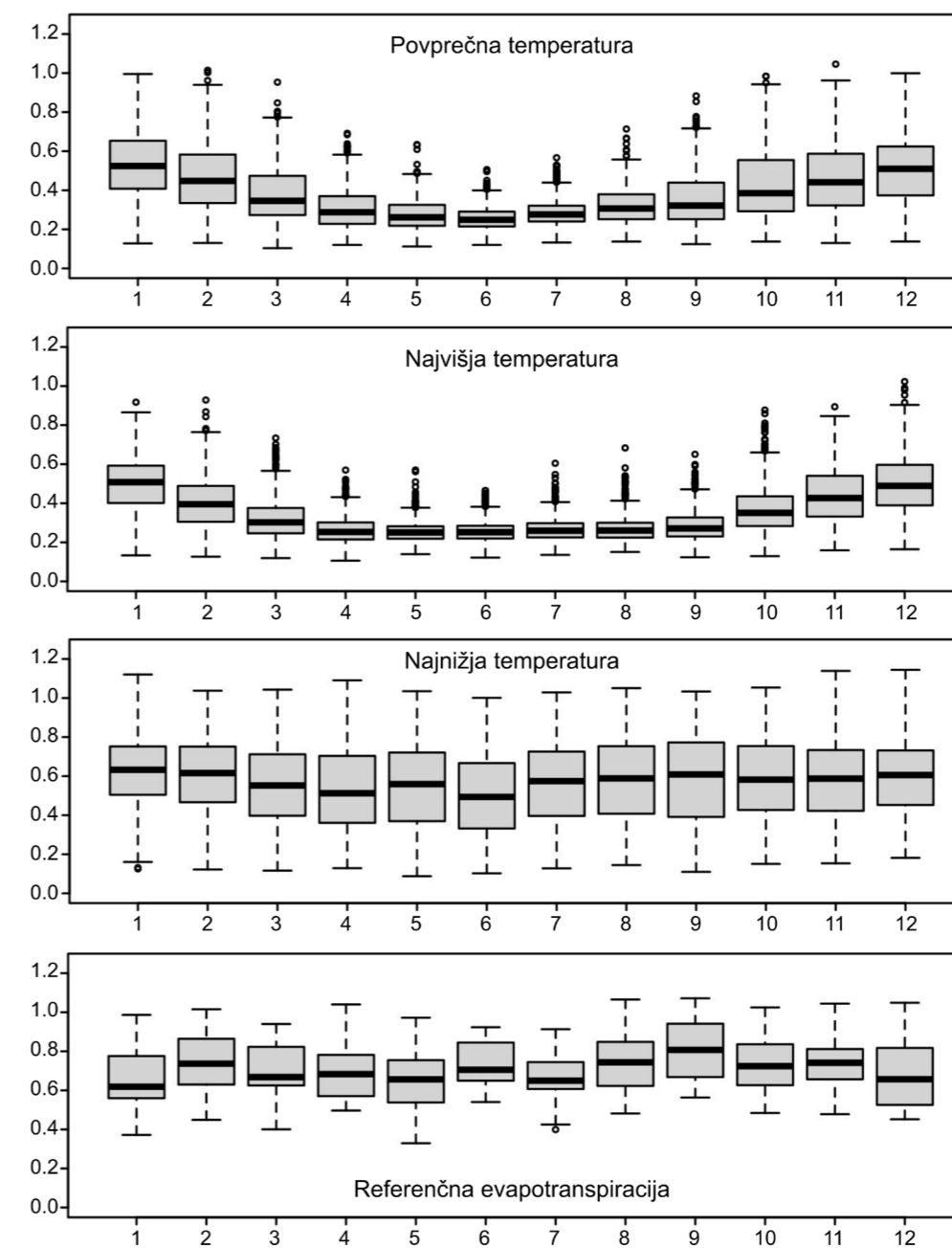
Glede na to, da ima ob temperaturnem obratu na temperaturo zraka največji vpliv lega postaje, smo postaje glede na njihovo lego razdelili v tri skupine:

- kotline,
- prevetrena območja,
- gore.

S samodejnim algoritmom smo glede na razlike v temperaturi zraka med kotlinskimi in prevetrenimi postajami določili situacije s temperaturnim obratom. Za te situacije smo prostorsko interpolacijo izvajali po

prilagojenem algoritmu. Pri tem smo na podlagi vnaprej določenih postaj v štirih različnih višinskih pasovih določili nelinearen temperaturni potek z višino. Po tako določenem temperaturnem profilu smo vse meritve na izpostavljenih mestih preračunali na enak višinski nivo (250 m) in na tem nivoju interpolirali vrednosti na enak način kot vse ostale spremenljivke, torej z

metodo splošnega kriginga. Po prostorski interpolaciji smo temperaturo na prevetrenih mestih preračunali nazaj na pravo nadmorsko višino (zopet z uporabo nelinearnega temperaturnega poteka z višino), pri čemer smo uporabili masko kotlin, ki smo jo naredili na podlagi digitalnega modela reliefa v ločljivosti 100 m.



Slika 4.1 | Porazdelitev relativne celotne napake (RCN) po posameznih mesecih za dnevno povprečno, najvišjo in najnižjo temperaturo ter referenčno evapotranspiracijo. Odebeljena črta v grafikonu kvantilov predstavlja mediano vseh vrednosti RCN v posameznem mesecu, meje pravokotnikov 1. in 3. kvartil, ročaji pa vrednosti 1. in 99. centila. Krožci nad ali pod ročaji predstavljajo osamelce.

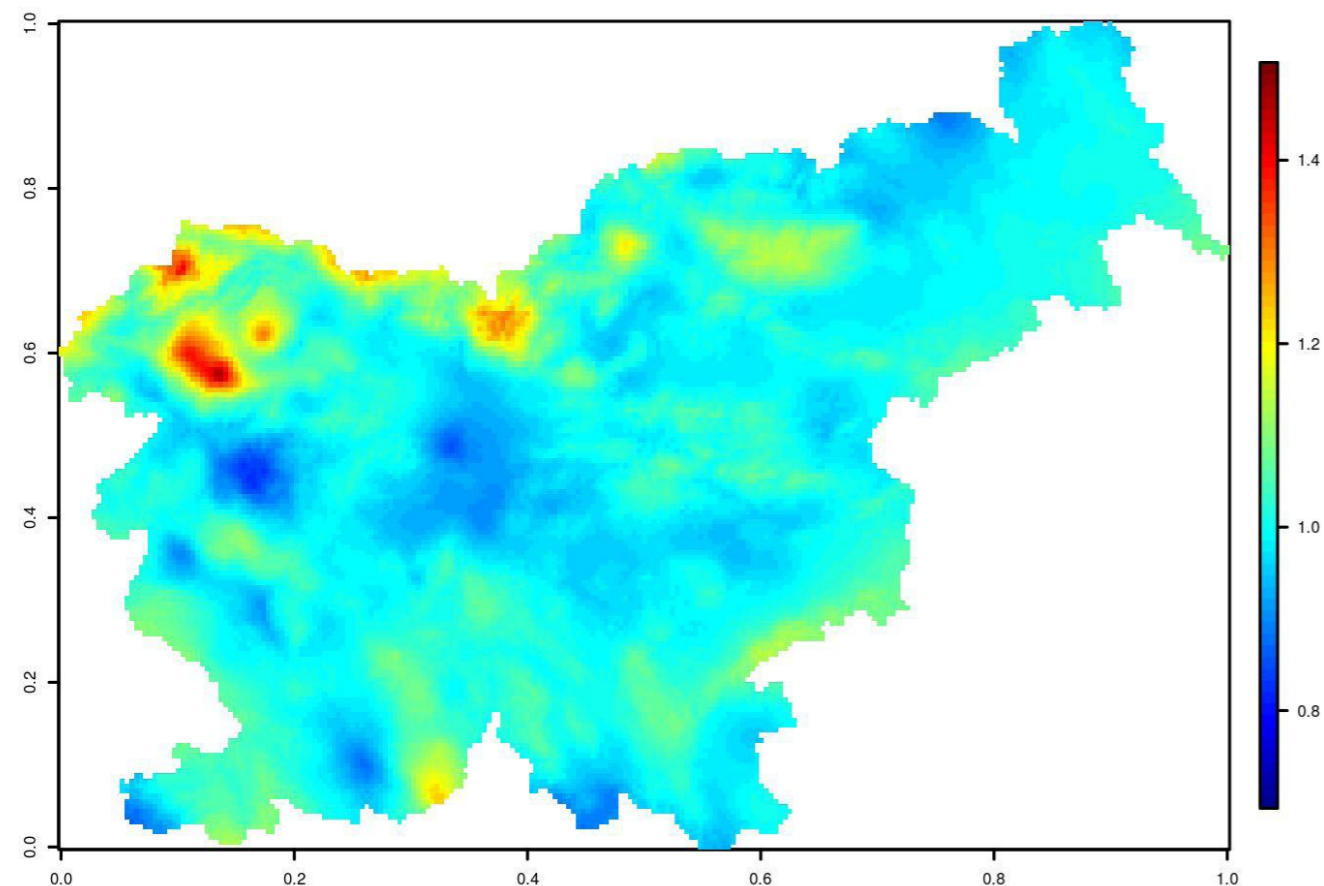
4.1.2 Rezultati prostorske interpolacije

Napako interpolacije temperature in referenčne evapotranspiracije smo ocenili z navzkrižnim preverjanjem (Isaaks in Srivastava, 1989) s pomočjo relativne celotne napake (RCN) (Hengl, 2007), ki je celotna napaka modeliranih vrednosti, normalizirana s prostorskim standardnim odklonom meritev. Ta statistična cenilka podaja relativno točnost interpoliranih vrednosti (Hengl, 2007), pri čemer vrednosti pod 0,4 pomenijo, da so interpolirane vrednosti zanesljive. Vrednosti relativne celotne napake med 0,4 in 0,75 pomenijo, da so interpolirane vrednosti še vedno precej zanesljive, čeprav so obremenjene z večjo napako. Vrednosti relativne celotne napake nad 0,75 pa pomenijo, da so interpolirane vrednosti obremenjene z zelo veliko napako in da interpolacijski model ne pojasni niti 44 % spremenljivosti vhodnih podatkov (Hengl, 2007).

Najboljši so rezultati interpolacije za dnevno najvišjo temperaturo, zelo podobni tudi za dnevno povprečno

temperaturo (slika 4.1). Za obe spremenljivki so znatno boljši rezultati za mesece toplega dela leta, ko so interpolirane vrednosti v večini primerov zanesljive (RCN je nižja od 0,4). Rezultate za hladen del leta poslabšajo situacije s temperaturnim obratom, ki so tudi vzrok za slabše rezultate interpolacije dnevne najnižje temperature. Vendar tudi v teh primerih večina primerov pade v kategorijo precej zanesljivih rezultatov (RCN nižja od 0,75). Čeprav smo algoritem interpolacije za situacije s temperaturnim obratom prilagodili, je za zelo veliko prostorsko spremenljivost temperature v takih situacijah dana gostota meritev še vedno premajhna, da bi jo lahko v celoti zajeli. Bistveno manj zanesljivi so rezultati prostorske interpolacije referenčne evapotranspiracije, kjer zanesljivost tudi nima značilnega sezonskega hoda.

Največja spremenljivost v zanesljivosti rezultatov je pri interpolaciji padavin, pri čemer pa prav tako kot pri referenčni evapotranspiraciji nismo zasledili značilnega sezonskega hoda pri relativni celotni napaki. Pri padavinah je zelo pomembno, da z interpolacijo



Slika 4.2 | Faktor odstopanja dolgotrajnega povprečja višine padavin (obdobje 1981–2010), interpoliranega na osnovi mesečnih meritev, od dolgotrajnega povprečja istega obdobja, izračunanega na osnovi interpoliranih dnevni višin padavin

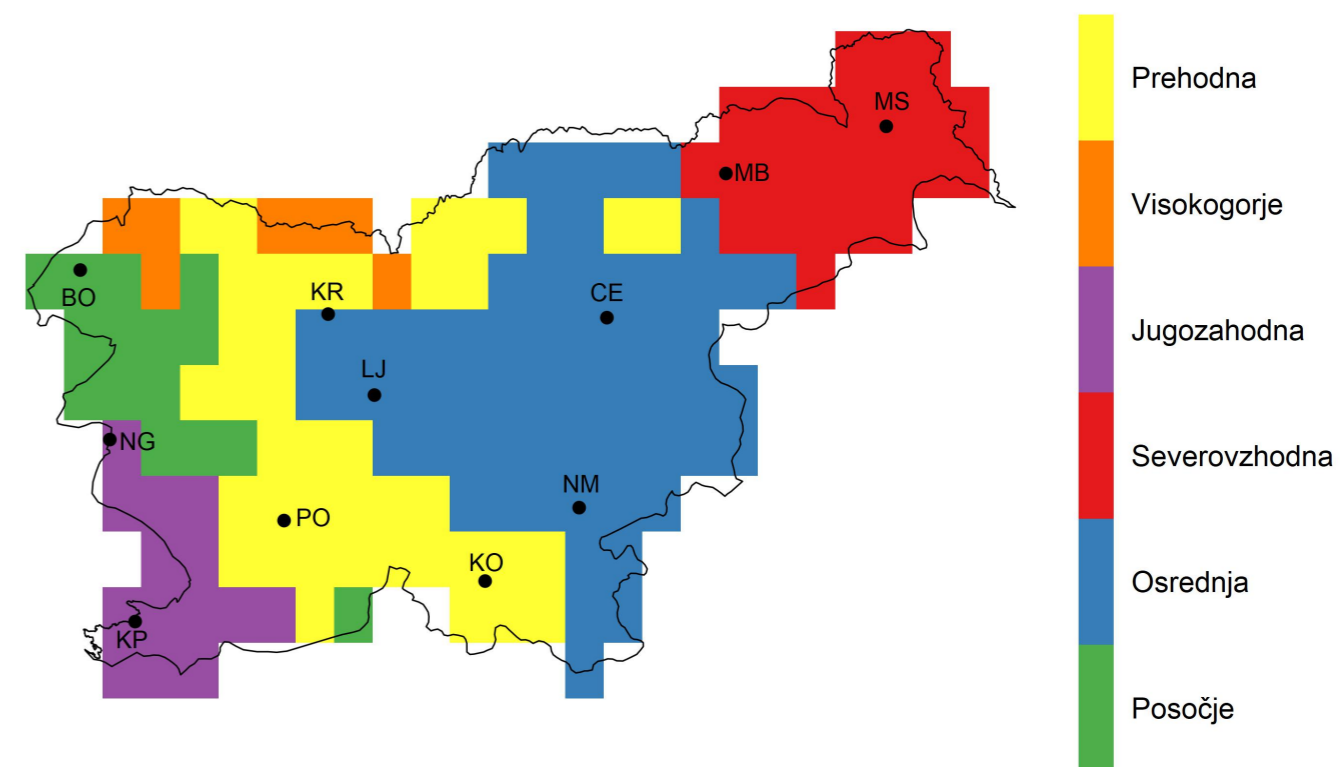
dnevni vrednosti čim bolj točno ocenimo mesečno vsoto padavin. Že zaradi algoritma interpolacije so skrajne vrednosti nekoliko zglajene. Na najbolj namočenih območjih je mesečna vsota padavin praviloma podcenjena, na relativno manj namočenih območjih pa precenjena. Precejšnje so te napake predvsem v alpskem delu Slovenije (slika 4.2). Zato smo za vsak mesec posebej izračunali korekcijski količnik, s katerim smo v vsaki mrežni točki dnevne padavine popravili tako, da se je vsota interpoliranih dnevni vrednosti ujemala z interpoliranimi mesečnimi vrednostmi.

4.2 PODNEBNA REGIONALIZACIJA SLOVENIJE

Glede na podnebne značilnosti Slovenije v primerjalnem obdobju 1981–2010 smo določili podnebne regije. Pri tem smo upoštevali dolgotrajna povprečja glavnih podnebnih spremenljivk v tem obdobju. Ker smo v regijah želeli spremljati spreminjanje podnebnih razmer, smo

poleg dolgotrajnih povprečij glavnih podnebnih spremenljivk pri regionalizaciji upoštevali tudi njihove trende. Ti so bili izračunani za obdobje 1961–2010. Povprečja in trendi spremenljivk so bili izračunani v točkah meritev in nato interpolirani v pravilno kilometrsko mrežo. Rezultati regionalnih podnebnih modelov so v mreži velikosti $0,125^\circ \times 0,125^\circ$, zato smo želeli njihove rezultate interpretirati na regijah, ki so določene v enaki ločljivosti kot podnebni modeli. Tako smo še pred regionalizacijo vse spremenljivke iz kilometrske mreže s povprečenjem pretvorili v mrežo velikosti $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ in nato regije določili v tej ločljivosti.

Za določitev regij smo uporabili statistično metodo razvrščanja v skupine. Enote razvrstimo v skupine po principu podobnosti – znotraj posamezne skupine so enote, ki so si glede na vnaprej določen kriterij podobne, znotraj različnih skupin pa enote, ki so si glede na ta kriterij različne (Rencher, 2002). Naš cilj so bile skupine, znotraj katerih so združene točke mreže s podobnimi vrednostmi podnebnih spremenljivk in njihovih trendov. Te skupine predstavljajo podnebne regije. Razvrščanje smo izvedli po nehierarhični metodi voditeljev (ang. *k-means*, MacQueen, 1967).



Slika 4.3 | Opredelitev podnebnih regij v Sloveniji

S predhodno analizo podatkov smo določili ključne spremenljivke, na podlagi katerih smo opredelili regije. Uporabljene spremenljivke so bile naslednje: mesečne povprečne temperature, povprečja dnevne najvišje temperature v najtoplejšem mesecu, povprečne mesečne vsote padavin, povprečja sezonske skupne višine novozapadlega snega, trendi sezonskih povprečij temperatur, trend povprečja dnevne najnižje temperature v najhladnejšem mesecu, trend povprečja dnevne najvišje temperature v najtoplejšem mesecu, trend razlike med letnim povprečjem dnevne najvišje in najnižje temperature in trendi povprečnih sezonskih vsot padavin.

Število regij, v katere smo razvrščali enote, smo določili na podlagi poznavanja statističnih kazalnikov regionalnih podnebnih razmer ter izkušenj, in sicer smo se odločili za šest regij. Rezultat regionalizacije je prikazan na sliki 4.3.

4.3 MODELSKE SIMULACIJE PODNEBJA

Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja projekta OPS21 temelji na analizi simulacij regionalnih podnebnih modelov. Zaradi negotovosti podnebnih simulacij smo želeli, da ocena temelji na simulacijah večjega števila modelov. Zanj smo uporabili dostopne izračune podnebnih modelov. Zaradi sistematičnega in usklajenega pristopa k modeliranju podnebja so bili za naš namen najprimernejši podatki projekta EURO-CORDEX, opisani v poglavju *Podatki modelskih simulacij*. Ker smo poleg analize povprečnega podnebja želeli analizirati tudi spremembe v izjemnih vremenskih dogodkih na lokalni ravni, smo uporabili dnevne modelske podatke v ločljivosti približno 12,5 km. Da bi ocenili negotovost projekcij podnebnih sprememb, smo uporabili podatke več regionalnih modelov – ansambel modelov. Posamezna kombinacija globalnega in regionalnega podnebnega modela da pristranske ocene prihodnjega podnebja (več v poglavju *Negotovost podnebnih projekcij*), zato je priporočljivo uporabljati ansambel modelov in analizirati razpršenost njihovih rezultatov.

Modele je bilo potrebno oceniti, primerjati z meritvami, izbrati manjši ansambel najboljših in analizirati njihove rezultate. Metodologija ocene podnebnih sprememb

projekta OPS21 je bila tako sestavljena iz naslednjih korakov (slika 4.4):

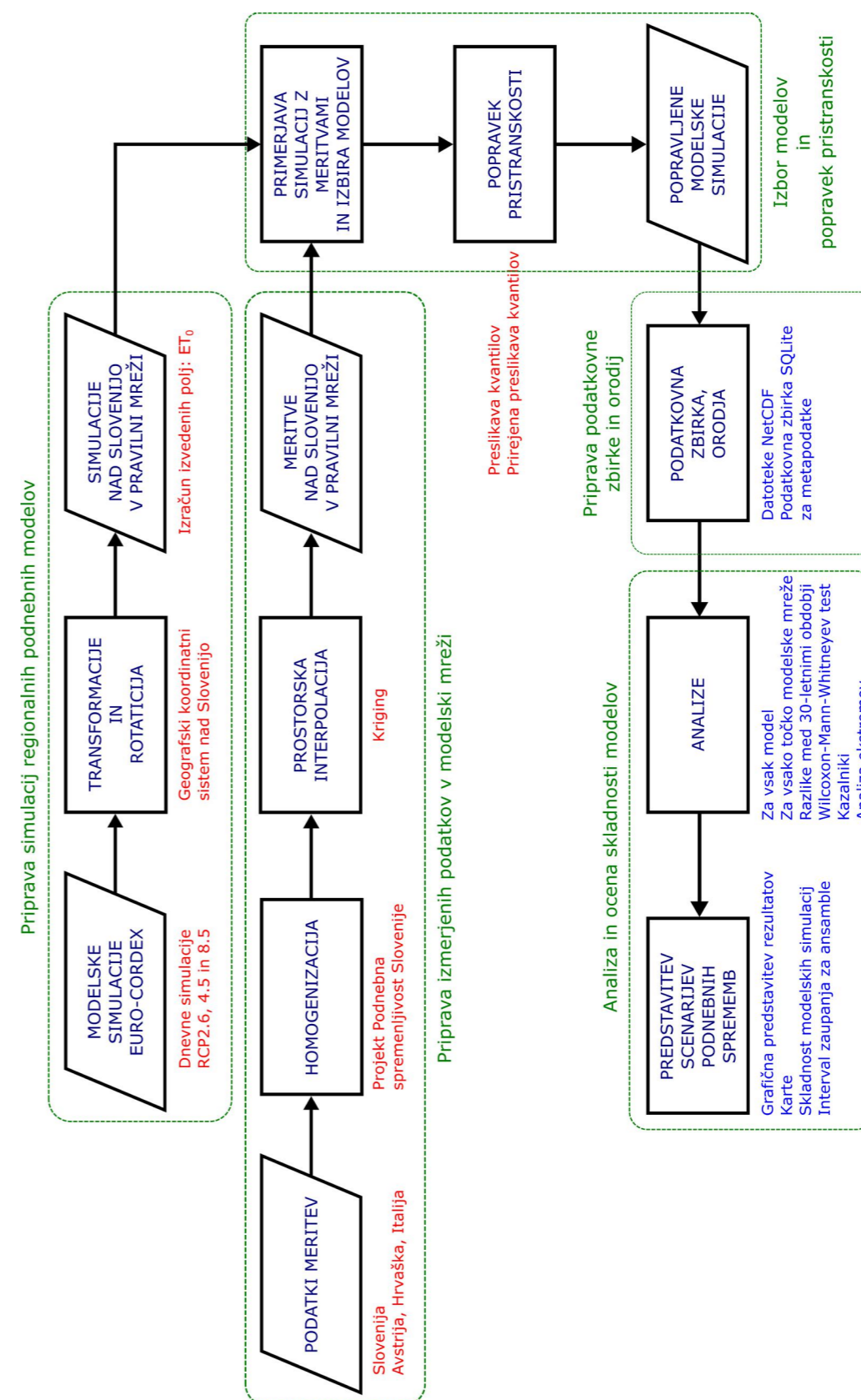
1. Priprava izmerjenih podatkov v modelski mreži,
2. Priprava izračunov simulacij regionalnih podnebnih modelov za različne scenarije izpustov toplogrednih plinov (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5),
3. Izbor primernih regionalnih podnebnih modelov in popravki njihovih pristranskosti,
4. Priprava ustrezne podatkovne zbirke podnebnih scenarijev in orodij za dostop do podatkov,
5. Analiza podatkov izbranih regionalnih podnebnih modelov in ocena skladnosti ugotovljenih sprememb oziroma združevanje rezultatov modelov ansambla v enotno oceno podnebnih sprememb za posamezni scenarij toplogrednih plinov.

4.3.1 Priprava modelskih podatkov regionalnih podnebnih modelov

Vsi rezultati modelskih simulacij projekta EURO-CORDEX so na voljo v datotekah NetCDF (ang. *network common data form*), ki je strojno neodvisna oblika za shranjevanje matričnih znanstvenih podatkov, v našem primeru meteoroloških podatkov v prostorski mreži. Podatki modelov so shranjeni v zavrti geografski projekciji (ang. *rotated pole coordinate system*) v ločljivosti 0,11°, zato smo jih najprej pretvorili v običajno geografsko projekcijo v ločljivosti 0,125° (okrog 14 km × 10 km). To smo storili z zbirko orodij CDO (ang. *Climate Data Operators*) za uporabo in analizo podatkov podnebnih in vremenskih napovedi in projekcij (MPI-M, 2018). Modelsko območje EURO-CORDEX je za naše namene zelo veliko, zato smo ga obrezali, da je pokrivalo Slovenijo in dele okoliških držav. Končno območje je obsegalo območje med vzhodno zemljepisno dolžino 12° in 17° ter severno širino med 45° in 48° (okrog 900 modelskih točk). Na koncu smo izračunali vrednosti izvedenih spremenljivk, npr. referenčne evapotranspiracije.

4.3.2 Izbor regionalnih podnebnih modelov

V bazi projekta EURO-CORDEX smo imeli na voljo modelske izračune 18 kombinacij globalnih in regionalnih podnebnih modelov. Med temi kombinacijami so bili trije enaki pari modelov z različnimi nastavitvami,



Slika 4.4 | Shematski prikaz priprave podnebnih projekcij

Preglednica 4.1 | Izbrane kombinacije globalnih in regionalnih modelov. Globalni in regionalni modeli so ponavadi označeni z imenom institucije in modela, npr. CCLMcom-CCLM4-8-17 za regionalni model CCLM4-8-17 skupnosti CLM ali MOHC-HadGEM2-ES za globalni model HadGEM2-ES Centra Hadley za podnebno znanost in storitve britanske meteorološke službe Met Office.

globalni/regionalni	CCLM4-8-17	HIRHAM5	WRF331F	RACMO22E	RCA4
CNRM-CM5-LR	■				
MPI-ESM-LR	■				■
EC-EARTH		■			
IPSL-CM5A-MR			■		
HadGEM2-ES				■	

za dve modelski kombinaciji (z regionalnim modelom CSC) pa so bili izračuni nepopolni. Ker so bili nekateri modeli bolj, drugi pa manj pogosto zastopani in ker je kakovost modelskih izračunov nad različnimi območji različna, smo se odločili za izbor modelskih kombinacij. Z izborom smo se izognili prevelikemu vplivu bolj pogosto zastopanih modelov na končne rezultate in hkrati izbrali tiste modele, ki so zadovoljivo simulirali podnebje na območju Slovenije v preteklosti. Upoštevajoč zgoraj navedene omejitve smo lahko izbirali med 14 različnimi kombinacijami globalnih in regionalnih modelov.

S pomočjo izmerjenih vrednosti, projiciranih na modelsko prostorsko mrežo, smo analizirali statistike dnevni in mesečni vrednosti povprečne temperature zraka in višine padavin. Primerjavo med izmerjenimi in modelskimi vrednostmi smo naredili po podnebnih regijah. Kakovost mesečnih vrednosti smo določili z odklonom mediane modelskih od izmerjenih vrednosti za vsak mesec leta v primerjalnem obdobju 1981–2005. Mesečne odklone smo nato kvadrirali in sešteli, da smo dobili vsote kvadratov odklonov. Tako izračunane vrednosti za 14 različnih modelskih simulacij smo primerjali med sabo in izbrali tiste modelske kombinacije, kjer so bili rezultati za vse statistike vsaj srednje dobri. Izbrali smo torej modele, ki so se sorazmerno dobro ujemale z meritvami (statistike dnevni in mesečni vrednosti temperature in višine padavin po podnebnih regijah Slovenije). Hkrati smo pazili tudi na čim večjo raznovrstnost med kombinacijami globalnih in regionalnih podnebnih modelov, da bi pokrili čim večji del negotovosti, ki izvira iz značilnosti tako globalnih kot regionalnih modelov. Na primer, izračunana višina padavin modela IPSL-CM5A-MR/WRF331F je za scenarija RCP4.5 in RCP8.5 po letu 2050 veliko večja, medtem ko je za model MPI-ESM-LR/CCLM4-8-17 po letu 2070 v splošnem veliko manjša kot pri ostalih

modelih. Pri scenariju RCP2.6 je izračunana višina padavin modela EC-EARTH/HIRHAM5 nadpovprečno velika glede na obdobje 1981–2010, nasprotno pa je za model HadGEM2-ER/RACMO22E veliko manjša, razen po letu 2080, vendar še vedno veliko manjša od prvega modela.

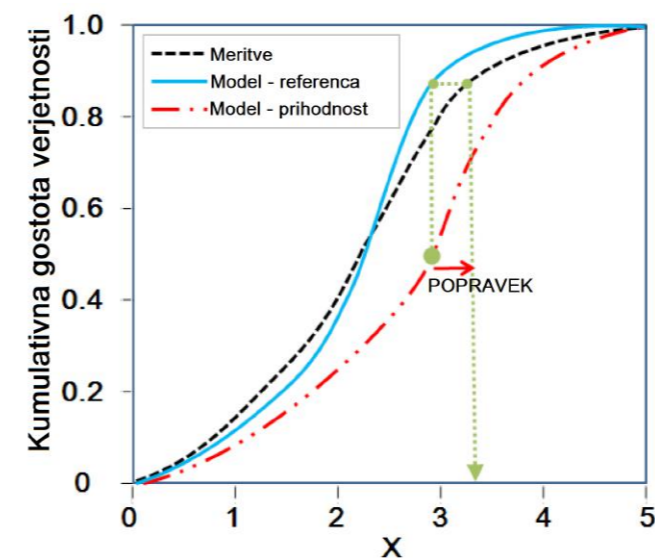
Od 14 kombinacij globalnih in regionalnih podnebnih modelov smo jih na koncu izbrali šest (preglednica 4.1). Da bi proučili vpliv globalnih modelov na rezultate regionalnih, njihovi podatki so bili vhodni podatki v regionalne modele, smo izbrali dve kombinaciji z istim globalnim modelom (modela MPI-ESM-LR/CCLM4-8-17 in MPI-ESM-LR/RCA4), za proučitev vpliva regionalnih modelov pa dve kombinaciji z istim regionalnim modelom (modela CNRM-CM5-LR/CCLM4-8-17 in MPI-ESM-LR/CCLM4-8-17).

4.3.3 Odprava pristranskosti regionalnih podnebnih modelov

Podnebni modeli vsebujejo sistematične napake. Te nastanejo zaradi omejene vodoravne in navpične ločljivosti, poenostavljenih enačb za nekatere fizikalne procese, numeričnih shem, nepopolnega razumevanja vseh podnebnih procesov itn. (več v poglavju *Negotovost podnebnih projekcij*). V splošnem je potrebno sistematične napake modelov pred uporabo njihovih rezultatov popraviti. Rezultati modelov naj bi seveda čim bolje predstavili preteklost, ki pa je tudi točno ne poznamo. Zato primerjamo modelske rezultate z meritvami in jih ustrezno popravimo, za kar obstaja več različnih metod. V projektu OPS21 smo uporabili prirejeno metodo preslikave kvantilov (ang. *quantile mapping*). Popravke modelskih simulacij smo naredili

za obdobje 1981–2100, primerjalno obdobje za oceno pristranskosti pa je bilo tridesetletno obdobje 1981–2010. Za odpravo pristranskosti smo uporabili dnevne podatke prizemnih meritev, interpolirane na modelsko mrežo (več v poglavju *Meritve v pravilni mreži*).

Odpravljanja pristranskosti modelskih podatkov smo se lotili za vsako spremenljivko posebej. Najprej smo izvedli metodo odpravljanja pristranskosti (ang. *bias correction*, BC) pri padavinskih podatkih z metodo kvantilnega prilagajanja (ang. *quantile mapping*). To smo naredili s programskim orodjem R, z uporabo knjižnice *qmap* (Gudmundsson, 2016). Na podlagi članka avtorja paketa (Gudmundsson in sod., 2012), v katerem je primerjal različne metode, smo se odločili za uporabo metode neparametrične preslikave kvantilov z uporabo empiričnih kvantilov (ang. *non-parametric quantile mapping using empirical quantiles*) z linearno ekstrapolacijo. Popravljanje se je vršilo za vsako modelsko celico neodvisno od drugih. Splošni postopek je naslednji. Primerjamo porazdelitvi modelskih podatkov in meritev v primerjalnem obdobju ter ocenjujemo razlike po kvantilih te porazdelitve (slika 4.5). Ocenjene razlike uporabimo kot popravke modelskih podatkov za prihodnost pri izbranem kvantilu. Popravke smo izračunali za vsak dan v letu z uporabo drsečega časovnega okna (ang. *moving window*). Pri padavinah smo se odločili za 61-dnevno časovno okno in 100 razredov kvantilov.



Slika 4.5 | Postopek odpravljanja pristranskosti. Pri izbrani vrednosti X (na grafu označeno z zeleno točko) pogledamo, kolikšen je popravek modela v primerjalnem obdobju glede na meritve (razlika vrednosti pri enakem centilu; sledi zelenim pikicam). To vrednost popravka nato pripišemo modelu v prihodnosti (rdeča puščica).

Vse ostale spremenljivke smo popravljali z metodo preslikave kvantilov odklonov (ang. *quantile delta mapping*, v nadaljevanju QDM). Upoštevali smo odvisnost obravnavane spremenljivke (npr. dnevne povprečne temperature) od višine padavin. Ohraniti smo namreč želeli modelske trende za obravnavano spremenljivko ter povezavo med višino padavin in spremenljivko, ki sledi iz meteoroloških meritev. Za obravnavano spremenljivko smo za štiri razrede padavin popravljali odmike te spremenljivke od povprečnega letnega hoda v primerjalnem obdobju z metodo preslikave kvantilov. Pri tem smo uporabljali knjižnico *MBC* (funkcija *QDM*) statističnega in programskega orodja R (Cannon, 2018). Popravljanje se je vršilo za vsak padavinski razred in za vsako modelsko celico neodvisno od drugih ter po 30-letnih obdobjih (2011–2040, 2041–2070 in 2071–2100). Po popravkih odklonov smo s prištjetjem povprečnega letnega hoda dobili absolutne vrednosti obravnavane spremenljivke.

Padavinske razrede smo določili na podlagi meritev. Ker se padavinski procesi in s tem napake v modelskih izračunih skozi leto spreminjajo, smo padavinske razrede določili na mesečnih vrednostih merjenih podatkov. Določili smo štiri razrede glede na dnevno višino padavin. V najnižji razred sodijo podatki, kjer je dnevna višina padavin manjša od 0,01 mm (skupina dni brez padavin). V ta razred sodi največ podatkov. Ostale tri razrede smo ločili po tercilih, da so bili razredi karseda enako veliki. Isto število podatkov v razredih pri meritvah in modelu smo zagotovili tako, da smo modelske podatke razvrstili po velikosti in jih nato razvrstili v štiri razrede z istim številom podatkov kot pri meritvah. Pogostost pojavljanja vseh štirih razredov pri modelskih podatkih je bila tako enaka kot pri izmerjenih podatkih.

Ker se posamezne spremenljivke skozi leto po absolutni vrednosti močno spreminjajo, smo pred odpravljanjem pristranskosti za vsak razred posebej ločili povprečni sezonski potek spremenljivke in odstopanje od tega poteka. Povprečni sezonski potek smo izračunali z glajenjem podatkov s funkcijo lokalno uteženega glajenja (ang. *locally weighted scatterplot smoothing*, LOESS). Za okno glajenja smo vzeli 61 dni in pri tem pazili na gladek prehod na robovih leta (december, januar). Zglajeni časovni potek označimo s \tilde{T} (razred, dan).

Pri popravljanih podatkih smo želeli ohraniti skladnost med vrednostmi različnih spremenljivk, zato smo za posamezne spremenljivke (razen za padavine) opisano splošno metodo odpravljanja pristranskosti modelskih podatkov nekoliko priredili.

Dnevna povprečna temperatura

Dnevna povprečna temperatura ima velik letni hod, zato smo v tem primeru popravljali odmike dnevne povprečne temperature od povprečnega letnega hoda, ki smo ga določili za vsak padavinski razred posebej (primera prikazuje slika 4.6).

Odmike izračunamo kot razliko obeh vrednosti:

$$\Delta T_{pov}[\text{razred}, \text{dan}] = T_{pov}[\text{razred}, \text{dan}] - \bar{T}_{pov}[\text{razred}, \text{dan}], (1)$$

kjer smo z ΔT_{pov} označili odmik dnevne vrednosti

povprečne temperature T_{pov} od zglajenega časovnega poteka \bar{T}_{pov} .

Odmiki so po velikosti skoraj neodvisni od letnega časa, zato so primernejši za izračun popravkov. Odmike smo izračunali glede na padavinski razred in dan v letu. Ves postopek smo izvedli ločeno za meritve in modele, ter za posamezna tridesetletna obdobja.

Da ohranimo zvezno prehajanje odmikov med zaporednimi dnevi, ki jih želimo popraviti z metodo QDM, smo uporabili 31-dnevno centrirano drseče okno. S tem smo zaradi večjega nabora vrednosti povečali

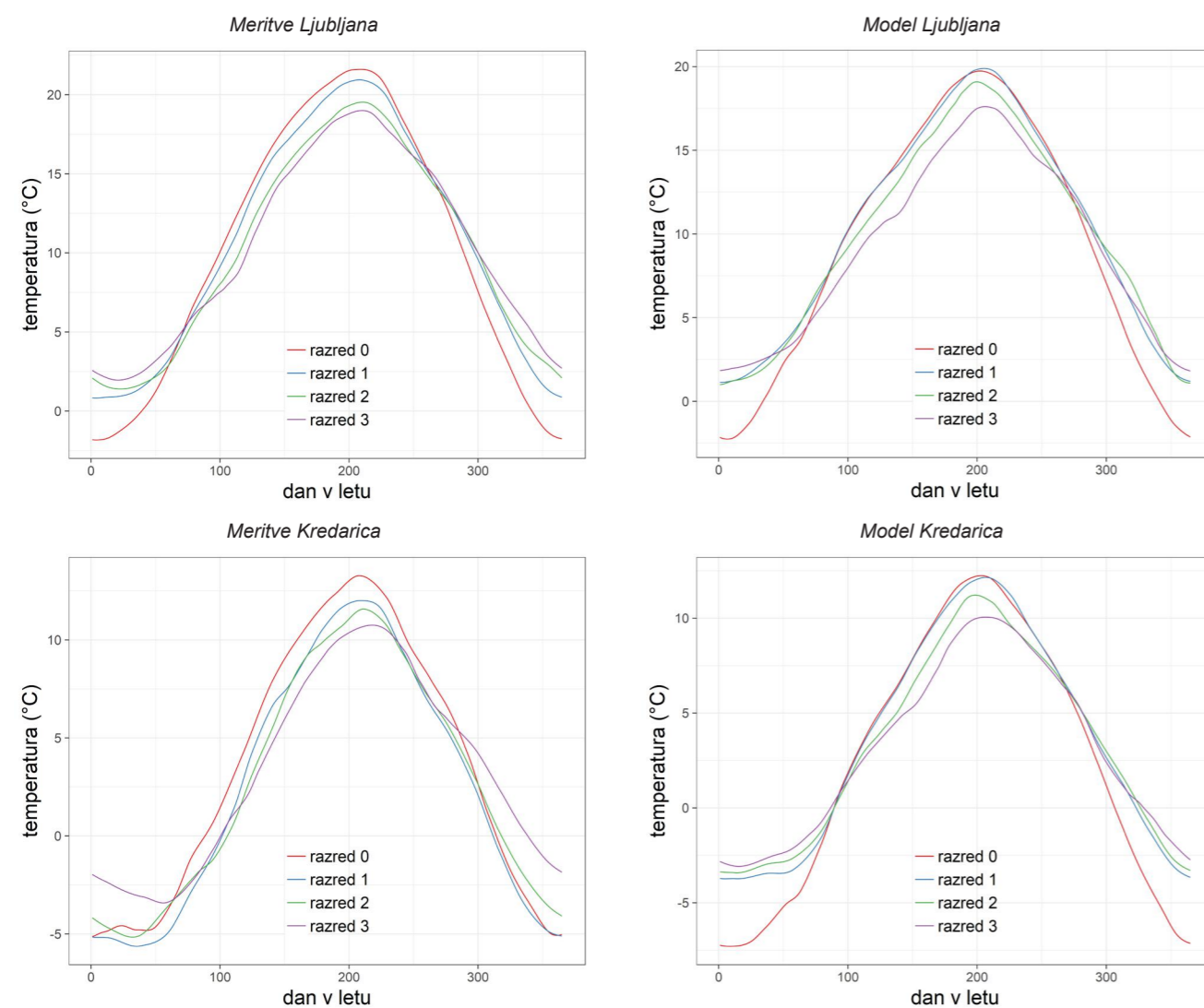
zanesljivost izračuna popravkov v primerjavi z metodo, ki pri popravljanju upošteva zgolj podatke točno določenega dne v letu.

Popravke odmikov smo izračunali s pomočjo funkcije QDM programskega orodja R. S funkcijo uskladimo statistični porazdelitvi odmikov (meritev in modela) v primerjalnem obdobju. Popravke iz primerjalnega obdobja nato uporabimo za popravek porazdelitve odmikov modela v projekcijskem obdobju. Za izračun potrebuje funkcija podatke meritev in modela v kalibracijskem obdobju (t_{kal}) in modela v projekcijskem obdobju (t_{proj}):

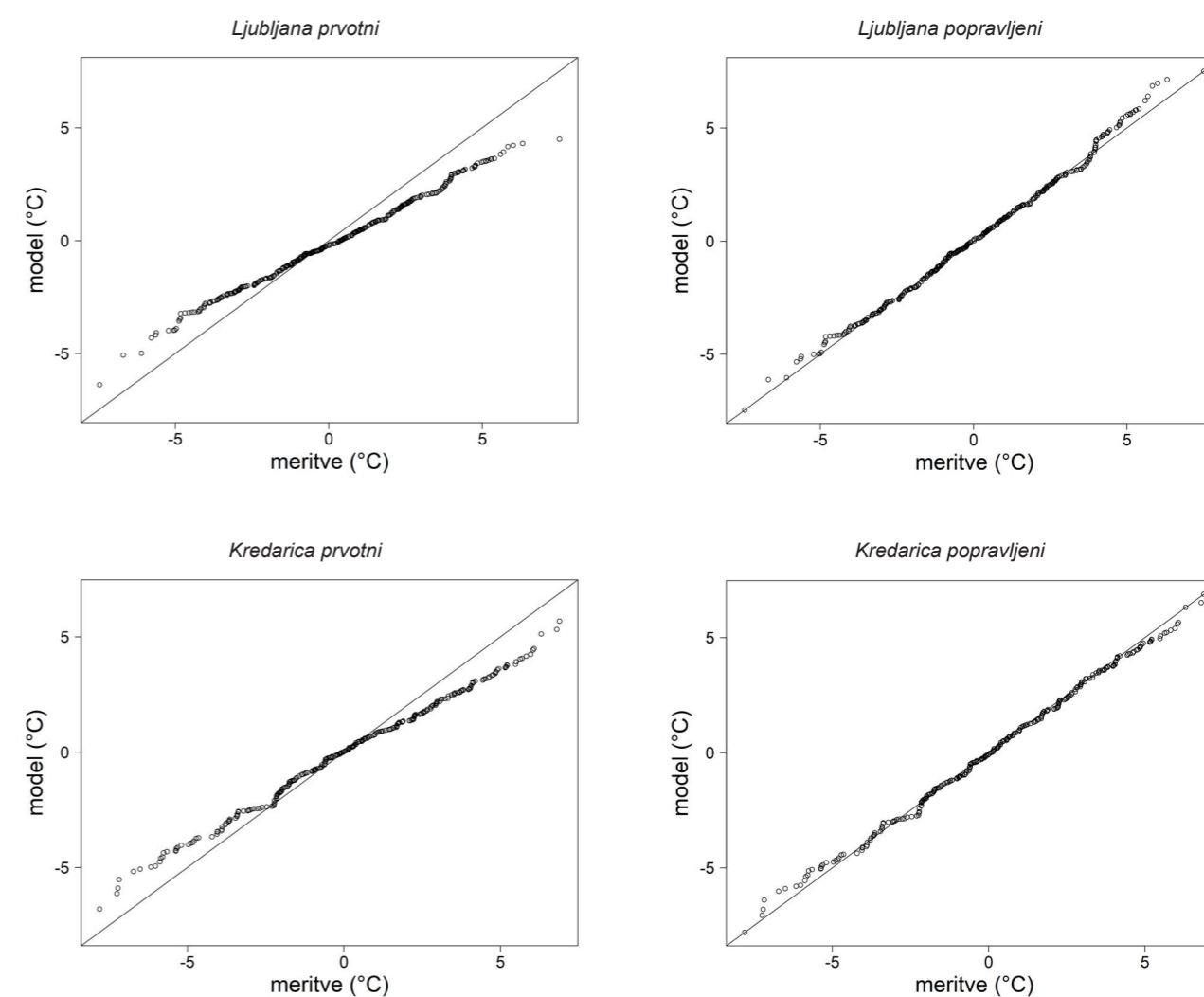
$$\Delta T'_{pov}(t, model)[\text{razred}, \text{dan}] = QDM \left(\begin{aligned} &\Delta T_{pov}(t_{kal}, meritve)[\text{razred}, \text{dan}], \\ &\Delta T_{pov}(t_{kal}, model)[\text{razred}, \text{dan}], \\ &\Delta T_{pov}(t_{proj}, model)[\text{razred}, \text{dan}] \end{aligned} \right).$$

Rezultat te funkcije so popravljene vrednosti odmikov za model v primerjalnem obdobju $\Delta T'(t_{kal}, model)[\text{razred}, \text{dan}]$ in v projekcijskem obdobju $\Delta T'(t_{proj}, model)[\text{razred}, \text{dan}]$.

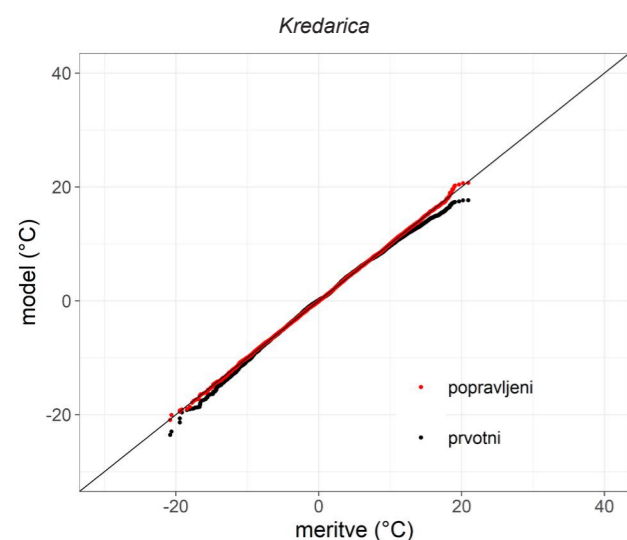
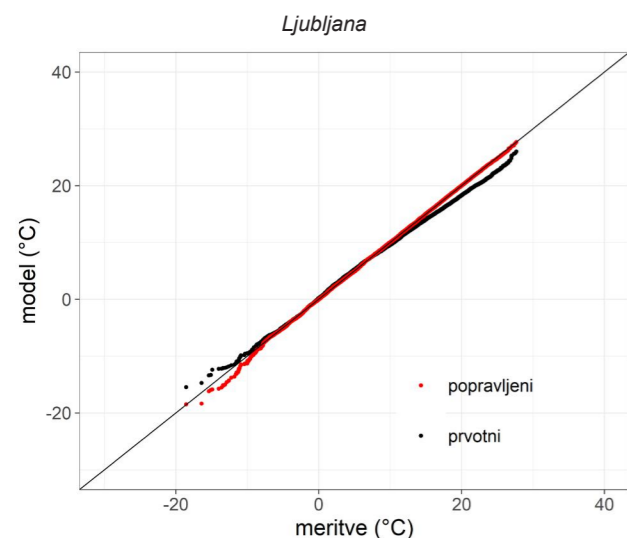
Na koncu je potrebno te popravljene odmike prišteti nazaj k zglajenemu časovnemu poteku za meritve, da dobimo popravljeno vrednost za absolutno vrednost



Slika 4.6 | Zglajeni letni hod za dnevno povprečno temperaturo \bar{T}_{pov} v modelskih celicah interpoliranih meritev (levo) in modelskih simulacij (desno), v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Razred 0 predstavlja skupino dni brez padavin, ostali trije razredi pa so terciili padavinskih dogodkov, pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.



Slika 4.7 | Primerjava med prvotnimi (levo) in popavljenimi (desno) odmiki od časovnega poteka za padavinski razred 0 in 31-dnevno časovno okno pri dnevni povprečni temperaturi, za modelski celici, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj)



Slika 4.8 | Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno povprečno temperaturo za modelski celici, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Podatki zajemajo obdobje 1981–2010.

povprečne temperature $T'_{pov}(t, model)[razred, dan]$, za projekcijska obdobja pa še razliko zglajenih modelskih časovnih potekov med projekcijskim in primerjalnim obdobjem.

Primerjavo med popravljenimi in prvotnimi vrednostmi odmkov prikazuje primer na sliki 4.7. Prikazane so vrednosti za najnižji padavinski razred in 31-dnevno časovno okno, centrirano na izbrani majski dan. Vidimo lahko, da prvotno izračunani odmiki odstopajo od odmkov pri meritvah, medtem ko popravljeni

odmiki lepo sovpadajo z meritvami.

V primerjalnem obdobju popravljeno vrednost dnevne povprečne temperature T'_{pov} izračunamo kot:

$$T'_{pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] = \Delta T'(t_{kal}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan]. \quad (3)$$

Za projekcijsko obdobje je postopek podoben, prištejemo le še razliko v povprečnem letnem poteku za posamezni padavinski razred v projekcijskem in primerjalnem obdobju:

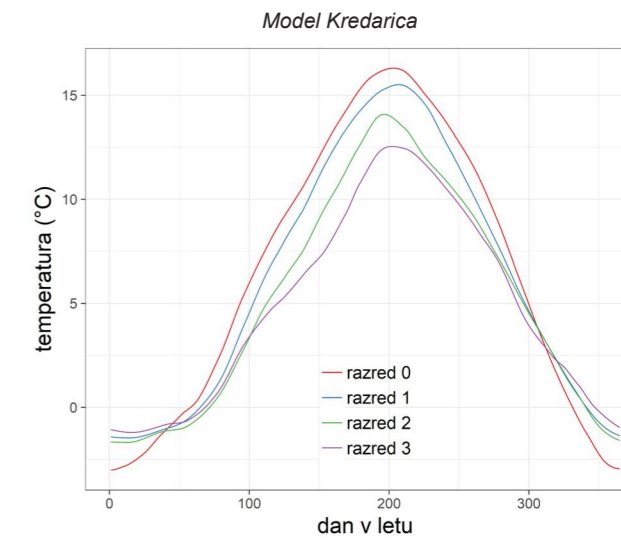
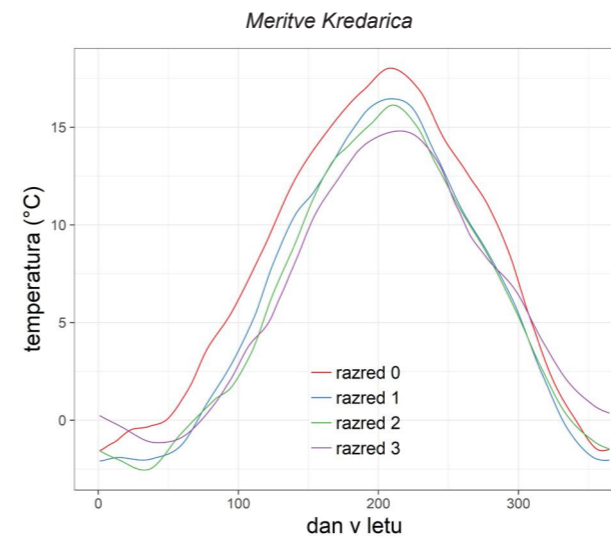
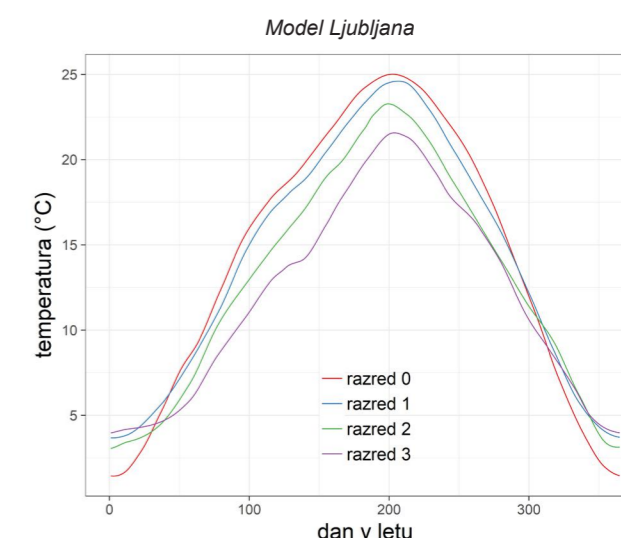
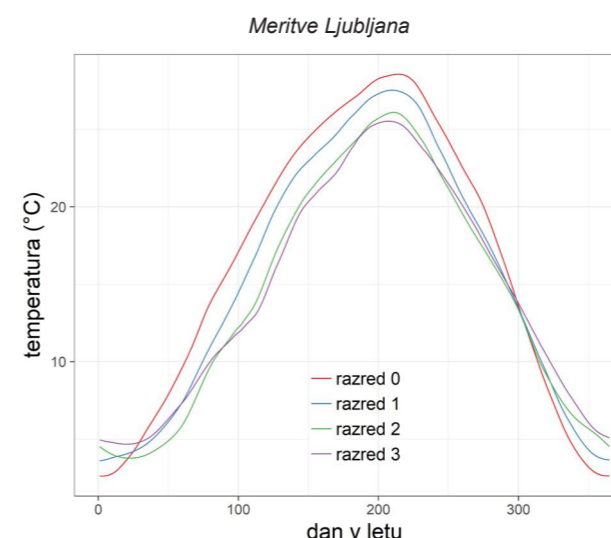
$$T'_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] = \Delta T'_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] + (\tilde{T}_{pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] - \tilde{T}_{pov}(t_{kal}, model)[razred, dan]).$$

S tem postopkom zagotovimo, da se v časovni vrsti popravljenih podatkov ohranja trend, ki je prisoten v prvotnih modelskih podatkih. Končni rezultat postopka za izbrani primer prikazuje slika 4.8. Prvotni modelski podatki na obeh skrajnostih precej odstopajo od meritvev, pri popravljenih vrednostih pa je ujemanje mnoge boljše.

Dnevna najvišja in najnižja temperatura

Dnevne najvišje in najnižje temperature nismo popravljali povsem neodvisno, ampak smo ju vezali na vrednost povprečne temperature. Če tega ne bi naredili, bi bila lahko kakšen dan najnižja temperatura višja od povprečne ali najvišje in analogno za najvišjo temperaturo. Zato smo izvedli popravke na odklonih dnevne najvišje in najnižje temperature od dnevne povprečne temperature. Prirejeno metodo preslikave kvantilov glede na štiri padavinske razrede smo uporabili za te odklone, na koncu pa smo odmike preračunali v absolutne vrednosti s prištevanjem dnevne povprečne temperature.

Postopek za izračun popravkov pri dnevni najvišji in najnižji temperaturi je enak, zato je opisan samo primer za najvišjo temperaturo. Glede na povprečno temperaturo zraka smo v tem primeru naredili še en dodaten računski korak. Od dnevne najvišje temperature zraka T_{maks} smo odšteli povprečno temperaturo posameznega dne T_{pov} . Razliko označimo s $T_{maks-pov}$. Nadaljnji postopek je enak kot pri povprečni temperaturi zraka, le da računamo z odkloni od povprečne temperature. Izračunamo vrednosti povprečnega letnega



Slika 4.9 | Zglajeni letni poteki odmkov najvišje temperature od povprečne temperature $\tilde{T}_{maks-pov}$ v modelskih celicah interpoliranih meritvev (levo) in modelskih simulacij (desno), v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Razred 0 predstavlja primere brez padavin, ostali trije razredi pa so ločeni po višini padavin (tercili), pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.

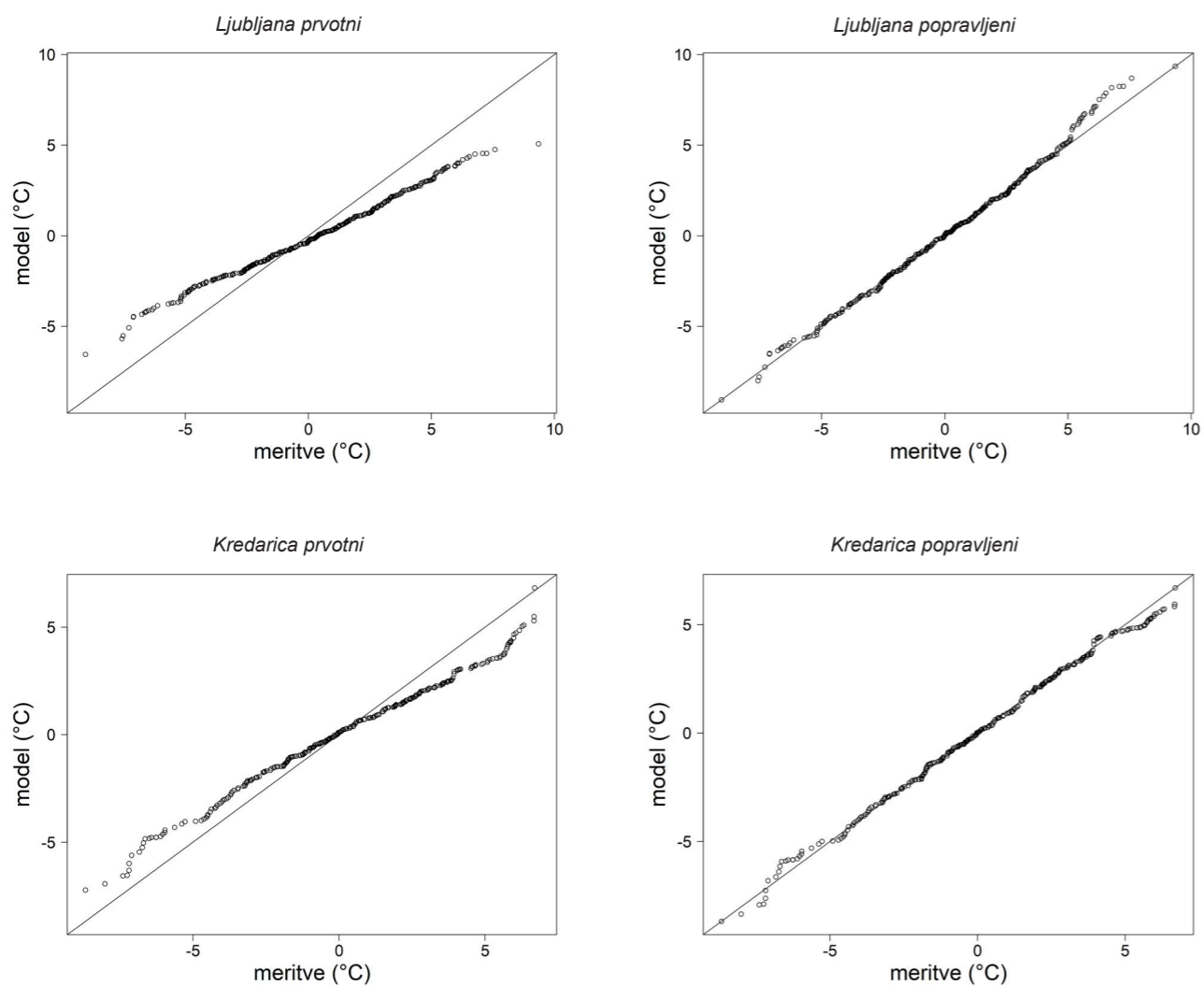
poteka po padavinskih razredih za te razlike $\tilde{T}_{maks-pov}$ (slika 4.9) in jih odštejemo od dnevne vrednosti odklona. Ponovno dobimo odmike $\Delta T_{maks-pov}$ (slika 4.10), ki jih popravimo z metodo QDM. Postopek izračuna končnih vrednosti se ponovno loči na primerjalno in projekcijsko obdobje.

Ker smo na začetku naredili razliko najvišje (T_{maks}) in povprečne temperature (T_{pov}), je sedaj popravljenemu odkliku ($\Delta T'_{maks-pov}$) potrebno prišteti vrednost povprečne temperature. Prištejemo popravljeno vrednost za povprečno temperaturo T'_{pov} , da se nam ohranja trend.

Končni izračun predstavlja enačba 5:

$$T'_{maks}(t_{kal}, model)[razred, dan] = \Delta T'_{maks-pov}(t_{kal}, model)[razred, dan] + \tilde{T}_{maks-pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] + T'_{pov}(t_{kal}, model)[dan]. \quad (5)$$

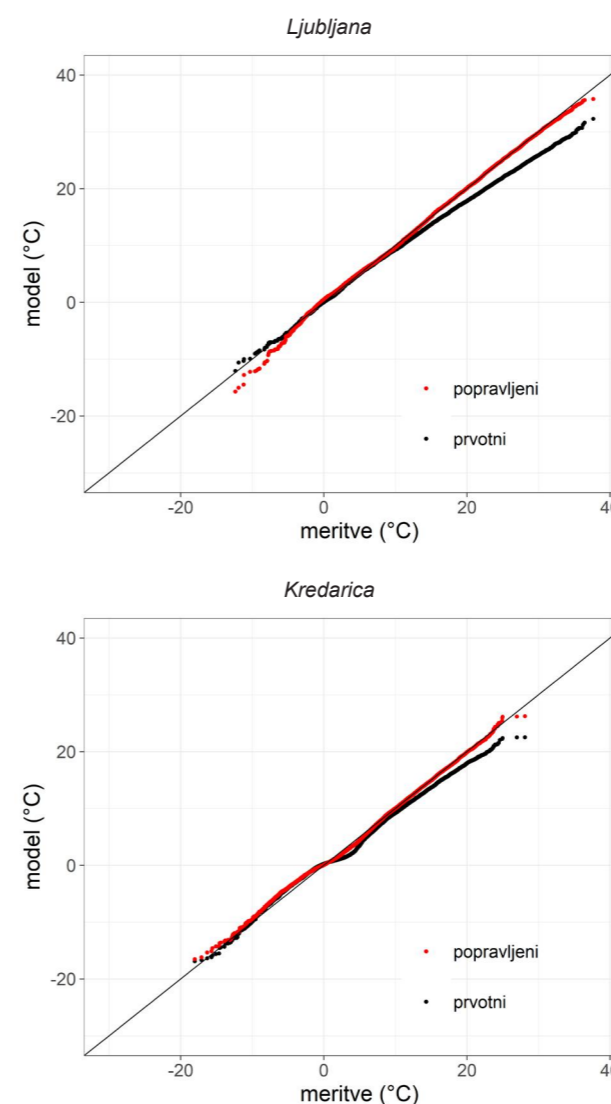
Tudi v tem primeru je postopek enak, kot je bil opisan za dnevno povprečno temperaturo v projekcijskem obdobju in dnevno najvišjo temperaturo v primerjalnem obdobju. Potrebno je paziti, da prištejemo popravljeno vrednost za povprečno temperaturo T'_{pov} in razliko med letnima hodoma v projekcijskem in primerjalnem obdobju. Končni izračun predstavlja enačba 6:



Slika 4.10 | Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) odmiki od letnega hoda za padavinski razred 0 in 31-dnevno časovno okno pri dnevni najvišji temperaturi zraka za modelski celici, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Največje odstopanje je vidno pri Kredarici, kjer prvotni modelski podatki zelo odstopajo od meritev.

$$T'_{maks}(t_{proj}, model)[razred, dan] = \Delta T'_{maks-pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] + \bar{T}_{maks-pov}(t_{kal}, meritve)[razred, dan] + T'_{pov}(t_{proj}, model)[dan] + (\bar{T}_{maks-pov}(t_{proj}, model)[razred, dan] - \bar{T}_{maks-pov}(t_{kal}, model)[razred, dan]). \quad (6)$$

Končni popravki so za izbrani primer prikazani na sliki 4.11.



Slika 4.11 | Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za dnevno najvišjo temperaturo za modelski celici, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Podatki zajemajo obdobje 1981–2010.

Referenčna evapotranspiracija

Tudi vrednosti referenčne evapotranspiracije ET_0 smo popravljali s prirejeno metodo preslikave kvantilov. Popravljanje te spremenljivke se od ostalih razlikuje v tem, da ne popravljamo odmikov ET_0 od povprečnega letnega hoda, ampak absolutne vrednosti. Z odmiki ne računamo, ker je porazdelitev vrednosti evapotranspiracije izrazito nesimetrična in so številne vrednosti blizu fizikalne spodnje meje (0 mm). Tudi tukaj popravljamo vrednosti za vsak padavinski razred posebej. Primer zglajenega letnega hoda (\bar{ET}_0) prikazuje slika 4.12 in posamezne popravke slika 4.13.

Popravki za referenčno evapotranspiracijo (ET'_0) imajo obliko:

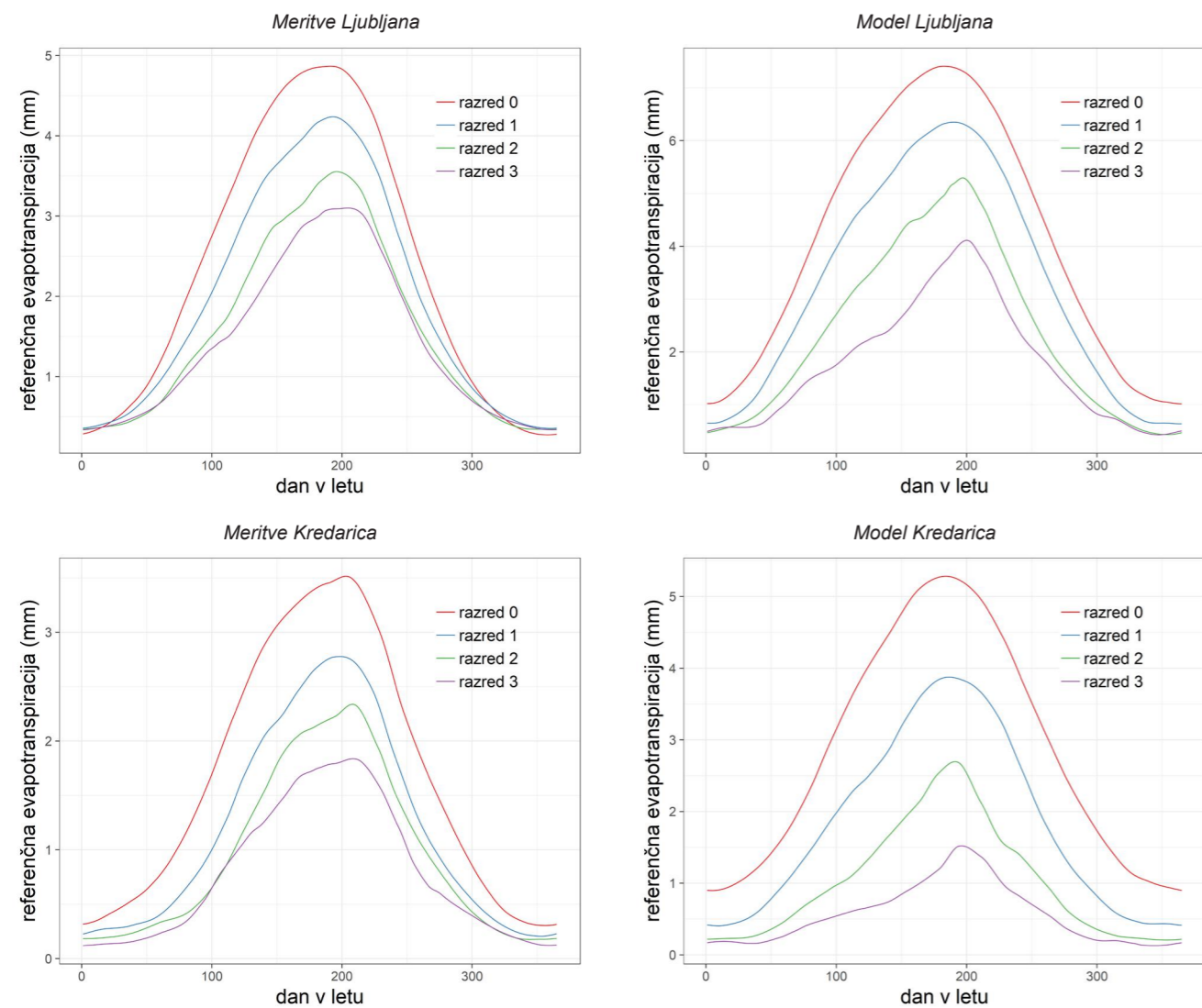
$$ET'_0(t, model)[razred, dan] = QDM \left(ET_0(t_{kal}, meritve)[razred, dan], ET_0(t_{kal}, model)[razred, dan], ET_0(t_{proj}, model)[razred, dan] \right), \quad (7)$$

kjer $ET_0(t_{kal}, meritve)$ predstavlja vrednosti referenčne evapotranspiracije v primerjalnem obdobju za meritve, $ET_0(t_{kal}, model)$ vrednosti modela v primerjalnem obdobju in $ET_0(t_{proj}, model)$ vrednosti modela v projekcijskem obdobju.

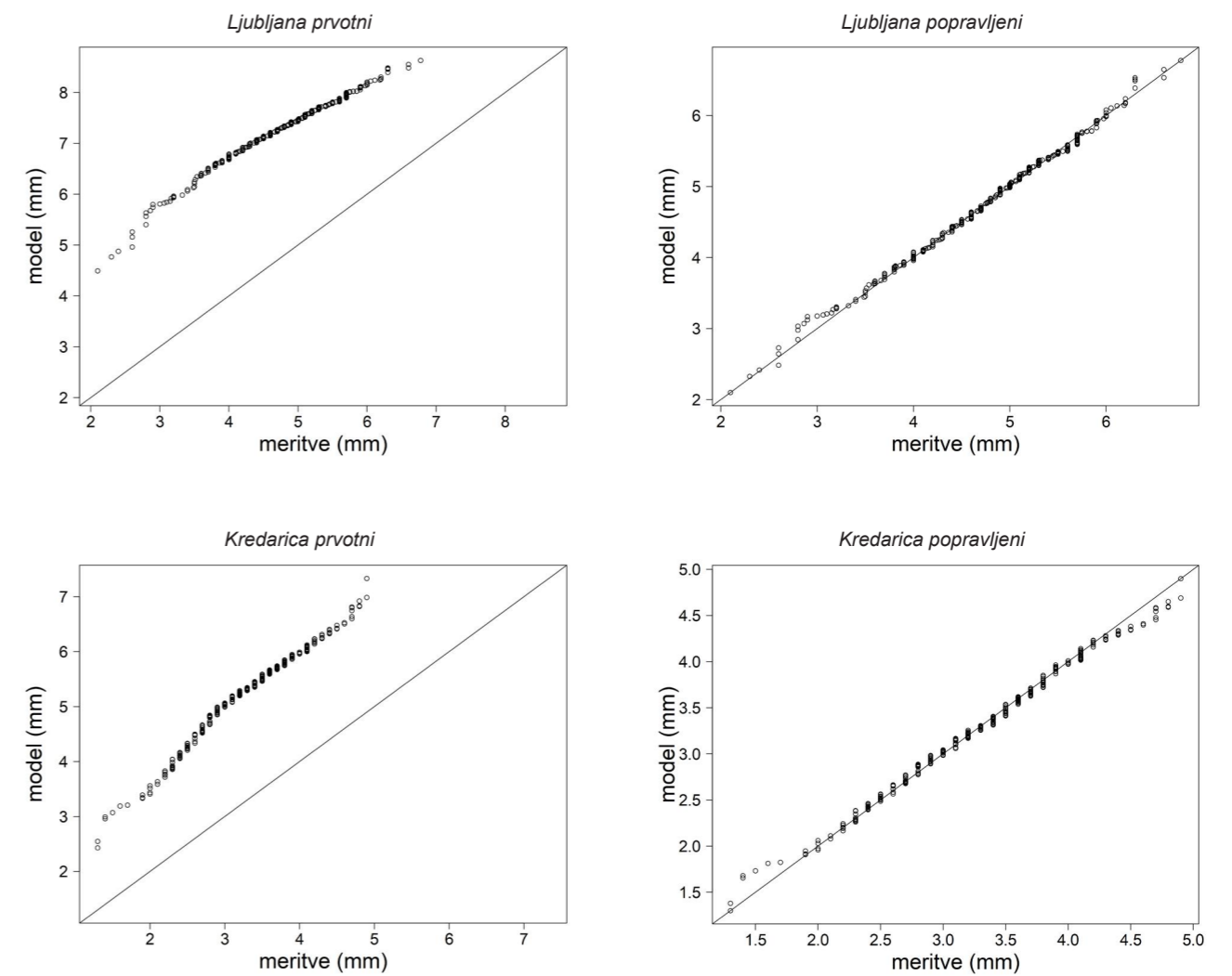
Ponovno se popravki ločijo za primerjalno (t_{kal}) in projekcijsko (t_{proj}) obdobje. Končni popravki so za izbrani primer prikazani na sliki 4.14.

Na sliki 4.13 opazimo veliko odstopanje modelskih vrednosti od meritev. Referenčna evapotranspiracija je izračunana iz ostalih modelskih vrednosti (več v podpoglavju *Referenčna evapotranspiracija* v poglavju *Izpeljani podatki*). Vsaka izmed teh vrednosti ima svojo pristranskost, ki se pri izračunu referenčne evapotranspiracije deloma seštevajo, zato je lahko pristranskost v referenčni evapotranspiraciji precej velika (slika 4.14).

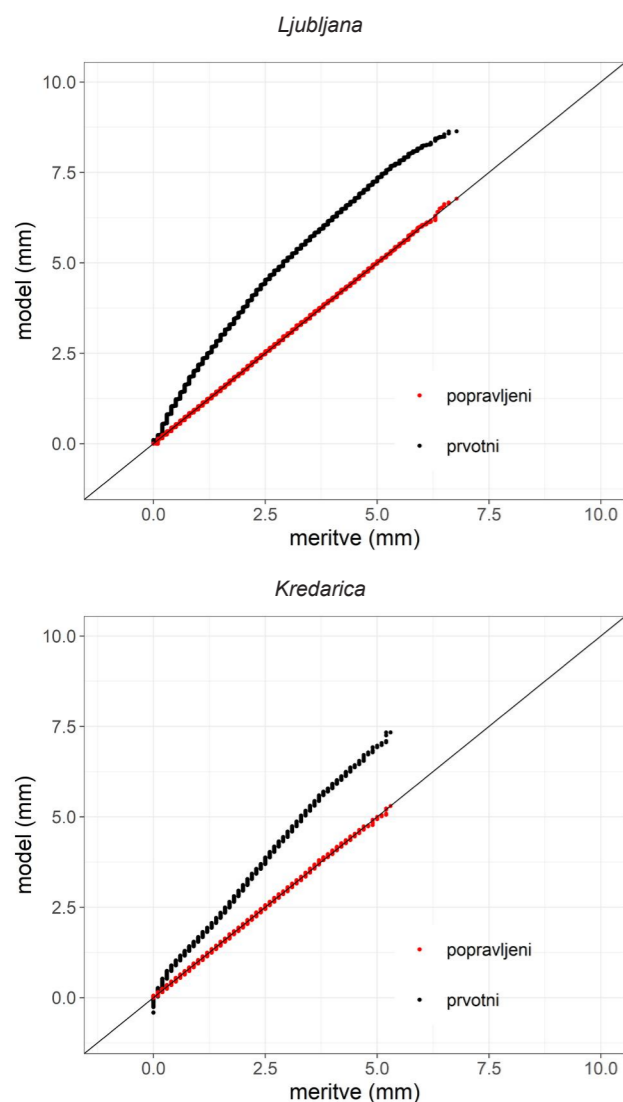
Lahko se zgodi, da z navedenim postopkom popravljajna referenčne evapotranspiracije dobimo negativne vrednosti, kar je fizikalno nemogoče. V takšnih primerih vse negativne vrednosti postavimo na nič.



Slika 4.12 | Zglajeni letni hod za referenčno evapotranspiracijo \bar{E}_T^0 v modelskih celicah interpoliranih meritev (levo) in modelskih simulacij (desno), v kateri sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Razred 0 predstavlja primere brez padavin, ostali trije razredi pa so ločeni po višini padavin (tercili), pri čemer razred 3 predstavlja najvišji padavinski razred.



Slika 4.13 | Primerjava med prvotnimi (levo) in popravljenimi (desno) vrednostmi referenčne evapotranspiracije za padavinski razred 0 in 31-dnevno časovno okno za modelski celici, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj)



Slika 4.14 | Primerjava med prvotnimi (črna) in popravljenimi (rdeča) modelskimi podatki za referenčno evapotranspiracijo za modelski celici, v katerih sta Ljubljana (zgoraj) in Kredarica (spodaj). Podatki zajemajo obdobje 1981–2010.

4.3.4 Podatkovne zbirke podnebnih scenarijev

Modelski podatki in popravljeni modelski podatki predstavljajo zelo veliko količino podatkov. Za lažje delo z njimi smo uredili podatkovno zbirko podnebnih scenarijev. Podatki regionalnih modelov in popravljeni modelski podatki so organizirani v datoteke netCDF. Za njihovo organizacijo smo uredili relacijsko podatkovno zbirko z orodjem SQLite. V statističnem in programskem orodju R smo napisali funkcije za dostop in obdelavo teh podatkov. Za shranjevanje rezultatov analiz smo uredili podatkovno zbirko z orodjem PostgreSQL. V njej smo uredili tudi zbirko prizemnih meteoroloških meritev, ki smo jih interpolirali v pravilno mrežo.

4.3.5 Analiza modelskih podatkov

Vse izračune smo najprej opravili za vsak model ansambla posebej in po točkah modelske mreže. Za izbran scenarij izpustov smo za vsak model in vsako točko modelske mreže ocenili spremembo v prihodnosti. Spremembo smo analizirali s primerjavo rezultatov za enega od treh projekcijskih obdobj s primerjalnim preteklim obdobjem ali pa z oceno trenda v celotnem obdobju (1981–2100).

Podatke regionalnega modela v vsaki modelski točki smo analizirali na dva načina:

1. Ocenili smo spremembe povprečnih vrednosti podnebnih spremenljivk in njihovih kazalnikov v treh tridesetletnih obdobjih glede na primerjalno obdobje.
2. Ocenili smo dolgoletni trend izjemnih vrednosti podnebnih spremenljivk oziroma njihovih kazalnikov. Dolgoletni trend smo izračunali tudi za povprečno temperaturo zraka, ker je ta trend pomemben pri oceni spremembe kratkotrajnih izjemnih nalivov.

Statistično zanesljivost spremembe povprečnih vrednosti smo ocenili s testiranjem ničelne hipoteze, da do spremembe ni prišlo. Statistično zanesljivost trendov izjemnih vrednosti pa smo ocenili z oceno intervala zaupanja za trend. Spremembe smo ocenili na letni ravni, ker pa so pri nekaterih spremenljivkah bistvene razlike v spremembah med sezonami, smo jih ocenili tudi na ravni meteoroloških letnih časov (sezona). Letne čase smo opredelili kot naslednja tromesečja:

- *pomlad* (marec, april, maj),
- *poletje* (junij, julij, avgust),
- *jesen* (september, oktober, november) in
- *zimo* (december, januar, februar).

Pri zimi je potrebno upoštevati, da so zaradi prehoda v naslednje leto decembrski podatki iz drugega leta kot januarski in februarski. To je pomembno pri analizi časovnih vrst, npr. sezonskih izjemnih vrednosti spremenljivk.

Pri oceni povprečnih vrednosti smo za vsak model primerjali letne in sezonske vrednosti podnebnih spremenljivk in njihovih kazalnikov v treh prihodnjih tridesetletnih obdobjih:

- *bližnji prihodnosti* (2011–2040),
- *sredini stoletja* (2041–2070) in
- *koncu stoletja* (2071–2100).

Primerjalno obdobje je bilo tridesetletno obdobje 1981–2010. Statistično zanesljivost smo preverili z Mann–Whitney–Wilcoxonovim testom (tudi Wilcoxonov test). To je neparametrični test ničelne hipoteze, da je pri naključni izbiri vrednosti iz prvega vzorca enako verjetno, da je ta vrednost manjša ali večja od naključno izbrane vrednosti drugega vzorca. Alternativna hipoteza je, da je za naključno izbrano vrednost iz prvega vzorca verjetneje, da je manjša (večja) od naključno izbrane vrednosti drugega vzorca. Ena porazdelitev je potem stohastično večja od druge. Stopnjo značilnosti (α) za test smo postavili na 0,1.

Vrednosti razlik in statističnih značilnosti posameznih modelov smo združili, ocenili smo t. i. skladnost modelskega ansambla, ki nam pove, ali kažejo modeli ansambla podobne spremembe. Spremembo ansambelskih vrednosti smo označili kot zanesljivo, če je več kot polovica modelov kazala statistično pomembno razliko z istim predznakom. Če je približno enako število modelov kazalo statistično pomembno razliko v eno in drugo stran, smo spremembo označili za *nezanesljivo*. Pri taki spremembi glede na modelske simulacije ne moremo reči, kakšna bo, lahko se zgodijo velike spremembe v eno ali drugo smer. Za preostale primere smo označili, da sprememb glede na podatke ne pričakujemo. Več o tem najdete v poglavju *Skladnost modelskih simulacij*.

Dolgoletne trende izjemnih vrednosti podnebnih spremenljivk smo ocenili s klasično teorijo izjemnih vrednosti (Coles, 2001). Iz ocenjene porazdelitve GEV smo izračunali vrednosti z določeno povratno dobo in negotovost te ocene. Negotovost je velika, tako da večinoma ni opaznih razlik med primerjalnim obdobjem 1981–2010 in tridesetletnimi projekcijskimi obdobji. Zato smo ocenili linearni trend izjemnih vrednosti za celotno obdobje. Spremembe izjemnih vrednosti so bile namreč v okviru negotovosti približno linearne. Ker današnje vrednosti poznamo, dobljene so z analizo merskih podatkov, lahko prek trenda ocenimo, kakšne bodo te vrednosti v prihodnosti. Vrednosti trendov in njihovih napak (intervalov zaupanja trendov) za posamičen model smo nazadnje združili v oceno za celoten ansambel modelov po metodi ponovnega vzorčenja (ang. *bootstrap*). Dobili smo srednjo vrednost za trend ansambla in njegovo ocenjeno napako oziroma interval zaupanja, ki je večji, kot so intervali zaupanja trendov posameznih modelov. Statistično značilnost trenda celotnega ansambla pa smo ocenili podobno kot pri oceni razlik v tridesetletnih obdobjih.

Modelski rezultati regionalnih podnebnih modelov projekta EURO-CORDEX nam zaradi časovnega koraka, dolžine enega dneva, dajejo samo dnevne vrednosti vremenskih spremenljivk. Zato smo lahko analizirali samo vrednosti za dnevno ali večdnevno višino padavin. Na nalive s krajšim trajanjem iz teh podatkov ne moremo neposredno sklepati. Za 12-urne padavine predvidevamo podobno spremembo kot za enodnevnne.

Rezultate smo predstavili v obliki zemljevidov. Podatke smo preračunali v državni koordinatni sistem, ločljivosti 12 km × 12 km. Predstavitvi zemljevidov sta dve in sta opisani v poglavju *Metodologija predstavitve rezultatov*.

Analizirali smo linearen trend izjemne višine enodnevnih, tridnevnih in petdnevnih padavin ter vodnega primanjkljaja. Linearen trend na enostaven način pove, kako se s časom spreminjajo vsi povratni nivoji za izbrano spremenljivko. Sedanje vrednosti povratnih nivojev so izračunane iz podatkov večdesetletnih meteoroloških meritev v preteklosti. Linearni trendi so podani v obliki spremembe na desetletje (mm/desetletje za izjemne padavine) in so prikazani na zemljevidih (glej poglavje *Metodologija predstavitve rezultatov*). Ti prikazujejo mediane trendov ansambla šestih (dveh za scenarij RCP2.6) izbranih podnebnih modelov in zanesljivost ansambelskega rezultata. Zanesljivi trendi so označeni s črnimi pikami, z rdečimi pa trendi, kjer rezultati modelov ansambla niso skladni, modeli v

ansamblu si niso enotni glede predznaka trenda. Ti rezultati lahko zato pomenijo velike spremembe tako navzgor kot navzdol, vendar so modeli trenutno še tako nepopolni, da bi o tem zanesljiveje težko kaj povedali. Kjer pik ni, trendi statistično niso značilni in na osnovi podatkov, ki smo jih imeli na voljo, ne moremo sklepati, da bo do sprememb prišlo. Vedno moramo imeti v mislih tudi to, da je ocena trenda ansambla statistična in vsebuje tudi statistično napako. Izračunali smo tudi 95-odstotne intervale zaupanja za trende, ki so objavljeni v preglednicah v dodatku.

Linearne trende v letni povprečni temperaturi smo ocenili z metodo Theila in Sena (Coles, 2001). To je modernejša robustna regresijska metoda, ki je veliko manj občutljiva na posamezne izjemne vrednosti (osamelce) kot klasična metoda najmanjših kvadratov. Linearni trend je seveda le grob približek dejanskih podnebnih sprememb, je pa vseeno uporaben kazalnik dolgoletnih sprememb. Tudi v tem primeru smo ocenjene trende posameznih podnebnih modelov in njihovih intervalov zaupanja združili v enoten rezultat celega ansambla po metodi ponovnega vzorčenja. Statistično značilnost ansambla pa smo ocenili podobno kot pri oceni razlik v tridesetletnih obdobjih.

4.4 HIDROLOŠKI MODEL

Za oceno sprememb hidroloških razmer smo uporabili programski paket MIKE 11, s katerim razpolaga ARSO (Petan in sod., 2016), razvilo pa ga je podjetje DHI (*Danish Hydraulic Institute*). MIKE 11 je orodje za enodimenzijsko modeliranje toka vode, ki ga tvorita dve osnovni komponenti: hidrološki model NAM, ki vključuje snežni modul, in enodimenzijski hidrodinamični model (DHI, 2014).

Hidrološki model NAM je deterministični, konceptualni in združen (ang. *lumped*) model odtoka padavin (Nielsen in Hansen, 1973), ki simulira kroženje vode na zemeljskem površju. Model računa površinski in podpovršinski odtok s prispevnih površin. Osnovna računarska enota modela je podporečje, ki predstavlja prispevno območje posamezne reke do izbrane točke, kar je praviloma lokacija vodomerne postaje, ali pa prispevno območje za posamezen odsek reke med dvema vodomernima postajama. Podporečje je v modelu opredeljeno z velikostjo in topografijo, ki je

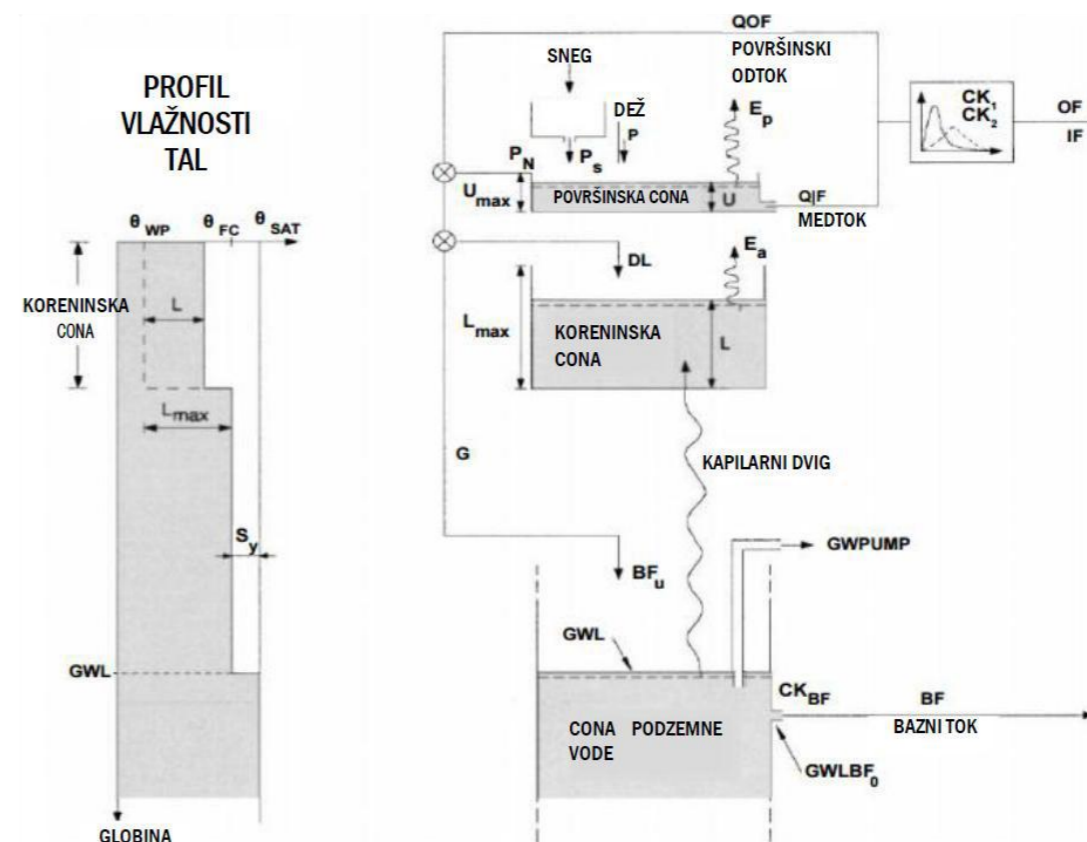
v snežnem modulu opisana s površinami stometrskih višinskih pasov. Snežni modul za vsak višinski pas simulira kopičenje padavin v snežni odeji in sproščanje snežnice v površinski odtok. Model izračuna hidrograme površinskega odtoka z vsakega višinskega pasu in jih nato združi po podporečjih. Struktura hidrološkega modela NAM je prikazana na sliki 4.15.

Vhodni podatki v model so časovni nizi padavin, temperature zraka, referenčne evapotranspiracije in pretoka rek. V postopku umerjanja modela je potrebno za vsako podporečje določiti parametre fizikalnih in semi-empiričnih enačb, ki so v modelu uporabljene za računanje hidrograme odtoka, spremljanje nakopičene vode v snežni odeji, na površini tal, v koreninski coni in v vodonosniku (Gačnik in Plečko, 2018).

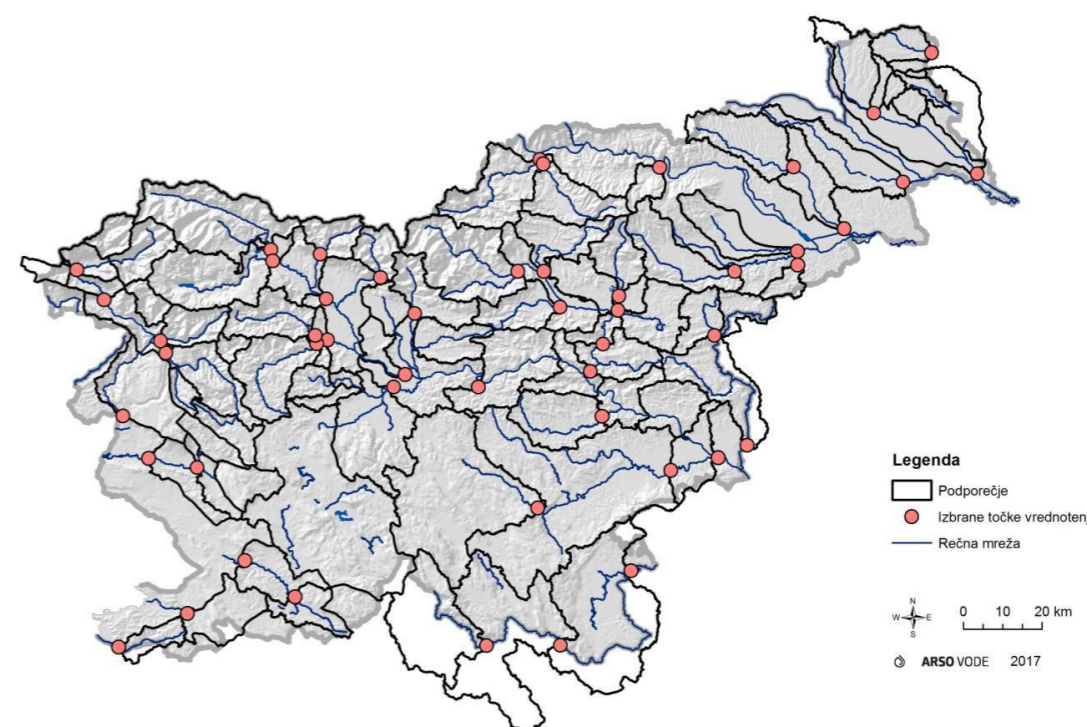
Hidrološki model NAM na ARSO uporabljamo v sklopu Hidrološkega prognostičnega sistema (HPS) (Petan in sod., 2016). Sistem omogoča vpogled v trenutno hidrološko stanje rek in ponuja napoved pretokov in vodostajev rek za izbrane prognostične točke. V sklopu HPS smo izdelali več hidroloških modelov za porečja Slovenije, ki so bili osnova pri izgradnji hidrološkega modela za oceno hidroloških razmer v prihodnosti (Gačnik in Plečko, 2018). Hidrološki model za oceno hidroloških razmer je bil za območje Slovenije uporabljen na 81 podporečjih s srednjo velikostjo okoli 226 km². Rezultate smo ovrednotili na 52 vodomernih postajah, ki smo jih izbrali na podlagi reprezentativnosti vodomernih postaj, pokritosti porečij in vodotokov, čim manjšem človekovem vplivu na hidrološki režim in popolnosti niza podatkov za primerjalno obdobje 1981–2010 (slika 4.16).

Model smo predhodno umerili in nastavili vrednosti parametrov modela za vsako podporečje. Za umerjanje in vrednotenje modela smo določili primerjalno obdobje 1981–2010. Vhodni meteorološki podatki so bili pripravljene v pravilni prostorski mreži (poglavje *Meritve v pravilni mreži*). V postopku umerjanja smo simulirane dnevne pretoke primerjali z merjenimi na vodomernih postajah (Gačnik in Plečko, 2018). Ujemanje simuliranih z merjenimi pretoki smo ocenili vizualno (grafično) in numerično z različnimi kriteriji: razlika v vodni bilanci, Nash-Sutcliffev koeficient učinkovitosti modela (NSE), determinacijski koeficient (R^2) in delež pristranskosti (PBIAS).

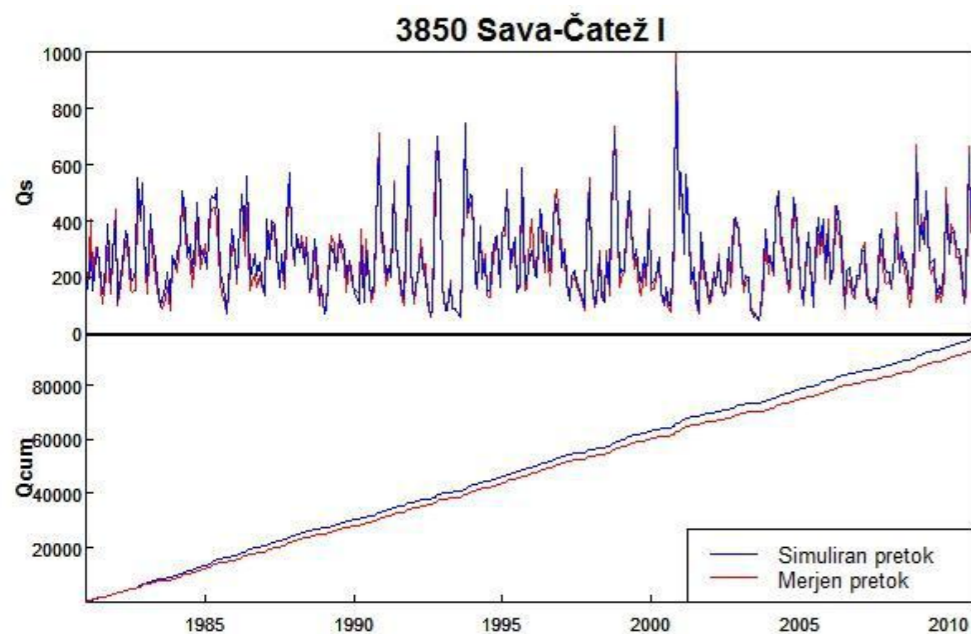
Pri umerjanju smo se osredotočili na napako v vodni bilanci, ki je razmerje med povprečnim simuliranim in merjenim pretokom, ter na koeficient učinkovitosti



Slika 4.15 | Struktura hidrološkega modela NAM (povzeto po DHI, 2014)



Slika 4.16 | Prikaz podporečij hidrološkega modela in točk vrednotenja modela



Slika 4.17 | Primerjava simuliranih in merjenih mesečnih pretokov (v m³/s, zgoraj) ter akumuliranega pretoka (v m³/s, spodaj) za postajo Čatež na Savi za obdobje 1981–2010

modela (NSE) in determinacijski koeficient (R^2), ki kažeta na skladnost oblike hidrograma simulacije in meritev. Pristranskost v vodni bilanci smo zmanjšali s korekcijskim faktorjem za padavine, določenim za vsako posamezno podporečje (Gačnik in Plečko, 2018). Za večino podporečij izkazujejo vrednosti NSE in R^2 dobro umerjanje simuliranih pretokov z merjenimi. Primer ujemanja simuliranega in merjenega pretoka za vodno postajo Čatež na reki Savi v obdobju 1981–2010 je prikazan na sliki 4.17.

Za simulacijo pretokov do konca 21. stoletja so bili vhod v hidrološki model popravljeni dnevni podatki šestih regionalnih podnebnih modelov za tri scenarije izpustov (poglavje *Modelske simulacije podnebja*).

4.5 VODNO-BILANČNI MODEL GROWA-SI

Vpliv podnebnih sprememb na napajanje podzemne vode v Sloveniji smo ocenili na osnovi spremembe vodne bilance. Za izračun vodne bilance v Sloveniji na letni ravni smo uporabili vodno-bilančni model GROWA-SI (Andjelov in sod., 2013), s katerim je bila izračunana vodna bilanca Slovenije na podlagi

izmerjenih meteoroloških in hidroloških podatkov v obdobju 1981–2010.

Model GROWA-SI je empirični regionalni vodno-bilančni model, ki na podlagi zveznih meteoroloških in hidroloških podatkov ter drugih fizično-geografskih podatkov omogoča izračun vodne bilance. Sestavlja ga več modulov v prostorski mreži 100 m × 100 m, s katerimi iz vhodnih podnebnih in hidroloških podatkov, podatkov o rabi tal, pedoloških in geoloških značilnostih ter topografiji, izračuna člene vodne bilance: dejansko evapotranspiracijo, skupni odtok, direktni odtok in napajanje podzemne vode. Uporablja se za izračun neto letne vodne bilance na območju celotne Slovenije, pri čemer izhaja iz prejete količine padavin v hidrološkem letu, ki traja od 1. novembra do 31. oktobra. Vhodni podatki o količini padavin so ločeni glede na vegetacijsko obdobje: na padavine hladnega dela leta od novembra do aprila in padavine vegetacijskega obdobja od maja do oktobra. Vhodni podatki o referenčni evapotranspiraciji predstavljajo letne vrednosti. Model GROWA-SI pri izračunu upošteva samo prejeto količino vode v obliki padavin na območju Slovenije, ne upošteva dotokov rek iz sosednjih držav (Andjelov in sod., 2013; Andjelov in sod., 2016).

Model GROWA-SI iz razlike med letno količino padavin in oceno dejanske evapotranspiracije izračuna skupni odtok. Vrednosti skupnega odtoka v prostoru so osnova

za izračun direktnega odtoka in napajanja podzemne vode, ki ju ločimo z uporabo indeksa baznega odtoka BFI. Ta predstavlja razmerje med napajanjem podzemne vode in skupnim odtokom (Andjelov in sod., 2013).

Za oceno povprečnega letnega napajanja podzemne vode v prihodnosti smo kot vhodne podnebne podatke uporabili popravljene podatke regionalnih podnebnih modelov (poglavje *Modelske simulacije podnebja*). Ostale vhodne vrednosti hidroloških in drugih fizično-geografskih parametrov so ostale nespremenjene.

4.6 IZPELJANI PODATKI

4.6.1 Referenčna evapotranspiracija

Po metodologiji Organizacije Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (ang. *Food and agriculture organization of the United Nations*, FAO) je vpliv podnebja na potrebe rastlin po vodi podan z referenčno evapotranspiracijo ET_0 , kmetijska rastlina pa je opisana s koeficientom rastline oziroma evapotranspiracijskim koeficientom rastline K_C . Referenčna evapotranspiracija ET_0 je določena s Penman-Monteithovo metodo, pri čemer je referenčna površina ustrezno gojena in z vodo oskrbovana zelena trava, ki aktivno raste. Metoda uporablja standardne podnebne podatke, ki so enostavno merljivi ali izračunljivi iz splošno dostopnih merjenih meteoroloških podatkov. Vsi izračuni so standardizirani glede na dostopne meteorološke podatke in časovne ravni izračuna.

Penman-Monteithova enačba za oceno referenčne evapotranspiracije ET_0 se glasi:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (8)$$

kjer je:

ET_0	referenčna evapotranspiracija (v mm/dan),
R_n	neto sončni obsev na površino z rastlino (v MJ/(m ² dan)),
G	gostota toplotnega toka v tleh (v MJ/(m ² dan)),
T	dnevna povprečna temperatura zraka na višini 2 m (v °C),
u_2	hitrost vetra na višini 2 m (v m/s),
e_s	nasičeni parni tlak (v kPa),

e_a	dejanski parni tlak (v kPa),
$e_s - e_a$	primanjkljaj parnega tlaka (v kPa),
Δ	naklon krivulje parnega tlaka (v kPa/°C),
γ	psihrometrična konstanta (v kPa/°C).

Referenčna evapotranspiracija je standardizirana količina, ki omogoča primerjavo evapotranspiracije za različna obdobja leta in med različnimi regijami ter omogoča izračun evapotranspiracije ostalih kmetijskih rastlin.

Enačba uporablja standardne podatke o sončnem obsevanju, temperaturi in vlažnosti zraka ter hitrosti vetra. Vse izračune referenčne evapotranspiracije v projektu OPS21 smo naredili na dnevni podatkih. Pri izračunu referenčne evapotranspiracije iz meritev v primerjalnem obdobju 1981–2010 smo uporabljali naslednje podatke:

- lokacijo meritev (nadmorsko višino, geografsko širino),
- dnevno najvišjo in najnižjo temperaturo zraka,
- dnevno najvišjo in najnižjo relativno zračno vlažnost,
- dnevni globalni sončni obsev ali trajanje sončnega obsevanja ali dnevno povprečno oblačnost za oceno neto sončnega sevanja,
- dnevno povprečno hitrost vetra (večinoma na standardni višini 10 m).

Pri izračunu modelske referenčne evapotranspiracije ni bilo na voljo toliko podatkov kot pri meritvah primerjalnega obdobja. Uporabili smo naslednje podatke:

- lokacijo modelske točke (nadmorsko višino, geografsko širino),
- dnevno najvišjo in najnižjo temperaturo zraka (polje *tasmx* in *tasmin*),
- dnevno povprečno specifično zračno vlažnost na površju za oceno zračne vlažnosti (polje *huss*),
- dnevno povprečje gostote toka kratkovalovnega sončnega sevanja na vodoravno površino (polje *rsds*),
- dnevno povprečno hitrost vetra na površju (polje *sfcWind*).

Vse vhodne količine smo preračunali v ustrezne vrednosti iz zgornje enačbe po navodilih v Allen in sod., 1998.

4.6.2 Temperaturni kazalniki

Za oceno toplotne obremenitve je v uporabi veliko različnih kazalnikov, ki se po svetu uporabljajo v različne namene. Veliko več je kazalnikov, ki ocenjujejo vročinsko obremenitev, kot tistih za oceno hudega mraza. V nadaljevanju so predstavljene definicije in metode izračuna kazalnikov, ki so se izkazali za najprimernejšo izbiro na območju Slovenije.

Za oceno prihodnje vročinske obremenitve smo izbrali naslednje podnebne kazalnike:

- **Kazalnik vročine (EHF – ang. Excess Heat Factor)**

Toplotna obremenitev se pojavi zlasti v dneh, ko je vroče tako čez dan, kot tudi nadpovprečno toplo ponoči. Obremenitev lahko določimo iz primerjave treh zaporednih dnevni povprečnih temperatur z referenčno vrednostjo. Vrednost pri 95. centilu izmerjenih dnevni temperatur velja za mejo velike toplotne obremenitve. Kazalnik vročine je tako izražen kot dolgotrajni temperaturni odklon. Povprečje treh dni je izbrano na podlagi ugotovitve, da ranljivi del prebivalstva postane občutljiv na vročino po treh dneh izpostavljenosti velikemu toplotnemu presežku (Nairn in Fawcett, 2013). Podnebna referenčna vrednost za nastop toplotne obremenitve je 95. centil izmerjenih dnevni povprečnih temperatur v daljšem časovnem obdobju (izbrano je bilo obdobje 1981–2010).

Za izračun kazalnika vročine (ang. *Excess Heat Index*, EHI_{sig}) najprej izračunamo povprečne vrednosti dnevne povprečja temperature (*PDT*) v celotnem opazovanem večletnem časovnem obdobju (upoštevajoč vse dneve v letu) kot:

$$PDT = \frac{T_{maks} + T_{min}}{2} \quad (9)$$

Naredimo povprečje po treh zaporednih dneh in izračunamo odstopanje od mejne vrednosti:

$$EHI_{sig} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2}}{3} - T_{95}, \quad (10)$$

kjer je T_i dnevna povprečna temperatura (*PDT*) i -tega dneva v °C. Vrednost T_{95} predstavlja 95. centil dnevni povprečnih temperatur v izbranem tridesetletnem časovnem obdobju (1981–2010), prav tako v enotah °C. V primerjavi z drugimi kazalniki je kazalnik vročine relativno nov, saj je bil razvit v Avstralskem uradu za meteorologijo leta 2013 (Nairn in Fawcett, 2013).

Kazalnik vročine, ki upošteva privajanje (ang. *Excess Heat Index – Acclimatization*, EHI_{akl}), v literaturi najdemo tudi pod imenom toplotna obremenitev (ang. *heat stress*). Izvira iz opažanj, da so bolj obremenilni dnevi, ki so toplejši od nedavne preteklosti (predhodnih 30 dni). Podobno kot pri kazalniku vročine tudi tukaj dnevne povprečne temperature treh zaporednih dni primerjamo z dnevno povprečno temperaturo predhodnih trideset dni. Kazalnik tako izraža časovni odklon temperature v krajšem obdobju in upošteva morebitno hitro privajanje na vročino. Človek za privajanje na višje temperature potrebuje od dva do šest tednov. Oblika opisanega kazalnika je naslednja:

$$EHI_{akl} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2}}{3} - \frac{T_{i-1} + \dots + T_{i-30}}{30} \quad (11)$$

Vrednost nam pove stopnjo toplotne obremenitve, ki je predstavljena kot temperaturni odklon, v primerjavi s povprečjem predhodnih trideset dni. Enota kazalnika je °C. Tako kot kazalnik vročine je tudi to relativno nov kazalnik iz leta 2013 in izvira iz Avstralije (Nairn in Fawcett, 2013).

Najnovejši kazalnik, prav tako iz Avstralije, je kazalnik vročine (Nairn in Fawcett, 2013). Ta združuje navedena nova kazalnika EHI_{sig} in EHI_{akl} , z namenom definicije vročinskega vala v Avstraliji. Kazalnik vročine združuje jakost, trajanje in toplotno obremenitev v času vročinskega vala. V Avstraliji je vročinski val določen s pozitivno vrednostjo:

$$EHF = EHI_{sig} \times \max(1, EHI_{akl}). \quad (12)$$

Enota kazalnika je °C², saj imata oba kazalnika, ki se uporabljata pri izračunu, enoto °C. Število 1 v členu $\max(1, EHI_{akl})$ pomeni 1 °C. Vročinski valovi, ki so šibki, povzročijo majhno jakost dogodkov *EHF*. Ko se EHI_{sig} in EHI_{akl} hkrati povečujeta, se njun produkt povečuje kvadratično. Glede na to, ali nas zanimajo pretekli ali prihodnji dogodki, v enačbah 10 in 11 lahko uporabimo pretekle oziroma prihajajoče tri dneve. Kazalnik vročine je pozitiven, če je EHI_{sig} pozitiven (obravnavano tridnevje je vroče glede na absolutno vrednost, torej je nad 95. centilom dnevne povprečne temperature), poleg tega je *EHF* velik, ko je povprečno tridnevno obdobje toplejše kot predhodnih trideset dni. *EHF* se izračuna za prvega od treh obravnavanih dni. Če vročinski val traja več kot tri dni, potem določimo t. i. *vročinski napor* kot vsoto pozitivnih vrednosti *EHF* (Nairn in Fawcett, 2013). S pomočjo teh vsot in produkta lahko tako med sabo primerjamo različne vročinske

valove po svojem trajanju in jakosti, podobno kot to lahko naredimo pri kazalniku dnevne jakosti vročinskega vala.

- **Kazalnik dnevne jakosti vročinskega vala (HWMId – ang. Heat-wave Magnitude Index Daily)**

Kazalnik dnevne jakosti vročinskega vala je nadgradnja oziroma posodobljena različica kazalnik HMMI (*Heat-wave Magnitude Index*) (Russo in sod., 2014). Popravljen različica je bila objavljena novembra 2015 (Russo in sod., 2015). Za izračun tega kazalnika potrebujemo 30-letno primerjalno obdobje, v našem primeru je bilo to obdobje 1981–2010. Mejno vrednost za nadpovprečno vročino izračunamo za vsak dan v letu posebej. Za celotno primerjalno obdobje upoštevamo isti del leta (15 dni pred in 15 dni po obravnavanem dnevu i) in izračunamo 90. centil dnevne najvišje temperature. Vročinski val določimo kot obdobje najmanj treh zaporednih dni, ko je ta meja presežena. Po tej definiciji imamo vročinske valove tudi pozimi. Kazalnik HMMId poskuša razporediti vročinske valove glede na trajanje in glede na to, koliko so posamezne dnevne najvišje temperature odstopale od predhodno izračunane mejne vrednosti. Jakost vročinskega vala se izračuna kot vsota jakosti po posameznih dnevih znotraj enega vročinskega vala. Najvišja vrednost v letu predstavlja vrednost kazalnika HMMId. Dnevno jakost izračunamo kot:

$$M(T_{maks}) = \begin{cases} \frac{T_{maks} - T_{30y25p}}{T_{30y75p} - T_{30y25p}}, & \text{če je } T_{maks} > T_{30y25p} \\ 0, & \text{če je } T_{maks} \leq T_{30y25p} \end{cases}, \quad (13)$$

kjer je T vrednost dnevne najvišje temperature, T_{30y25p} in T_{30y75p} pa sta 25. in 75. centil letni najvišjih vrednosti temperature v izbranem 30-letnem primerjalnem obdobju (Russo in sod., 2015).

- **Število toplih dni (SU – ang. Number of summer days)**, ki je število dni na leto, ko dnevna najvišja temperatura zraka preseže 25 °C.
- **Število vročih dni**, ko dnevna najvišja temperatura preseže 30 °C.
- **Število tropskih noči (TR – ang. Number of tropical nights)**, ko je dnevna najnižja temperatura nad 20 °C.
- **Kazalnik najtoplejših dni (TX90p)**, kar je odstotek dni, ko je dnevna najvišja temperatura nad 90. centilom.

Odstotek dni, ko je dnevna najvišja temperatura nad 90. centilom izračunamo na naslednji način: če je TX_i dnevna najvišja temperatura za dan i in TX_{in90} devetdeseti centil na izbran dan v letu, ki se izračuna s pomočjo petdnevnega okna v primerjalnem obdobju 1981–2010, se odstotek glede na primerjalno obdobje dobi z

$$TX_{ij} > TX_{in90}. \quad (14)$$

- **Kazalnik skupne dolžine toplih obdobj (WSDI – ang. Warm Spell Duration Index)**

Kazalnik skupne dolžine toplih obdobj je število dni v letu, ko imamo vsaj šest zaporednih dni z dnevno najvišjo temperaturo nad 90. centilom, ki se izračuna s pomočjo izbranega primerjalnega obdobja in s pomočjo petdnevnega okna.

Za oceno izjemnega mraza so bili izbrani naslednji podnebni kazalniki:

- **Kazalnik mraza (ECF – ang. Excess Cold Factor)**

Kazalnik mraza je bil v Avstraliji oblikovan vzporedno s faktorjem toplotnega presežka. Podobno kot pri vročini je za izračun tega kazalnika potreben predhodni izračun dveh kazalnikov:

$$ECI_{sig} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2}}{3} - T_{05}, \quad (15)$$

$$ECI_{akl} = EHI_{akl} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2}}{3} - \frac{T_{i-1} + \dots + T_{i-30}}{30}, \quad (16)$$

kjer je T_{05} 5. centil povprečnih dnevni temperatur v izbranem primerjalnem obdobju (1981–2010). T_i ima enak pomen kot pri kazalniku vročine, torej označuje dnevno povprečno temperaturo. Kazalnik mraza izračunamo kot:

$$ECF = -ECI_{sig} \times \min(-1, ECI_{akl}). \quad (17)$$

Hladni val oziroma obdobje hudega mraza nastopi v primeru, ko je vrednost *ECF* negativna.

- **Število hladnih dni (FD – ang. Number of frost days)**, ko dnevna najnižja temperatura pade pod 0 °C.
- **Število ledenih dni (ID – ang. Number of icing days)**, ko dnevna najvišja temperatura ostane pod 0 °C.

- **Kazalnik najhladnejših dni (TN10p)**, to je odstotek dni, ko dnevna najnižja temperatura ne preseže 10. centila.

Odstotek dni, ko dnevna najnižja temperatura ne preseže 10. centila je izračunan na naslednji način: če je TN_i dnevna najnižja temperatura za dan i in TN_{in10} 10. centil na izbran dan v letu, ki se izračuna s pomočjo 5-dnevnega okna v primerjalnem obdobju 1981–2010, se odstotek glede na primerjalno obdobje dobi z:

$$TN_i < TN_{in10}. \quad (18)$$

- **Kazalnik skupne dolžine hladnih obdobj (CSDI – ang. Cold Spell Duration Index)**

Kazalnik skupne dolžine hladnih obdobj je vsota števil dni v letu, ko imamo vsaj šest zaporednih dni dnevno najnižjo temperaturo pod 10. centilom, ki se izračuna s pomočjo izbranega primerjalnega obdobja 1981–2010.

Večji del kazalnikov smo povzeli s spletne strani programa za podnebne raziskave pri Svetovni meteorološki organizaciji WCRP (*World Climate Research Programme*), kjer je sicer naštetih 27 različnih kazalnikov, s pomočjo katerih lahko ocenimo krajevno spreminjanje podnebja (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml). Za potrebe izračuna kazalnikov smo pridobili dnevne podatke o povprečni, najvišji in najnižji temperaturi. Za vsako mrežno celico, za vsak dan v letu, oziroma mesec ali leto (odvisno od definicije kazalnika), se je izračunal izbrani kazalnik. Izračunale so se povprečne vrednosti v posameznem tridesetletnem obdobju za vsako celico. Prvo obdobje (1981–2010) je bilo izbrano kot primerjalno, tudi v primerih, ko gre za centilne vrednosti. Vrednost povprečja tega obdobja se je odštela od povprečnih vrednosti ostalih treh obdobj (2011–2040, 2041–2070, 2071–2100). Poleg rezultatov za tri scenarije je za vsak kazalnik predstavljena tudi njihova zanesljivost. Zanesljivost je bila ocenjena s pomočjo Mann–Whitney–Wilcoxonovega statističnega testa, kot je opisano v poglavju *Skladnost modelskih simulacij*.

4.6.3 Padavinski kazalniki

Iz skupine 27 kazalnikov, s katerimi lahko ocenimo krajevno spreminjanje podnebja, smo uporabili šest kazalnikov, ki se nanašajo na spremembo padavin:

- **Največja enodnevna višina padavin (Rx1day – ang. Monthly maximum 1-day precipitation)**, ki je mesečna najvišja vrednost enodnevne višine padavin.
- **Največja petdnevna višina padavin (Rx5day – ang. Monthly maximum 5-day precipitation)**, ki je mesečna najvišja vrednost petdnevne višine padavin.
- **Število dni s padavinami nad 0,1 mm (R0.1mm)**, ki je število dni na leto, ko je v enem dnevu padlo vsaj 0,1 mm padavin.
- **Število dni s padavinami nad 1 mm (R1mm)**, ki je število dni na leto, ko je v enem dnevu padlo vsaj 1 mm padavin.
- **Število dni s padavinami nad 10 mm (R10mm)**, ki je število dni na leto, ko je v enem dnevu padlo vsaj 10 mm padavin.
- **Število dni s padavinami nad 20 mm (R20mm)**, ki je število dni na leto, ko je v enem dnevu padlo vsaj 20 mm padavin.
- **Število dni s padavinami nad 50 mm (R50mm)**, ki je število dni na leto, ko je v enem dnevu padlo vsaj 50 mm padavin.
- **Dolžina najdaljšega suhega obdobja (CDD – ang. Maximum length of dry spell)**, ki je najdaljše število zaporednih dni v letu, ko je bila dnevna višina padavin manjša od 1 mm.
- **Dolžina najdaljšega mokrega obdobja (CWD – ang. Maximum length of wet spell)**, ki je najdaljše število zaporednih dni v letu, ko je bila dnevna višina padavin večja ali enaka 1 mm.
- **Letna višina padavin iz najbolj mokrih dni (R95pTOT – ang. Annual total PRCP when RR > 95p)**, ki je celoletna vsota padavin iz dni, ko dnevna višina padavin presega mejni 95. centil mokrih dni. Za moker dan se šteje dan, ko je padlo vsaj 1 mm padavin. Primerjalno obdobje za izračun 95. centila je obdobje 1981–2010.

Metoda izračuna kazalnikov padavin je bila enaka tisti za kazalnike temperature, le da smo v tem primeru uporabili popravljene modelske podatke o dnevni višini padavin.

4.6.4 Vodni primanjkljaj

Izraz »vodni primanjkljaj« običajno uporabljamo za negativno meteorološko oziroma površinsko vodno bilanco, torej takrat, ko je referenčna evapotranspiracija večja od višine padavin v nekem obdobju. Dejansko se s površine v ozračje sprosti manj vode od vrednosti referenčne evapotranspiracije, saj se ob z vodo slabše založenih tleh zmanjša tako izhlapevanje kot izguba vode zaradi dihanja rastlin. Vseeno je vodna bilanca (oziroma v sušnih obdobjih vodni primanjkljaj) koristen kazalnik, s katerim na dokaj enostaven način, pa vendar objektivno, določamo trajanje in intenzivnost suhega obdobja in je primerna osnova za prvo oceno pojava kmetijske suše. Za posledice kmetijske suše je ključna razporeditev padavin in tudi razmerje med količino padavin in količino izhlapele vode v rastni dobi.

Dolgoletni nizi podatkov o meteorološki vodni bilanci nam omogočajo, da s pomočjo statističnih metod preko izbranih pragov ugotovimo tudi jakost suše. Na osnovi meteorološke vodne bilance lahko iščemo preučevanemu letu sorodna leta in na ta način lahko na osnovi tedanjega razvoja suše tudi predvidevamo razvoj suše v tekočem letu. Na tak način so bile izdelane analize razvoja preteklih kmetijskih suš v letih 2003, 2007, 2012, 2013 in 2017. Vsaka suša je sicer drugačna glede na nastanek in razvoj, zato običajno vodno bilanco računamo za različna obdobja: na dnevni ravni, za posamezne mesece, rastno dobo posameznih kmetijskih kultur ali za posamezna sušna obdobja med padavinskimi dogodki.

Za objektivno oceno tveganja pojava suše je potrebno metodo prilagoditi in poenotiti, ker ne analiziramo posameznega sušnega dogodka, temveč povprečno tveganje pojava posledic suše. Zato je potrebno bolje določiti sušno obdobje oziroma izločiti negotovost in deloma tudi subjektivnost pri definiciji začetka in konca sušnega obdobja. Izkušnje na ARSO in tudi nekatere študije so pokazale močno povezavo med izgubo pridelka in dvomesečnim standardiziranim padavinskim odstopanjem. Študija, ki je bila izvedena leta 2014 v Bolgariji (Popova in sod., 2015), je na podlagi simulacije zmanjšanja pridelka, kot referenčnega kazalnika za poletno kmetijsko sušo, priporočila standardiziran padavinski kazalnik za dvomesečno obdobje, in sicer povprečno vrednost za julij in avgust. Dvomesečno obdobje je torej mejno obdobje za nastanek posledic suše v kmetijstvu. Pri daljšem obdobju (npr. akumulacija površinske vodne bilance za celotno rastno dobo) lahko velika odstopanja v končnem rezultatu

izvirajo iz zmernih odstopanj v daljšem časovnem obdobju (ki sicer ne pomenijo nastanka posledic v kmetijstvu), krajša sušna obdobja (npr. nekaj tednov) pa lahko rastline same premostijo. Kot merilo za jakost kmetijske suše je torej privzet največji primanjkljaj v površinski vodni bilanci v 60-dnevem obdobju, ki ga izračunamo kot razliko med višino padavin in izgubo vode s površine zaradi evapotranspiracije v tekočem 60-dnevem obdobju. V vsakem letu določimo 60-dnevno obdobje, v katerem tovrstni primanjkljaj doseže največjo vrednost; praviloma gre za poletne mesece, saj je pri nas v hladnejšem delu leta referenčna evapotranspiracija za velikostni red manjša kot poleti. Statistična obdelava tako določenega vodnega primanjkljaja nam lahko za daljše obdobje prikaže pogostost in trend pojavljanja kmetijske suše.

4.6.5 Temperaturne razmere za rast rastlin

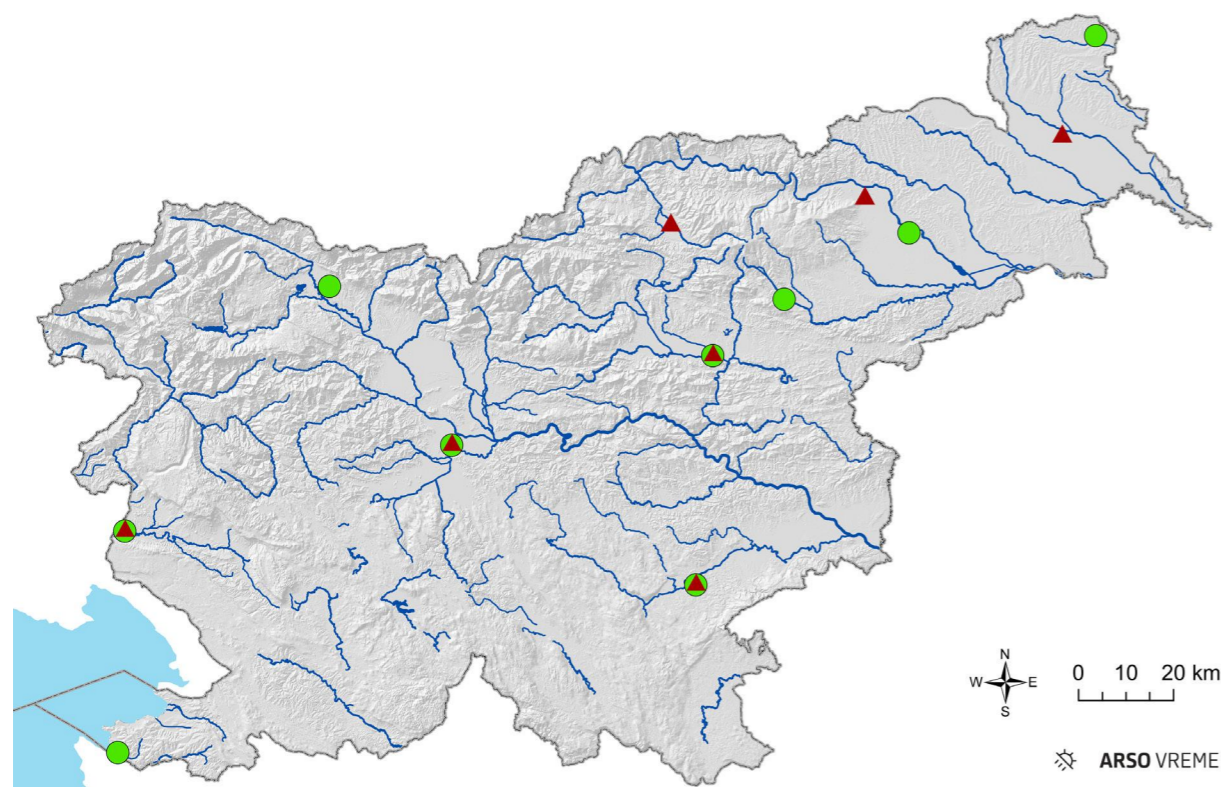
Temperatura tal in temperatura zraka sta v splošnem močno povezani spremenljivki (npr. Islam in sod., 2015; Zheng in sod., 1993; v Sloveniji Gams, 1989; Knez, 2007). Knez je ugotovil, da je koeficient korelacije pozitiven in se z globino bolj ali manj zmanjšuje ter da je korelacija pozimi slabša, saj je med zrakom in tlemi pogosto snežna odeja, ki je odličen toplotni izolator.

Z vidika kmetijstva je najbolj pomembno poznavanje temperature tal v času rastne dobe, od aprila do septembra. V posebni študiji je Valher (2016) na podlagi meritev temperature tal in temperature zraka na več merilnih postajah določila najustreznejši empirični model, kjer se temperatura tal izračuna na podlagi linearnega modela iz povprečne temperature zraka dne, ko želimo tudi oceno temperature tal, in dveh predhodnih dni ter zaporednega dneva v letu:

$$T_{tal}[t] = k_1 \times T_{zraka} + k_2 \times T_{zraka}[t-1] + k_3 \times T_{zraka}[t-2] + k_4 \times \cos(danVletu) + k_5, \quad (19)$$

pri čemer je t dan, za katerega želimo izračun, ter $danVletu$ zaporedno število obravnavanega dne v letu, k_1 , k_2 , k_3 , k_4 in k_5 pa koeficienti linearnega modela, ki so bili določeni za vsako postajo posebej.

Časovni potek temperature tal v 21. stoletju je bil izračunan za štiri globine tal (5, 10, 20 in 30 cm), za sedem postaj, ki so enakomerno razporejene po Sloveniji (slika 4.18).



Slika 4.18 | Zemljevid lokacij postaj za temperaturo tal (trikotnik) in za pojav fenološke faze prvih listov, dolžino rastne dobe in oceno tveganja za pozebo (pika)

Najpomembnejša dejavnika okolja, ki vplivata na fenološki razvoj rastlin, sta temperatura in dolžina dneva. Za fiziološki razvoj potrebujejo rastline določeno količino toplote, ki jo lahko opredelimo z akumuliranimi toplotnimi enotami oziroma temperaturnimi vsotami (Huang in sod., 2001). Pri napovedovanju nastopa fenološke faze rastlin na podlagi meteoroloških podatkov tako pogosto uporabimo temperaturno vsoto (ang. *growing degree day*, GDD), to je vsoto dnevni povprečnih temperatur zraka nad izbrano temperaturo praga (T_p) do izbranega dneva v letu, pri čemer je dnevna povprečna temperatura izračunana kot aritmetična sredina dnevne najnižje (T_{min}) in najvišje (T_{maks}) temperature zraka (Perry in sod., 1997; Črepinšek in Kajfež-Bogataj, 2005):

$$GDD = \sum_{i=1}^n GDD_i; GDD_i = \frac{T_{maks} + T_{min}}{2} - T_p, \quad (20)$$

pri čemer velja, da je v primeru $\frac{T_{maks} + T_{min}}{2} < T_p$, $GDD_i = 0$.

Spremembe temperaturne vsote za rast so izračunane kot odmik od povprečja primerjalnega obdobja

1981–2010 za tri prihodnja tridesetletna obdobja. Za omenjena obdobja je bila izračunana tudi sprememba 5., 25., 50., 75. in 95. centila porazdelitve povprečne temperature tal. Analize so bile narejene ločeno za prvi del rastne dobe, od aprila do junija, ter drugi del, od julija do septembra. Ker sta za scenarij RCP2.6 na voljo le dve modelski simulaciji, je zanesljivost težko oceniti. Rezultatov tega scenarija zato ne prikazujemo.

Glavni kazalnik začetka rastne dobe je olistanje rastlin. Oblišar (2016) je na podlagi opazovanih dni pojava fenološke faze prvih listov in meritev najnižje in najvišje temperature zraka v obdobju 1971–2015 določil temperaturni prag in temperaturno vsoto za devet postaj, ki so enakomerno razporejene po Sloveniji (slika 4.18), in tri neogojene drevesne vrste (bukev, divji kostanj, lipa). Pri tem so bile za nekatere postaje obravnavane le določene rastline – v Biljah in Portorožu divji kostanj, v Velikih Dolencih pa bukev in divji kostanj.

Pomemben podnebni kazalnik rasti je tudi dolžina rastne dobe (ang. *growing season length*, GSL), ki se jo izračuna kot število dni med začetkom rastne dobe – prvim petdnevni obdobjem z dnevnimi povprečnimi

temperaturami nad 5 °C – in koncem rastne dobe – prvim petdnevni obdobjem z dnevnimi povprečnimi temperaturami pod 5 °C (Frich in sod., 2002).

Na ARSO uporabljamo modificirano metodo (Žust, 2016), ki daje za Slovenijo pravilnejše rezultate. Začetek rastne dobe nastopi prvi dan vsaj 6 dni dolgega obdobja s povprečno temperaturo zraka višjo od temperature praga, po zadnjem vsaj 6 dni dolgem obdobju s povprečno temperaturo zraka, ki je nižja od temperature praga, v kolikor to obdobje v danem letu obstaja, pri čemer začetek rastne dobe nastopi najkasneje 1. julija. Konec rastne dobe nastopi prvi dan vsaj 6 dni dolgega obdobja s povprečno temperaturo zraka, ki je nižja od temperature praga, pri čemer konec rastne dobe nastopi najhitreje 1. julija in najkasneje zadnji dan leta.

Izračun začetka, konca in dolžine rastne dobe smo opravili po zgoraj opisani metodologiji za devet postaj, ki so enakomerno razporejene po Sloveniji, enako kot v primeru obravnavanih fenoloških faz, in za dve temperaturi praga (5 in 10 °C).

Spremembe pojava olistanja in dolžine rastne dobe so izračunane kot odmik od primerjalnega obdobja 1981–2010 za tri prihodnja obdobja. Za omenjena obdobja je bila izračunana tudi sprememba 5., 25., 50., 75. in 95. centila porazdelitve. Ker sta za scenarij RCP2.6 na voljo le dve modelski simulaciji, rezultatov scenarija RCP2.6 ne prikazujemo.

4.6.6 Pozeba

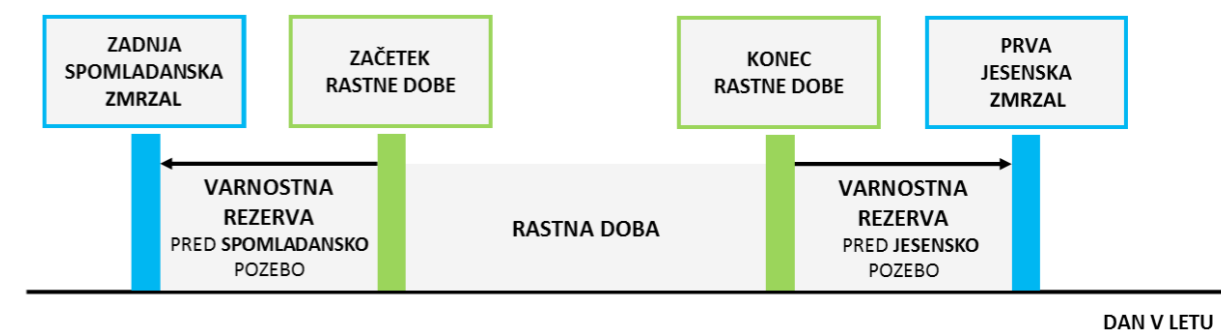
Dan s pojavom pozebe je v študijah pogosto določen kot dan, ko je dnevna najnižja temperatura zraka manjša od kritične temperature, pri čemer je v večini

študij izbrana temperatura 0 °C (Anandhi in sod., 2013). To definicijo uporablja tudi Evropska agencija za okolje, EEA. Ker je izbira kritične temperature močno odvisna od rastline in fenološke faze (Žust in Sušnik, 1996), smo izračune naredili za dve kritični temperaturi, in sicer –2 in 0 °C.

Izračunali smo število dni s spomladansko pozebo in jesensko pozebo v rastni dobi, ki smo jo določili za različni temperaturi praga (podpoglavje *Temperaturne razmere za rast rastlin*). Dan s spomladansko pozebo je dan od začetka rastne dobe do konca maja, ko je dnevna najnižja temperatura zraka nižja od kritične, dan z jesensko pozebo pa je dan od začetka septembra do konca rastne dobe, ko dnevna najnižja temperatura ne preseže kritične.

Tveganje pred spomladansko pozebo lahko izračunamo kot varnostno rezervo pred spomladansko pozebo, to je število dni med zadnjo spomladansko zmrzaljo in začetkom rastne dobe (Vitasse in sod., 2018), pri čemer je to število lahko tudi negativno v primeru, da se pozeba pojavi po začetku rastne dobe. Varnostna rezerva je kazalnik za tveganje – v primeru zmanjšanja varnostne rezerve se tveganje poveča in obratno. Varnostno rezervo smo izračunali tako za spomladansko pozebo kot za jesensko pozebo, to je število dni med dnevom prve jesenske zmrzali in koncem rastne dobe. Izračun je bil narejen za dve temperaturi praga za začetek in konec rastne dobe (5, 10 °C) in za dve kritični temperaturi (–2, 0 °C) za 9 lokacij (slika 4.18).

Spremembe so izračunane kot odmik od primerjalnega obdobja 1981–2010, na enak način kot pri temperaturnih vsotah in fenološki fazi olistanja.



Slika 4.19 | Shema varnostne rezerve pred pozebo

4.6.7 Hidrološki kazalniki

Za projekcije sprememb hidroloških razmer smo iz modelskih podatkov srednjih dnevni pretokov (poglavje *Hidrološki model*) izbrali letne statistike malih, srednjih in velikih pretokov, ki se najpogosteje uporabljajo v hidroloških analizah, ter povratne dobe velikih pretokov (glej podpoglavje *Hidrološke spremenljivke* v poglavju *Analiza izjemnih vrednosti*).

Odtok površinskih voda je del hidrološkega kroga, ki se dogaja na površini Zemlje. Pretok predstavlja prostornino vode, ki v časovni enoti preteče skozi prečni prerez vodotoka. Pretoki rek se s časom neprestano spreminjajo. Časovna spremenljivost pretokov rek v Sloveniji je velika. Dejavniki, ki vplivajo na hidrološko dogajanje in pretočni režim so številni, od podnebja, reliefa, tal, geološke sestave, vegetacije in rabe vode. V Sloveniji je najpomembnejši dejavnik podnebje, saj so pretoki rek v glavnem odvisni od časovne in prostorske razporeditve padavin, temperature zraka in trajanja snežne odeje.

Srednji letni pretok (Q_s) predstavlja povprečno letno količino vode, ki teče skozi določen profil vodotoka. Srednji pretok v določenem obdobju (sQ_s) je povprečje srednjih letnih vrednosti pretoka v obdobju na določenem profilu vodotoka. Izraža se v m^3/s .

Male pretoke zaznavamo v strugi vodotoka, ko dalj časa ni padavin ali taljenja snežne odeje in so odtoki posledica izcejanja podzemnih voda. S kazalniki malih pretokov opisujemo sušno obnašanje posameznih vodotokov. Srednji mali pretok v obdobju (sQ_{np}) je večletno povprečje najnižje vrednosti srednjega dnevnega pretoka v letu (Q_{np}) na določenem profilu vodotoka.

Ob večji količini padavin začne pretok vode v vodotokih naraščati, precej hitro doseže maksimum in nato postopoma upada. Za kazalnik največjih letnih vrednosti, ki služi za analize poplavnih pretokov in poplav, se običajno vzame največji pretok v letu (visokovodna konica Q_{vk}).

4.7 ANALIZA IZJEMNIH VREDNOSTI

4.7.1 Meteorološke spremenljivke

Pri analizi izjemnih vrednosti naključnih spremenljivk obstajata dva glavna pristopa. Pri prvem, klasičnem, analiziramo izjemne vrednosti dovolj dolgih blokov podatkov, npr. letno najvišjo ali najnižjo temperaturo ali letno najvišjo enodnevno ali večdnevno višino padavin. Drugi pristop je analiza podatkov, ki presežejo vnaprej določen, dovolj visok prag. Zaradi problematike izbire praga pri drugem pristopu smo pri analizi uporabili prvo metodo, drugo smo uporabili za nekaj primerov in primerjali rezultate. Ker so bili rezultati konsistentni, tukaj podajamo samo povzetek prve metode, ki smo jo uporabili pri vseh analizah izjemnih vrednosti podnebnih spremenljivk v tej publikaciji.

Klasična teorija izjemnih vrednosti (Coles, 2001) preučuje statistične lastnosti izjemnih vrednosti blokov podatkov:

$$M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}, \quad (21)$$

kjer je X_1, X_2, \dots, X_n zaporedje neodvisnih naključnih spremenljivk iz iste porazdelitve. Ponavadi X_i predstavljajo vrednosti procesa, merjenega v enakih časovnih presledkih. Primer so dnevne vrednosti najvišje izmerjene temperature ali dnevne vrednosti višine padavin. Če je vrsta stacionarna, torej taka, ki se s časom ne spreminja, za katerokoli časovno obdobje so njene vrednosti iz iste porazdelitve, velja pri dovolj splošnih pogojih, da se izjemne vrednosti v blokih podatkov M_n porazdeljujejo po posplošeni porazdelitvi izjemnih vrednosti (ang. *generalized extreme value distribution*, GEV):

$$G(z; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} e^{-(1+\xi \frac{z-\mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}}, & \xi \neq 0, \\ e^{-e^{-\frac{z-\mu}{\sigma}}}, & \xi = 0. \end{cases} \quad (22)$$

To velja za dovolj velike bloke podatkov (v limitnem primeru, ko gre število podatkov v bloku proti neskončnosti).

Porazdelitev je tripametrska, njeni parametri so:

1. Parameter *lege* (ang. *location parameter*) μ , ki določa lego verjetnostne porazdelitve. Njegove vrednosti lahko zavzamejo vse realne vrednosti.
2. Parameter *merila* (ang. *scale parameter*) σ , ki določa statistično razpršenost porazdelitve. Njegove vrednosti so pozitivne. Višja je vrednost

parametra σ , bolj razpotegnjena je porazdelitev.

3. Parameter *oblike* (ang. *shape parameter*) ξ , ki določa družino porazdelitvene funkcije. Njegove vrednosti lahko zajemajo vsa realna števila. Pri vrednosti $\xi = 0$ je porazdelitev Gumbelova in ima eksponentno padajoč rep, pri pozitivni vrednosti ξ je porazdelitev Frechetova in ima širok rep, ki pada potenčno, pri negativni vrednosti ξ pa je porazdelitev obratna Weibullova. Pri Frechetovi družini porazdelitve so mogoči osamelci (posamezne zelo visoke vrednosti), obratna Weibullova je navzgor omejena, pri Gumbelovi pa osamelcev ni. Oblike vseh treh družin prikazuje slika 4.20.

Običajno izjemne vrednosti naključne spremenljivke analiziramo tako, da izjemnim vrednostim dovolj dolgih blokov podatkov (npr. letnih najvišjih vrednosti, sezonskih najvišjih vrednosti) določimo porazdelitev GEV, ki se s podatki kar najbolje ujema. Velikokrat to naredimo z metodo največjega verjetja (ang. *maximum likelihood*), ki omogoča tudi enostavno oceno statistične napake parametrov in ocenjenih vrednosti.

Če so bloki dolgi eno leto, lahko ocenimo skrajne kvantile letne porazdelitve izjemnih vrednosti z obratom zgornje enačbe:

$$z_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left(1 - (-\ln(1-p))^{-\xi}\right), & \text{za } \xi \neq 0, \\ \mu - \sigma \ln(-\ln(1-p)), & \text{za } \xi = 0, \end{cases} \quad (23)$$

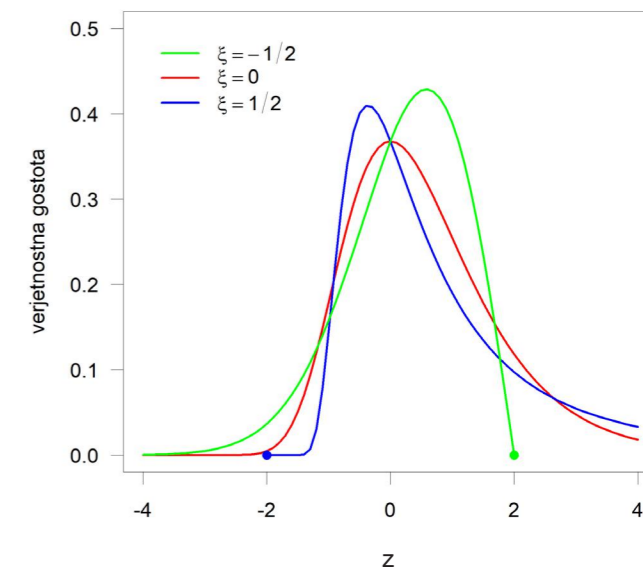
kjer je $G(z_p) = 1 - p$. Velikokrat izražamo izjemne vrednosti v jeziku povratnih dob. Vrednost z_p z dano povratno dobo $1/p$ je v povprečju presežena enkrat na $1/p$ let. Vrednost z_p je znana kot *povratni nivo s povratno dobo $1/p$ let*. Slika 4.21 kaže graf povratnih nivojev za tri družine porazdelitve GEV.

Zgornje enačbe veljajo torej za stacionarne procese. Nestacionarni procesi pa se spreminjajo s časom. Nestacionarnost je lahko npr. odraz spreminjanja podatkov zaradi letnih časov ali trenda v njih. Eden od pristopov k analizi takih procesov je posplošitev enačbe 22, v kateri dovolimo časovno odvisne parametre. V naši analizi smo uvedli linearen časovni trend v parameter lege:

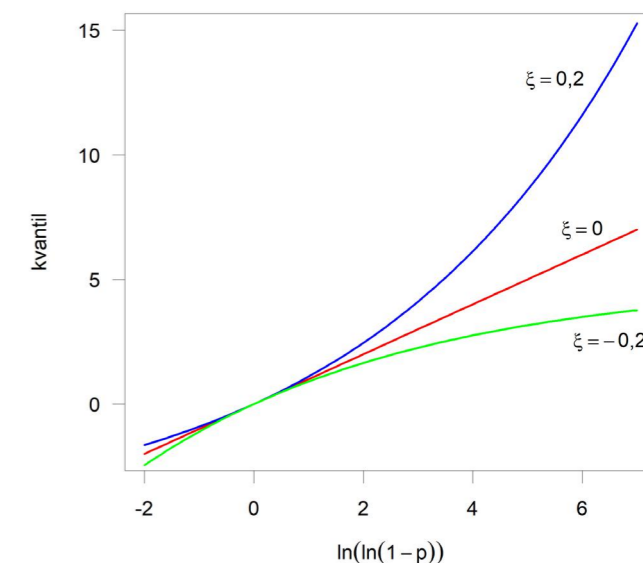
$$z_t = G(\mu(t), \sigma, \xi), \quad (24)$$

kjer je

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (25)$$



Slika 4.20 | Tri družine posplošene verjetnostne porazdelitve izjemnih vrednosti: Gumbelova (rdeče), Frechetova (modro) in obratna Weibullova (zeleno). Pri vseh je vrednost parametra lege μ enaka 0, parametra merila σ pa ena.



Slika 4.21 | Graf povratnih nivojev porazdelitve GEV z vrednostmi parametra oblike $\xi = -0,2, 0$ in $0,2$ (Coles, 2001)

in sta μ_0 in μ_1 parametra časovne odvisnosti. Parameter μ_1 predstavlja letno spremembo v izjemni vrednosti slučajne spremenljivke. Podobno se da vpletati časovno odvisnost v ostala parametra, vendar so izračuni pokazali, da večinoma taki modeli v naših primerih niso bili statistično značilni. Linearen trend

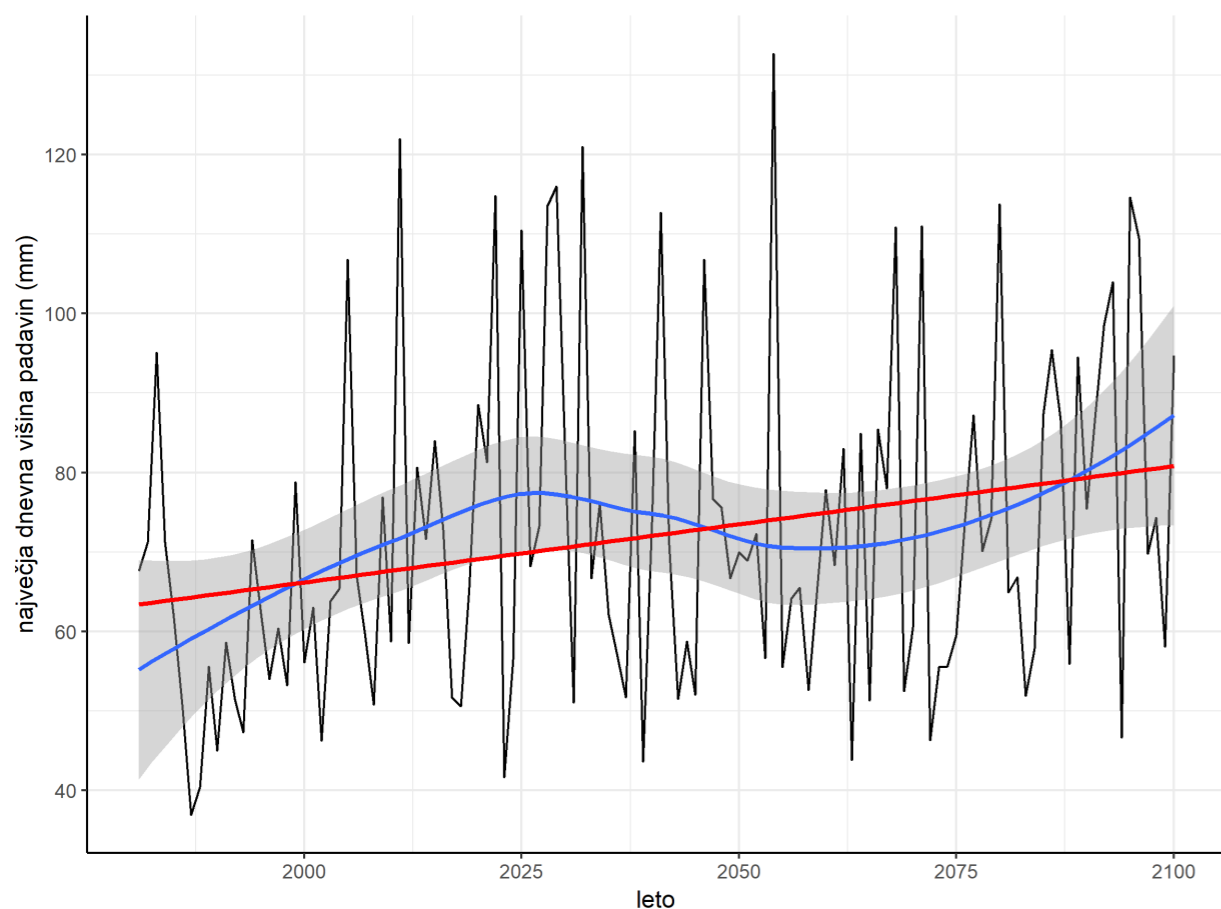
je v večini primerov prikladna izbira; je enostaven in v okviru napak dobro pojasni naraščanje ali padanje izjemnih vrednosti (primer za modelske rezultate največjih letnih enodnevnih padavin v Ljubljani kaže slika 4.22).

Statistična značilnost modela s trendom se določa s t. i. *testom razmerja verjetij* (ang. *likelihood ratio test*). Test za gnezdena modela, v našem primeru za stacionarni model in model z linearnim trendom v parametru lege, testira ničelno hipotezo, ki pravi, da oba modela pojasnjujeta podatke enako dobro. Alternativna hipoteza je, da model s trendom pojasnjuje podatke bolje.

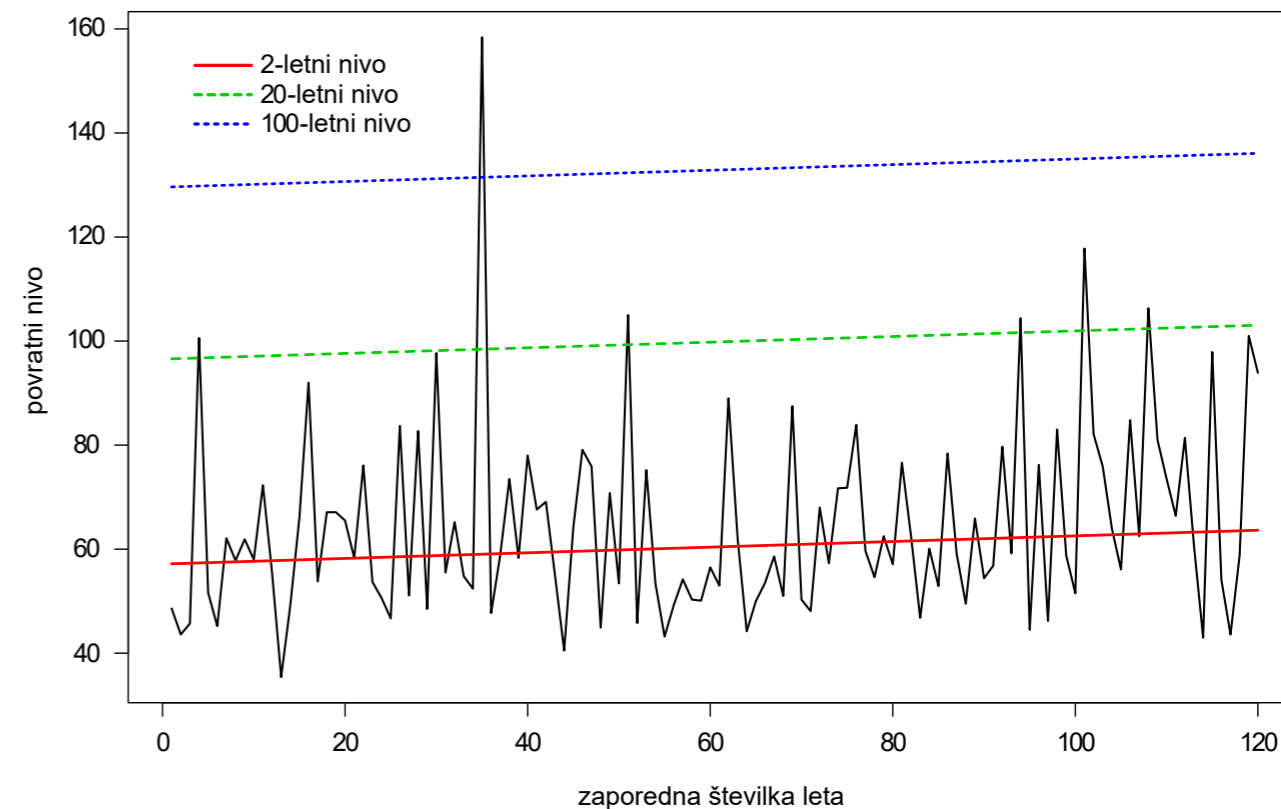
Ker predstavlja parameter μ_1 letno spremembo v izjemni vrednosti slučajne spremenljivke, se s takšnim trendom spreminjajo vsi povratni nivoji (slika 4.23). Ker trenutne povratne nivoje za pomembnejše

spremenljivke poznamo, izračunani so namreč iz podatkov empirične porazdelitve, ki se prilega večdesetletnim meritvam, trend μ_1 pa se da izračunati, skupaj z njegovo statistično napako, lahko izračunamo spremembo v povratnih nivojih za poljubno obdobje našega projekcijskega obdobja (v našem primeru do leta 2100), skupaj z napako ocene.

Pri vseh naših analizah izjemnih vrednosti smo uporabljali statistično in programsko orodje R s paketom extRemes in njegovima funkcijama *fevd* in *ci*.



Slika 4.22 | Največja dnevna višina padavin po letih v Ljubljani za model CNRM-CM5-LR/ CLMcom- CCLM4-8-17 in scenarij RCP4.5. Modra krivulja označuje podnebni signal, dobljen z metodo lokalne regresije LOESS, sivo območje njen 95-odstotni interval zaupanja, rdeča premica pa linearni trend za enoletne izjemne vrednosti. Linearni trend se v okviru napake ujema s podnebnim signalom.



Slika 4.23 | Sprememba povratnih nivojev s povratno dobo 2, 20 in 100 let s časom v modelu z linearnim trendom v parametru lege. Časovna vrsta na grafu je normirana na Gumbelovo porazdelitev (glej Coles, 2001)

4.7.2 Hidrološke spremenljivke

Poplavni dogodki so v naravi redki dogodki, zato je za verjetnost nastopa določenega dogodka v prihodnosti potrebna uporaba verjetnostne teorije. Verjetnost nastopa določenega dogodka velja za eno najpomembnejših analiz hidroloških podatkov, kjer na podlagi predhodnih dogodkov ocenjujemo verjetnost dogodka v prihodnosti. Vsak napovedan poplavni dogodek ima določeno verjetnost nastopa, ki jo zaradi enostavnosti in lažjega razumevanja v praksi prikazujemo z njeno recipročno vrednostjo, to je povratno dobo dogodka. Povratna doba je ocena povprečnega časovnega intervala med dogodki. Pri razumevanju je treba upoštevati slučajnost dogodkov, kar pomeni, da se pretok s povratno dobo 10 let ne bo pojavil vsakih 10 let, ampak pričakujemo, da se bo dogodek pojavil 10-krat v 100 letih, ali v povprečju vsakih 10 let.

Pomemben vidik ocene povratnih dob je dolžina obdobja meritev, saj za daljše nize meritev lahko z

večjo gotovostjo podajamo oceno napovedi dogodka z določeno povratno dobo. Za krajše nize so ocene bolj negotove. Ocene so odvisne tudi od obdobja, za katerega z verjetnostno teorijo ocenjujemo povratne dobe dogodkov.

Za izračun povratnih dob izjemnih pretokov se v hidrološki praksi najpogosteje uporablja Pearsonova porazdelitvena funkcija tretjega tipa in njena logaritemska različica. Porazdelitvi spadata med triparametrične funkcije gama, ki izhaja iz eksponentne porazdelitve. Povratne dobe smo računali z metodo letnih največjih vrednosti za največje letne pretoke (letne visokovodne konice). Izračune smo naredili za 10-, 100- in 500-letne povratne dobe.

4.8 SKLADNOST MODELSKIH SIMULACIJ

Statistike in statistične teste oziroma preverjanje hipotez smo naredili po modelskih točkah za vsak model in vsak scenarij izpustov posebej. Rezultat je ocena (npr. izračunan trend ali sprememba spremenljivke v projekcijskem obdobju v primerjavi s primerjalnim obdobjem) in njena statistična značilnost za vsak model ansambla v vsaki točki modelske mreže. Rezultati v izbrani modelski točki se med modeli ansambla razlikujejo (glej poglavje *Negotovost podnebnih projekcij*). Uporaba ansamblov podnebnih modelov lahko zato vodi do širokega razpona ocene podnebnih sprememb. Iz množice rezultatov na prvi pogled ni vedno razvidno, ali je iz projekcij mogoče potegniti enoznačne zaključke. Da bi zgostili informacijo bodočih sprememb, smo uvedli skladnost ansambelske projekcije. *Skladnost* je definirana kot soglasnost modelskih simulacij bodočih sprememb, še posebej, če so te spremembe statistično značilne.

Opisan je postopek določanja zanesljivosti spremembe, ki smo ga uporabili. Postopek je podrobneje predstavljen za scenarija RCP4.5 in RCP8.5, katerih ansambla štejeta po šest podnebnih modelov. Postopek za scenarij RCP2.6, katerega ansambel šteje le dva modela, je omenjen na koncu poglavja.

Za oceno skladnosti ansambla smo vzeli naslednje merilo: ocena ansambla je označena kot skladna, če je statistično značilna za vsaj polovico modelov ansambla, pri čemer morajo značilne spremembe imeti isti predznak. Če kažejo modeli ansambla značilno spremembo z obema predznakoma, je ocena ansambla skladna le, če je absolutna razlika med številom modelov z značilno spremembo različnih predznakov večja ali enaka polovici modelov v ansamblu.

Statistično zanesljivost izračunanih sprememb za posamezen model smo izračunali z Mann–Whitney–Wilcoxonovim testom, s stopnjo značilnosti 10 %. Postopek izračuna je naslednji. Za vsak model ansambla v vsaki modelski točki izračunamo spremembo oziroma statistično količino in jo testiramo na ničelno hipotezo, da spremembe ni (npr. da je razlika v povprečjih ali medianah med projekcijskim in primerjalnim obdobjem enaka nič ali da se izračunan trend ne razlikuje od nič). Empirično (opazovano) stopnjo značilnosti p , smo primerjali z vnaprej predpisano stopnjo značilnosti α . Sprememba je statistično značilna, če zavrnemo ničelno hipotezo, da sprememba iz podatkov ni razvidna ($p \leq \alpha$). Za vsak model ansambla v vsaki točki modelske

mreže določimo statistično značilno spremembo izbrane spremenljivke:

$$\text{statistični test} = \begin{cases} 0, & \text{statistično neznačilna sprememba,} \\ 1, & \text{statistično značilna sprememba.} \end{cases} \quad (26)$$

Na podlagi testa smo ločili med tremi rezultati: statistično značilno pozitivno spremembo (naraščanje, povečanje), statistično značilno negativno spremembo (upadanje, zmanjšanje) in statistično neznačilno spremembo. Za ansambel izračunamo vsoto statističnih testov njegovih modelov:

$$\text{vsota statističnega testa} = \sum_{\text{modeli}} \text{statistični test.} \quad (27)$$

Vsota zajema vrednosti med 0 in 6. Če je vsota večja ali enaka 3, se kaže sprememba v projekciji, njena značilnost pa je odvisna od soglasja modelov glede smeri spremembe. Predznak spremembe je zanesljiv, če je modelov, ki kažejo statistično značilno spremembo v isto smer, za vsaj 3 (polovica števila članov ansambla) več, kot tistih, ki kažejo spremembo v nasprotno smer. Predznak spremembe izbrane spremenljivke med projekcijskim in primerjalnim obdobjem modela v ansamblu označimo takole:

$$\text{predznak spremembe} = \begin{cases} -1, & \text{zmanjšanje,} \\ 1, & \text{povečanje.} \end{cases} \quad (28)$$

Nazadnje izračunamo absolutno vrednost vsote predznakov spremembe (VPS) za vse modele ansambla, ki kažejo statistično značilno spremembo:

$$\text{VPS} = \left| \sum_{\text{modeli}} \text{predznak spremembe}(\text{statistični test} = 1) \right|. \quad (29)$$

Končno zanesljivost spremembe določimo po matriki, ki jo kaže preglednica 4.2. Na opisani način smo za posamezno spremenljivko in podnebni scenarij ocenili zanesljivost sprememb na podlagi statistične zanesljivosti za vseh šest modelov ansambla. Ločili smo med tremi vrstami zanesljivosti. Z oranžno je označena skladna ocena ansambla (*visoka zanesljivost*), kjer se večina modelov ujema v predznaku statistično značilne spremembe. S sivo je predstavljena neskladna ocena ansambla (označujemo jo kot *nizka zanesljivost*), kjer si modeli nasprotujejo glede smeri spremembe, spremembe v obe smeri pa so lahko tudi zelo velike in statistično značilne. Z zeleno smo označilo primere, ko večina modelov ansambla kaže statistično neznačilne spremembe, torej da sprememb glede na podatke ne pričakujemo.

Visoka stopnja zanesljivosti pomeni, da gre z veliko verjetnostjo pričakovati spremembe v določeno smer. Stopnjo zanesljivosti »ni spremembe« pa lahko razumemo, da sklop uporabljenih modelskih kombinacij kaže na majhno, statistično nepomembno spremembo, ki jo verjetno zakrije naravna spremenljivost podnebja. Nizka stopnja zanesljivosti pa kaže na pomembne razlike v podnebnih modelih, ki privedejo do nasprotujočih rezultatov. To je lahko posledica različnega opisa posameznih fizikalnih, kemijskih ali bioloških procesov v modelih ali celo popolne odsotnosti ključnih dejavnikov za obravnavano spremenljivko. V takšnih primerih sklepamo, da je verjetnost spremembe v eno ali drugo smer znatna. V teh primerih lahko le izboljšave modelov privedejo do večje skladnosti rezultatov in posledične razvrstitve v eno od obeh ostalih skupin končne zanesljivosti sprememb (*visoka* ali »ni spremembe«). Nezanjsljiva sprememba torej ne pomeni, da projekcije ne kažejo na spremembo v prihodnosti.

Za scenarij RCP2.6 sta bila na voljo samo dva modela, zato smo skladnost ansambelske projekcije ocenili na naslednji način: ocena ansambla je skladna (*visoka zanesljivost*), če oba modela kažeta statistično značilni spremembi v isto smer, neskladna (*nizka zanesljivost*), če oba modela kažeta statistično značilni spremembi v nasprotnih smereh, in neznačilna (*ni spremembe*) v vseh ostalih primerih.

Kriterije za določitev končne zanesljivosti – število modelskih kombinacij z določeno vrsto spremembe – smo sprejeli na podlagi tuje literature in simulacije za idealizirane primere. Za ilustracijo navajamo tri primere.

V prvem predpostavimo, da vrednosti spremenljivke v nobeni od modelskih kombinacij nimajo dolgoročnega trenda (le naključno nihajo iz meseca v mesec, iz leta

v leto). V tem primeru bi za končno zanesljivost spremembe pričakovali rezultat »ni spremembe«. Simulacija za tak primer ob prej navedenih kriterijih kaže, da je verjetnost rezultata »ni spremembe« okoli 98,5 %, za nizko zanesljivost okoli 1,2 % in za visoko zanesljivost okoli 0,4 %.

V drugem primeru naj bo sprememba v obravnavni spremenljivki za vse modelske kombinacije ravno na meji statistične značilnosti za pozitivno spremembo. S to spremembo imamo v mislih povprečno spremembo, ki bi jo hipotetično izračunali na ogromnem številu ponovitev podnebnih sprememb z različnim potekom vremena. V takšnem primeru je verjetnost, da dobimo statistično značilno pozitivno spremembo za posamezno modelsko kombinacijo 50 %. Če združimo rezultate šestih takšnih med seboj neodvisnih modelskih kombinacij, obstaja dobrih 65 % možnosti, da bo izračunana končna zanesljivost spremembe visoka (in v pozitivno smer), dobrih 34 % možnosti, da je rezultat »ni spremembe« in le 0,2 % možnosti, da je zanesljivost nizka.

Oglejmo si še zadnji primer, kjer pa so modelske kombinacije že v osnovi neenotne v spremembi. Denimo, da je dejanska in povprečna pričakovana sprememba v izbrani spremenljivki enaka nič, le da imajo modeli sistematično napako – posamezni v negativno, drugi v pozitivno smer. Naj bo standardni odklon te sistematične napake enake standardnemu odklonu izračunane spremembe, ki je posledica zgolj naravne spremenljivosti vremena in podnebja. To pomeni, da je razlika v povprečni vrednosti spremenljivke v dveh ločenih obdobjih (na primer letne povprečne temperature zraka v letih 1981–2010 in 2071–2100) v enaki meri posledica drugačnega razvoja vremena oziroma naravnega nihanja podnebja ter nepopolnosti modelov. V tem primeru je ravno zaradi sistematične napake v modelih pričakovati večjo verjetnost, ko za različne modelske kombinacije dobimo statistično značilno spremembo v različnih smereh. Simulacija kaže, da je verjetnost za končno zanesljivost vrste »ni spremembe« slabih 84 %, za visoko stopnjo zanesljivosti skoraj 4 % in za nizko stopnjo zanesljivosti okoli 12,5 %. V primerjavi s prvim primerom (ko so modeli brez sistematične napake) verjetnost za visoko in nizko stopnjo zanesljivosti precej poraste, zato pa se zniža verjetnost rezultata »ni spremembe«. K predstavljenim primerom je treba dodati opombo, da za posamezne kombinacije podnebnih modelov, ki smo jih uporabili v projektu OPS21, ne poznamo sistematičnih napak, sami modeli pa niso povsem neodvisni (številni si delijo enake računske sheme, predpostavke itd.).

Preglednica 4.2 | Matrika zanesljivosti spremembe

		Vsota statističnega testa						
		0	1	2	3	4	5	6
Vsota predznaka spremembe	0							
	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							

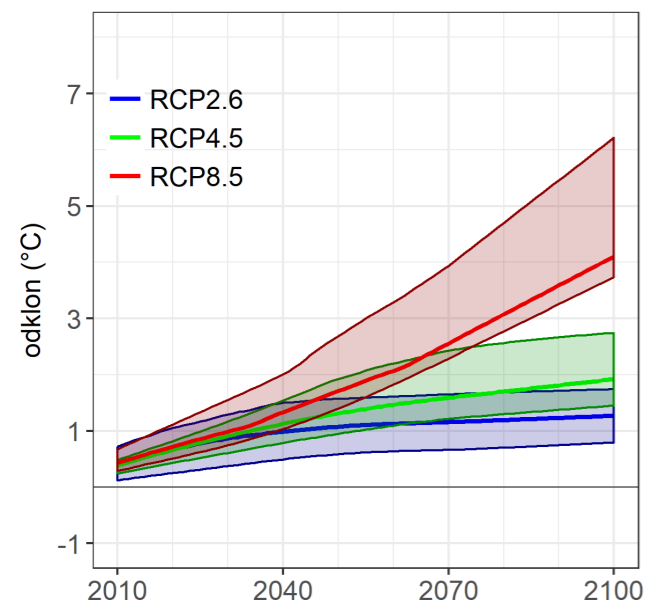
5 REZULTATI PROJEKTA OPS21

5.1 METODOLOGIJA PREDSTAVITVE REZULTATOV

Rezultati po posameznih poglavjih so predstavljeni na pet načinov, vsak od njih osvetli določen vidik rezultatov, na primer časovni ali prostorski. Prikazane so spremembe oziroma odkloni od povprečja v obdobju 1981–2010. Ker gre za projekcije, je zelo pomembna tudi zanesljivost rezultatov. Ta je predstavljena na dva načina, s prikazom celotnega intervala rezultatov modelskih simulacij in s stopnjo zanesljivosti, ki je rezultat statističnih testov in skladnosti modelskih simulacij.

Časovni potek sprememb

Časovni potek sprememb je prikazan grafično, z glajenim podnebnim signalom (slika 5.1). Omenjeni prikaz z odebeljeno črto predstavlja glajeno mediano vseh modelskih simulacij za izbrano spremenljivko. Ovojnice okoli srednje vrednosti prikazuje glajene najvišje in najnižje modelske projekcije. Na grafih so skoraj vedno predstavljeni trije različni poteki s pripadajočimi ovojnicami, ki predstavljajo različne scenarije izpustov (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5). Potek sprememb je prikazan od leta 2011 do konca stoletja. Prikazano je prostorsko povprečje spremembe za celotno območje Slovenije ali za posamezno regijo. Grafi so pripravljene



Slika 5.1 | Primer časovnega poteka sprememb, za povprečno temperaturo zraka v osrednji regiji Slovenije

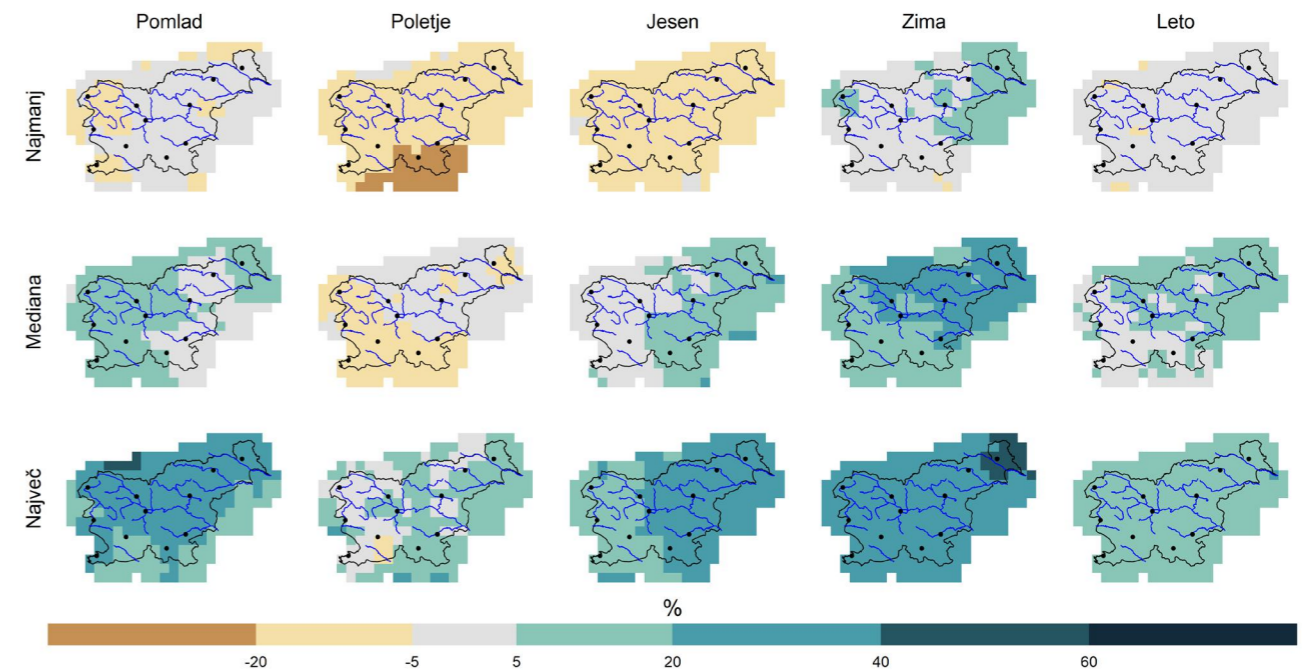
za letne vrednosti spremenljivk in za povprečja spremenljivk po meteoroloških letnih časih. Za rastne razmere sta predstavljena poteka za dva scenarija izpustov (RCP4.5 in RCP8.5), prikazani so tudi glajeni modelski rezultati za zgodovinsko obdobje 1981–2010.

Zemljevidi z razponi sprememb

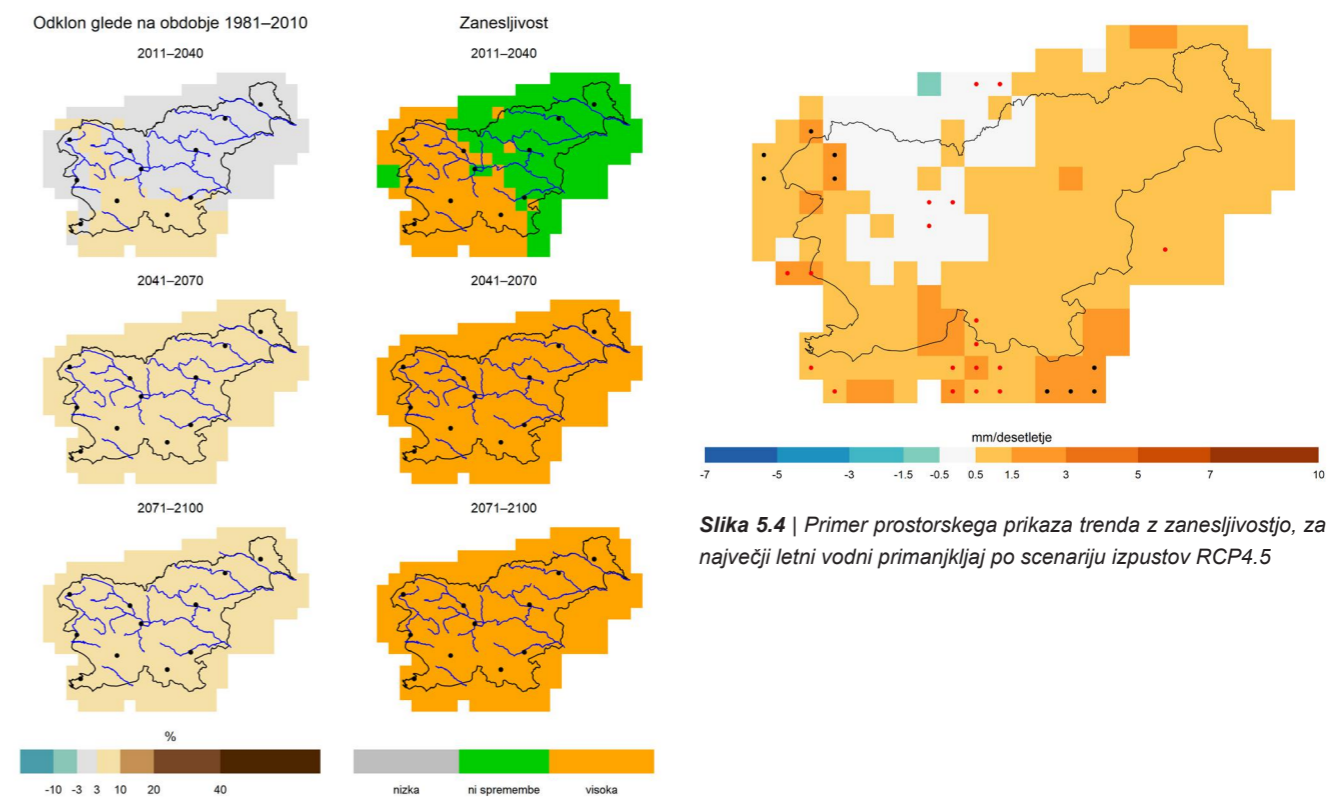
Prostorski prikaz z razponi sprememb prikazuje spremembe v tridesetletnih obdobjih v primerjavi s primerjalnim obdobjem po celi državi v prostorski ločljivosti podnebnih modelov (12 km × 12 km) v državnem koordinatnem sistemu (slika 5.2). Prikazi so ločeni za tri tridesetletna obdobja: bližnjo prihodnost (2011–2040), sredino stoletja (2041–2070) in konec stoletja (2071–2100). Spremembe glede na primerjalno obdobje 1981–2010 so predstavljene v obliki intervala: za izbrano spremenljivko, scenarij in projekcijsko obdobje sta izračunani najvišja in najnižja vrednost ter vrednost mediane vseh modelskih simulacij v posamezni modelski celici. Spremembe so prikazane po letnih časih, v zadnjem stolpcu je prikaz na letni ravni. V primerih, ko ločevanje po letnih časih ni mogoče (število vročih dni, število tropskih noči...) so na isti sliki predstavljeni rezultati za vsa tri projekcijska obdobja.

Zemljevidi sprememb z zanesljivostjo

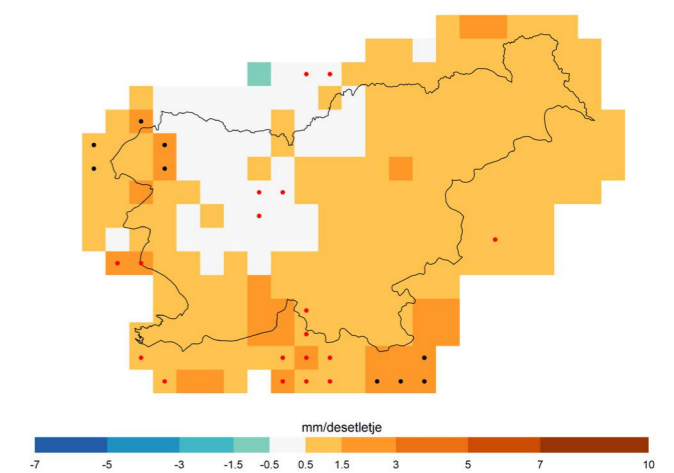
Drug način prostorske predstavitve je zemljevid sredine (mediane) sprememb skupaj z njihovo zanesljivostjo (slika 5.3). Za izbrano spremenljivko in scenarij izpustov je na levi strani prikazan zemljevid sredine (mediane) sprememb vseh modelskih simulacij. Na desni strani slike je za vsako obdobje prikazana zanesljivost te ocene v treh stopnjah. »Visoka stopnja zanesljivosti« pomeni, da gre z veliko verjetnostjo pričakovati spremembe v določeno smer. Pri stopnji zanesljivosti »ni spremembe« gre za majhne, statistično nepomembne spremembe, ki so primerljive ali celo manjše od naravne spremenljivosti. »Nizka stopnja zanesljivosti« pa namiguje na pomembne razlike v podnebnih modelih, ki privedejo do nasprotujočih rezultatov. V takšnih primerih sklepamo, da je verjetnost znatne spremembe v eno ali drugo smer velika. V primeru trendov izjemnih vrednosti spremenljivk je zanesljivost označena na istem zemljevidu kot vrednost trenda (slika 5.4). S pikami različnih barv v posamezni mrežni celici je označena stopnja zanesljivosti. Črna pika označuje »visoko stopnjo zanesljivosti« trenda, rdeča »nizko stopnjo zanesljivosti«, za mrežno celico brez pike pa velja, da »ni spremembe«.



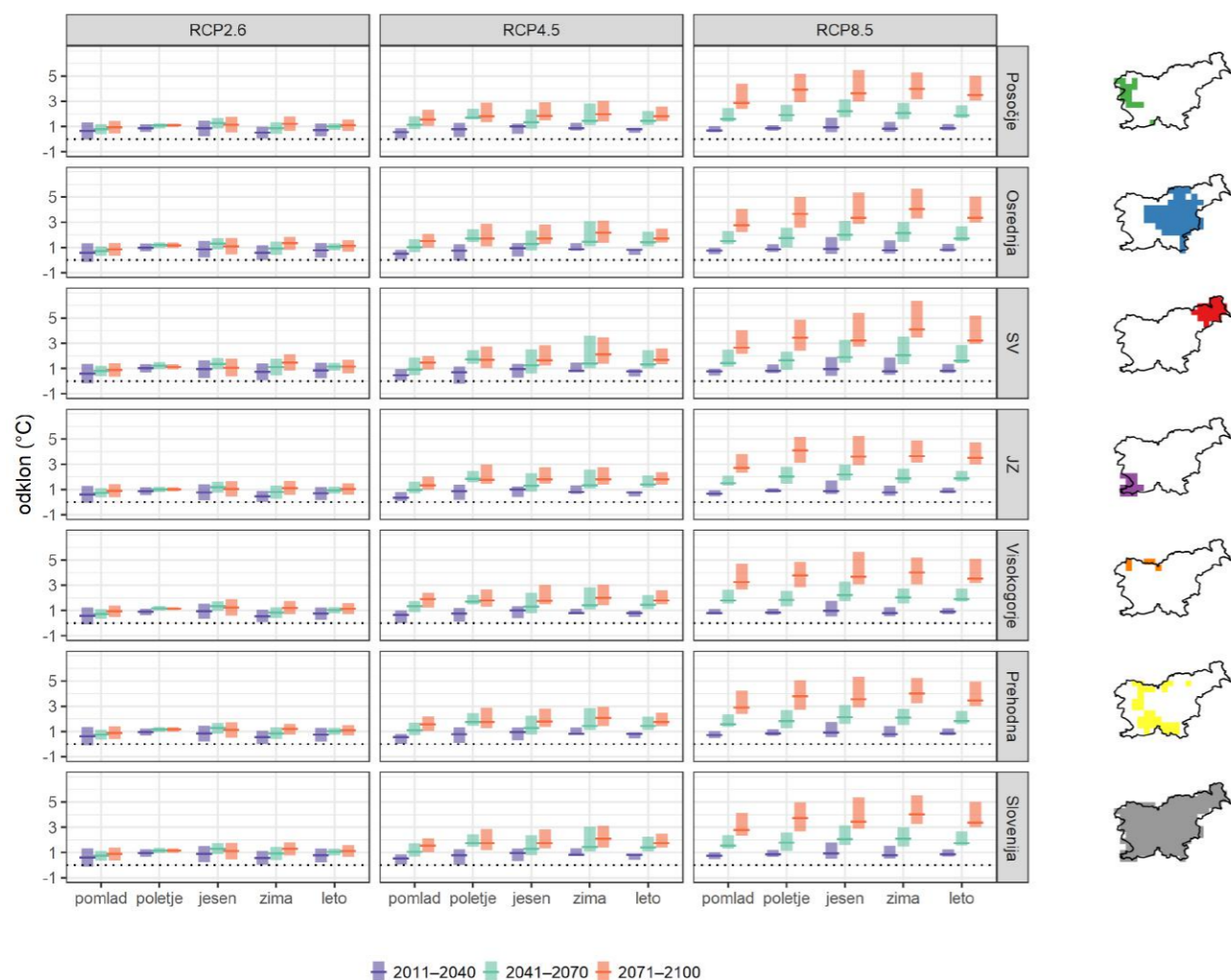
Slika 5.2 | Primer prostorskega prikaza z razponi sprememb, za višino padavin v obdobju 2011–2040 po scenariju izpustov RCP4.5



Slika 5.3 | Primer prostorskega prikaza spremembe z zanesljivostjo, za letno povprečno evapotranspiracijo po scenariju izpustov RCP4.5



Slika 5.4 | Primer prostorskega prikaza trenda z zanesljivostjo, za največji letni vodni primanjkljaj po scenariju izpustov RCP4.5



Slika 5.5 | Primer grafikona razponov sprememb, za povprečno dnevno najvišjo temperaturo. Prekinjena vodoravna črta označuje 0 °C.

Razponi sprememb po regijah

Povprečne spremembe smo izračunali tudi za podnebne regije. Za namen primerjave sprememb po scenarijih izpustov, obdobjih in regijah smo pripravili grafikon povprečnih razponov sprememb po regijah (slika 5.5). Pokončni pravokotniki na grafu prikazujejo razpon predvidenih sprememb med izbranim projekcijskim in primerjalnim obdobjem, povprečenih po območju podnebne regije. Spodnji rob pravokotnika označuje najmanjšo, zgornji rob pa največjo vrednost modelskih simulacij. Poudarjena črtica znotraj pravokotnika prikazuje mediano modelskih simulacij. Različne barve stolpcev predstavljajo različna projekcijska obdobja. Grafikon je razdeljen v tri ločene stolpce, od katerih vsak prikazuje enega od scenarijev izpustov. Znotraj

posameznega stolpca so prikazani rezultati po letnih časih in za celo leto. Višina pravokotnika podaja informacijo o negotovosti predvidenih sprememb.

5.2 SPREMEMBE TEMPERATURE

Naraščanje temperature zraka se bo v Sloveniji v 21. stoletju nadaljevalo, velikost dviga pa je zelo odvisna od scenarija izpustov toplogrednih plinov. V primeru optimističnega scenarija izpustov RCP2.6 bo temperatura do konca stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 zrasla za približno 1,3 °C, v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov RCP4.5 za približno 2 °C, v primeru pesimističnega scenarija izpustov RCP8.5 pa za približno 4,1 °C. Verjetno bo najbolj zrasla temperatura pozimi, le nekoliko manj poleti in jeseni, najmanj pa spomladi.

Dvig temperature bo močno povečal toplotno obremenitev. V primeru optimističnega scenarija izpustov se bo število vročih dni v Sloveniji do konca stoletja povečalo za približno 6 dni, v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov za približno 11 dni, v primeru pesimističnega scenarija izpustov pa za približno 27 dni. V vseh scenarijih izpustov se bo povečalo število in trajanje vročinskih valov. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov bomo imeli konec stoletja povprečno vsaj en vročinski val letno, ki bo po jakosti primerljiv ali hujši od vročinskega vala, ki smo ga imeli poleti 2003.

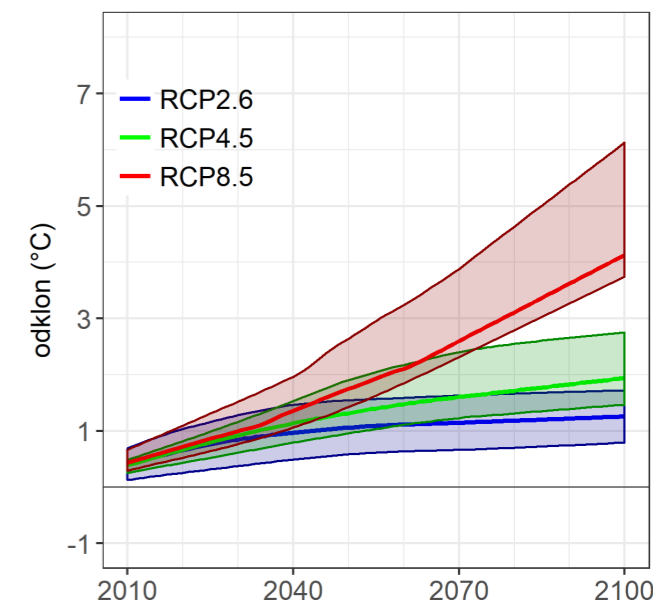
Skladno z dvigom temperature zraka se bo ogreval površinski sloj tal, oboje pa bo vplivalo na fenološki razvoj rastlin in dolžino rastne dobe. Spomladanski fenološki razvoj rastlin bo zgodnejši. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov bo olistanje gozdnega drevja približno dva tedna, v primeru pesimističnega scenarija izpustov pa celo do približno 40 dni zgodnejše kot v primerjalnem obdobju 1981–2010. Dolžina rastne dobe se bo podaljševala skladno z dvigom temperature, zgodnejši bo njen začetek spomladi in kasnejši zaključek jeseni.

Pogostost spomladanskih pozeb bo ostala na podobni ravni kot v primerjalnem obdobju 1981–2010.

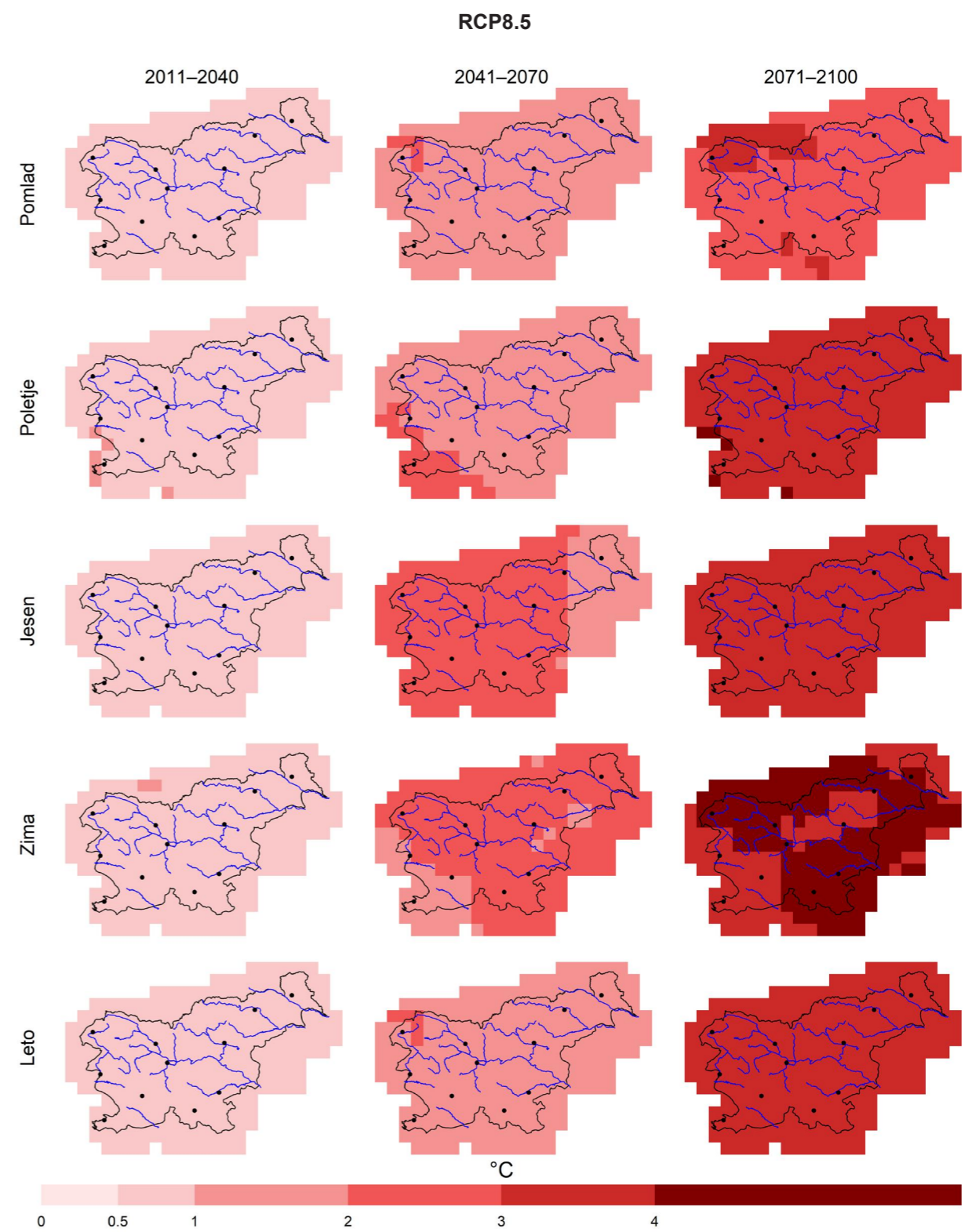
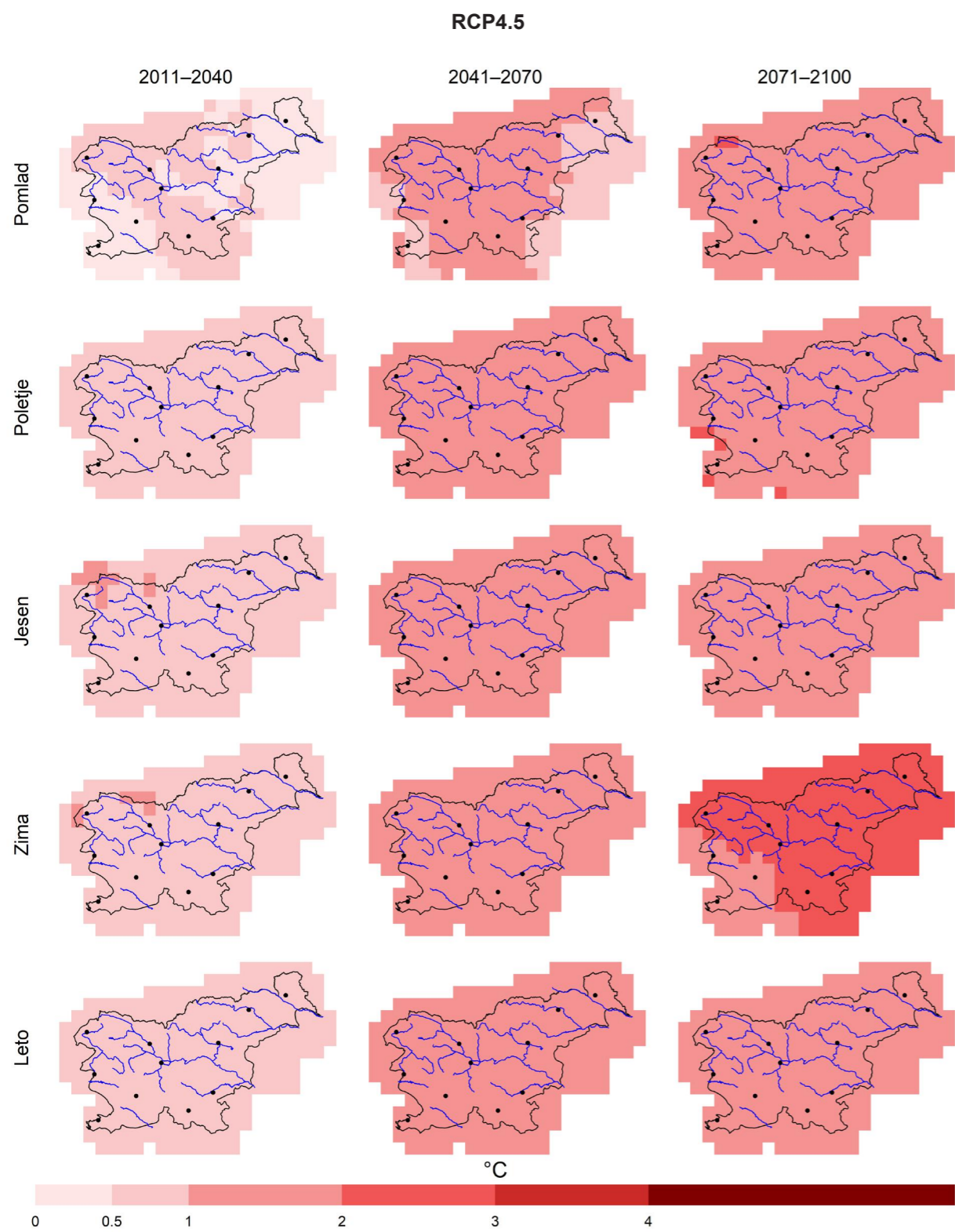
5.2.1 Spremembe temperature zraka

Skladno s projekcijo postopnega ogrevanja zraka v Evropi v 21. stoletju bo tudi v Sloveniji povprečna prizemna temperatura zraka naraščala. Vsi trije scenariji značilnega poteka vsebnosti toplogrednih plinov v Sloveniji do konca stoletja z visoko zanesljivostjo predvidevajo naraščanje temperature zraka (slika 5.6). Po scenariju izpustov RCP2.6 se bo letna povprečna temperatura dvignila za približno 1,3 °C, po RCP4.5 za približno 2 °C in po RCP8.5 za približno 4,1 °C. Po prvih dveh scenarijih, ki predvidevata zmanjšanje izpustov, temperatura sprva narašča in se konec 21. stoletja ustali. Po RCP8.5 pa se naraščanje temperature proti koncu stoletja stopnjuje.

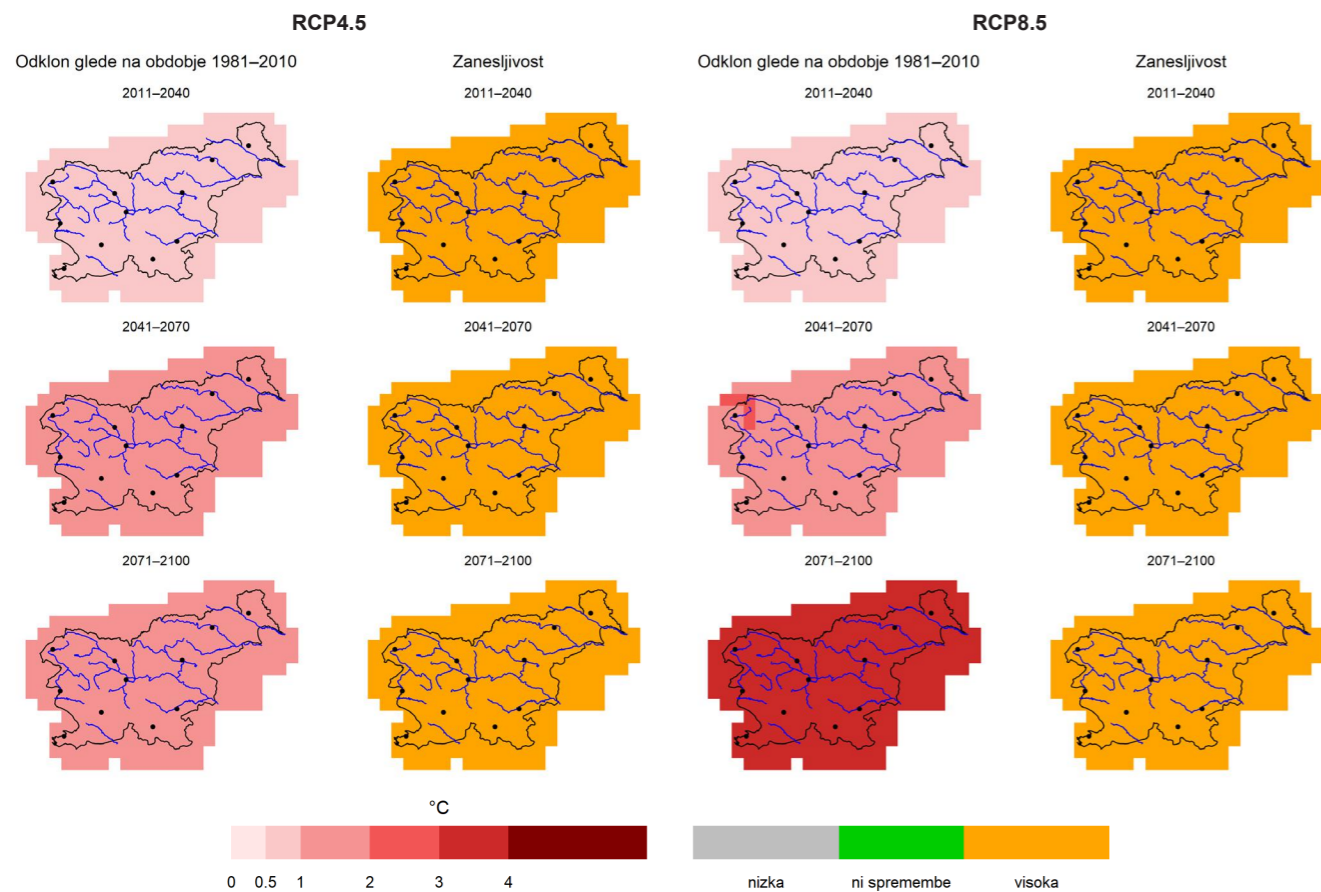
Naraščanje temperature je prostorsko precej enakomerno, razlikuje se po letnih časih (slika 5.7). Zmerno optimistični scenarij izpustov RCP4.5 v prvem obdobju predvideva dvig povprečne temperature zraka za od 0,4 do 1,0 °C, v drugem obdobju za od 1,1 do 2,3 °C, v zadnjem obdobju za od 1,5 do 2,6 °C. V prvem obdobju so temperaturna odstopanja od primerjalnega obdobja med posameznimi scenariji izpustov še primerljiva, v naslednjih dveh obdobjih pa se časovni poteki ločijo.



Slika 5.6 | Časovni potek spremembe letnega povprečja temperature zraka v Sloveniji do konca 21. stoletja za tri scenarije izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnici največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.



Slika 5.7 | Sprememba povprečne temperature zraka po meteoroloških letnih časih in za celo leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za scenarija izpustov RCP4.5 (zgoraj) in RCP8.5 (naslednja stran). Prikazan je odklon temperature od povprečja v primerjalnem obdobju 1981–2010.



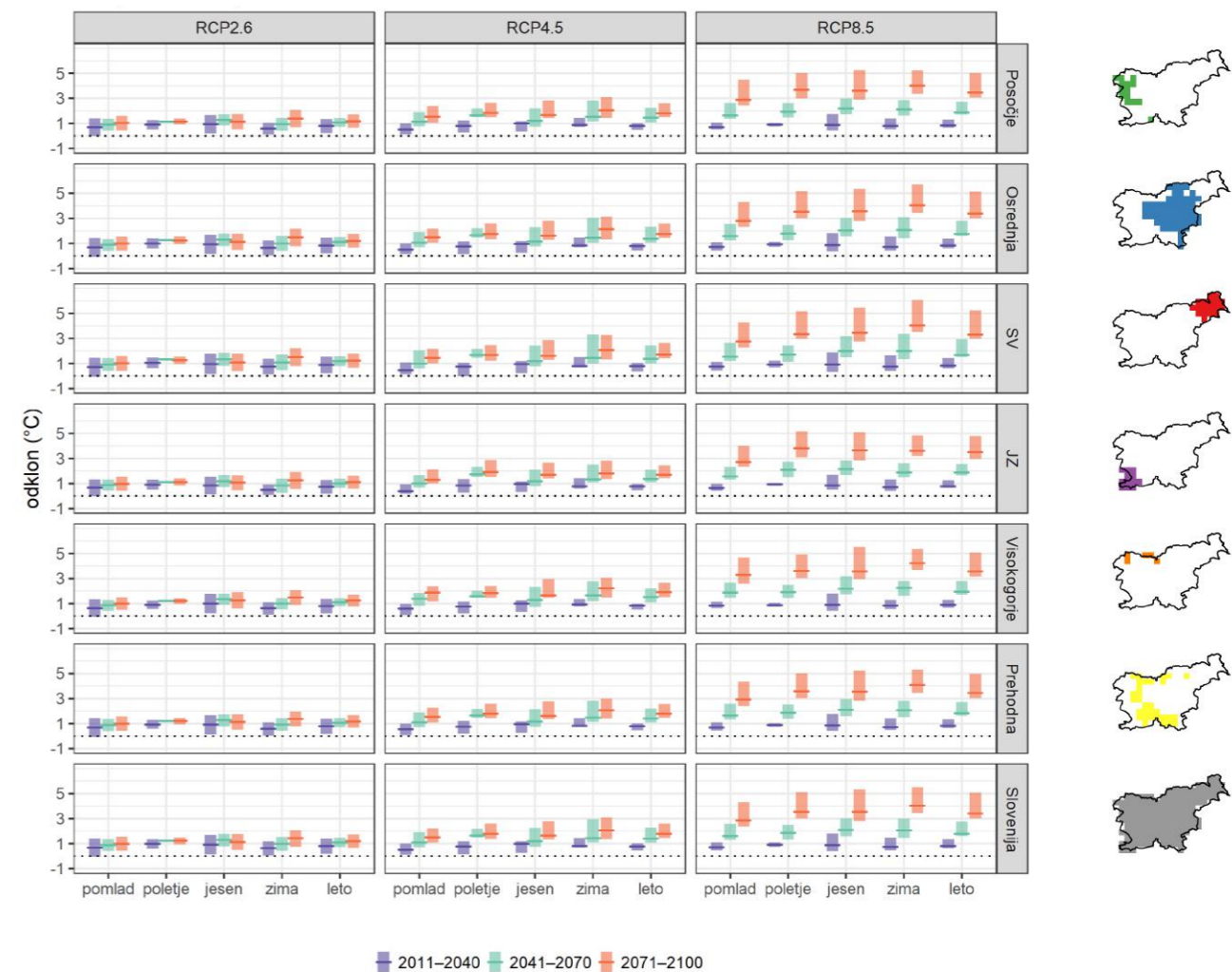
Slika 5.8 | Sprememba letnega povprečja temperature zraka v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija izpustov RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

Izrazitejša sprememba se kaže predvsem pri scenariju izpustov RCP8.5, po katerem se nam obeta dvig temperature za od 1,6 do 2,8 °C v drugem in od 3,0 do 5,1 °C v zadnjem obdobju (slika 5.8), ki je v glavnem pripisan večji vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju v primerjavi s preostalima scenarijema. Po scenariju izpustov RCP2.6 je dvig temperature ob koncu stoletja od 0,7 do 1,7 °C, kar je posledica aktivnih podnebnih politik in ukrepov zmanjšanja izpustov toplogrednih plinov.

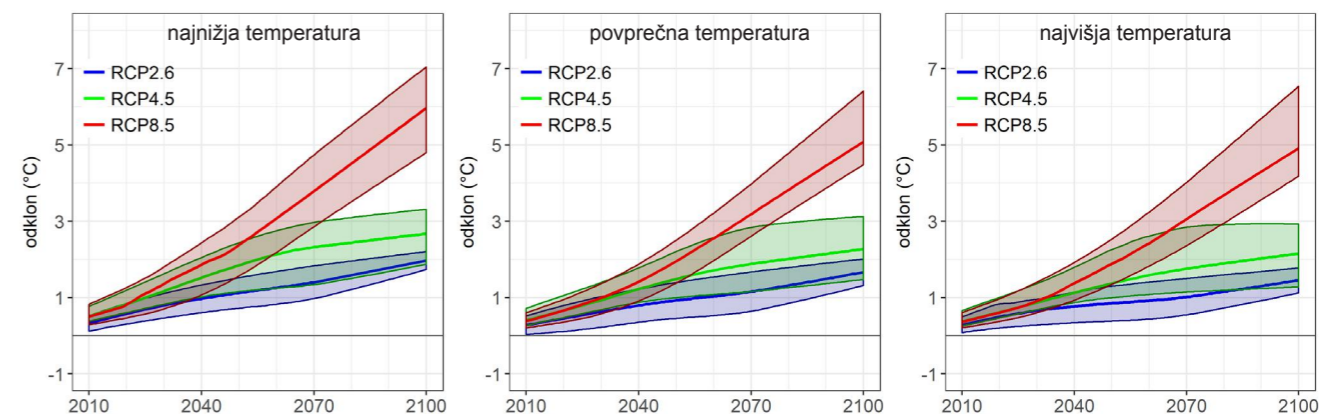
Naraščanje temperature je za Slovenijo predvideno v vseh letnih časih, vendar je za zimo podnebni signal ob koncu stoletja tako na državni kot na regionalni ravni izrazitejši od povprečnega letnega podnebnega signala. Predvsem v severnem in vzhodnem delu Slovenije (visokogorje, severovzhodna regija, osrednja regija) bo temperatura pozimi naraščala hitreje od letnega povprečja (slika 5.9). Naraščanje temperature bo najmanj izrazito spomladi. Predvidene spremembe po scenariju izpustov RCP4.5 so zanesljive in se v glavnem ujemajo

s projekcijami sprememb v večjem delu Evrope, kjer je največje naraščanje temperature predvideno pozimi v severnem in poleti v južnem delu Evrope. V gorskem svetu na višjih nadmorskih višinah je v obeh letnih časih predviden nadpovprečen dvig temperature.

Spremembe najnižje, najvišje in povprečne dnevne temperature zraka po scenariju izpustov RCP4.5 se na letni ravni opazno ne razlikujejo. Nekoliko večje razlike se za navedene temperaturne spremenljivke kažejo med sezonami in regijami, kjer izstopa najnižja dnevna temperatura v visokogorju (slika 5.10), ki bo pozimi v prvem in drugem projekcijskem obdobju predvidoma naraščala nekoliko hitreje kot drugje po Sloveniji in v drugih letnih časih. Po scenariju izpustov RCP4.5 je ta razlika približno 0,3 °C, scenarij izpustov RCP8.5 pa kaže, da bo do konca stoletja povprečna zimska najnižja dnevna temperatura v visokogorju narasla za približno 0,5 °C več kot povprečna in najvišja dnevna temperatura.



Slika 5.9 | Povprečni razponi sprememb povprečne temperature zraka v posameznih regijah po meteoroloških letnih časih in za celo leto za tri scenarije. Vodoravna poudarjena črta v stolpcu prikazuje mediano ansambla modelskih rezultatov, stolpec pa razpon vseh simulacij modelskega ansambla.



Slika 5.10 | Časovni potek spremembe dnevne najnižje (levo), povprečne (sredina) in najvišje (desno) temperature zraka pozimi v regiji visokogorje do konca 21. stoletja za tri scenarije izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnici pa največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

5.2.2 Spremembe kazalnikov izjemnih temperaturnih razmer

5.2.2.1 Kazalniki izjemne vročine

Največkrat navedeni podnebni kazalniki, povezani z vročino, ki prikazujejo število dni na leto nad izbrano mejno vrednostjo temperature zraka (število tropskih noči, število toplih in vročih dni), kažejo primerljive rezultate. Vsi trije kazalniki so zaradi svoje definicije močno odvisni od orografije. Na območju višjih nadmorskih višin, torej v prehodni regiji in v visokogorju, je število takih dogodkov na leto zelo majhno oziroma kar enako nič, zato je zanesljivost dobljenih rezultatov na tem območju za bližnjo prihodnost nižja kot v drugih regijah. V prvem in drugem obdobju ni večjih razlik v rezultatih za različna scenarija izpustov, ob koncu stoletja pa so spremembe kazalnikov vročine zelo odvisne od scenarija izpustov.

Število tropskih noči, ko se temperatura tudi ponoči ne spusti pod 20 °C, se bo v prvem obdobju predvidoma povečalo za približno 5 dni, v drugem obdobju pa tudi do 20 dni, odvisno od regije. V zadnjem obdobju se bo po scenariju izpustov RCP4.5 število tropskih noči ustalilo, po scenariju izpustov RCP8.5 pa bomo imeli v nekaterih območjih tudi do 60 tropskih noči več kot v današnjem podnebnju.

Toplih dni, ko najvišja temperatura preseže 25 °C, bo v bližnji prihodnosti (obdobje 2011–2040) približno 10 več kot v primerjalnem obdobju, ne glede na scenarij izpustov. Sprememba za obdobje 2041–2070 je že nekoliko odvisna od scenarija izpustov. Po scenariju izpustov RCP4.5 lahko pričakujemo nekaj manj kot 20 toplih dni več, po scenariju izpustov RCP8.5 pa do 25 toplih dni več kot v današnjem podnebnju. Konec stoletja bo sprememba v številu toplih dni zelo odvisna od scenarija izpustov. Po zmerno optimističnem

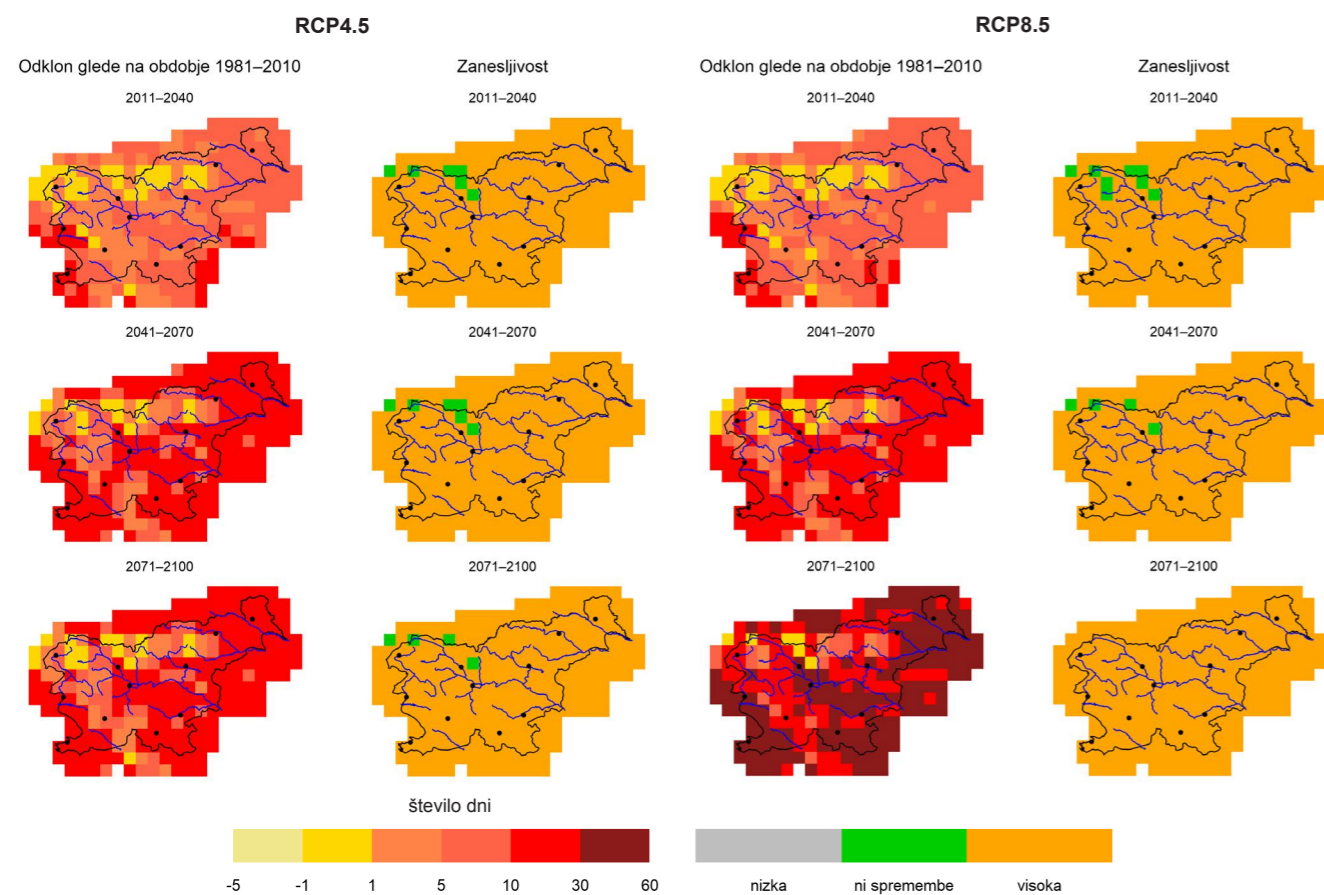
scenariju izpustov bo po večini regij do 25 več takšnih dni, medtem ko po pesimističnem scenariju izpustov (RCP8.5) lahko pričakujemo od 55 do 60 več toplih dni v primerjavi z današnjim podnebnjem.

Tudi kazalnik števila vročih dni, ko najvišja temperatura preseže 30 °C, kaže na postopno povečevanje števila takih dni. Rezultati tega kazalnika so prikazani na sliki 5.11. V bližnji prihodnosti bo vročih dni v nižinskem delu države (osrednja, severovzhodna in jugozahodna regija) od 5 do 10 več kot v primerjalnem obdobju. Nekoliko višja ocena (do 30 dni več) velja za večji del države v drugem in po scenariju izpustov RCP4.5 tudi tretjem obdobju. Konec stoletja nas po najbolj pesimističnem scenariju v nižinskem delu čaka tudi do 60 vročih dni več kot v primerjalnem obdobju.

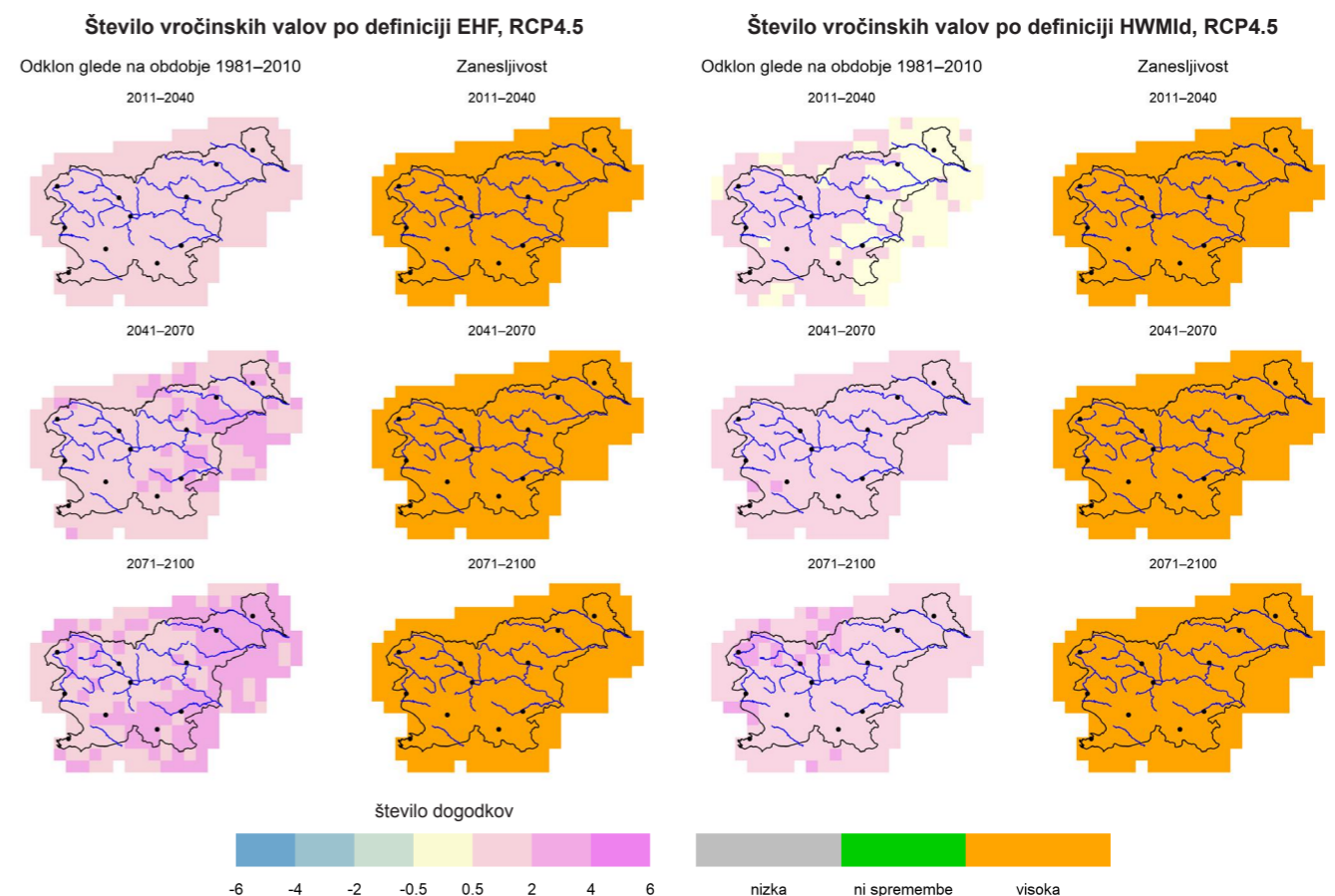
Pri spremljanju vročinskih valov je pomembna njihova jakost (magnituda), trajanje posameznega vročinskega

vala in njihova pogostost. Za jakost najhujšega vročinskega vala v letu (kazalnik HWMId) projekcije kažejo, da bodo najmočnejši vročinski dogodki v bližnji prihodnosti še primerljivi z današnjimi, v drugem in zadnjem obdobju pa močnejši od najmočnejših vročinskih valov iz primerjalnega obdobja. Koliko bodo močnejši, je odvisno od scenarija izpustov.

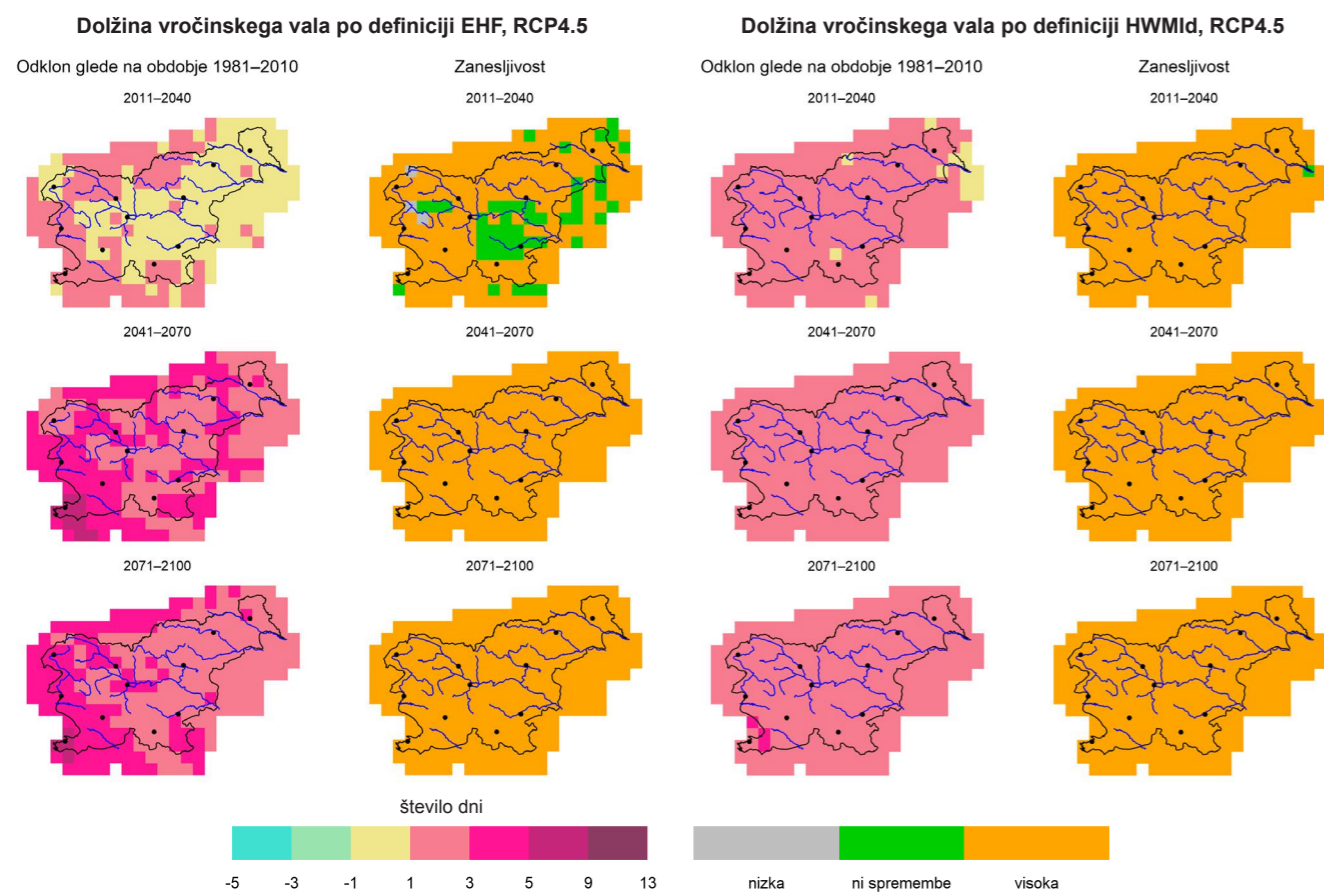
Na sliki 5.12 je prikazano število vročinskih valov glede na definicijo kazalnikov EHF in HWMId za zmeren scenarij izpustov RCP4.5. Po obeh definicijah vročinskih valov se bo njihovo število do konca stoletja postopno povečevalo. Predvidene spremembe v dolžini vročinskih valov se med kazalnikoma nekoliko razlikujejo (slika 5.13). Ne glede na izbor kazalnika bomo imeli v prihodnosti daljše vročinske valove.



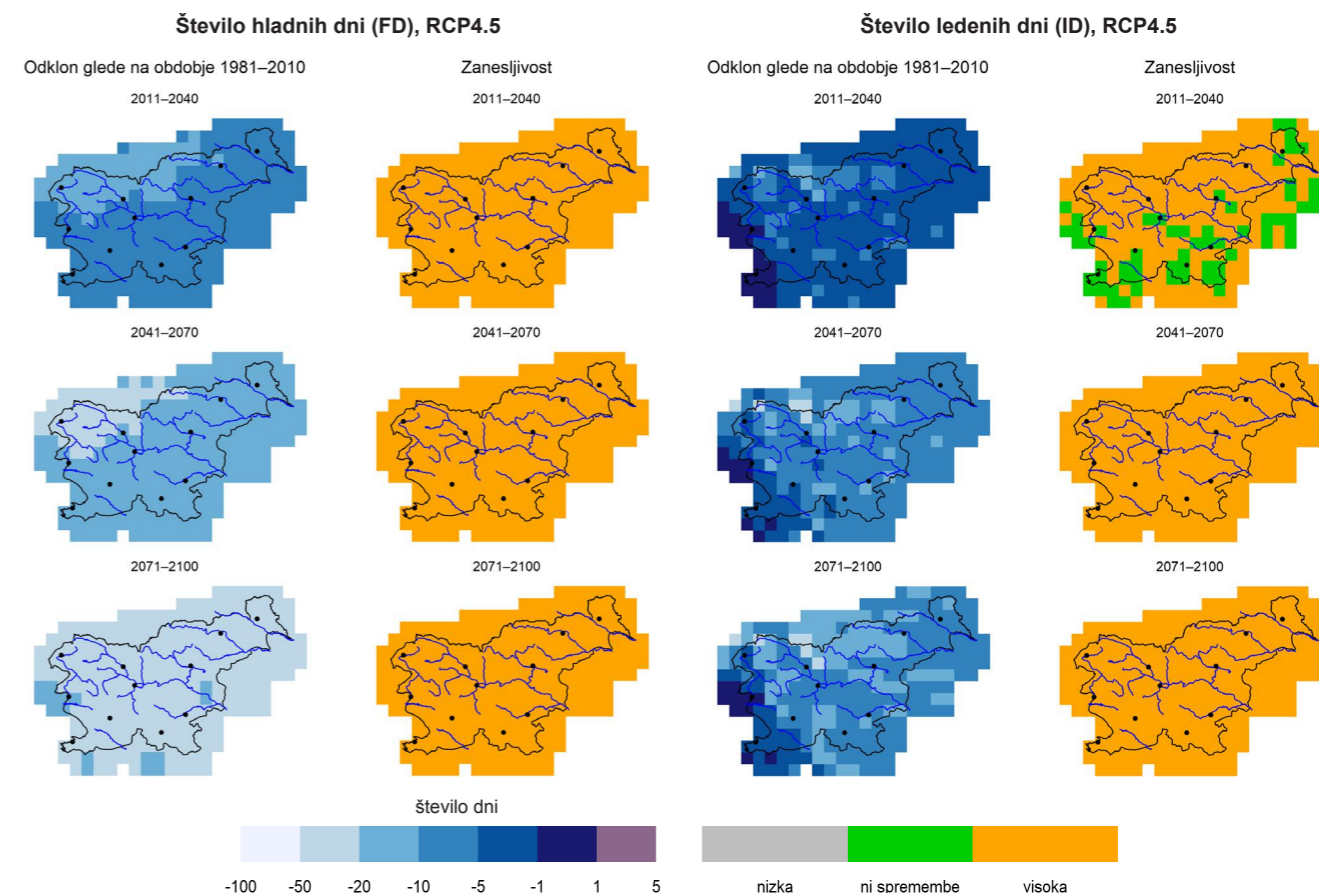
Slika 5.11 | Sprememba povprečnega števila vročih dni na leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija izpustov RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)



Slika 5.12 | Sprememba povprečnega števila vročinskih valov na leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarij izpustov RCP4.5. Vročinski valovi so definirani levo z uporabo kazalnika EHF, desno z uporabo kazalnika magnituda vročinskega vala (HWMId). Upoštevani so dogodki od maja do septembra.



Slika 5.13 | Sprememba povprečne dolžine vročinskih valov na leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarij izpustov RCP4.5. Vročinski valovi so definirani levo z uporabo kazalnika EHF, desno z uporabo kazalnika magnitude vročinskega vala (HWMI). Upoštevani so dogodki od maja do septembra.



Slika 5.14 | Sprememba povprečnega števila hladnih (levo) in ledenih (desno) dni na leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarij izpustov RCP4.5. Upoštevani so dogodki od oktobra do aprila.

5.2.2.2 Kazalniki izjemnega mraza

Število hladnih in ledenih dni je močno odvisno od reliefne oblikovanosti površja in nadmorske višine. Najmanjše spremembe pri teh kazalnikih so pričakovane v jugozahodni regiji, saj tu že v današnjem podnebju zelo redko zaznamo kak leden dan. Največji upad števila ledenih dni, ko najvišja temperatura ne preseže 0 °C, oziroma števila hladnih dni, ko dnevna najnižja temperatura pade pod 0 °C, v prihodnosti pričakujemo v visokogorju in v delu prehodne regije. Rezultati navedenih kazalnikov za zmerno optimistični scenarij izpustov RCP4.5 so prikazani na sliki 5.14.

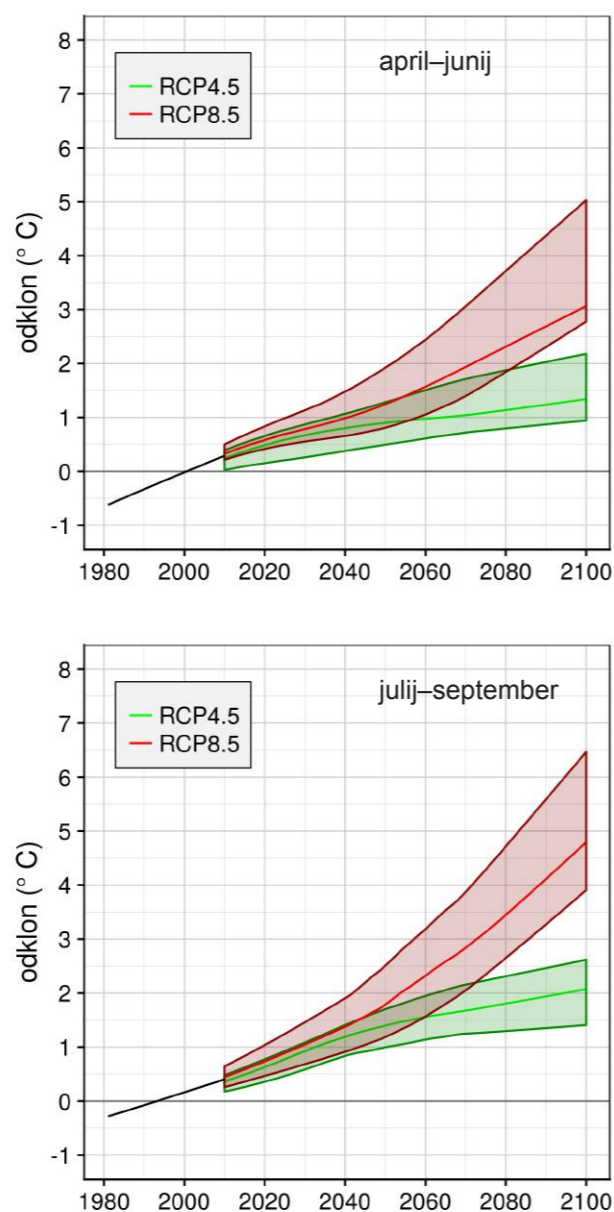
5.2.3 Spremembe rastnih razmer

5.2.3.1 Spremembe temperature tal

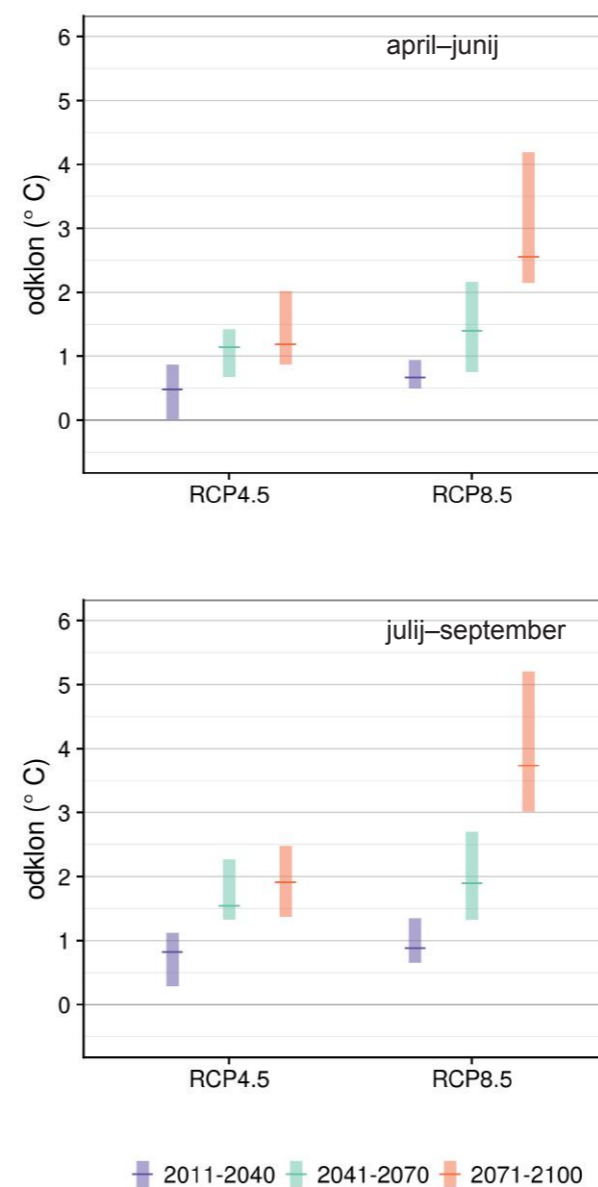
Podobno kot temperatura zraka se bo v 21. stoletju tudi povprečna temperatura tal postopno povečevala (primer za postajo Celje na sliki 5.15). Razlike med predvidenimi spremembami na različnih globinah tal so majhne, zato so prikazane le spremembe na globini 5 cm. Povečanje povprečne temperature tal rahlo pada z globino, razlika med globinama 5 in 30 cm je največja v zadnjem obdobju, in sicer v prvem delu rastne dobe do največ 0,2 °C, v drugem pa do 0,5 °C.

V prvem delu rastne dobe od aprila do junija se v prvem obdobju po scenariju izpustov RCP4.5 značilne spremembe ne pričakujejo (primer za postajo Celje na sliki 5.16). V drugem obdobju se bo temperatura tal povišala za od 1,1 do 1,2 °C glede na primerjalno obdobje 1981–2010. V tretjem obdobju se večje spremembe v primerjavi z drugim ne pričakujejo. Po pesimističnem scenariju izpustov RCP8.5 se bo temperatura v prvem obdobju povišala za od 0,7 do 0,8 °C, v drugem obdobju od 1,3 °C (Murska Sobota) do 1,6 °C (Bilje), v tretjem pa za od 2,5 do 2,7 °C.

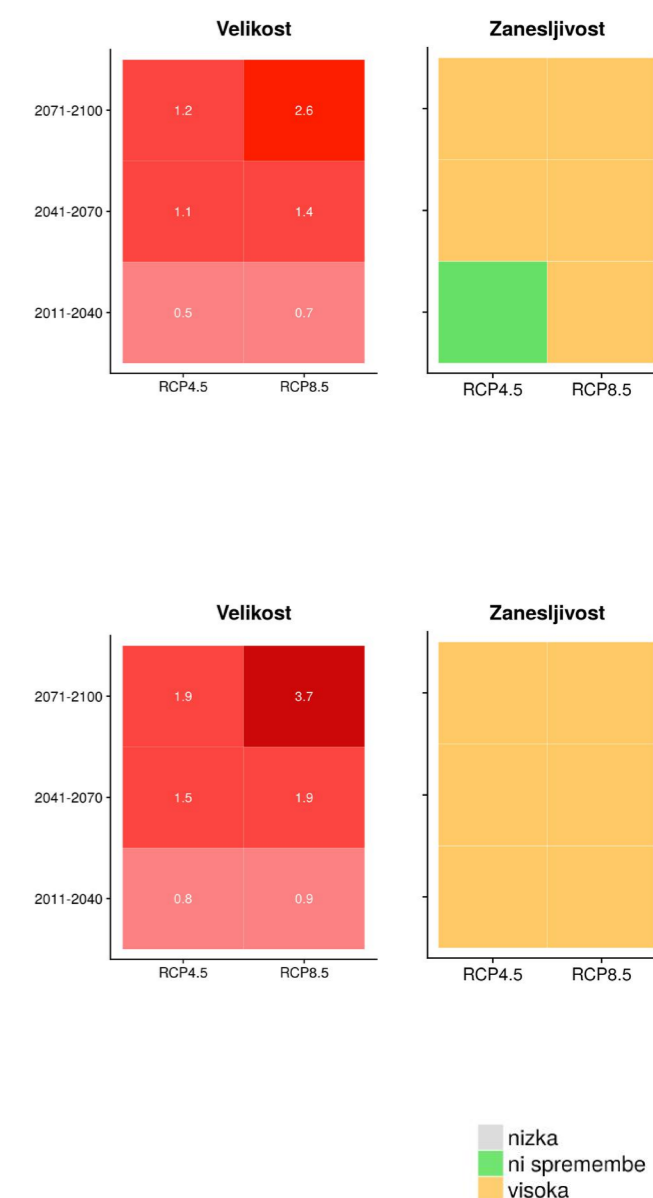
V drugem delu rastne dobe od julija do septembra se bo v prvem obdobju po obeh scenarijih temperatura zvišala za od 0,8 do 0,9 °C. V drugem obdobju se bo temperatura zvišala za od 1,5 do 1,7 °C (RCP4.5) oziroma za od 1,8 do 2 °C (RCP8.5). Večja razlika se pojavi v zadnjem obdobju, kjer se po zmerno optimističnem scenariju RCP4.5 pričakuje povišanje za od 1,9 do 2,1 °C, po RCP8.5 pa kar za od 3,6 do 4,1 °C.



Slika 5.15 | Časovni potek spremembe povprečne temperature tal na globini 5 cm v prvem delu rastne dobe (april–junij, zgoraj) in drugem delu rastne dobe (julij–september, spodaj) v Celju do konca 21. stoletja za dva scenarija izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnici največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.



Slika 5.16 | Razponi spremembe (levo) ter srednja sprememba in pripadajoča zanesljivost (desno) povprečne temperature tal na globini 5 cm v Celju za prvi del rastne dobe (zgoraj) in drugi del rastne dobe (spodaj) v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov



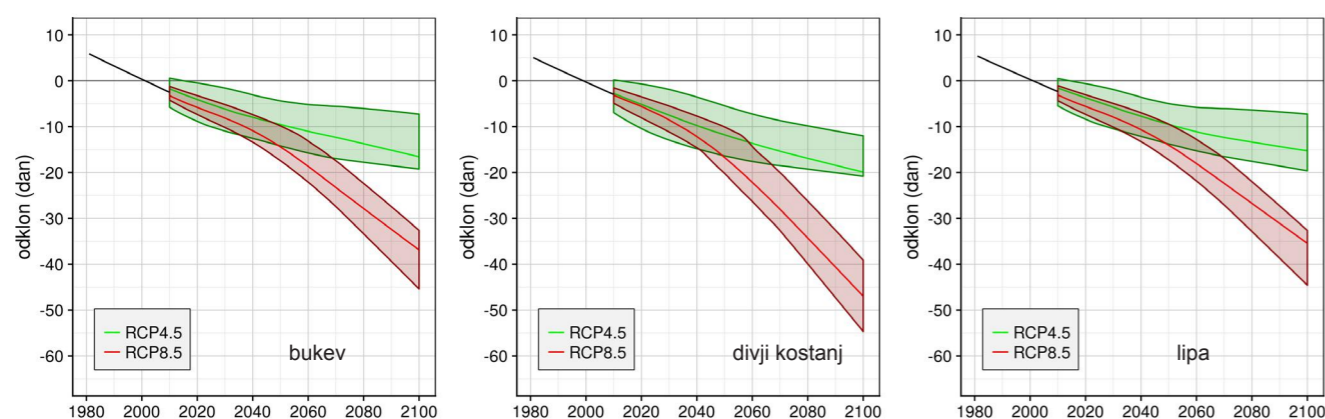
5.2.3.2 Fenološka faza prvih listov

Do konca 21. stoletja se bo olistanje pojavilo čedalje prej (primer postaje Celje na sliki 5.17), kar je glede na dvig temperature zraka pričakovano. Po zmerno optimističnem scenariju izpustov RCP4.5 bo bukev do konca 21. stoletja olistala od 14 (Veliki Dolenci) do 19 dni (Lesce) prej. Pesimistični scenarij izpustov RCP8.5 do konca 21. stoletja pričakovan predvideva še zgodnejše olistanje, in sicer od 33 (Veliki Dolenci) do 37 dni (Slovenske Konjice) prej, v Lescah pa kar 49 dni prej. Pri divjem kostanju so spremembe večje, do konca 21. stoletja bo po scenariju izpustov RCP4.5 olistal od 15 (Ljubljana) do 20 dni (Celje) oziroma 22 dni (Bilje, Portorož) prej, po RCP8.5 pa na večini lokacij 39 dni prej. Spremembe za lipo so podobne spremembam pri bukvi.

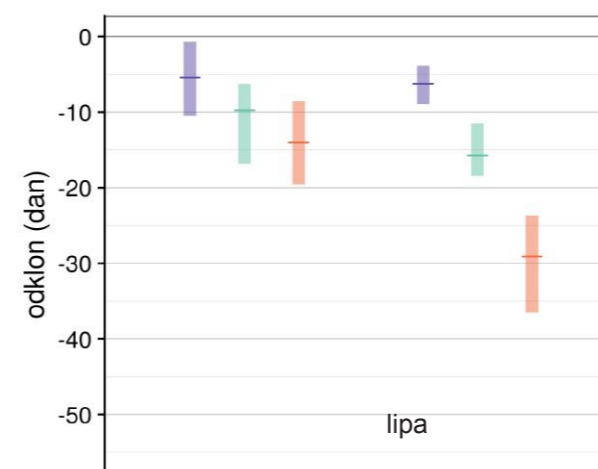
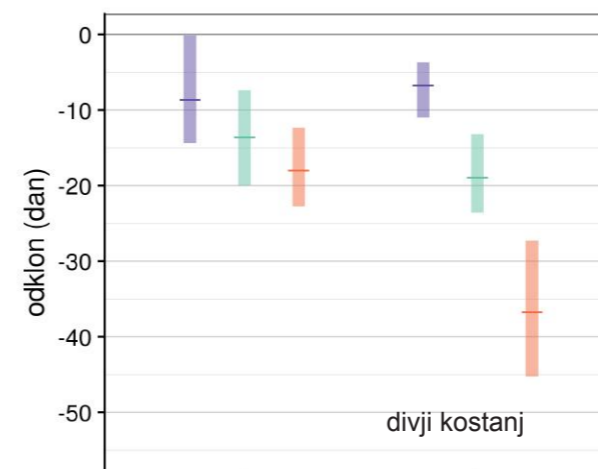
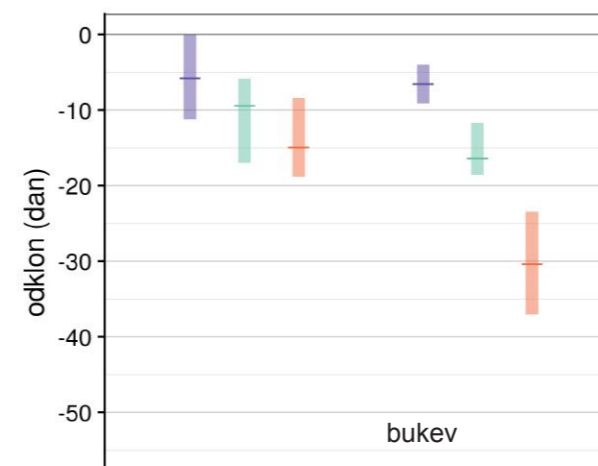
Pri olistanju bukke se v prvem obdobju po scenariju izpustov RCP4.5 značilne spremembe ne pričakujejo (primer za postajo Celje na sliki 5.18), razen v Lescah, kjer bo olistanje nastopilo 8 dni prej kot v primerjalnem obdobju. V drugem obdobju bo bukev olistala od 8 (Veliki Dolenci, Starše) do 12 dni (Slovenske Konjice) prej, v tretjem pa od 14 do 16 dni prej. Po pesimističnem scenariju izpustov RCP8.5 bo v prvem obdobju sprememba le v Ljubljani in Novem mestu (7 dni) ter v Lescah (9 dni). V drugem obdobju se bo olistanje pojavilo od 14 (Veliki Dolenci) do 17 dni (Novo mesto, Slovenske Konjice) prej, v tretjem obdobju pa od 28 do 31 dni prej.

Čas olistanja divjega kostanja se po zmerno optimističnem scenariju izpustov RCP4.5 v prvem obdobju ne bo spremenil (primer za postajo Celje na sliki 5.18), razen v Lescah in Biljah, kjer bo olistanje 7 oziroma 9 dni zgodnejše. V drugem obdobju bo na večini lokacij olistanje nastopilo od 12 do 15 dni prej, v tretjem pa od 17 do 19 dni prej. Po scenariju izpustov RCP8.5 bo v prvem obdobju sprememba v Portorožu (6 dni), Ljubljani (8 dni) in Biljah (9 dni). V drugem obdobju se bo olistanje pojavilo od 17 do 19 dni prej, v tretjem obdobju pa od 30 (Novo mesto) do 37 dni (Celje, Bilje) prej. Na vseh lokacijah, razen v Lescah, so spremembe časa olistanja divjega kostanja večje kot pri bukvi.

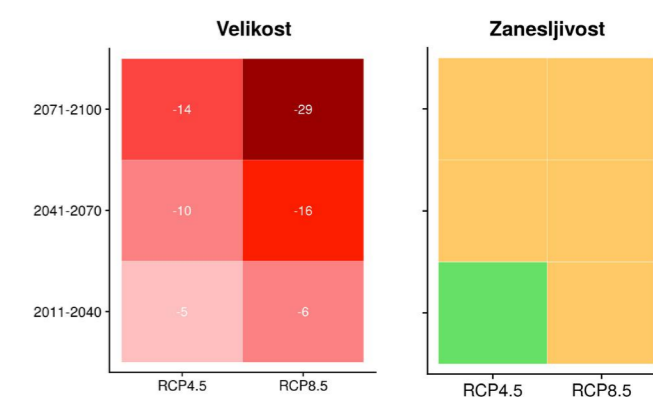
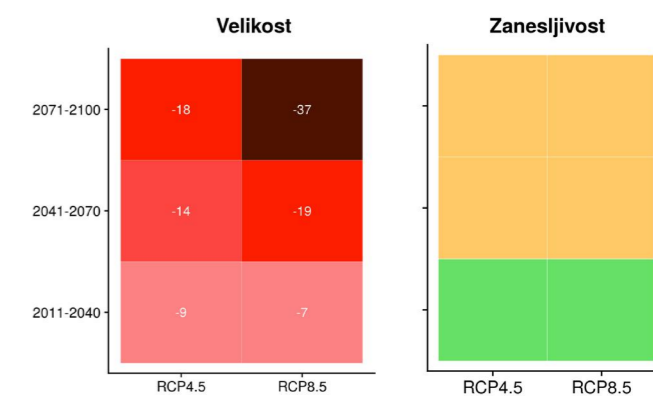
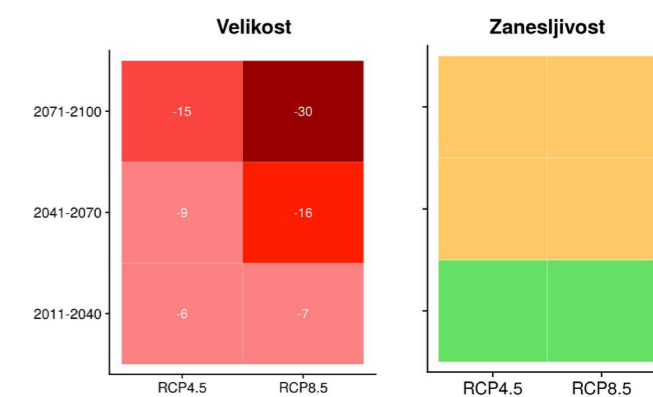
Pri olistanju lipe se v prvem obdobju po scenariju izpustov RCP4.5 značilne spremembe ne pričakujejo (primer za postajo Celje na sliki 5.18). V drugem obdobju bo lipa na večini lokacij olistala od 10 do 11 dni prej, v tretjem pa od 14 do 18 dni prej. Po pesimističnem scenariju izpustov RCP8.5 spremembe ne pričakujemo v Slovenskih Konjicah, drugje pa bo olistanje od 6 do 7 dni zgodnejše. V drugem obdobju bo lipa olistala od 16 do 17 dni prej, v tretjem obdobju pa od 28 do 31 dni prej. Na posamezni lokaciji so spremembe časa olistanja bukke zelo podobne spremembam pri lipi.



Slika 5.17 | Časovni potek spremembe dneva olistanja bukke, divjega kostanja in lipe (od leve proti desni) v Celju do konca 21. stoletja za dva scenarija izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnici največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.



■ 2011-2040 ■ 2041-2070 ■ 2071-2100



■ nizka
■ ni spremembe
■ visoka

Slika 5.18 | Razponi spremembe (levo) ter srednja sprememba in pripadajoča zanesljivost (desno) dneva olistanja bukke, divjega kostanja in lipe (od zgoraj navzdol) v Celju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov

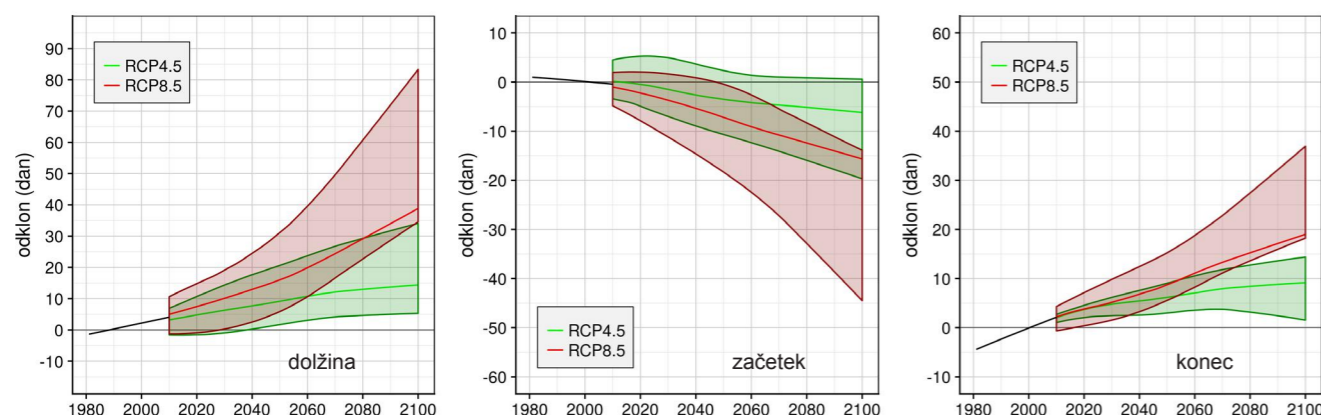
5.2.3.3 Dolžina, začetek in konec rastne dobe

Do konca 21. stoletja se bo dolžina rastne dobe podaljševala na račun zgodnejšega začetka in kasnejšega konca, kar je pričakovano glede na dvig temperature zraka.

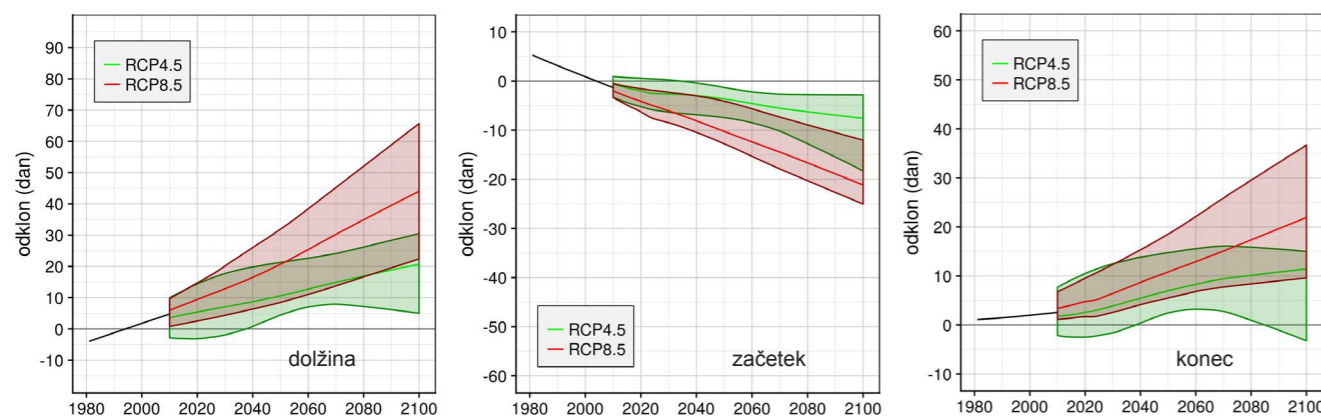
Pri temperaturi praga 5 °C (primer za postajo Celje na sliki 5.19) se bo po zmerno optimističnem scenariju izpustov RCP4.5 dolžina rastne dobe do konca 21. stoletja podaljšala na večini obravnavanih lokacij za od 19 do 26 dni. Podaljšanju dolžine rastne dobe bosta precej enakomerno prispevala zgodnejši začetek in kasnejši konec, pričakuje se, da se bo začetek

premaknil za od 11 do 13 dni, konec pa za od 9 do 12 dni. Po scenariju izpustov RCP8.5 se pričakovano predvideva še večje podaljšanje rastne dobe, in sicer za od 48 do 60 dni. Začetek bo na večini lokacij nastopil od 26 do 40 dni prej, konec pa od 21 do 22 dni kasneje v primerjavi s primerjalnim obdobjem. Po tem scenariju gre podaljševanje rastne dobe predvsem na račun zgodnejšega začetka, še posebej v Biljah in Portorožu.

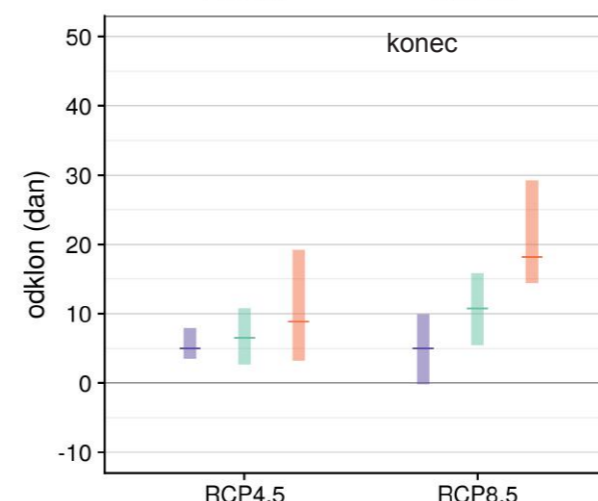
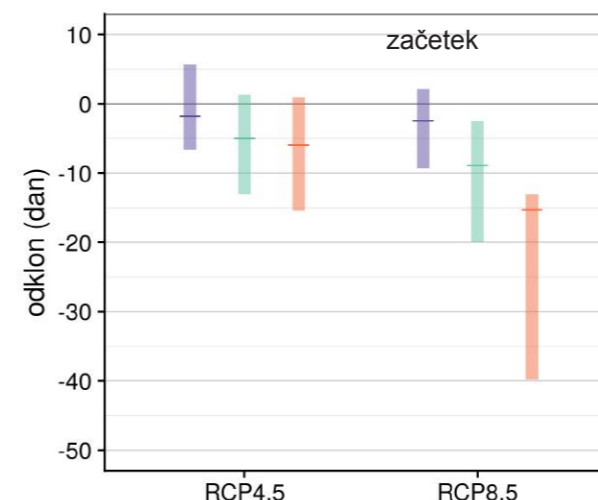
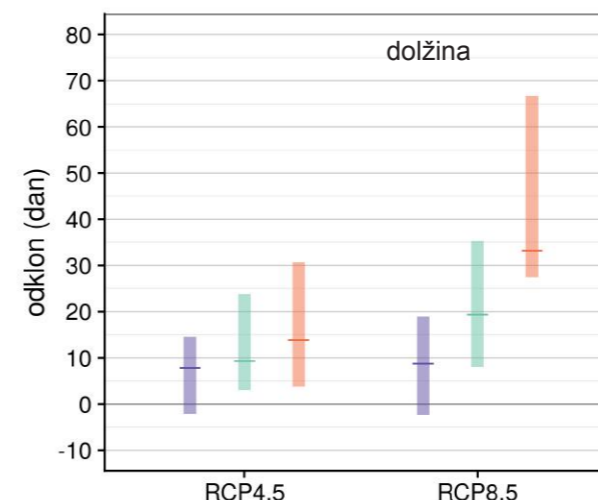
Pri temperaturi praga 10 °C (primer za postajo Celje na sliki 5.20) so spremembe pričakovano manjše. Po scenariju izpustov RCP4.5 se bo dolžina rastne dobe do konca 21. stoletja podaljšala na večini obravnavanih



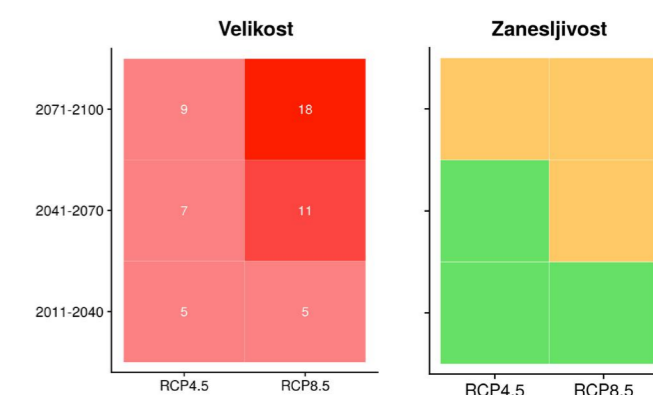
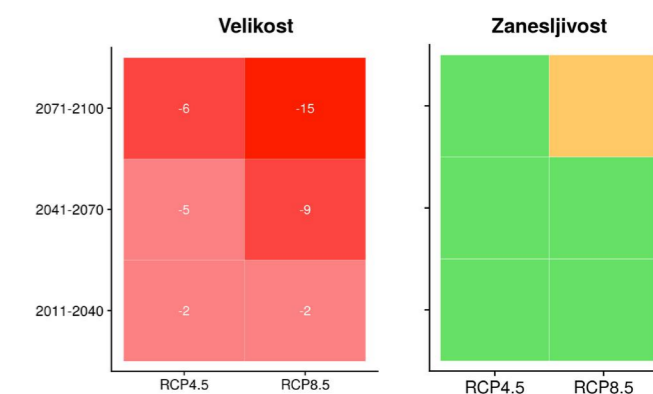
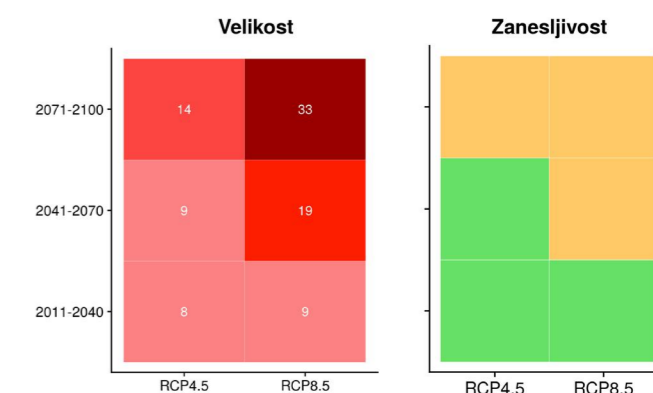
Slika 5.19 | Časovni potek spremembe dolžine rastne dobe ter dneva začetka in konca rastne dobe (od leve proti desni) za temperaturni prag 5 °C v Celju do konca 21. stoletja za dva scenarija izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnici največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.



Slika 5.20 | Časovni potek spremembe dolžine rastne dobe ter dneva začetka in konca rastne dobe (od leve proti desni) za temperaturni prag 10 °C v Celju do konca 21. stoletja za dva scenarija izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnici največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

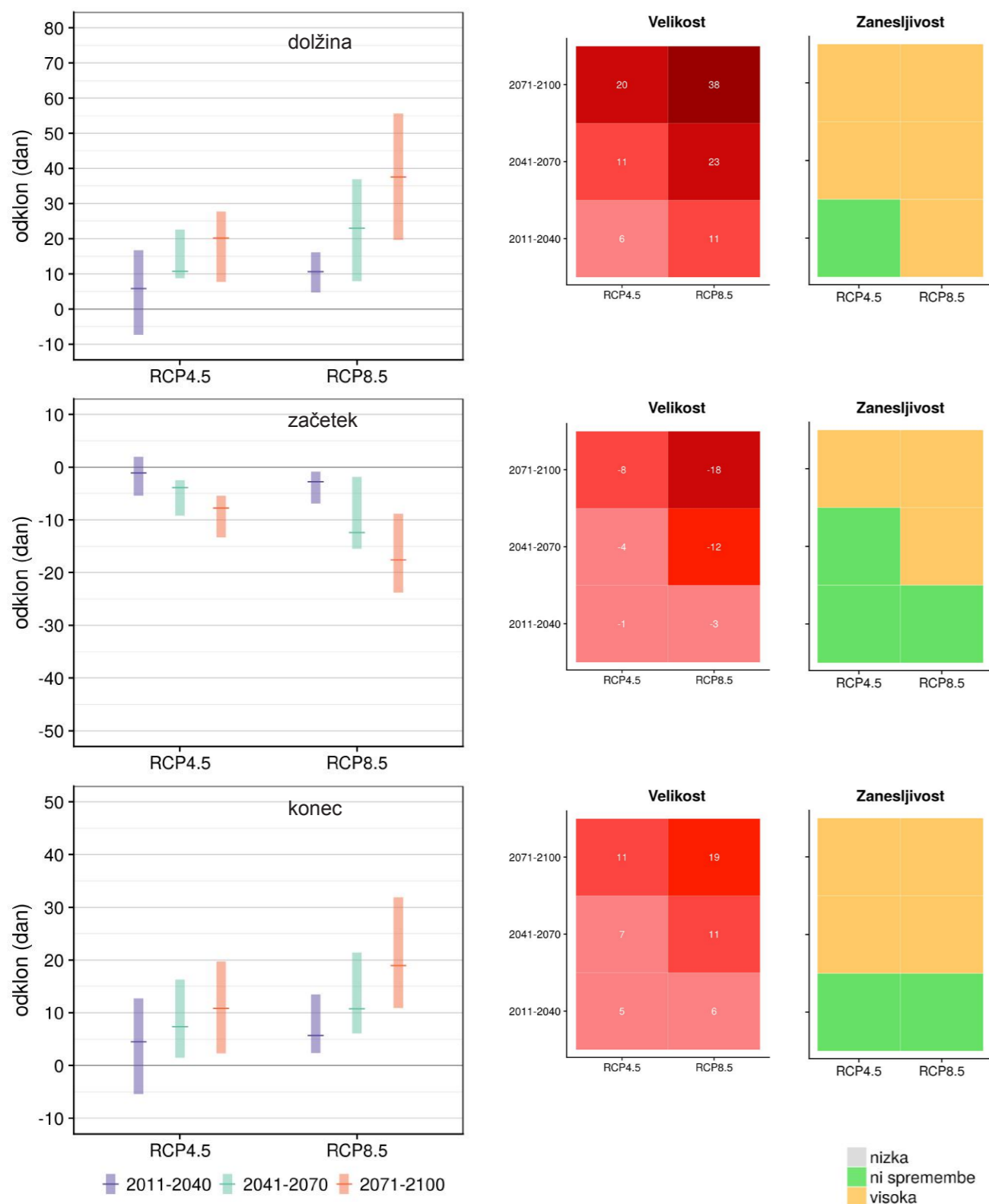


■ 2011-2040 ■ 2041-2070 ■ 2071-2100



■ nizka
■ ni spremembe
■ visoka

Slika 5.21 | Razponi spremembe (levo) ter srednja sprememba in pripadajoča zanesljivost (desno) dolžine rastne dobe ter dneva začetka in konca rastne dobe (od zgoraj navzdol) za temperaturni prag 5 °C v Celju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov



Slika 5.22 | Razponi spremembe (levo) ter srednja sprememba in pripadajoča zanesljivost (desno) dolžine rastne dobe ter dneva začetka in konca rastne dobe (od zgoraj navzdol) za temperaturi prag 10 °C v Celju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov

lokacij za od 13 do 19 dni. Podaljšanju dolžine rastne dobe bo rahlo manj prispeval zgodnejši začetek kot kasnejši konec, pričakuje se, da se bo začetek premaknil za od 7 do 10 dni, konec pa za od 7 do 12 dni. Po pesimističnem scenariju izpustov RCP8.5 se bo do konca 21. stoletja rastna doba podaljšala za od 38 do 45 dni. Začetek bo nastopil od 19 do 25 dni prej, konec pa od 18 do 22 dni kasneje. Po tem scenariju izpustov gre podaljševanje rastne dobe rahlo bolj na račun zgodnejšega začetka, razen v Portorožu, kjer gre na račun kasnejšega konca rastne dobe.

Pri temperaturi praga 5 °C se po v prvem obdobju po zmerno optimističnem scenariju izpustov RCP4.5 na večini obravnavanih lokacij značilne spremembe ne pričakujejo (primer za postajo Celje na sliki 5.21). V drugem obdobju se bo dolžina podaljšala za od 11 do 14 dni. Pri dnevu začetka je značilna sprememba le v Lescah (9 dni) in Portorožu (13 dni), kasnejši dan konca pa je pričakovani od 5 dni v Portorožu do 10 dni v Ljubljani. V tretjem obdobju se bo rastna doba podaljšala za od 17 do 23 dni. Začetek bo nastopil od 10 do 14 dni prej, konec pa od 7 do 10 dni kasneje. Tudi po scenariju izpustov RCP8.5 v prvem obdobju na večini lokacij spremembe niso pričakovane. V drugem obdobju se bo dolžina podaljšala za 19 dni v Slovenskih Konjicah in Celju, 22 v Lescah, 30 v Portorožu, 33 v Biljah in na drugih lokacijah za od 25 do 28 dni. Začetek bo nastopil od 13 do 15 dni prej, konec pa od 10 do 13 dni kasneje. V tretjem obdobju se pričakuje podaljšanje rastne dobe za od 37 do 49 dni. Začetek bo nastopil od 23 do 27 dni prej, konec pa od 18 do 22 dni kasneje.

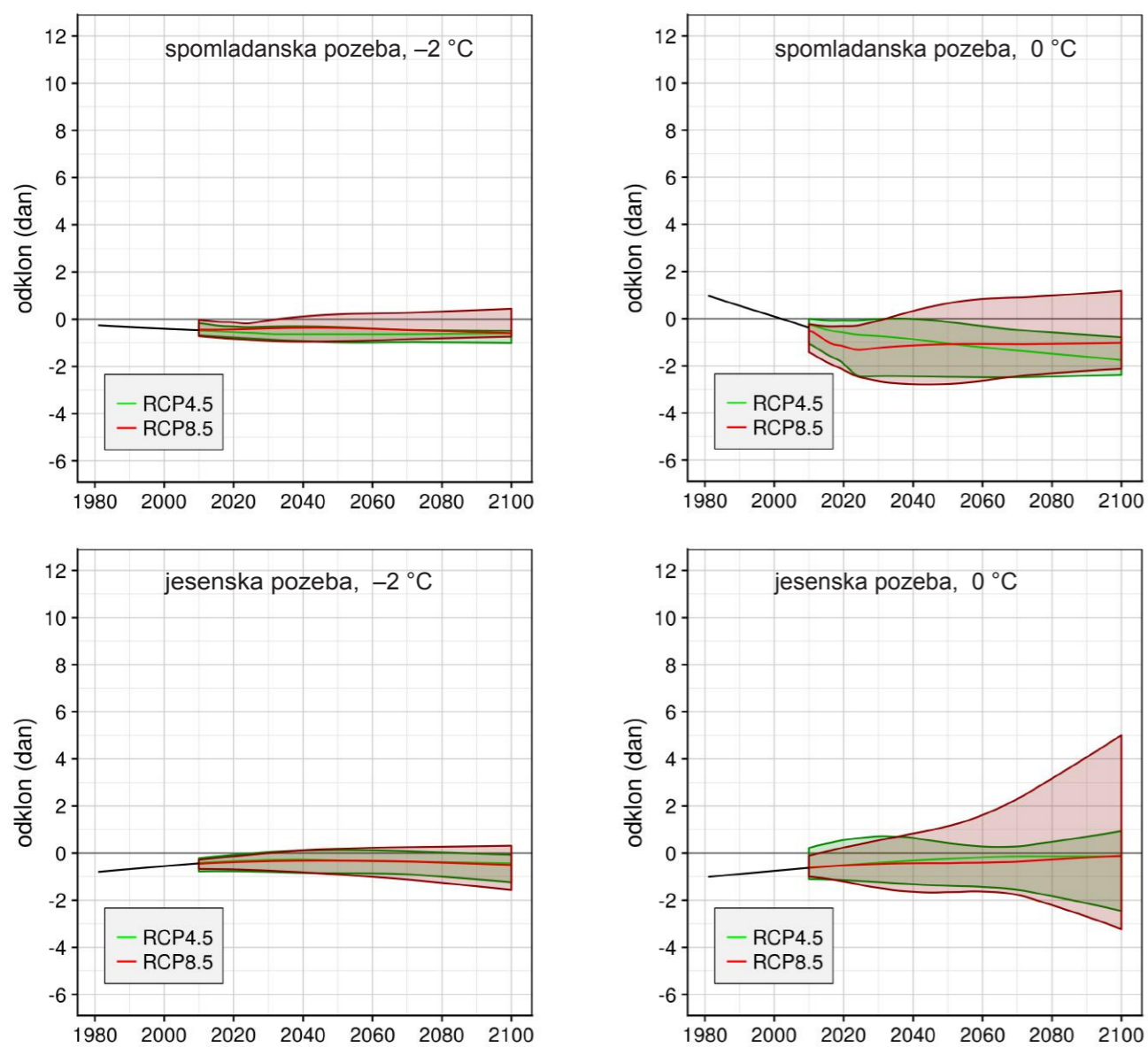
Pri temperaturi praga 10 °C (primer za postajo Celje na sliki 5.22) se v prvem obdobju po scenariju izpustov RCP4.5 značilne spremembe ne pričakujejo, tako pri dolžini kot pri dnevu začetka in konca. V drugem obdobju se pričakuje sprememba dolžine od 10 do 13 dni. Pri dnevu začetka je značilna sprememba le v Ljubljani (6 dni), Portorožu (8 dni) in Biljah (10 dni), pri dnevu konca pa v Biljah in Slovenskih Konjicah (6 dni) ter v Celju in Lescah (7 dni). V tretjem obdobju se bo rastna doba podaljšala za od 12 do 20 dni. Zgodnejši začetek je značilen le za Lesce in Slovenske Konjice (7 dni), Bilje in Celje (8 dni) ter Portorož (13 dni). Konec rastne dobe bo nastopil od 7 do 12 dni kasneje. Po pesimističnem scenariju RCP8.5 se bo v prvem obdobju dolžina podaljšala za od 8 do 11 dni, pri začetku ni značilne spremembe, prav tako ne pri koncu. V drugem obdobju se bo na večini obravnavanih lokacij dolžina podaljšala za od 18 do 21 dni. Začetek bo nastopil od

9 do 11 dni prej, konec pa od 8 do 11 dni kasneje. V tretjem obdobju se pričakuje podaljšanje rastne dobe za od 31 do 36 dni. Začetek bo nastopil od 15 do 18 dni prej, konec pa od 17 do 19 dni kasneje.

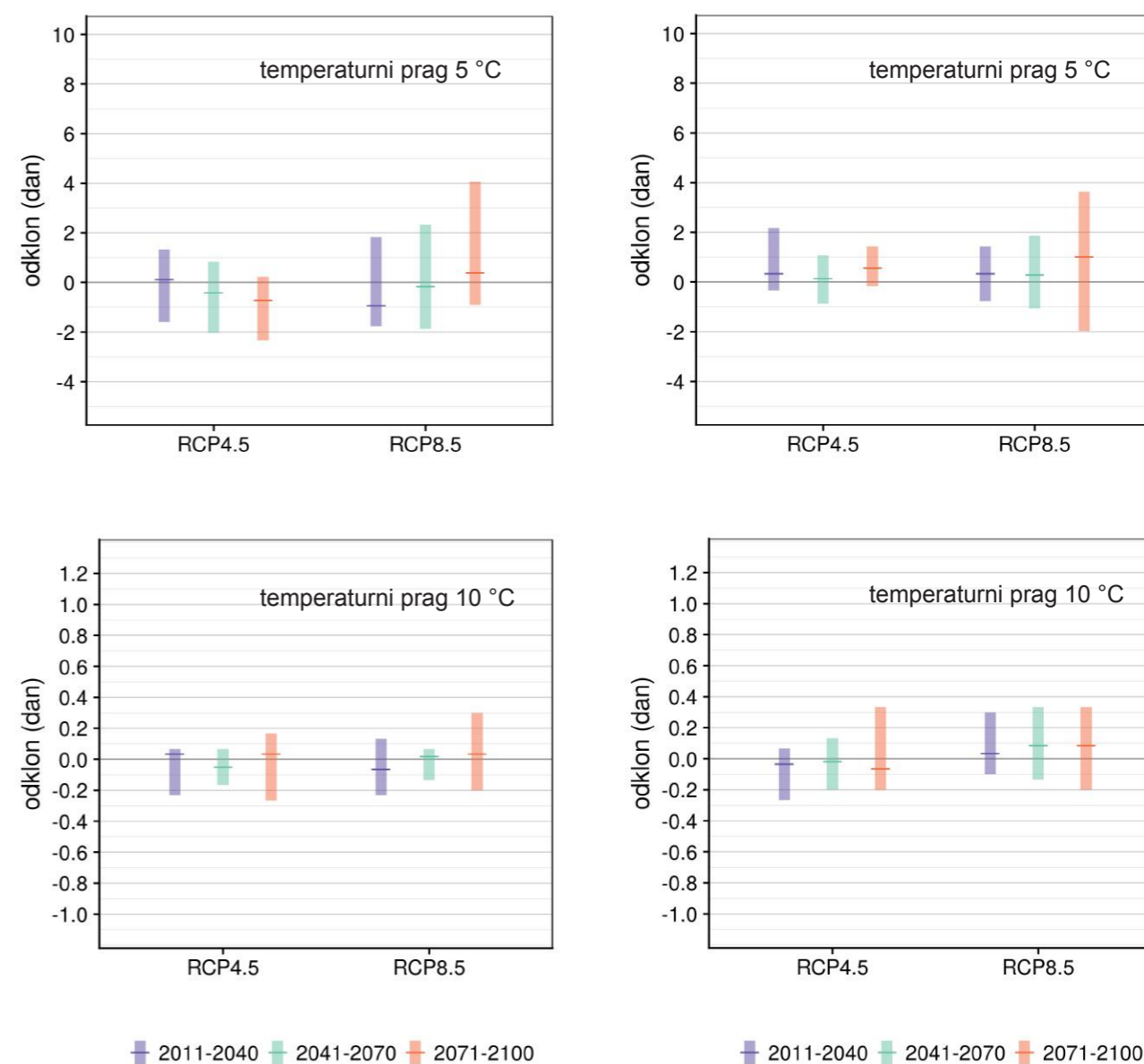
5.2.3.4 Pozeba

Do konca 21. stoletja se sprememba števila dni s spomladansko in jesensko pozebo v rastni dobi kljub njenemu podaljšanju ne pričakuje (primer za postajo Celje na slikah od 5.23 do 5.28). Za jesensko pozebo je izjema le Portorož, kjer se pri temperaturi praga 5 °C pričakuje zmanjšanje števila dni, in sicer za približno 1 dan pri najnižji temperaturi zraka, nižji od -2 °C, in 2 dneva pri 0 °C.

Čeprav se bo začetek rastne dobe pojavljal čedalje prej, konec pa čedalje kasneje, spremembe varnostne rezerve pred pozebo v 21. stoletju niso pričakovane, saj se bo zaradi dviga temperature zraka tudi zadnja spomladanska pozeba pojavljala čedalje prej, jesenska pa kasneje.

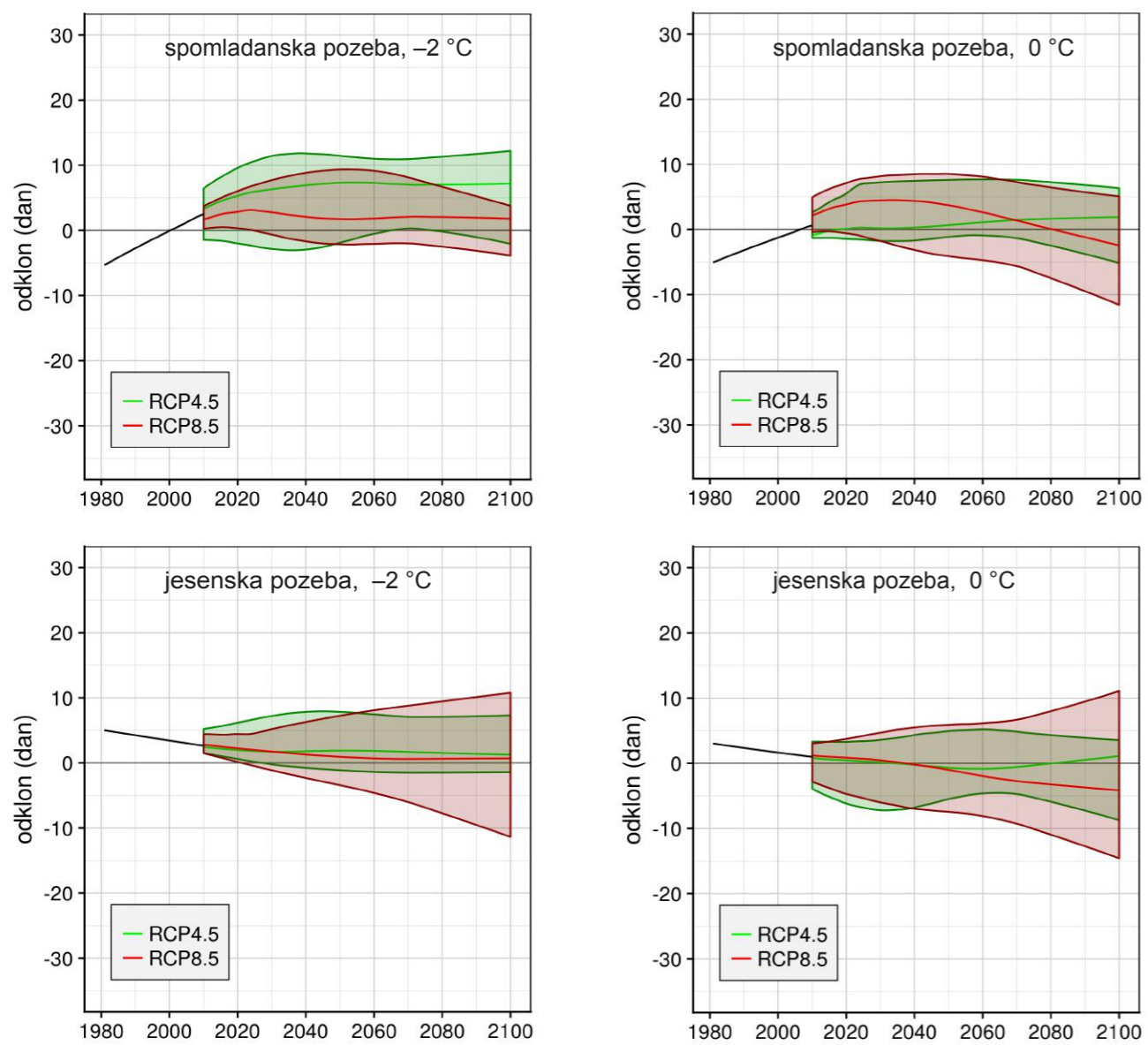


Slika 5.23 | Časovni potek spremembe števila dni s spomladansko (zgoraj) in jesensko (spodaj) pozebo v rastni dobi za temperaturni prag $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri najnižji temperaturi zraka, nižji od $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (levo) oziroma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (desno), v Celju do konca 21. stoletja za dva scenarija izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnic največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

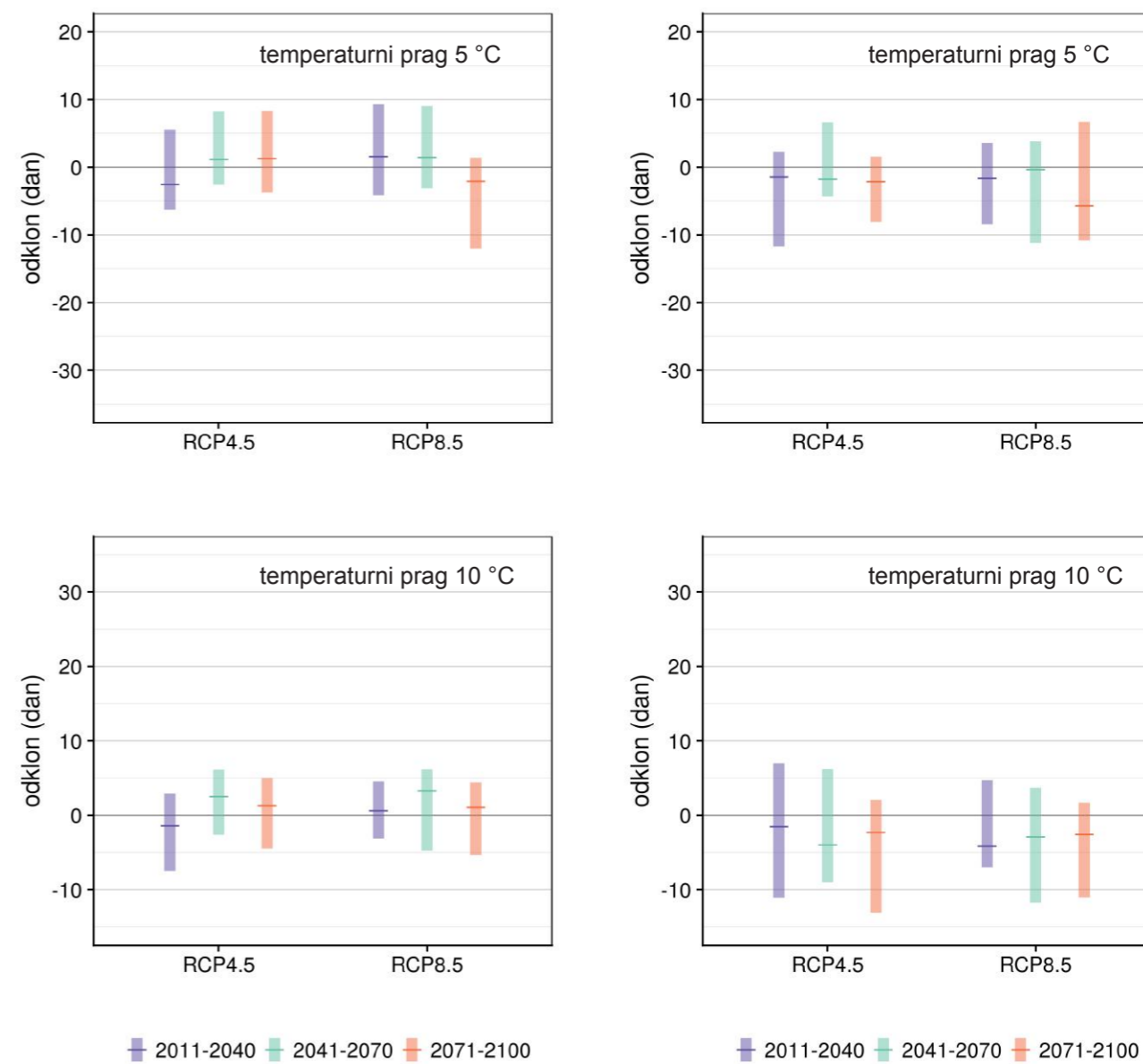


Slika 5.24 | Razponi spremembe števila dni s spomladansko pozebo v rastni dobi za temperaturni prag $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zgoraj) in $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (spodaj) pri najnižji temperaturi zraka, nižji od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, v Celju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov

Slika 5.25 | Razponi spremembe števila dni z jesensko pozebo v rastni dobi za temperaturni prag $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zgoraj) in $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (spodaj) pri najnižji temperaturi zraka, nižji od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, v Celju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov



Slika 5.26 | Časovni potek spremembe varnostne rezerve pred spomladansko (zgoraj) in jesensko (spodaj) pozebo za temperaturni prag 5 °C pri najnižji temperaturi zraka, nižji od -2 °C (levo) oziroma 0 °C (desno), v Celju do konca 21. stoletja za dva scenarija izpustov, vključno z razponi odstopanj. Prikazan je odklon od povprečja v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnic največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.



Slika 5.27 | Razponi spremembe varnostne rezerve pred spomladansko pozebo za temperaturni prag 5 °C (zgoraj) in 10 °C (spodaj) pri najnižji temperaturi zraka, nižji od 0 °C, v Celju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov

Slika 5.28 | Razponi spremembe varnostne rezerve pred jesensko pozebo za temperaturni prag 5 °C (zgoraj) in 10 °C (spodaj) pri najnižji temperaturi zraka, nižji od 0 °C, v Celju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za dva scenarija izpustov

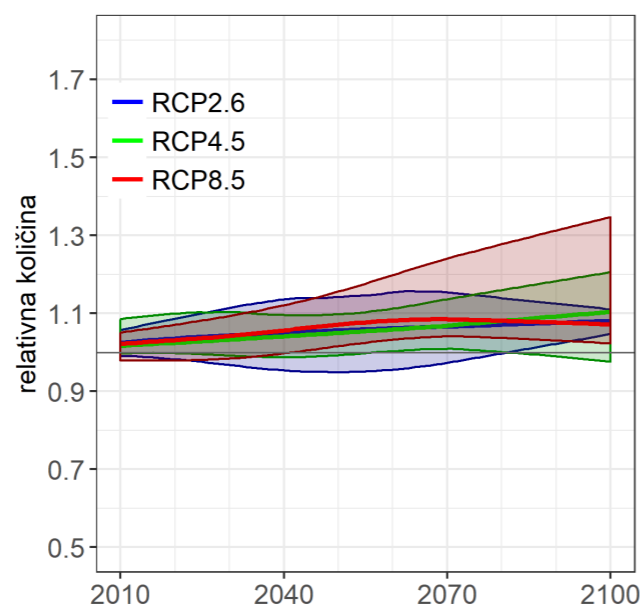
5.3 SPREMEMBE PADAVIN

Višina padavin na letni ravni in pozimi se bo po zmerno optimističnem in pesimističnem scenariju izpustov sredi ali konec 21. stoletja znatno povečala. V primeru obeh scenarijev izpustov bo povprečno povečanje letnih padavin konec stoletja v primerjavi z obdobjem 1981–2010 do 20 %. Še bolj se bodo padavine povečale pozimi, nekoliko bolj na vzhodu države. Že v sredini stoletja se bodo v vzhodni Sloveniji zimske padavine povečale do 40 %, do konca stoletja pa bo v primeru pesimističnega scenarija izpustov tudi več kot 60 % več zimskih padavin. V ostalih letnih časih je smer in velikost spremembe padavin zelo odvisna od scenarija izpustov in deloma modela, spremembe pa so večinoma manjše od naravne spremenljivosti padavin. Kazalniki, s katerimi merimo izjemne padavine, kažejo, da se bosta povečali tako jakost kot pogostost izjemnih padavin, povečanje pa bo najbolj izrazito v primeru pesimističnega scenarija izpustov.

5.3.1 Spremembe povprečnih padavinskih razmer

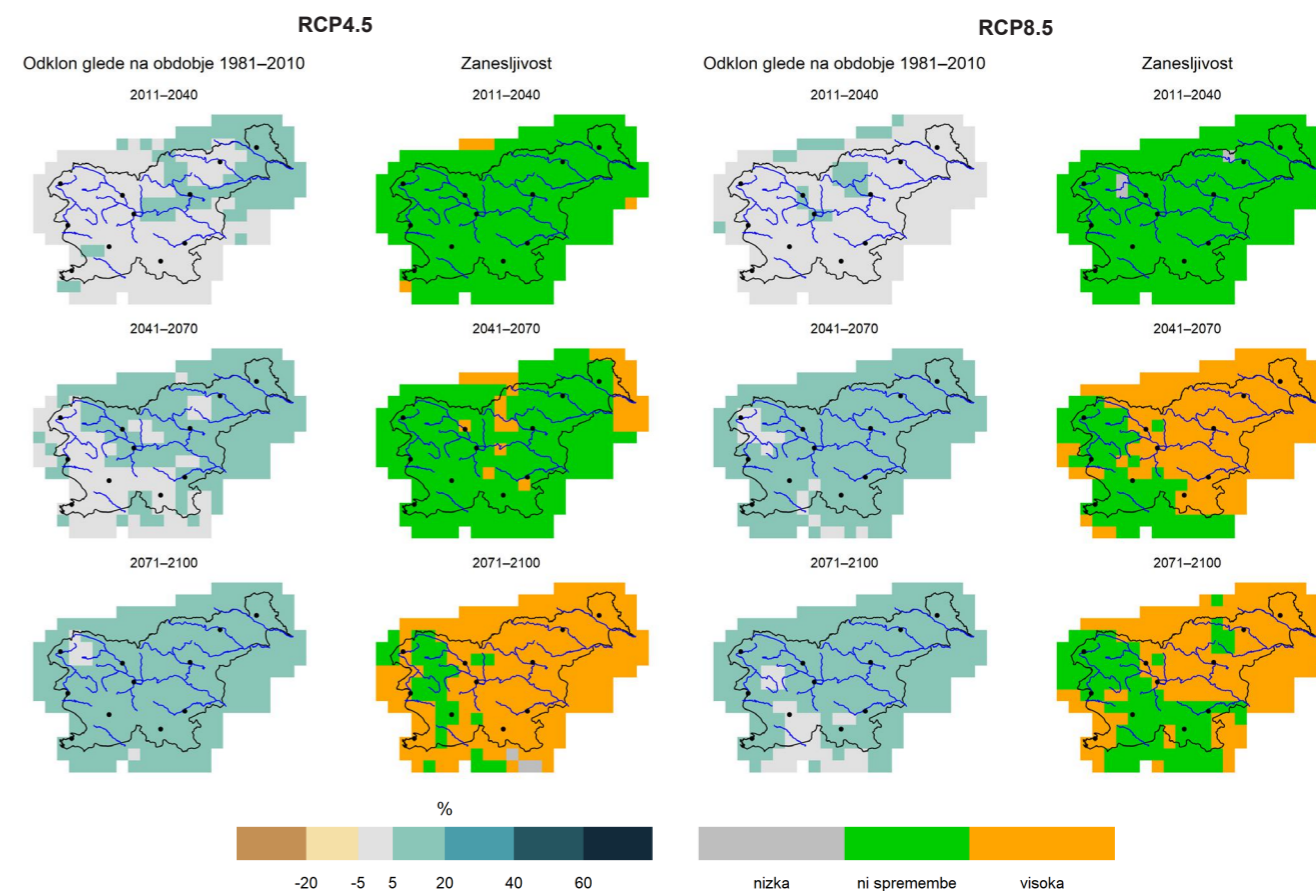
V nasprotju s temperaturo so scenariji za spremembe padavin manj zanesljivi, saj so te časovno in prostorsko bolj raznolike. Predvidene spremembe padavin v Sloveniji niso izrazite, saj leži na območju Evrope, kjer signal spremembe padavin zamenja smer. V severni Evropi bodo padavine na letni ravni naraščale, v južni bodo upadale. Iz lege na navedenem prehodnem območju izvirajo tudi manjša zanesljivost projekcij spremembe padavin in razlike med spremembami pri posameznih scenarijih izpustov. Medtem ko optimistični scenarij izpustov RCP2.6 na letni in državni ravni v nobenem obdobju ne predvideva statistično značilnih sprememb, pesimistični scenarij izpustov RCP8.5 sprva predvideva naraščanje padavin po vsej državi, v drugi polovici 21. stoletja pa se negotovost trenda močno poveča (slika 5.29). V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov RCP4.5 višina padavin vseskozi raste, v začetnem obdobju na letni ravni so spremembe zelo majhne, vendar se signal z odmikom v prihodnost stopnjuje. Z začetkom drugega obdobja se bo območje naraščanja padavin na letni ravni začelo širiti z vzhoda na zahod (slika 5.30, levo), vendar je sprememba zanesljiva le na skrajnem severovzhodu in v posameznih mrežnih točkah v notranjosti. Do leta 2100 je na celotnem območju Slovenije z izjemo Julijskih Alp pričakovan porast povprečnih letnih padavin za približno 10 % glede na obdobje 1981–2010, pri čemer je sprememba bolj zanesljiva v vzhodni polovici Slovenije.

Na sezonski ravni je signal spremembe padavin po velikosti bolj izražen, a je srednja vrednost (mediana) sprememb večinoma manj kot 20 % (slika 5.31). V



Slika 5.29 | Časovni potek spremembe letne višine padavin do konca 21. stoletja v Sloveniji za tri scenarije, vključno z razponi odstopanj. Prikazana je relativna vrednost glede na povprečje v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnic največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov RCP4.5 bo naraščanje padavin najbolj izrazito pozimi, za kar je zanesljivost deloma visoka. Spomladi in jeseni signal prav tako kaže naraščanje padavin, vendar manj zanesljivo. Poleti različni modeli kažejo bodisi majhne spremembe bodisi spremembe v različni smeri, zato je signal spremembe majhen ali negotov, pri čemer v prvih dveh obdobjih kaže sušenje, proti koncu stoletja pa se obrne in kaže povečanje padavin

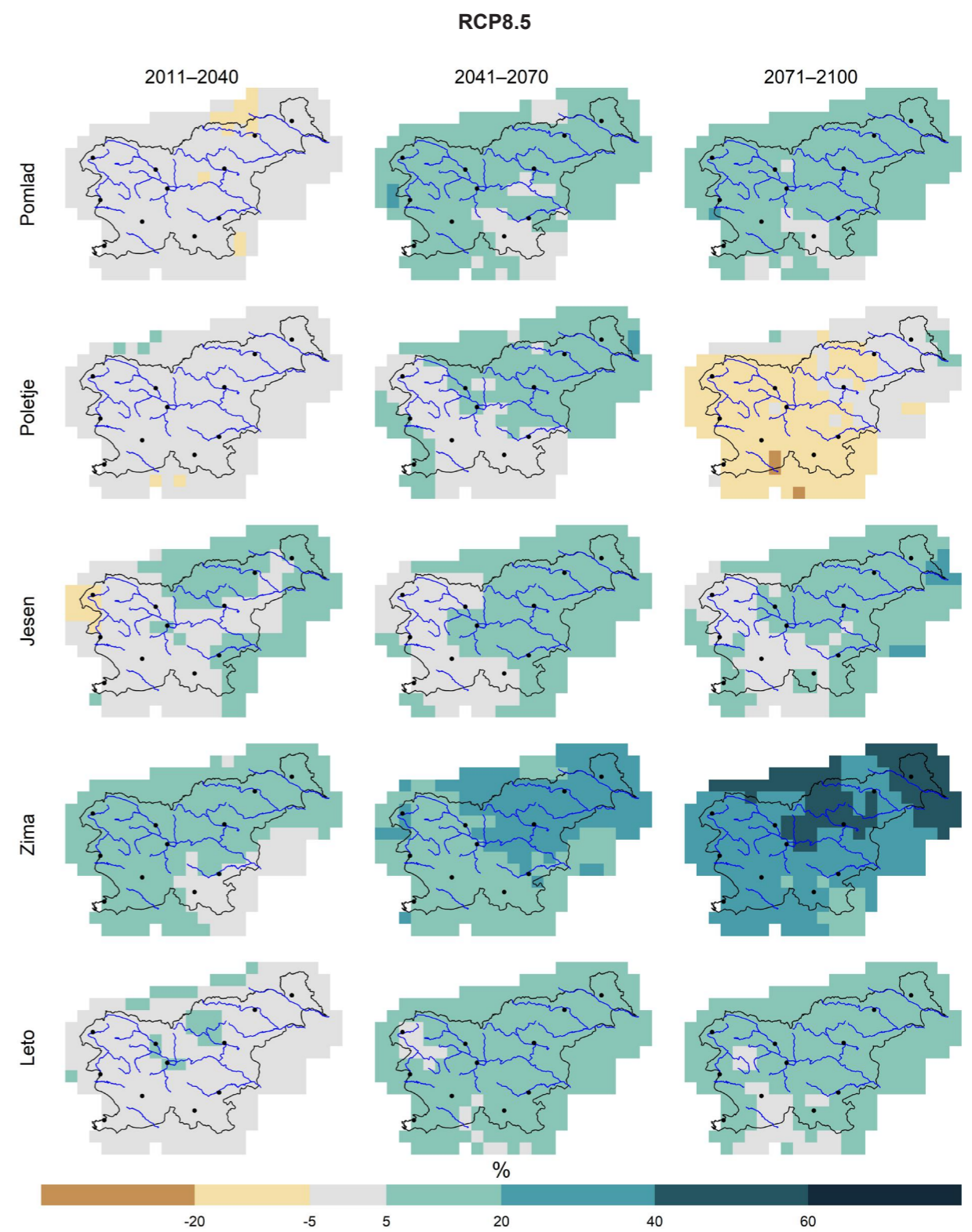
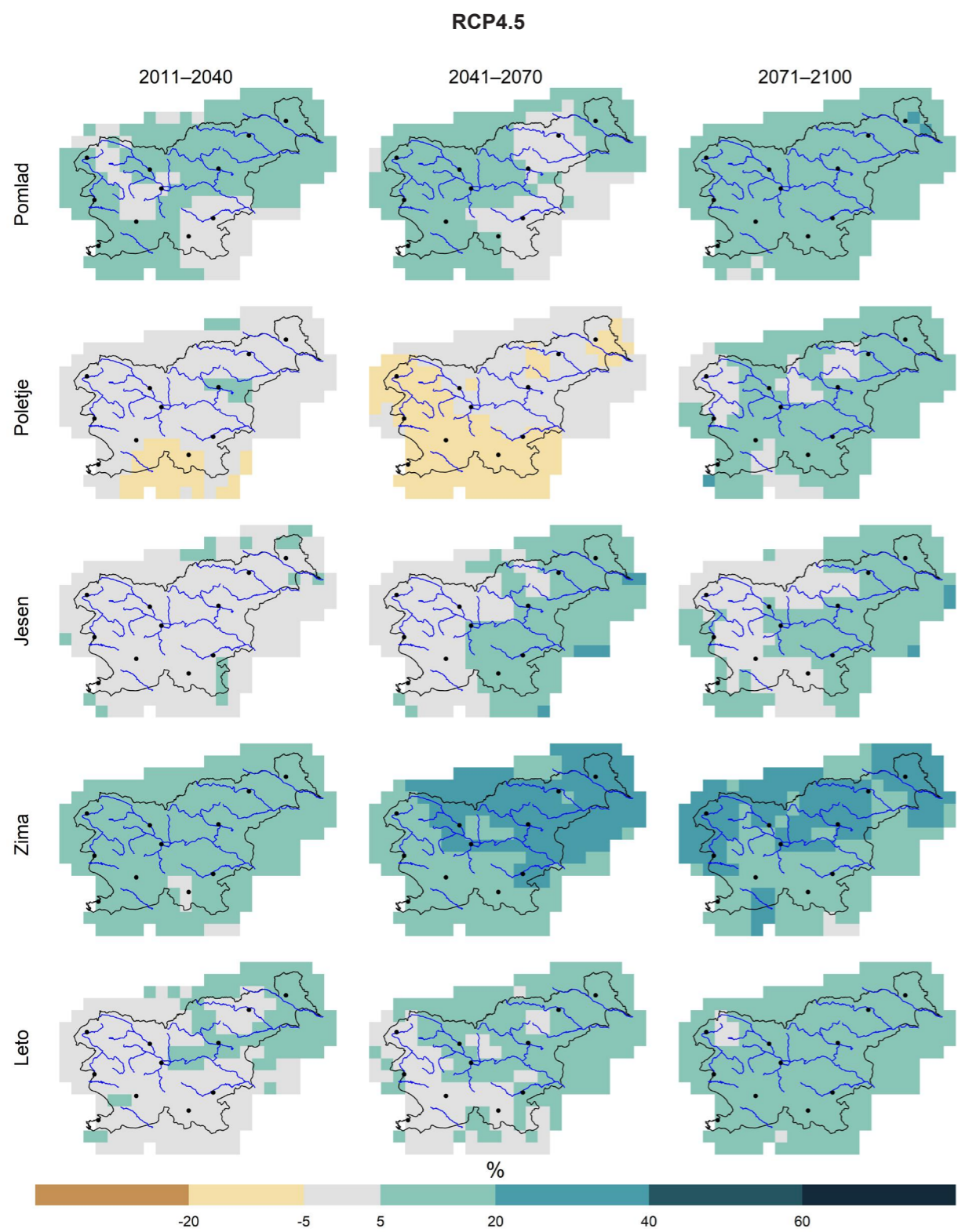


Slika 5.30 | Sprememba povprečne letne višine padavin v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija izpustov RCP4.5 (levo) in 8.5 (desno)

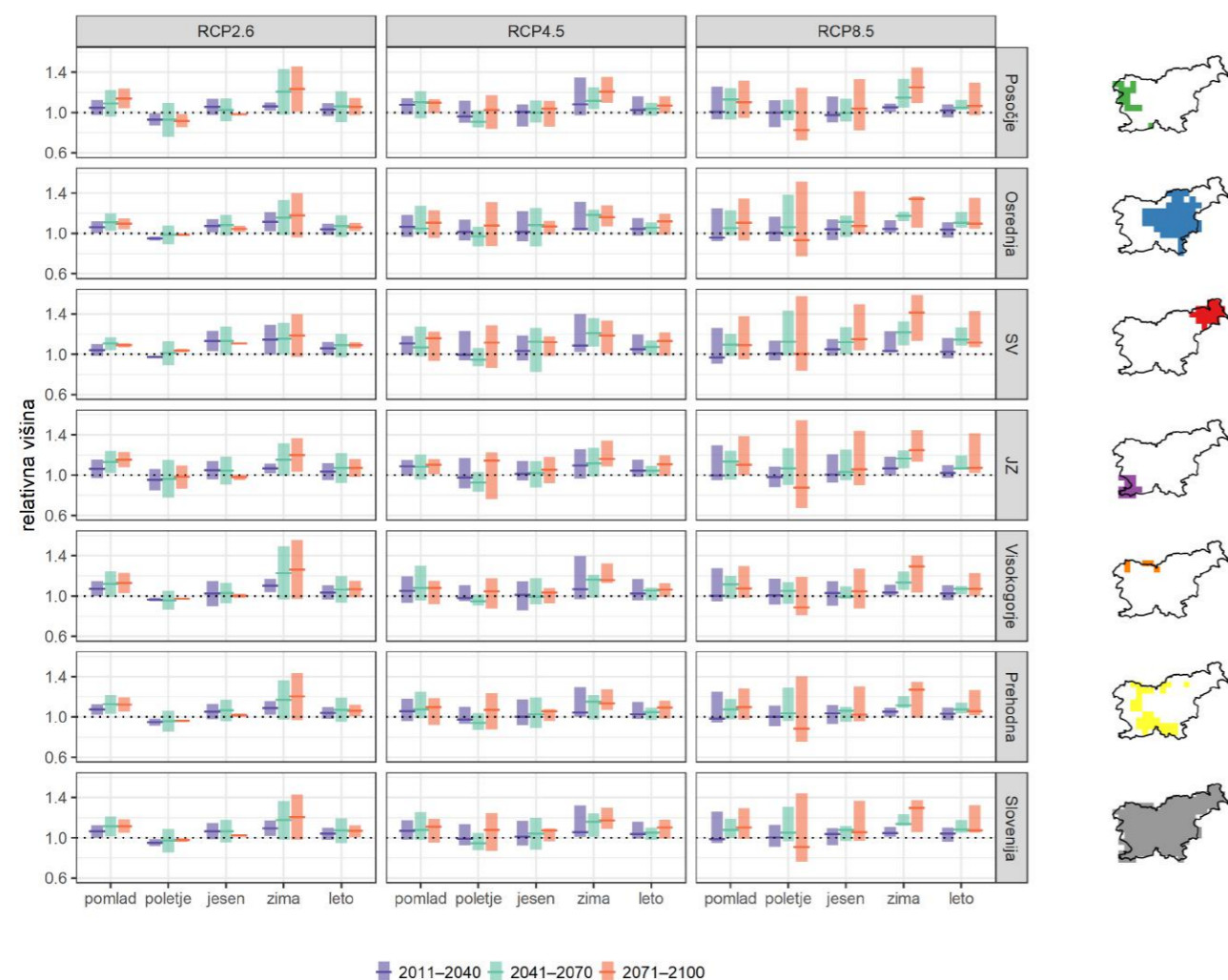
(slika 5.31, levo). V pesimističnem scenariju izpustov RCP8.5 (slika 5.31, desno) so signali sprememb za pomlad, jesen in zimo podobni kot v zmerno optimističnem scenariju, pri čemer je signal za povečanje zimskih padavin še bolj izražen in zanesljiv kot v scenariju izpustov RCP4.5. Tudi za pesimistični scenarij izpustov je podobno kot za zmerno optimistični scenarij signal spremembe padavin poleti v začetnih obdobjih zelo majhen, proti koncu stoletja pa zelo negotov. Je pa smer nakazanih sprememb v primerjavi z zmerno optimističnim scenarijem izpustov obrnjena, sredi stoletja kaže na povečanje, proti koncu pa na zmanjšanje padavin. Sezonske razlike in visoka negotovost izvirajo iz premikanja prehodnega območja padavinskega signala (kjer se predznak spremembe obrne), pozimi se bo to namreč nahajalo v južni, poleti pa v severni Evropi. Z izjemo poletja je v drugih letnih časih ob koncu stoletja predvidena večja višina padavin, vendar z gotovostjo lahko potrdimo le signal za zimo.

Predznak sezonskih sprememb padavin je le deloma odvisen od poteka izpustov toplogrednih plinov, bolj se razlikuje med posameznimi modeli. Navidezna velika razlika v poteku poletne višine padavin po scenarijih RCP4.5 in RCP8.5 je posledica sorazmerno velike negotovosti povprečnih vrednosti; zanesljivost spremembe po nobenem od scenarijev ni visoka. Po drugi strani je značilnost povečanja zimskih padavin do konca 21. stoletja odvisna od scenarija; po RCP2.6 so spremembe majhne, pri srednjem scenariju je ob koncu stoletja signal že deloma zanesljiv, pri RCP8.5 pa je signal povečanja padavin ob koncu stoletja povsod po Sloveniji zanesljiv. Zimsko naraščanje padavin ne pomeni povečane možnosti za sneg, saj bodo s hkrati naraščajočo temperaturo zraka snežne padavine najverjetneje postale čedalje manj pogoste.

Na letni ravni spremembe povprečnih padavin ne kažejo bistvenih regionalnih razlik, razpršenost signala spremembe je za RCP4.5 majhna (slika 5.32).



Slika 5.31 | Sprememba povprečne višine padavin po meteoroloških letnih časih in za celo leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za scenarija izpustov RCP4.5 (zgoraj) in RCP8.5 (naslednja stran). Prikazan je relativni odklon višine padavin od povprečja v primerjalnem obdobju 1981–2010.



Slika 5.32 | Povprečni razponi sprememb povprečne višine padavin v posameznih regijah po meteoroloških letnih časih in za celo leto za tri scenarije. Vodoravna poudarjena črta v stolpcu prikazuje mediano ansambla modelskih rezultatov, stolpec pa razpon vseh simulacij modelskega ansambla.

Negotovost je večja za signal padavin na sezonski ravni, predvsem pozimi v prvem projekcijskem obdobju in poleti v zadnjem. Medtem ko je predznak signala za zimo pri vseh modelih pozitiven, razpršenost signala spremembe padavin za poletni čas sega v obe smeri. Signali med posameznimi regijami si med seboj niso izrazito nasprotujoči.

5.3.2 Spremembe kazalnikov izjemnih padavinskih dogodkov

5.3.2.1 Suha in mokra obdobja

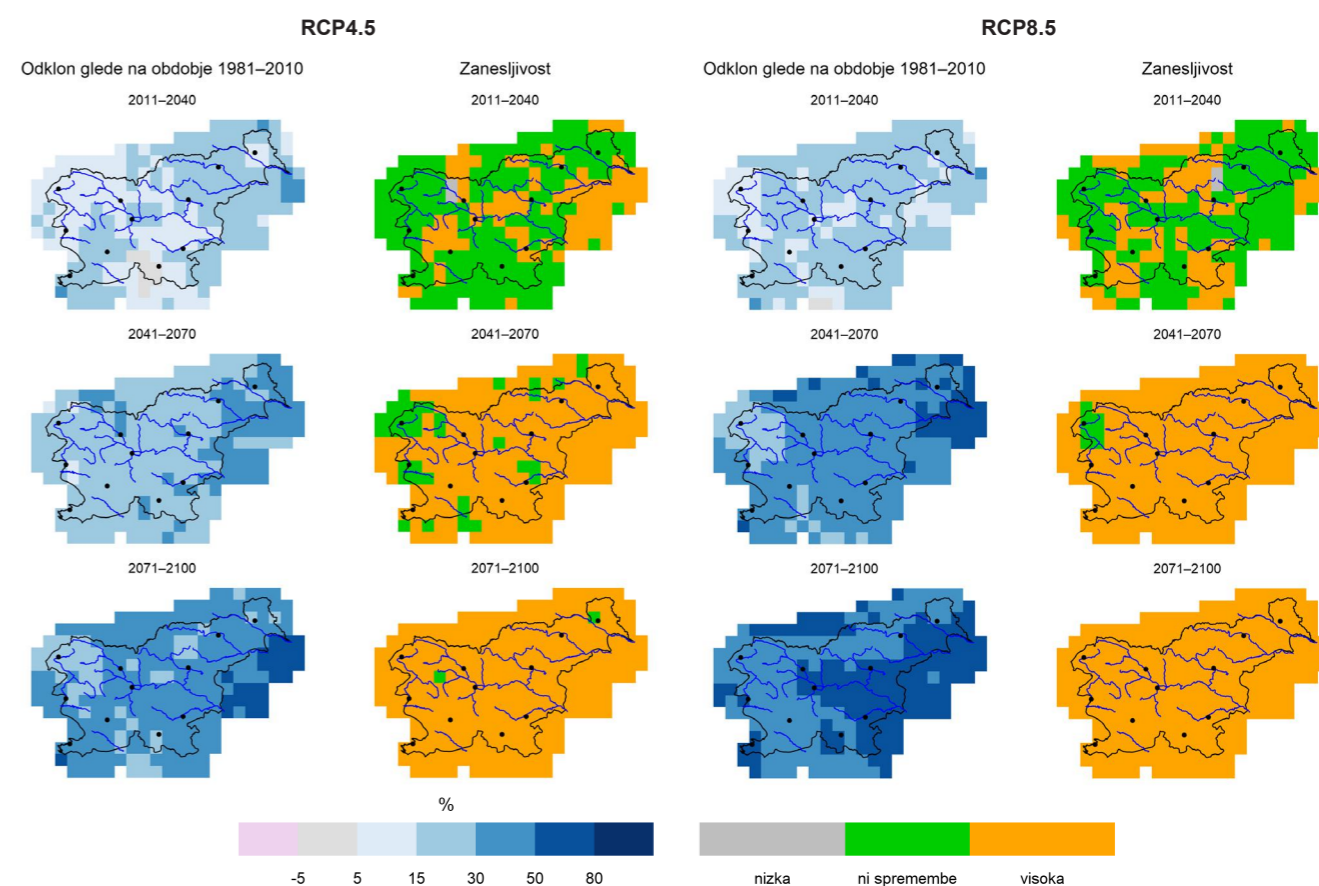
Ob znani spremembi padavin je pomemben podatek, kako se bo spremenila dolžina suhih in mokrih obdobj, ki posredno kažejo možnost za obe hidrološki skrajnosti, suše in poplave. Kazalnika dolžine zaporednih mokrih in suhih dni ne kažeta večjih sprememb za noben scenarij izpustov (zemljevidi so prikazani v dodatku).

5.3.2.2 Spremembe višine padavin ob močnejših nalivih

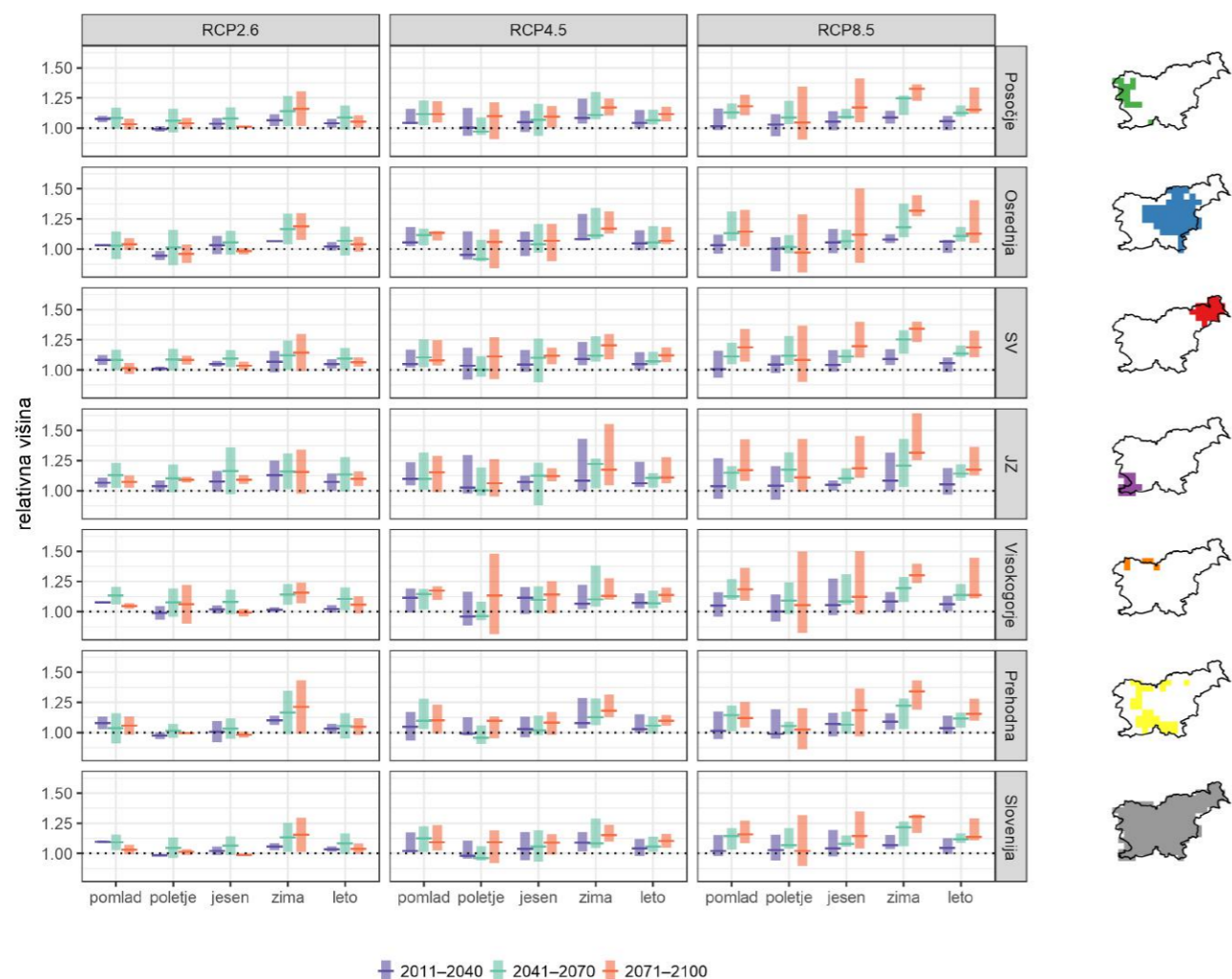
Spremembe v jakosti najmočnejših padavin, kar nam meri kazalnik letne vsote dnevne višine padavin, ko ta preseže 95. centil primerjalnega obdobja 1981–2010,

so občutne. Za prvo obdobje (2011–2040) je ne glede na scenarij ta sprememba še tako majhna, da je ne moremo ločiti od naravne spremenljivosti (slika 5.33). V naslednjih dveh tridesetletnih obdobjih pa se bo jakost najmočnejših padavin postopno večala, nekoliko manj v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov (RCP4.5) in nekoliko več v primeru pesimističnega scenarija izpustov (RCP8.5). V obeh primerih bo povečanje večje na vzhodu države. Ob koncu stoletja se bo izdatnost najmočnejših padavin po zmerno optimističnem scenariju na vzhodu države povečala do 50 %, po pesimističnem scenariju pa tudi do 80 %. Spremembe tega kazalnika torej kažejo, da bomo v prihodnosti dobili več padavin z jakostjo, ki jo v današnjem podnebjju pojmujejo kot izjemno.

Oba kazalnika, ki opisujeta značilnosti izjemnih padavin (najvišje mesečne vrednosti dnevni in petdnevni padavin), kažeta, da se bodo izjemne padavine povečale. Enodnevne izjemne padavine bodo v prihodnosti



Slika 5.33 | Sprememba povprečne letne višine padavin iz najbolj mokrih dni – ko dnevna višina padavin presega 95. centil – v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)



Slika 5.34 | Povprečni razponi sprememb povprečne največje dnevne višine padavin na mesec v posameznih regijah po meteoroloških letnih časih in za celo leto za tri scenarije. Vodoravna poudarjena črta v stolpcu prikazuje mediano ansambla modelskih rezultatov, stolpec pa razpon vseh simulacij modelskega ansambla.

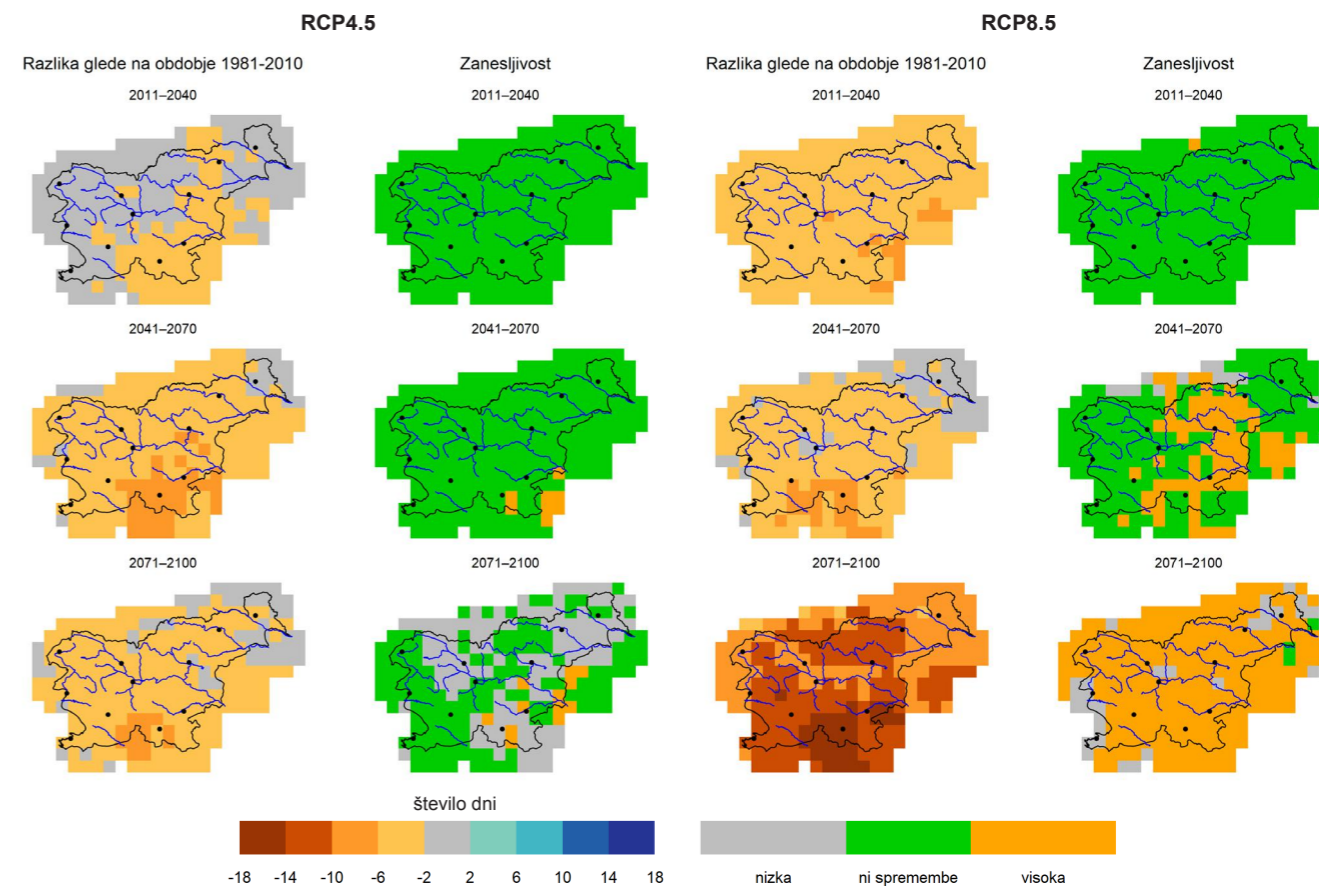
na celotnem obravnavanem območju Slovenije spomladi in pozimi obilnejše kot v primerjalnem obdobju 1981–2010 (slika 5.34). Najbolj je signal spremembe negotov za poletje, kjer nekatere simulacije kažejo tudi zmanjšanje enodnevnih izjemnih padavin. Za višino petdnevnih mesečnih najobilnejših padavin lahko na območju celotne države trdimo, da se bo glede na vse scenarije v zimskih mesecih zagotovo povečala. Signali spremembe so podobni tistim za dnevne izjemne padavine. Tudi v tem primeru so ocene za poletne mesece najbolj negotove.

5.3.2.3 Spremembe števila padavinskih dni

V primeru najbolj optimističnega scenarija RCP2.6 ne bo prišlo do večjih sprememb v številu dni z dnevno višino padavin nad 0,1, 1, 20 in 50 mm. Vse spremembe so manjše kot naravna spremenljivost posameznih spremenljivk.

Število dni s padavinami nad 0,1 mm

Padavinski dan je opredeljen kot dan, ko pade vsaj 0,1 mm padavin. Po zmerno optimističnem scenariju izpustov RCP4.5 se bo število padavinskih dni zmanjšalo samo poleti sredi stoletja, sicer sprememb



Slika 5.35 | Sprememba povprečnega števila dni na leto z več kot 0,1 mm padavin v treh projekcijskih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010 in zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

ni pričakovati (slika 5.35, levo). Precej večje spremembe pa lahko pričakujemo v primeru pesimističnega scenarija izpustov RCP8.5 (slika 5.35, desno). Na letni ravni se bo statistično značilno zmanjšalo število padavinskih dni že sredi stoletja, do konca stoletja se bo signal še stopnjeval. Spremembe so zanesljive na območju celotne države.

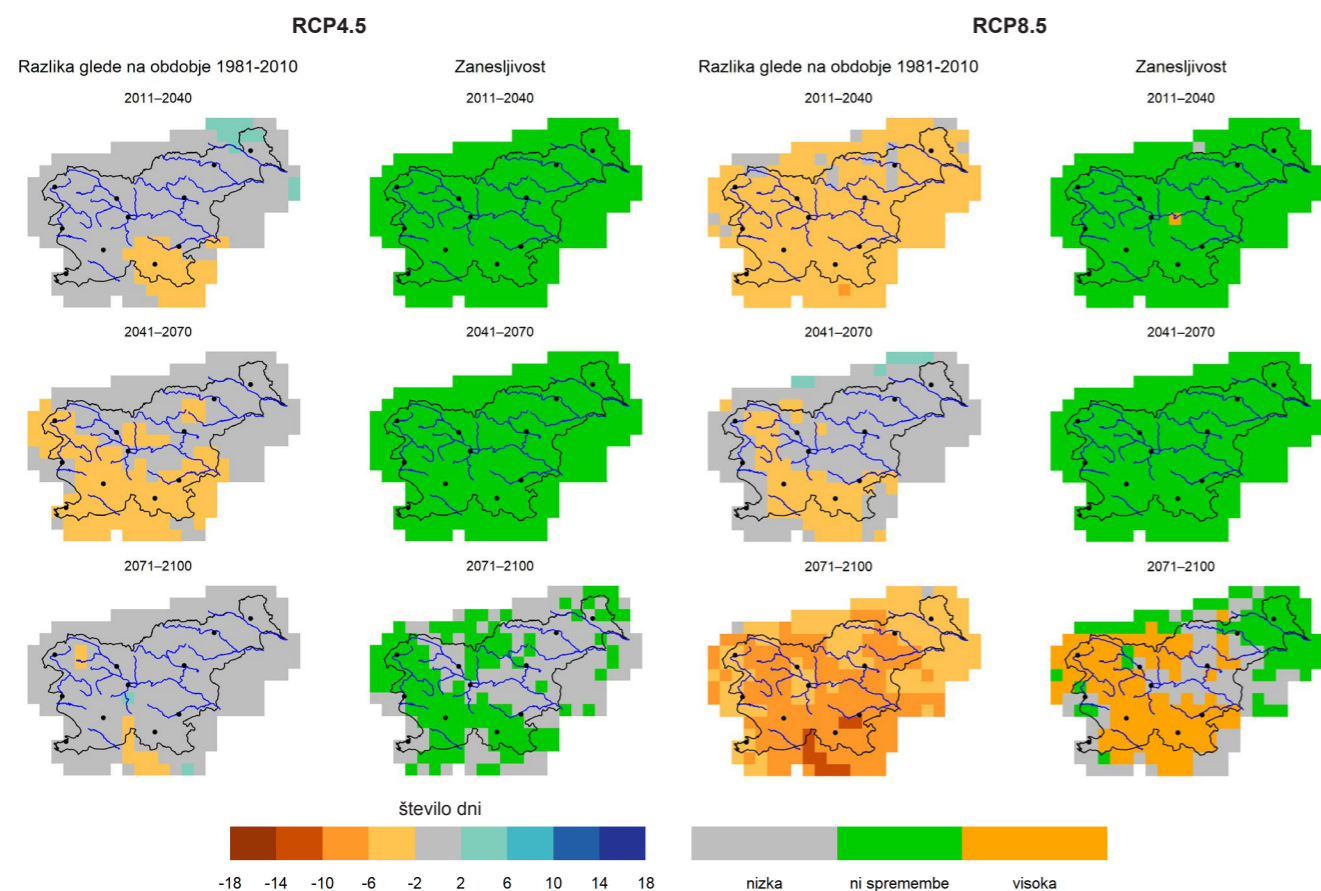
Število dni s padavinami nad 1 mm

Po strožjih merilih je padavinski dan določen kot dan, ko pade vsaj 1 mm padavin. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov večjih sprememb v pogostosti takšnih padavinskih dni ni pričakovati. Večje spremembe pričakujemo v primeru scenarija izpustov RCP8.5. Statistično pomembno se bo število padavinskih dni zmanjšalo v obdobju 2071–2100, tudi do 14 na letni ravni (slika 5.36, desno). V osrednji in

severovzhodni regiji si modeli niso enotni glede smeri sprememb (zmanjšanja ali povečanja).

Število dni s padavinami nad 10 mm

Meja za srednje intenzivne dnevne padavine po WCRP (ang. *World Climate Research Project*) je postavljena na 10 mm. V današnjem podnebju so takšni padavinski dnevi precej pogosti na alpsko-dinarski pregradi, redko pa se pojavijo na vzhodu Slovenije. V prihodnosti lahko občutne spremembe pričakujemo prav na vzhodu države. Po zmerno optimističnem scenariju izpustov so bo število srednje intenzivnih padavinskih dogodkov občutno povečalo šele ob koncu stoletja, medtem ko se v primeru pesimističnega scenarija (RCP8.5) občutno povečanje tako intenzivnih padavinskih dogodkov pojavi že v drugem obdobju (slika 5.37). Na območju, kjer je v današnjem podnebju



Slika 5.36 | Sprememba povprečnega števila dni na leto z več kot 1 mm padavin v treh projekcijskih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarij RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

število takšnih padavinskih dni veliko (alpsko-dinarska pregrada), signal spremembe kaže na zmanjšanje, vendar je ta sprememba v primerjavi z naravno spremenljivostjo majhna.

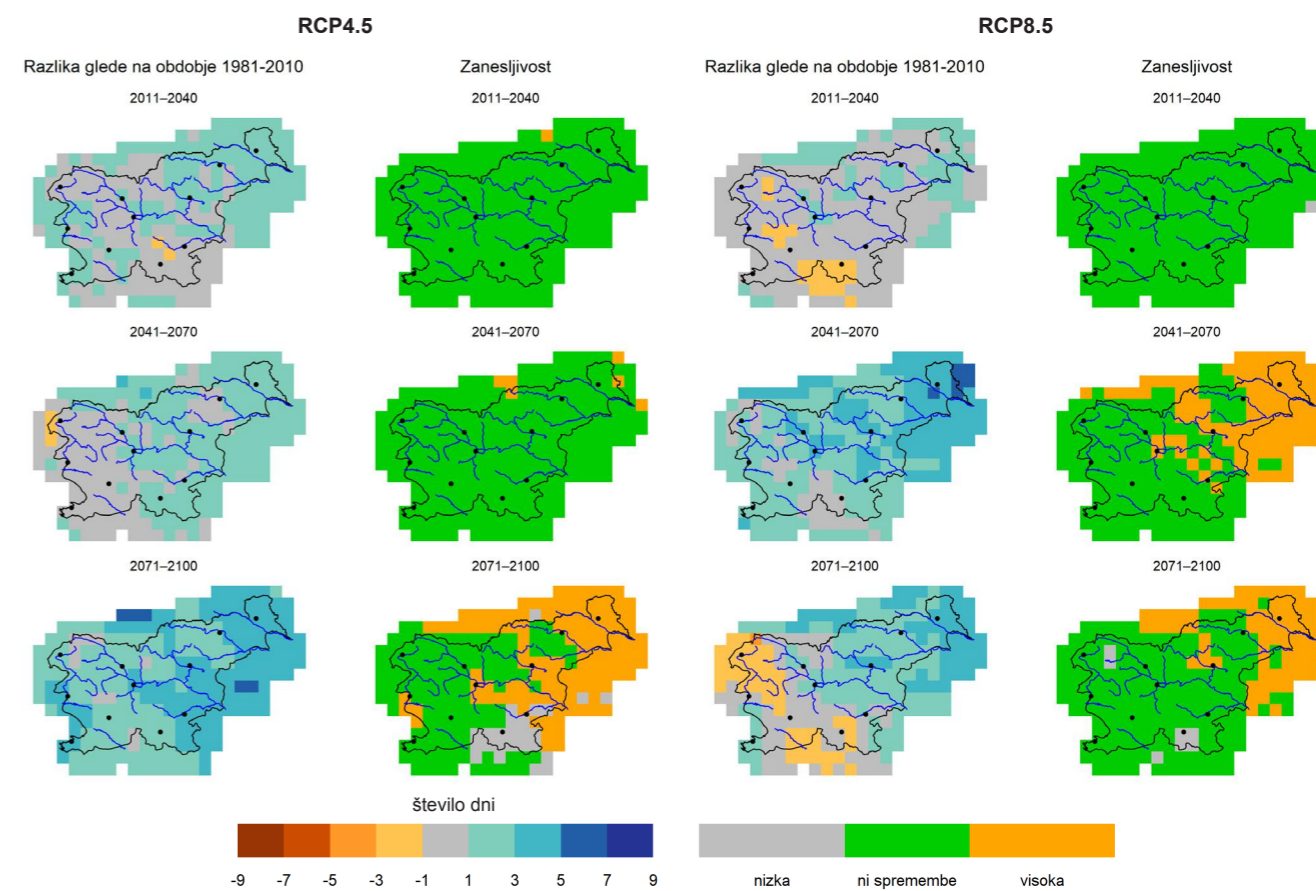
Število dni s padavinami nad 20 mm

20 mm padavin v enem dnevu za večino Slovenije pomeni veliko količino, ki se ne pojavlja pogosto. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov RCP4.5 se bo število dni z višino padavin nad 20 mm na letni ravni povečalo že sredi stoletja (2041–2070), do konca stoletja pa se bo povečanje še stopnjevalo (slika 5.38, levo). Spremembe so statistično zanesljive najprej na vzhodu Slovenije, do konca stoletja pa po vsej državi z izjemo alpsko-dinarske pregrade. Največji del povečanja takšnih dni gre na račun povečanja jeseni in pozimi.

Še večje spremembe v številu dni z višino padavin nad 20 mm so predvidene za scenarij izpustov RCP8.5 (slika 5.38, desno). Statistično zanesljivo se bo na letni ravni število takšnih dni povečalo v zadnjih dveh obdobjih po celotni državi, z izjemo alpsko-dinarske pregrade.

Število dni s padavinami nad 50 mm

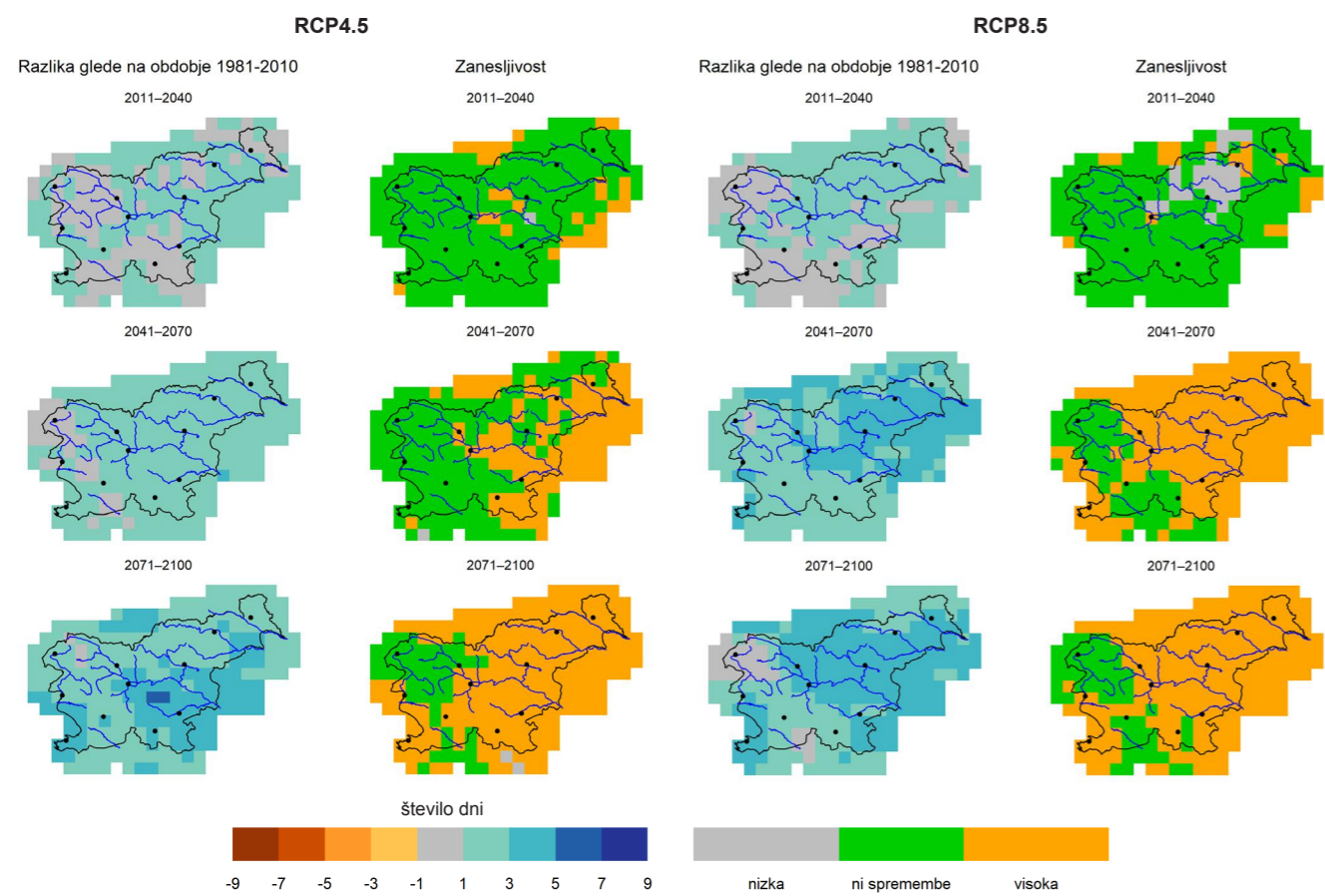
Dnevna višina padavin 50 mm ali več označuje zelo intenzivne padavinske dogodke, ki so v trenutnem podnebnju v vzhodni polovici Slovenije izjemni (v povprečju se zgodijo enkrat letno), pogostejši pa na alpsko-dinarski pregradi, kjer jih imamo v povprečju od 8 do 16 v enem letu. V primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov se bo število dni s tako intenzivnimi padavinami začelo večati na zahodu države (slika 5.39, levo). V srednjem projekcijskem obdobju bo



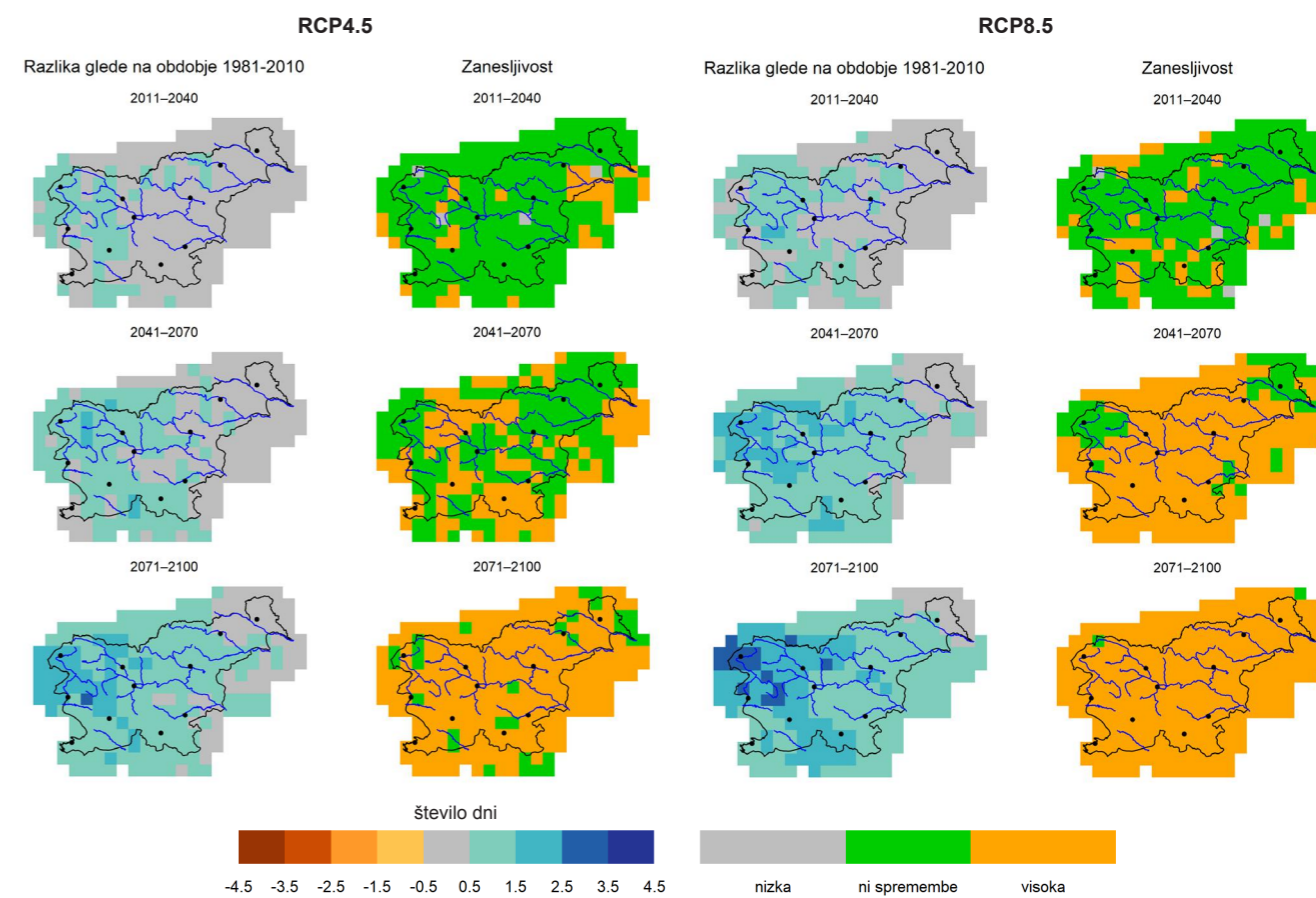
Slika 5.37 | Sprememba povprečnega števila dni na leto z več kot 10 mm padavin v treh projekcijskih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

signal povečanja večji od naravne spremenljivosti na posameznih območjih alpsko-dinarske pregrade, do konca stoletja pa se bo število takšnih dogodkov znatno povečalo po vsej državi.

V primeru scenarija izpustov RCP8.5 se bo število dni z več kot 50 mm padavin občutno povečalo po vsej državi že v drugem projekcijskem obdobju (slika 5.39, desno). Sprememba bo manjša od naravne spremenljivosti le v Julijskih Alpah in na skrajnem severovzhodu države. V zadnjem obdobju se bo število takšnih dogodkov občutno povečalo po vsej državi, najbolj na območju Alp, kjer bodo ponekod v povprečju trije dnevi več s tako intenzivnimi padavinami.



Slika 5.38 | Sprememba povprečnega števila dni na leto z več kot 20 mm padavin v treh projekcijskih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010 in zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)



Slika 5.39 | Sprememba povprečnega števila dni na leto z več kot 50 mm padavin v treh projekcijskih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010 in zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

5.3.3 Spremembe povratnih nivojev izjemnih padavin

Spremembe povratnih nivojev izjemnih padavin niso ocenjene po obdobjih kot druge spremembe. Ker gre za izjemne pojave, je tridesetletno obdobje običajno prekratko za zanesljive statistične analize, zato so spremembe analizirane z uporabo linearnih trendov v celotnem obravnavanem obdobju (1981–2100). Ta nam pove, kako se s časom spreminjajo vsi povratni nivoji za izbrano višino. Sedanje vrednosti povratnih nivojev so večinoma znane iz podatkov večdesetletnih meteoroloških meritev v preteklosti.

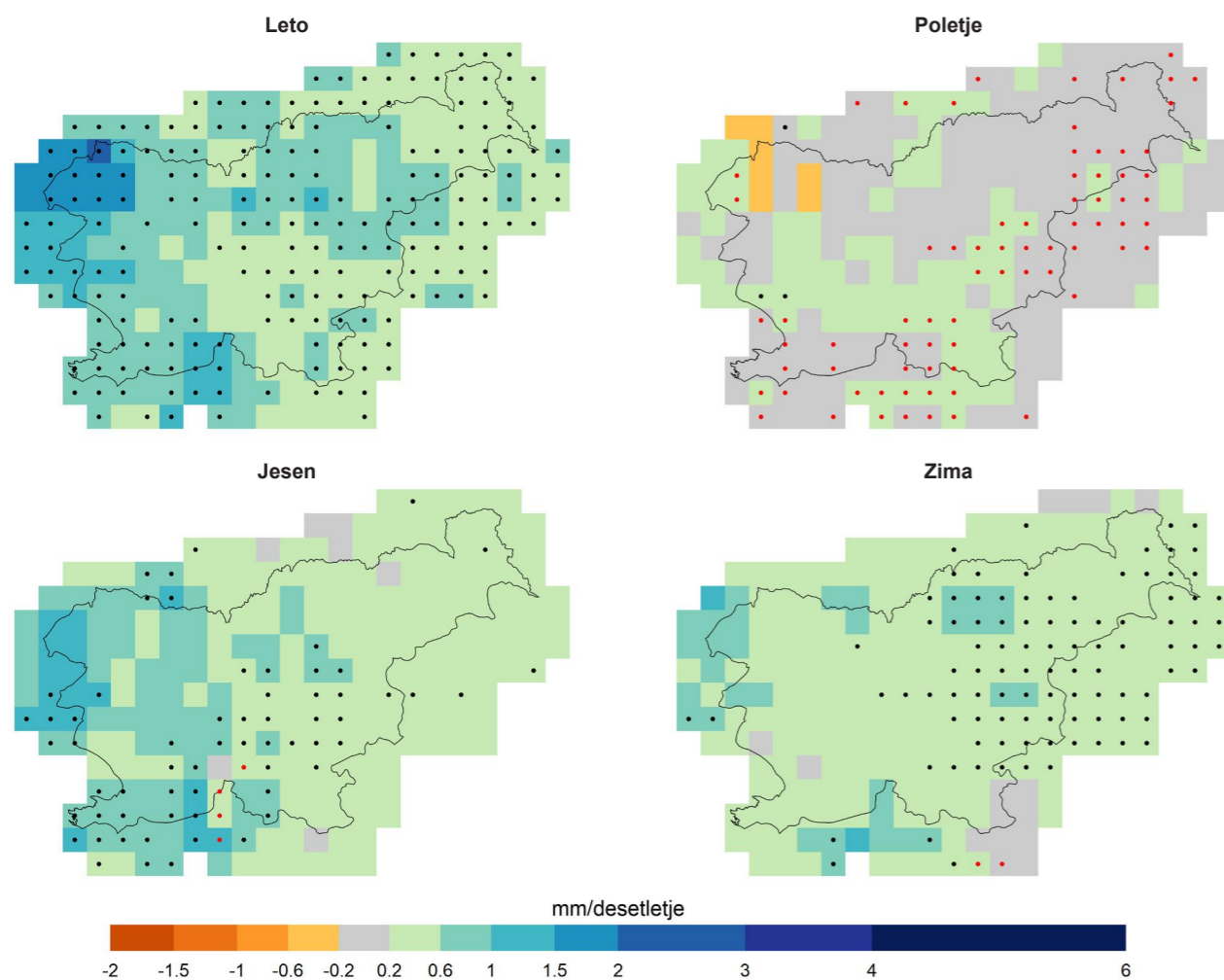
5.3.3.1 Izjemne enodnevne padavine

Za scenarij izpustov RCP2.6 modelski podatki ne dajejo statistično zanesljivih trendov izjemnih enodnevnih padavin. Izračunanih trendov ne moremo ločiti od naravne spremenljivosti in naključnih sprememb v podatkih.

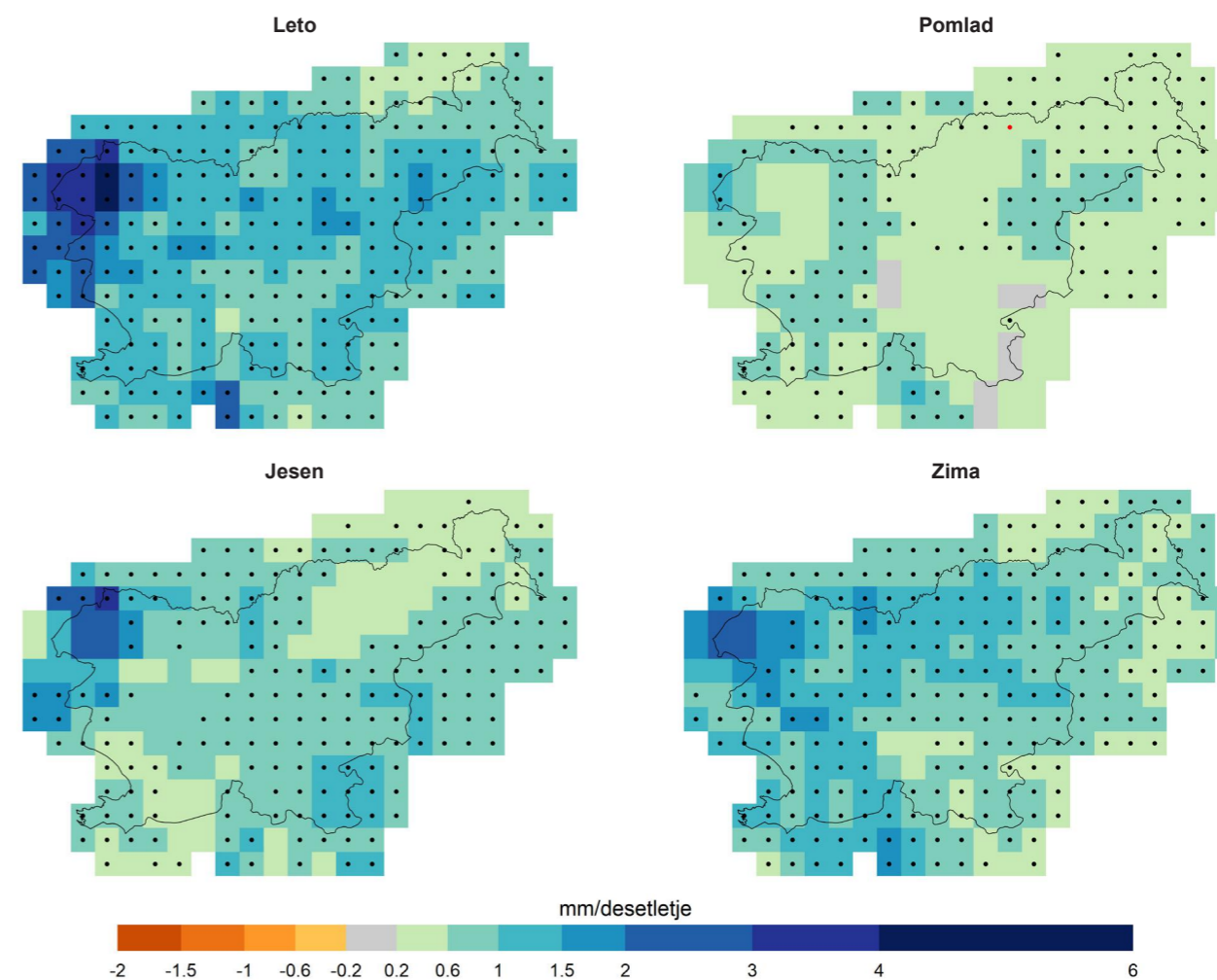
Za zmerno optimistični scenarij izpustov RCP4.5 se statistično zanesljiv trend izjemnih enodnevnih padavin kaže za obdobje celega leta v večjem delu države, jeseni nad južno Slovenijo in pozimi v vzhodnem delu države (slika 5.40). Za obdobje celega leta je največji zanesljiv trend nad območjem Alp, s srednjo vrednostjo

do 3 mm/desetletje. V zahodnem delu države in nekaterih predelih juga je trend ocenjen precej nižje (do 1,5 mm/desetletje), drugje (Obala, koroška regija, savinjska regija) pa do 1 mm/desetletje. Jeseni je zanesljiv trend do 1,5 mm/desetletje nad območjem od Obale prek Notranjske, kočevske in Dolenjske. Za zimo je zanesljiv trend s srednjo vrednostjo do 1 mm/desetletje nad vzhodnim delom Slovenije, predvsem nad koroško in savinjsko regijo ter Posavjem in delom Podravja. Previdni moramo biti glede rezultatov za poletje. Za vzhodni rob države je skladnost ansambelskih rezultatov majhna, modeli ansambla si glede predznaka trenda nasprotujejo, zgornja meja ocene trenda pa seže do vrednosti 2 mm/desetletje.

Trend izjemnih enodnevnih padavin po scenariju izpustov RCP8.5 je statistično zanesljiv na območju celotne države za obdobje celega leta in pozimi, spomladi in jeseni pa v večjem delu države (slika 5.41). Na ravni celega leta in pozimi je srednja vrednost trenda največja na območju Alp, kjer znaša do 4 mm/na letni ravni in do 2,5 mm/desetletje pozimi, najmanj pa v osrednji regiji in Pomurju, kjer znaša do 1 mm/desetletje. Spomladi je trend enodnevnih nalivov zanesljiv v gorenjski, notranjski in goriški regiji ter na Obali, kjer znaša do 1 mm/desetletje, in na severovzhodu države, kjer znaša do 0,6 mm/desetletje. Jeseni je trend zanesljiv predvsem v osrednji regiji in na jugovzhodu države, kjer njegova srednja vrednost znaša tudi do 1,5 mm/desetletje.



Slika 5.40 | Srednja vrednost največje enodnevnice višine padavin za obdobje celega leta (zgoraj levo), poletje (zgoraj desno), jeseni (spodaj levo) in pozimi (spodaj desno) s pripadajočo zanesljivostjo za scenarij RCP4.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).



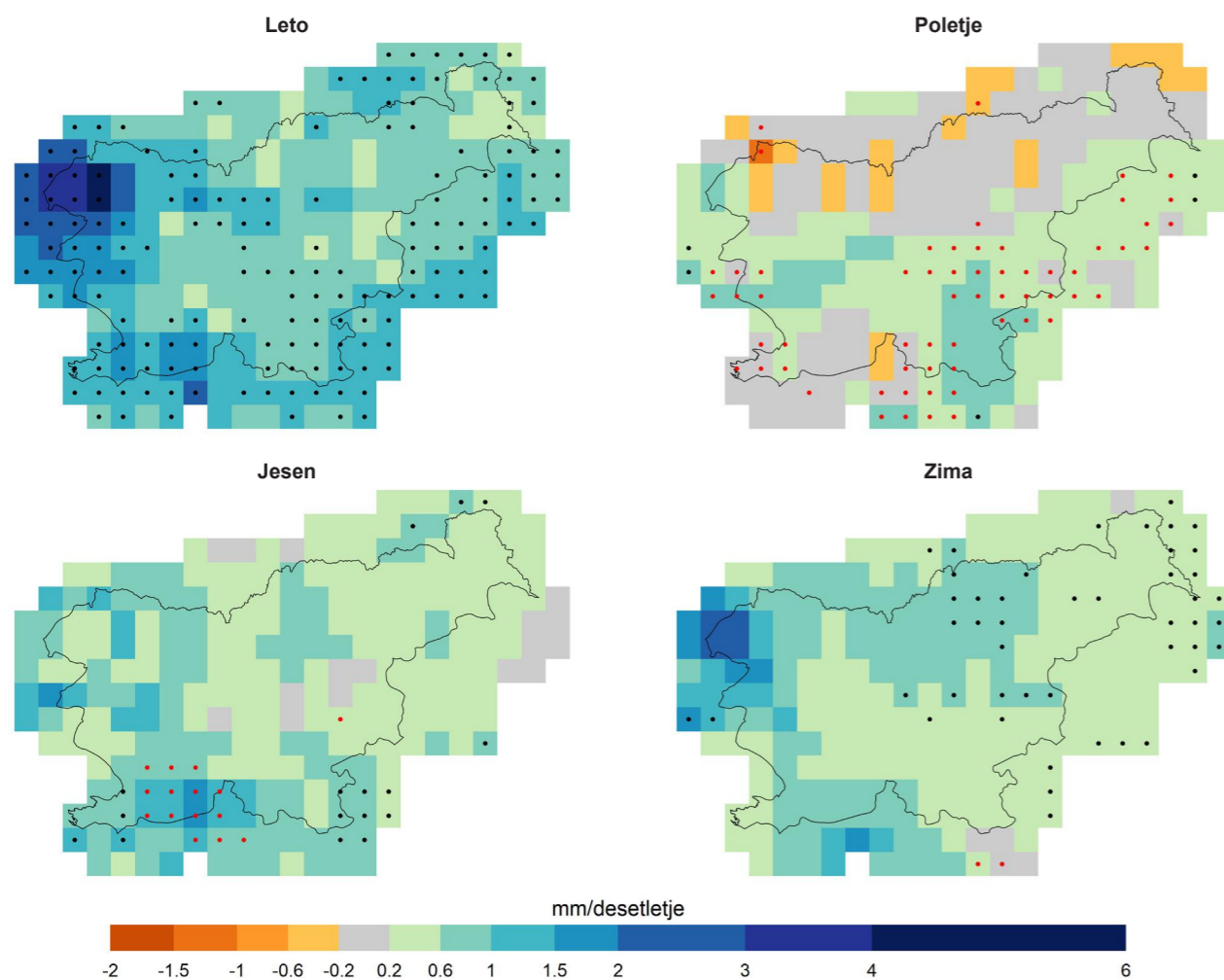
Slika 5.41 | Srednja vrednost največje enodnevnice višine padavin za obdobje celega leta (zgoraj levo), spomladi (zgoraj desno), jeseni (spodaj levo) in pozimi (spodaj desno) s pripadajočo zanesljivostjo za scenarij RCP8.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).

5.3.3.2 Izjemne tridnevne padavine

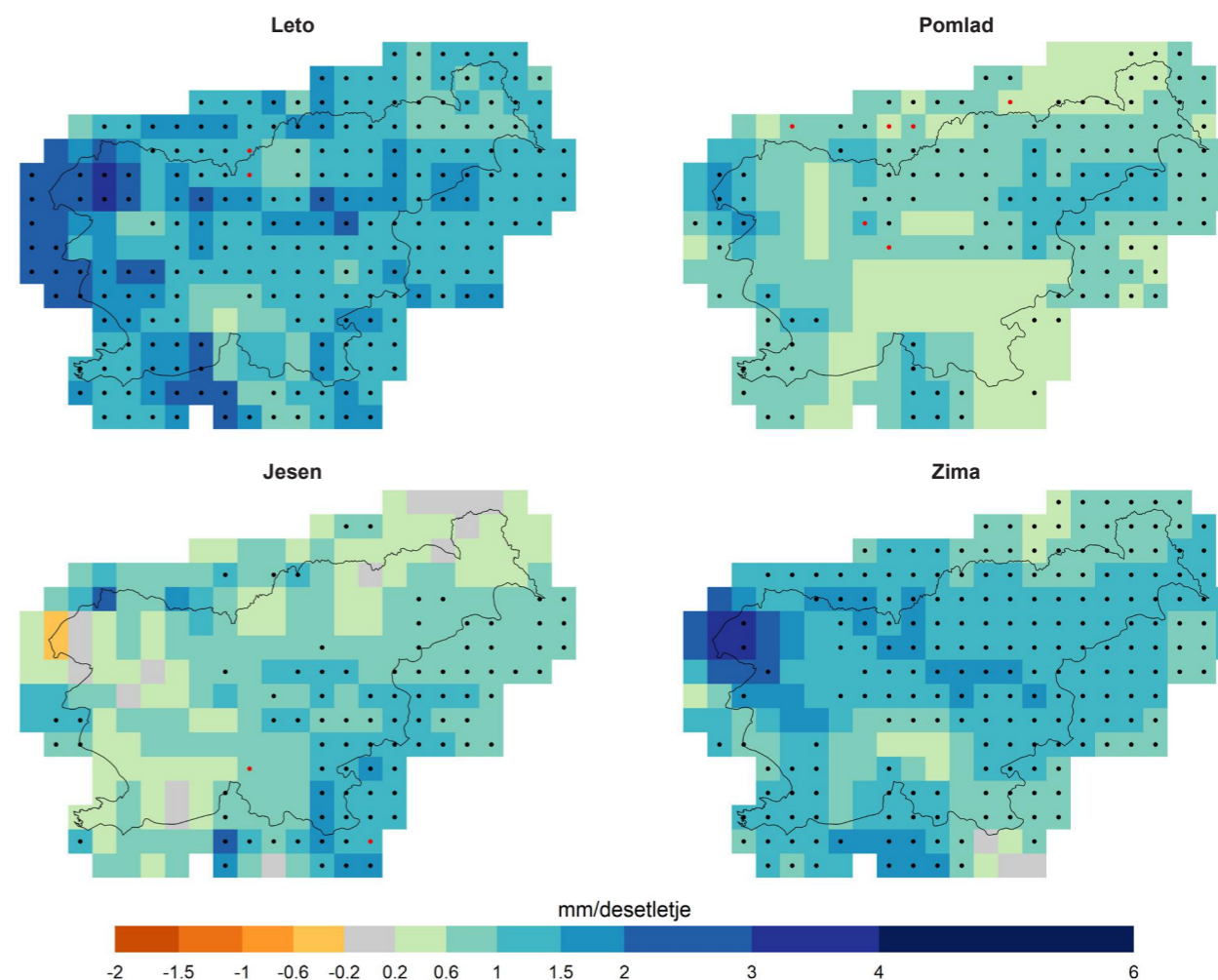
Za optimistični scenarij RCP2.6 tudi pri izjemnih tridnev-
nih padavinah modeli ne kažejo statistično zanesljivih
sprememb.

Za zmerno optimistični scenarij izpustov RCP4.5 je trend
izjemnih tridnevni padavin statistično zanesljiv le na letni
ravni (slika 5.42, zgoraj levo). Srednja vrednost trenda
je največja nad Alpami, kjer doseže vrednost do 4 mm/
desetletje. Na jugu države in v delih osrednje Slovenije je
ocenjeni trend do 2 mm/desetletje. Drugje trend statistično
ni zanesljiv. Za poletje so modeli neenotni glede predznaka
trenda. Podobno je za jesen v delih jugozahodne Slovenije.

V primeru scenarija izpustov RCP8.5 povečanje tri-
dnevni izjemni padavin bolj gotovo (slika 5.43, zgoraj
levo). Za obdobje celega leta je statistično zanesljiv
trend tridnevni izjemni padavin na območju celo-
tne države, razen v pasu dinarske pregrade. Njegova
srednja vrednost je največja nad Alpami in znaša do
3 mm/desetletje, na Obali, delih osrednje Slovenije in
delih savinjske regije do 2 mm/desetletje ter v osrednji
in severovzhodni Sloveniji do 1,5 mm/desetletje. Pozimi
so trendi podobni tistim na letni ravni, le da so območja
z visokimi vrednostmi nekoliko manjša. Spomladi so
trendi zanesljivi za severovzhodno Slovenijo (do 1,5
mm/desetletje), jeseni pa imajo podobne vrednosti za
Posavje, Novomeško kotlino in Belo krajino.



Slika 5.42 | Srednja vrednost trenda največje tridnevne višine padavin za obdobje celega leta (zgoraj levo), poleti (zgoraj desno), jeseni (spodaj levo) in pozimi (spodaj desno) s pripadajočo zanesljivostjo za scenarij RCP4.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).



Slika 5.43 | Srednja vrednost trenda največje tridnevne višine padavin na letni ravni (zgoraj levo), spomladi (zgoraj desno), jeseni (spodaj levo) in pozimi (spodaj desno) in pripadajoča zanesljivost za scenarij RCP8.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).

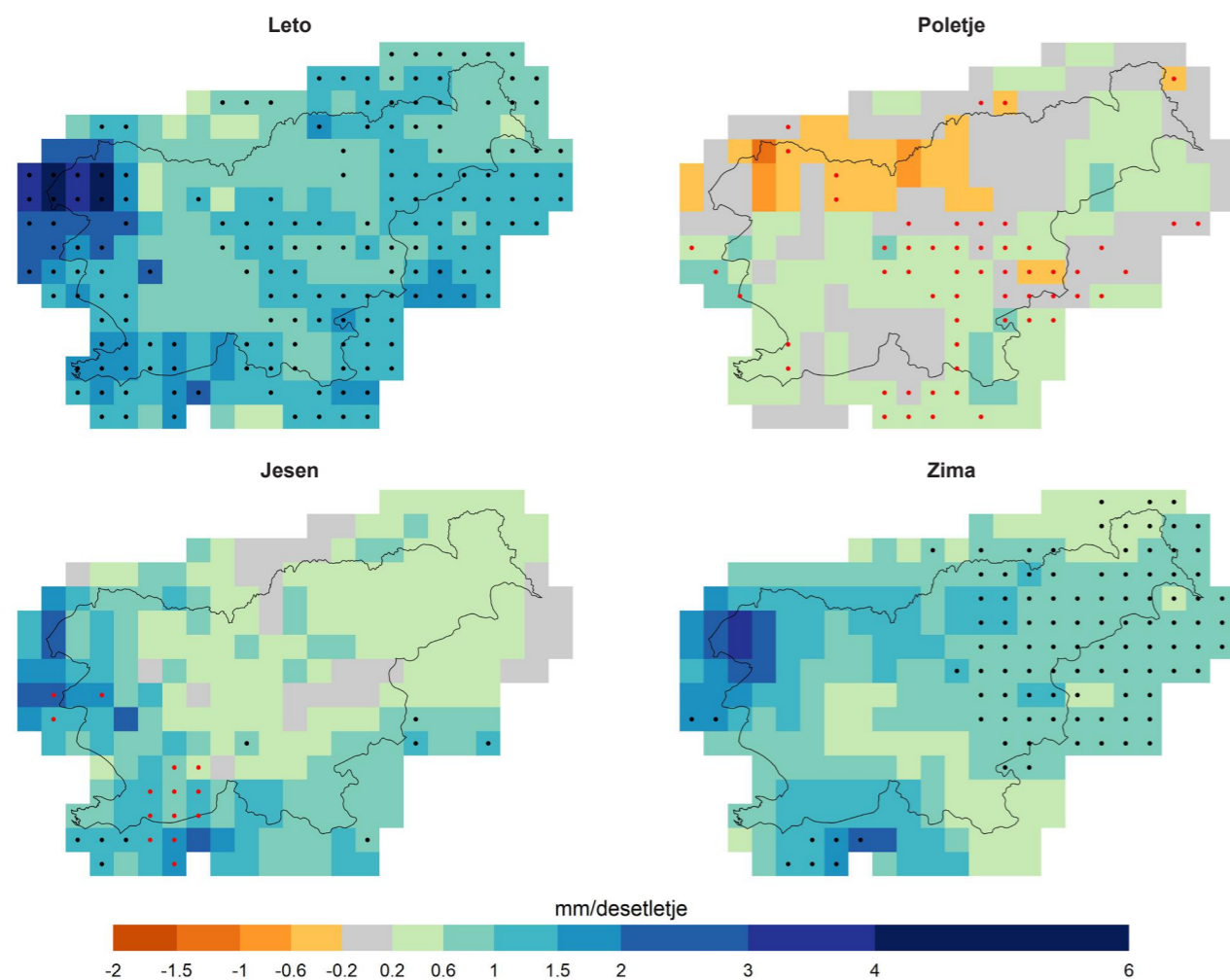
5.3.3.3 Izjemne petdnevne padavine

Kot pri enodnevni in tridnevni izjemni padavinah za
scenarij RCP2.6 tudi pri izjemni petdnevni padavi-
nah modeli ne kažejo statistično zanesljivih sprememb.

Za zmerno optimistični scenarij izpustov RCP4.5 so
statistično zanesljivi trendi petdnevni izjemni pada-
vin za obdobje celega leta na skrajnem zahodu države,
delih osrednje Slovenije in Podravju, za zimo pa na
severovzhodu države (slika 5.44). V Alpah srednja
vrednost trenda znaša do 4 mm/desetletje. Na Obali
srednja vrednost trenda znaša do 2 mm/desetletje, v

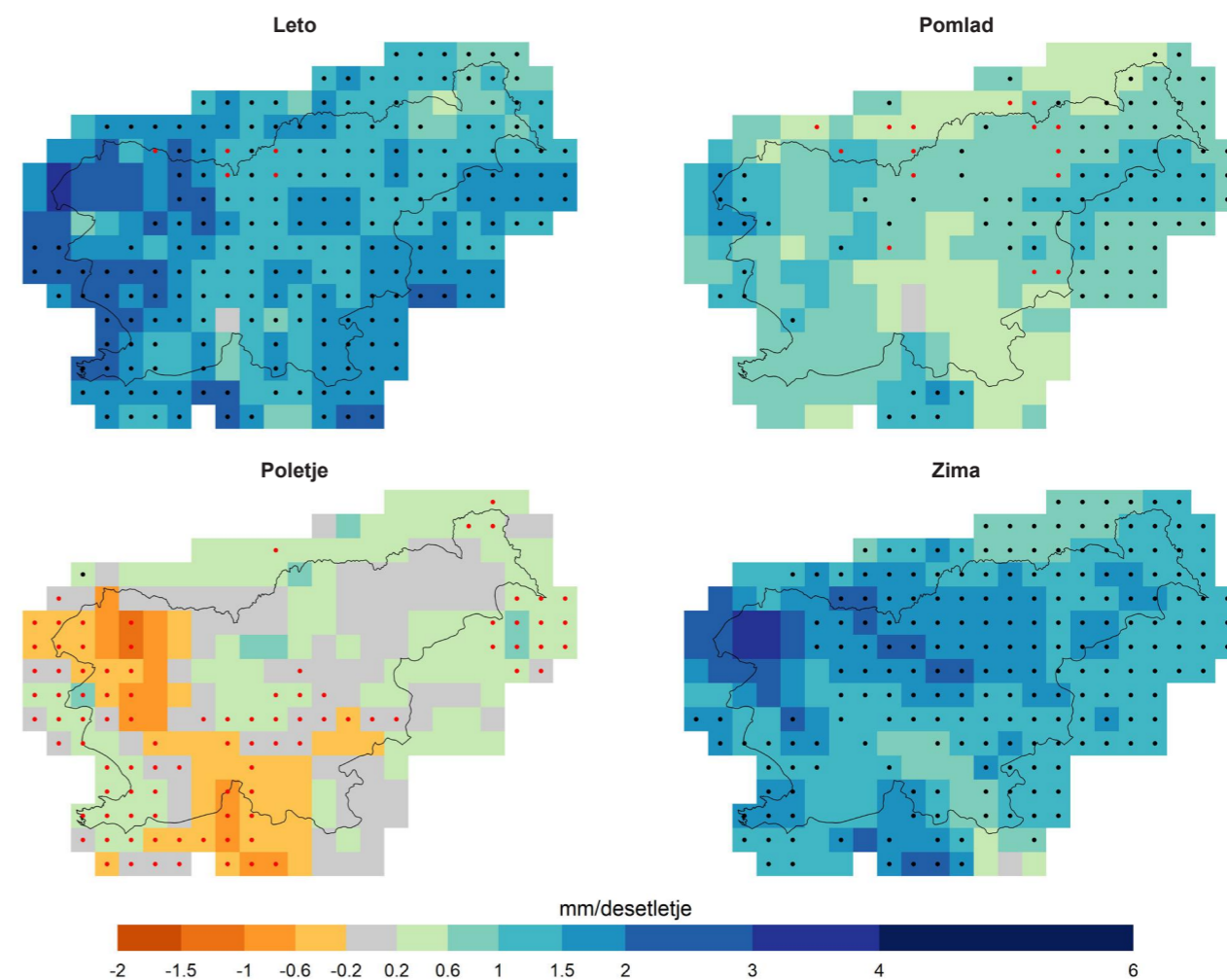
osrednji Sloveniji in Podravju pa do 1,5 mm/desetletje.
Pozimi je zanesljiv samo trend v severovzhodni Slo-
veniji in znaša do 1,5 mm/desetletje. Poleti so modeli
na delu osrednje Slovenije, Dolenjsko in Posavjem
neenotni glede predznaka trenda, zato je potrebna
previdnost. Podobno velja za jesenski trend nad delu
jugozahodne Slovenije. Zgornja meja trenda znaša
približno 1,5 mm/desetletje.

Za scenarij izpustov RCP8.5 so statistično zanesljivi
trendi na letni ravni in pozimi nad skoraj celotno Slo-
venijo, razen Julijskih Alp in srednje Soške doline ter
nad severovzhodno Slovenijo spomladi (slika 5.45).



Slika 5.44 | Srednja vrednost trenda največje petdnevne višine padavin na letni ravni (zgoraj levo), poleti (zgoraj desno), jeseni (spodaj levo) in pozimi (spodaj desno) in pripadajoča zanesljivost za scenarij RCP4.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).

Na letni ravni je največji trend v goriški regiji, na Obali in Gorenjskem, njegova srednja vrednost znaša do 3 mm/desetletje. Najmanjši je trend v Prekmurju, do 1 mm/desetletje. Podobno je pozimi, le da je prostorska slika v podrobnostih nekoliko drugačna, v Prekmurju pa trend znaša do 1,5 mm/desetletje. Spomladi je statistično zanesljiv trend izjemnih petdnevni padavin v severovzhodni Sloveniji. Srednja vrednost trenda znaša do 1,5 mm/desetletje. Poleti so modeli neenotni glede predznaka trenda v zahodnem in osrednjem delu države ter delih Dolenjske.



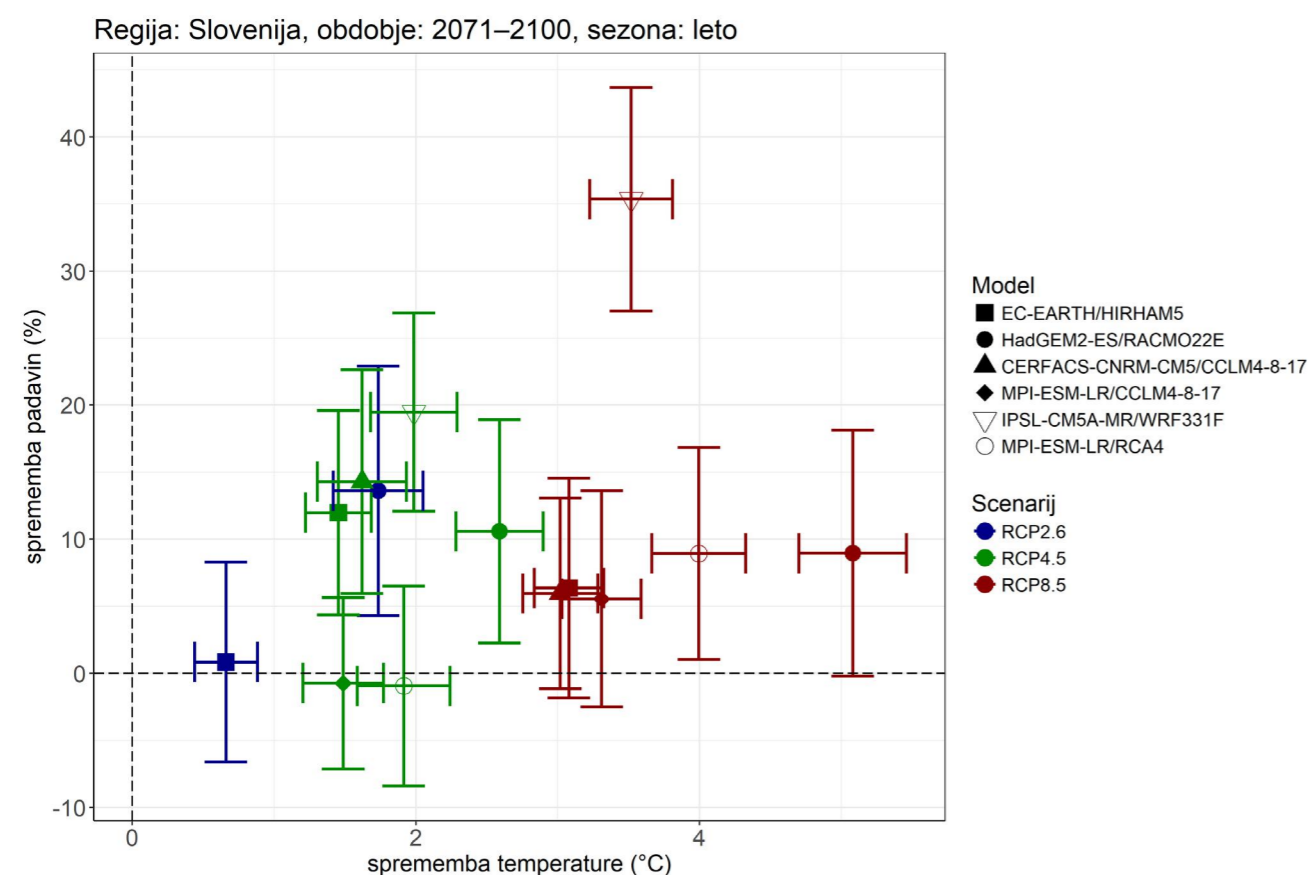
Slika 5.45 | Srednja vrednost trenda največje petdnevne višine padavin na letni ravni (zgoraj levo), spomladi (zgoraj desno), poleti (spodaj levo) in pozimi (spodaj desno) in pripadajoča zanesljivost za scenarij RCP8.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).

5.4 POVEZAVE MED SPREMENBAMI TEMPERATURE IN PADAVIN

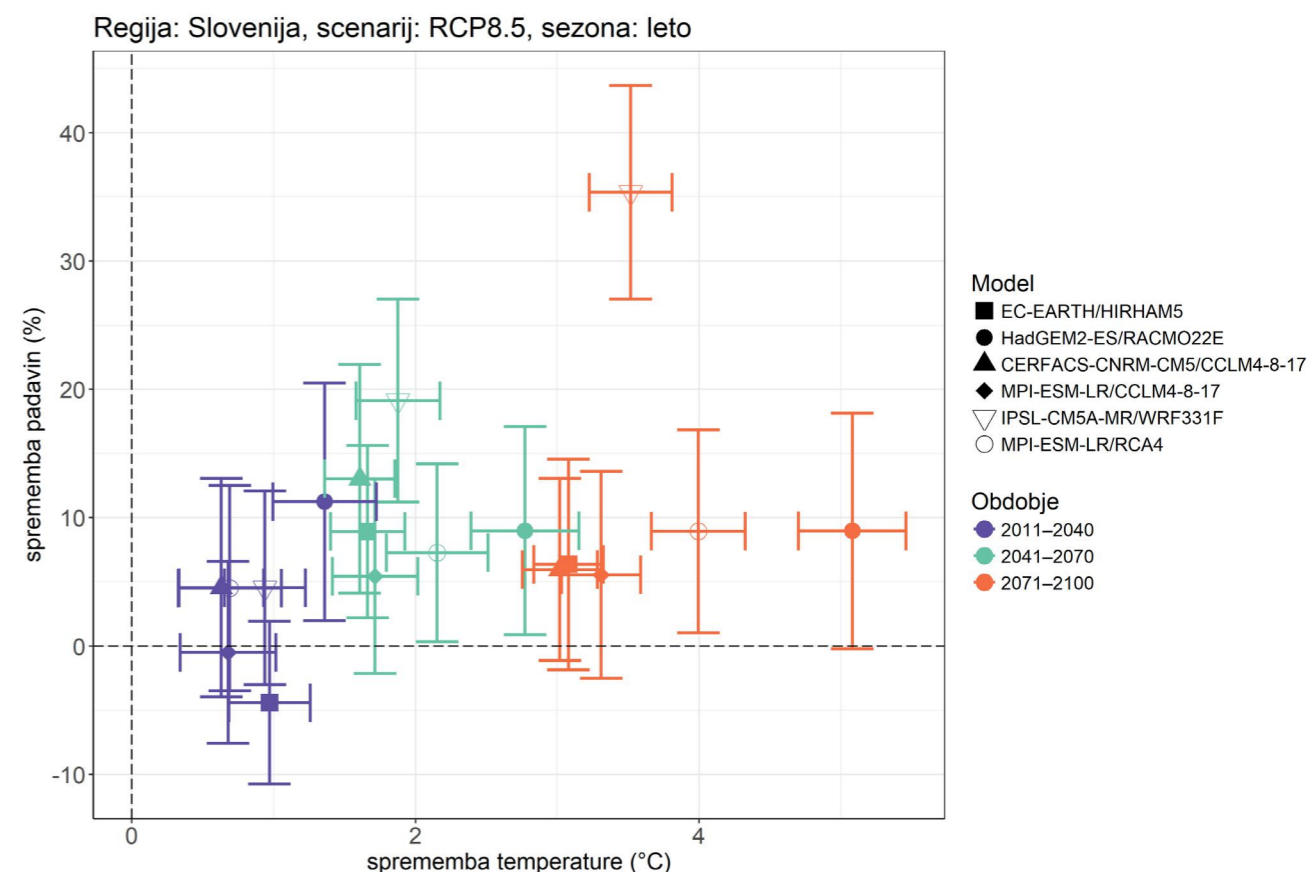
Negotovosti projekcij podnebnih sprememb so posledica tako nepopolnosti podnebnih modelov kot naravne spremenljivosti. Negotovost v posamezni spremenljivki (npr. temperaturi zraka) je lahko povezana z negotovostjo v drugi spremenljivki (npr. višini padavin). Pri tolmačenju podnebnih projekcij je tako potrebno poleg negotovosti v posameznih spremenljivkah upoštevati še medsebojne povezave. Grafično lahko to na primer ponazorimo z odvisnostjo podnebnih sprememb v dveh spremenljivkah, po modelih in scenarijih izpustov ali po obdobjih. Pri tem prikažemo še negotovost sprememb. Na sliki 5.46 je primer takšnega prikaza, kjer lahko hitro ocenimo ali so med posameznimi modeli in scenariji bistvene razlike. Kjer ni prekrivanja ali je prekrivanje med rezultati, upoštevajoč negotovost, le majhno, lahko sklepamo, da gre za statistično značilno

drugačen rezultat. Na predstavljenem primeru, ki prikazuje spremembe na ravni celotne države za obdobje 2071–2100 glede na primerjalno obdobje 1981–2010, vidimo, da nekaj rezultatov izstopa od jedra za posamezni scenarij izpustov. Najbolj očitno je odstopanje modela IPSL-CM5A-MR/WRF331F, ki kaže za scenarij izpustov RCP8.5 izrazito povečanje letnih padavin, a le zmerno visok dvig temperature zraka. Med drugim je zanimiva tudi velika razlika med obema modeloma za scenarija izpustov RCP2.6; HadGEM2-ES/RACMO22E kaže na mnogo bolj izrazite spremembe padavin in temperature zraka.

Omenjeni prikaz je osredotočen na razlike med posameznimi scenariji izpustov. Na enak način lahko prikažemo tudi časovni razvoj sprememb po posameznih scenarijih izpustov (slika 5.47). Za Slovenijo in scenarij izpustov RCP8.5 so poleg obdobja 2071–2100, ki je prikazano tudi na sliki 5.46, predstavljeni izračuni za prvi



Slika 5.46 | Odvisnost spremembe letnega povprečja višine padavin od spremembe letnega povprečja temperature zraka v Sloveniji v obdobju 2071–2100 glede na primerjalno obdobje 1981–2010. Znaki prikazujejo različne podnebne modele, barve scenarije značilnega poteka izpustov (RCP), črtice v smeri obeh osi pa negotovost izračunanih sprememb pri 10-odstotni stopnji značilnosti (90-odstotni interval zaupanja).



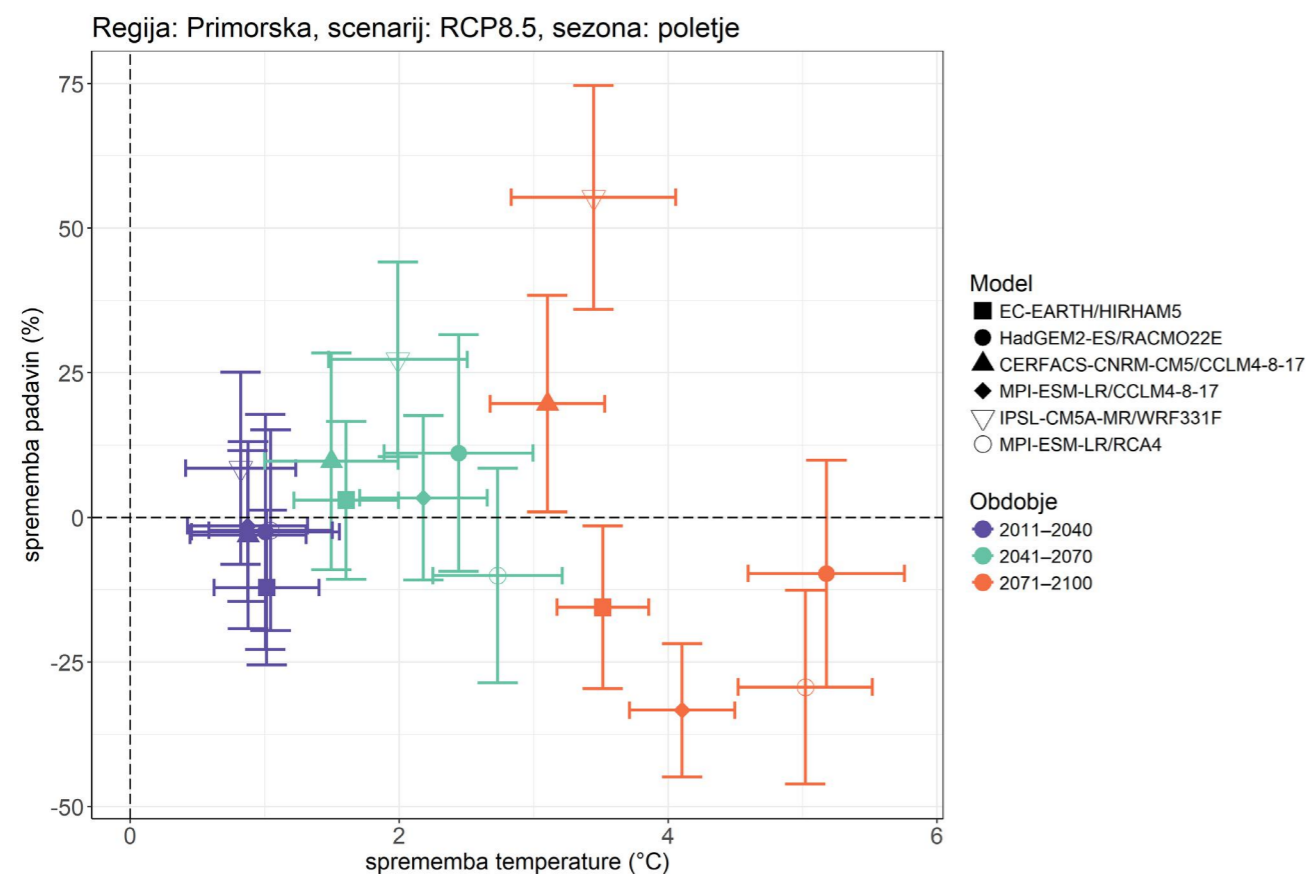
Slika 5.47 | Odvisnost spremembe letnega povprečja višine padavin od spremembe letnega povprečja temperature zraka v Sloveniji po scenariju izpustov RCP8.5 v različnih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010. Znaki prikazujejo različne modele, barve tridesetletna obdobja, črtice v smeri obeh osi pa negotovost izračunanih sprememb pri 10-odstotni stopnji značilnosti (90-odstotni interval zaupanja).

dve projekcijski obdobji. Videti je, da je razsop modelskih rezultatov največji v zadnjem obdobju, so pa že v prvem med posameznimi modeli statistično značilne razlike (najbolj izstopa HadGEM2-ES/RACMO22E). Model IPSL-CM5A-MR/WRF331F je sprva še blizu ostalim modelom, nato pa skozi 21. stoletje vse bolj izstopa.

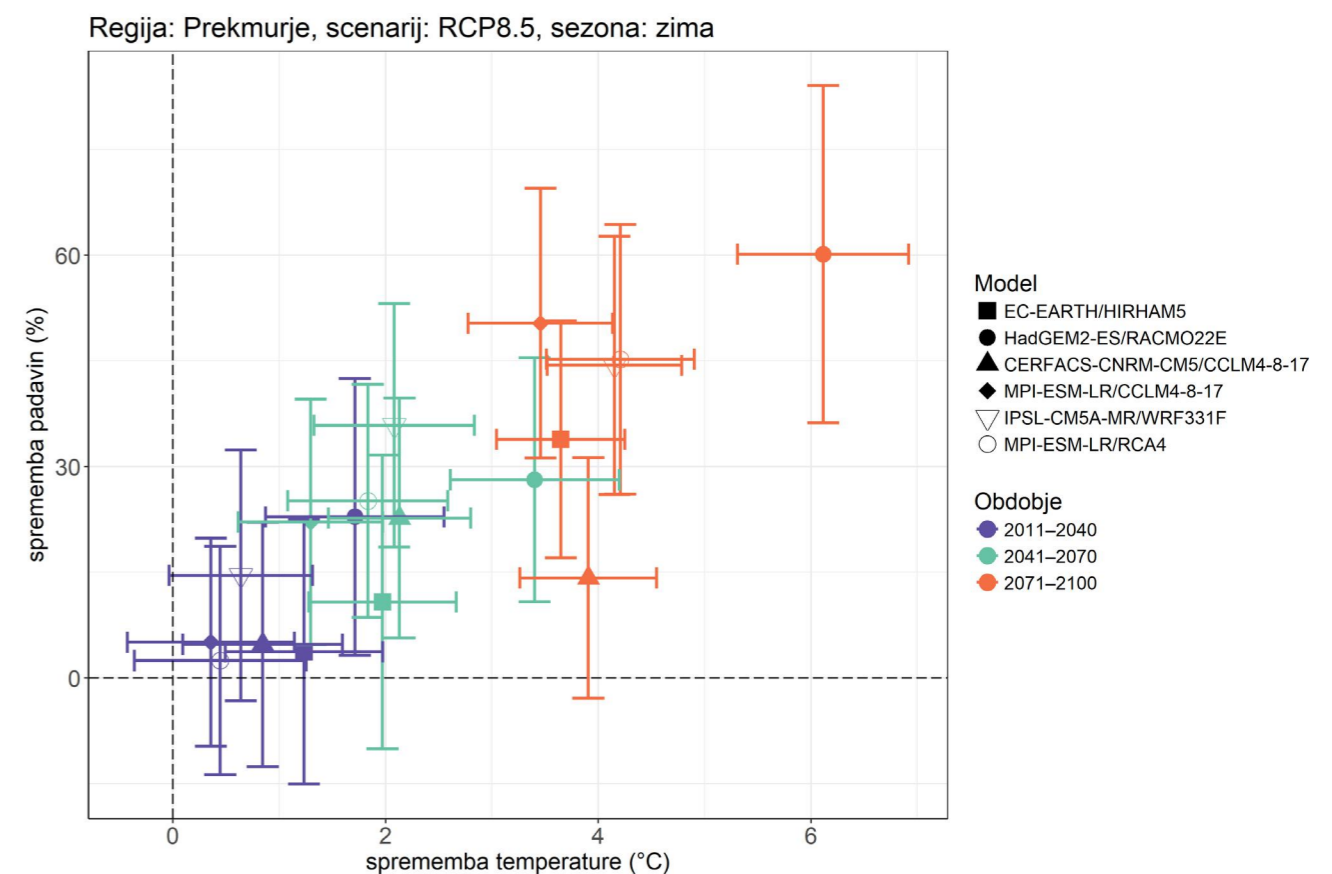
V splošnem so razlike med modeli večje pri scenariju izpustov RCP8.5 kot pri ostalih dveh scenarijih izpustov in se povečujejo z odklikom od primerjalnega obdobja. Tako so v povprečju največje razlike za scenarij izpustov RCP8.5 in obdobje 2071–2100, kjer razlika med modeli pogosto povsem prevlada nad statistično negotovostjo izračunanih sprememb zaradi naravne spremenljivosti. Izrazit primer takšne odvisnosti je prikazan na sliki 5.48. Modeli v prvem projekcijskem obdobju (2011–2040) kažejo na dvig temperature zraka poleti na Primorskem za približno 1 °C, pri čemer se višina padavin ne spremeni bistveno. V osrednjem obdobju so razlike med

modeli že večje, za zadnje obdobje (2071–2100) pa so razlike med modeli v obeh spremenljivkah velike, mnogo večje od statistične negotovosti sprememb za posamezni model. Dva modela (IPSL-CM5A-MR/WRF331F in CERFACS-CNRM-SM5/CCLM4-8-17) napovedujeta znatno povečanje padavin pri temperaturnem dvigu za okoli 3 do 4 °C, trije modeli znatno zmanjšanje višine padavin, dva modela (HadGEM2-ES/RACMO22E in MPI-ESM-LR/RCA4) pa mnogo večji temperaturni dvig od ostalih modelov.

V posameznih letnih časih ali na posameznih območjih povezava med spremembami v obeh spremenljivkah ni izrazita, v drugih primerih pa je dvig temperature skoraj linearno povezan s spremembo višine padavin (slika 5.49).



Slika 5.48 | Sprememba poletnega povprečja višine padavin v odvisnosti od spremembe poletnega povprečja temperature zraka v regiji Primorska po scenariju izpustov RCP8.5 v različnih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010. Znaki prikazujejo različne modele, barve tridesetletna obdobja, črtice v smeri obeh osi pa negotovost izračunanih sprememb pri 10-odstotni stopnji značilnosti (90-odstotni interval zaupanja).



Slika 5.49 | Sprememba zimskega povprečja višine padavin v odvisnosti od spremembe zimskega povprečja temperature zraka v regiji Prekmurje po scenariju izpustov RCP8.5 v različnih obdobjih glede na primerjalno obdobje 1981–2010. Znaki prikazujejo različne modele, barve tridesetletna obdobja, črtice v smeri obeh osi pa negotovost izračunanih sprememb pri 10-odstotni stopnji značilnosti (90-odstotni interval zaupanja).

Izračun negotovosti podnebnih sprememb za posamezni model in obdobje

Najprej smo izračunali linearno regresijo za vsako 30-letno obdobje (primerjalno in tri obdobja prihodnosti), pri čemer smo leta centriralni, da je središče obdobja leto 0 (na razpon vrednosti od $-14,5$ do $+14,5$). Na podlagi ostankov regresije smo izračunali standardni odklon začetne vrednosti (ki je hkrati tudi aritmetična sredina vrednosti 30-letnega obdobja). Pri izračunu razlike med dvema obdobjema (projekcijskim in primerjalnim) smo sešteli kvadrata standardnega odklona, vsoto korenili in nato še pomnožili s faktorjem za t-test za ustrezno stopnjo značilnosti (10 %) in številom prostostnih stopenj (56).

5.5 SPREMEMBE VODNE BILANCE

Skladno z rastjo temperature zraka se bo v Sloveniji do konca stoletja nadaljevala tudi rast referenčne evapotranspiracije. V primeru optimističnega scenarija izpustov bo porast referenčne evapotranspiracije v mejah njene naravne spremenljivosti. V zmerno optimističnem scenariju izpustov bo v primerjavi z obdobjem 1981–2010 referenčna evapotranspiracija v slovenskem povprečju zrasla za približno 8 %, v pesimističnem scenariju izpustov pa za približno 16 %. Porast referenčne evapotranspiracije po Sloveniji ne bo enakomeren, različen bo tudi med letnimi časi.

Šestdesetdnevni vodni primanjkljaj se bo v zmerno optimističnem scenariju izpustov v primerjavi z obdobjem 1981–2010 povečal le v sredini stoletja, v poletnem in jesenskem času, do 70 mm. Proti koncu stoletja se bo nato zopet zmanjšal na nivo primerjalnega obdobja. V pesimističnem scenariju izpustov se bo primanjkljaj povečal šele ob koncu stoletja, prav tako poleti in jeseni, ko bodo spremembe ponekod tudi večje od 70 mm.

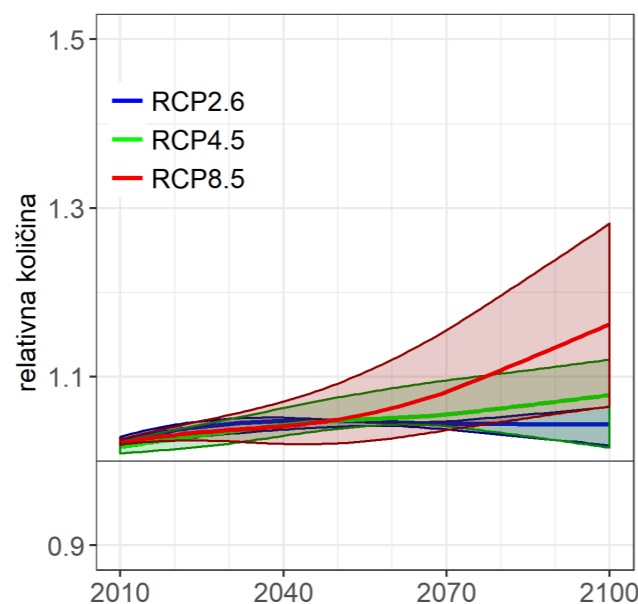
Ne glede na scenarij izpustov toplogrednih plinov se bo povprečno letno napajanje podzemne vode v primerjavi z obdobjem 1981–2010 do konca stoletja povečalo v povprečju do 20 %. Izstopa severovzhodna Slovenija, kjer lahko povečanje preseže 30 %.

5.5.1 Spremembe referenčne evapotranspiracije

Referenčna evapotranspiracija je izračunana iz večjega števila meteoroloških spremenljivk in za nekatere izmed njih so modelske vrednosti zelo nezanesljive. V oceni potencialne evapotranspiracije zato pričakujemo veliko negotovost. V nadaljevanju so opisane samo večje značilne spremembe v prihodnosti.

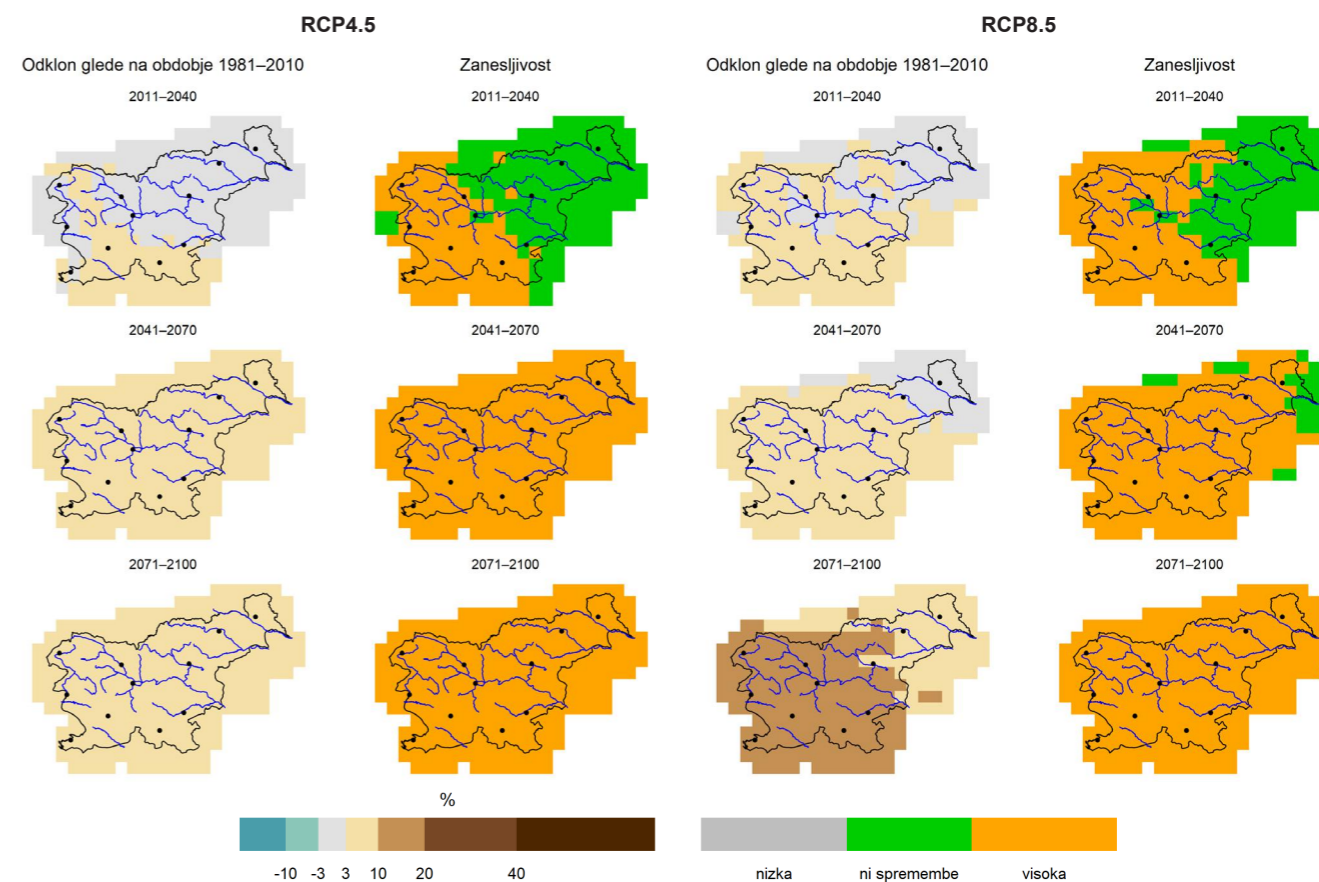
Referenčna evapotranspiracija bo skladno s postopnim naraščanjem temperature v 21. stoletju vsaj rahlo naraščala. Signal spremembe za noben scenarij izpustov, v nobenem obdobju ni padajoč (slika 5.50).

V scenariju izpustov RCP4.5 se zaradi dvigovanja povprečne temperature kažejo spremembe do deset odstotkov na letni ravni v vseh treh projekcijskih obdobjih, v prvem za jugozahodno polovico države, v zadnjih dveh za celotno državo (slika 5.51, levo). K spremembi na letni ravni bo v največji meri prispevalo zanesljivo povečanje referenčne evapotranspiracije poleti in jeseni, v zadnjem obdobju pa tudi spomladi (slika 5.52, levo). V prvem obdobju v scenariju izpustov RCP4.5 na sezonski ravni, z izjemo jeseni, ni jasnega signala. Spomladi je sprememba značilna v drugem obdobju nad jugozahodno polovico države in nad celotno državo v tretjem obdobju. Poleti je podobna sprememba značilna nad vso Slovenijo za zadnji dve obdobji. Največje spremembe se v vseh



Slika 5.50 | Časovni potek spremembe letne referenčne evapotranspiracije do konca 21. stoletja v Sloveniji za tri scenarije, vključno z razponi odstopanj. Prikazana je relativna vrednost glede na povprečje v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnic največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

treh obdobjih obetajo jeseni, ko bo 10-odstotna sprememba značilna v prvem obdobju nad zahodno polovico države, v zadnjih dveh pa nad celotno državo.



Slika 5.51 | Sprememba povprečne letne referenčne evapotranspiracije v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

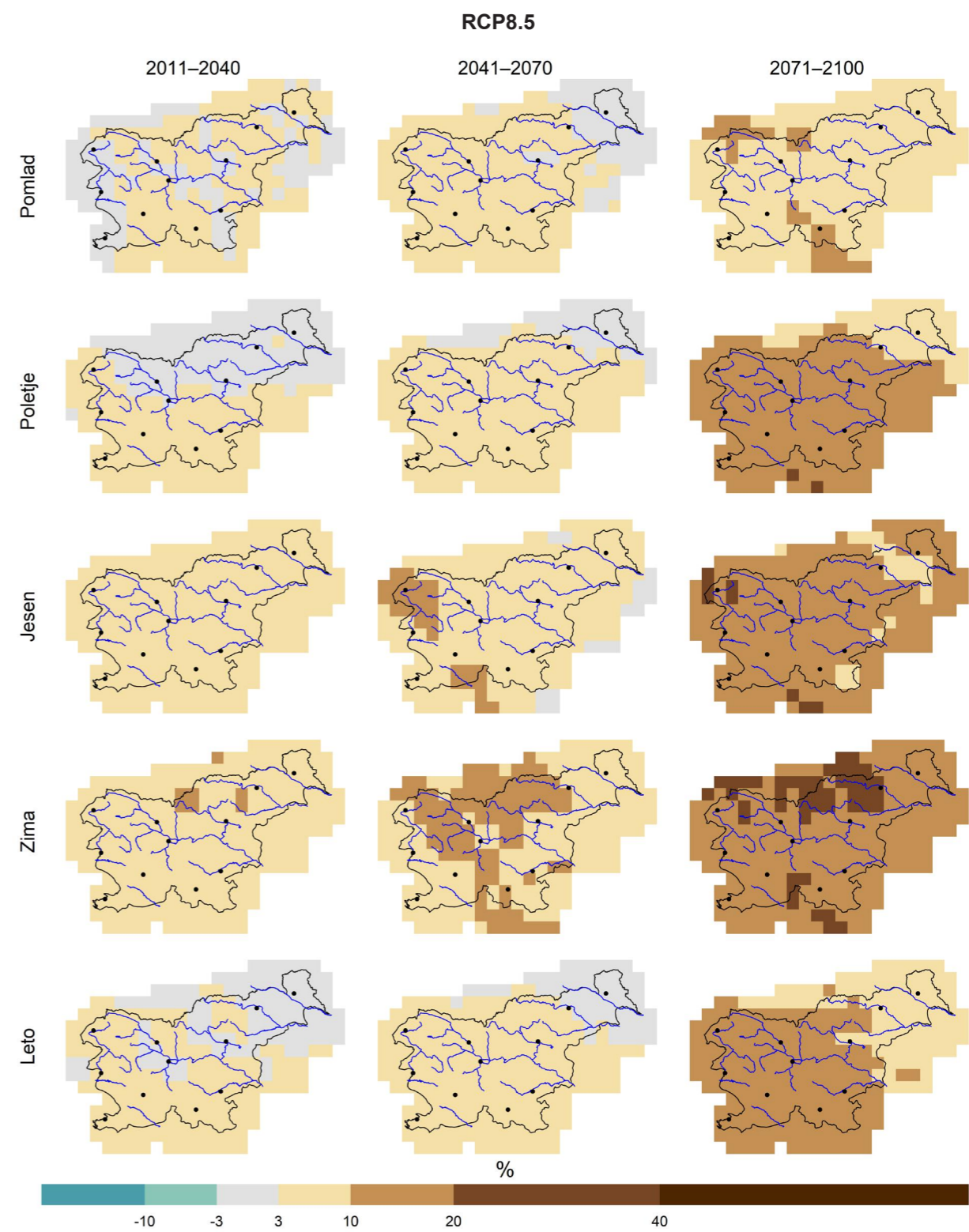
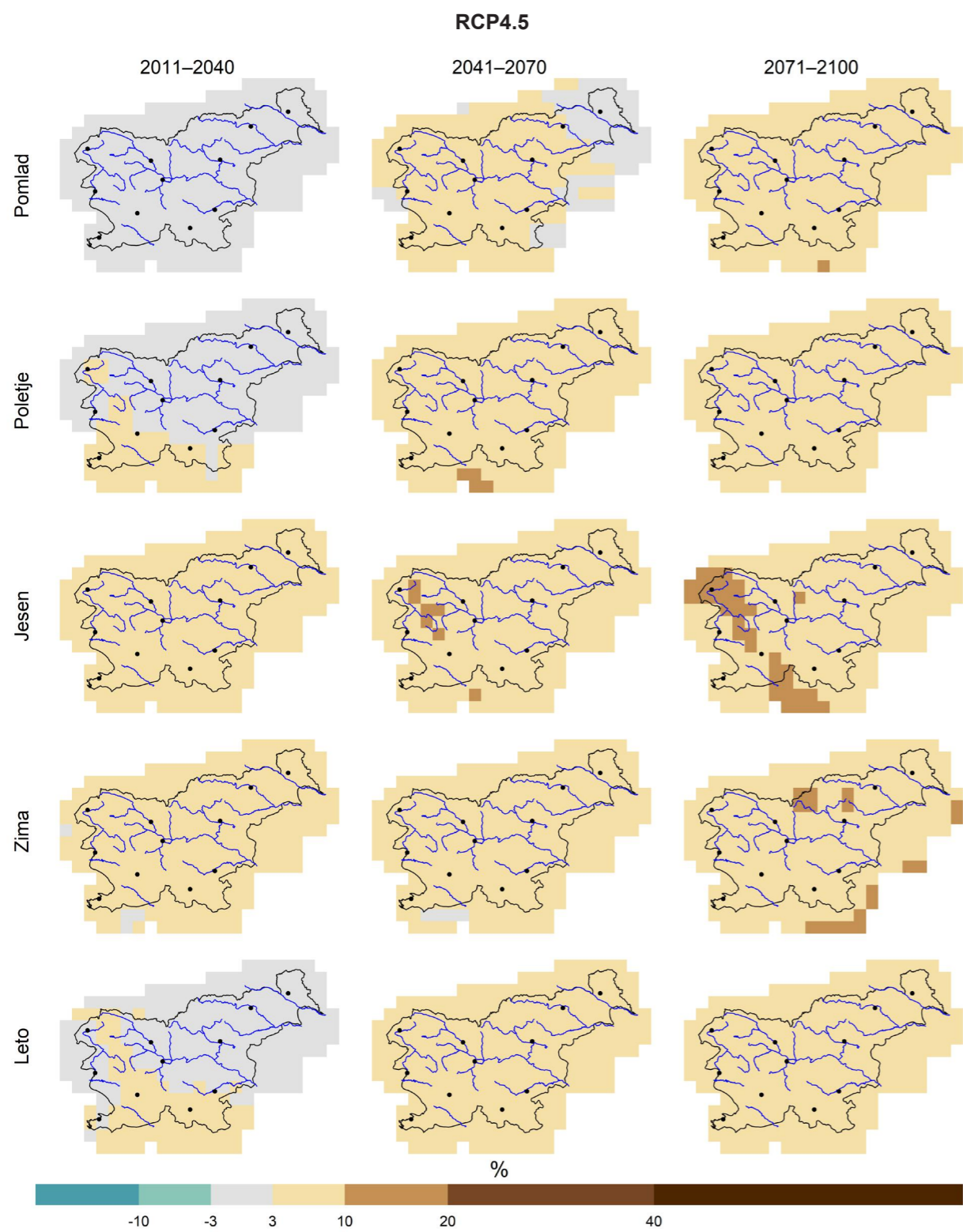
V drugem obdobju so te spremembe v delih Posočja tudi do 20 %, v zadnjem pa so spremembe do 20 % zanesljive v večjem delu prehodne regije.

Signal spremembe v primeru scenarija izpustov RCP2.6 se s spremembami v scenariju izpustov RCP4.5 razlikuje v tem, da je najzanesljivejši v drugem obdobju po celotni državi, v prvem in tretjem pa le v prehodni regiji. Povprečno je v Sloveniji na letni ravni predvideno povečanje do 10 % v primerjavi s primerjalnim obdobjem v vseh projekcijskih obdobjih, vendar je sprememba nekoliko manj zanesljiva, tudi zaradi manjšega števila uporabljenih modelov. Značilne spremembe v referenčni evapotranspiraciji se v scenariju izpustov RCP2.6 kažejo na ravni celega leta, poleti in jeseni, najzanesljivejše so spremembe v drugem obdobju.

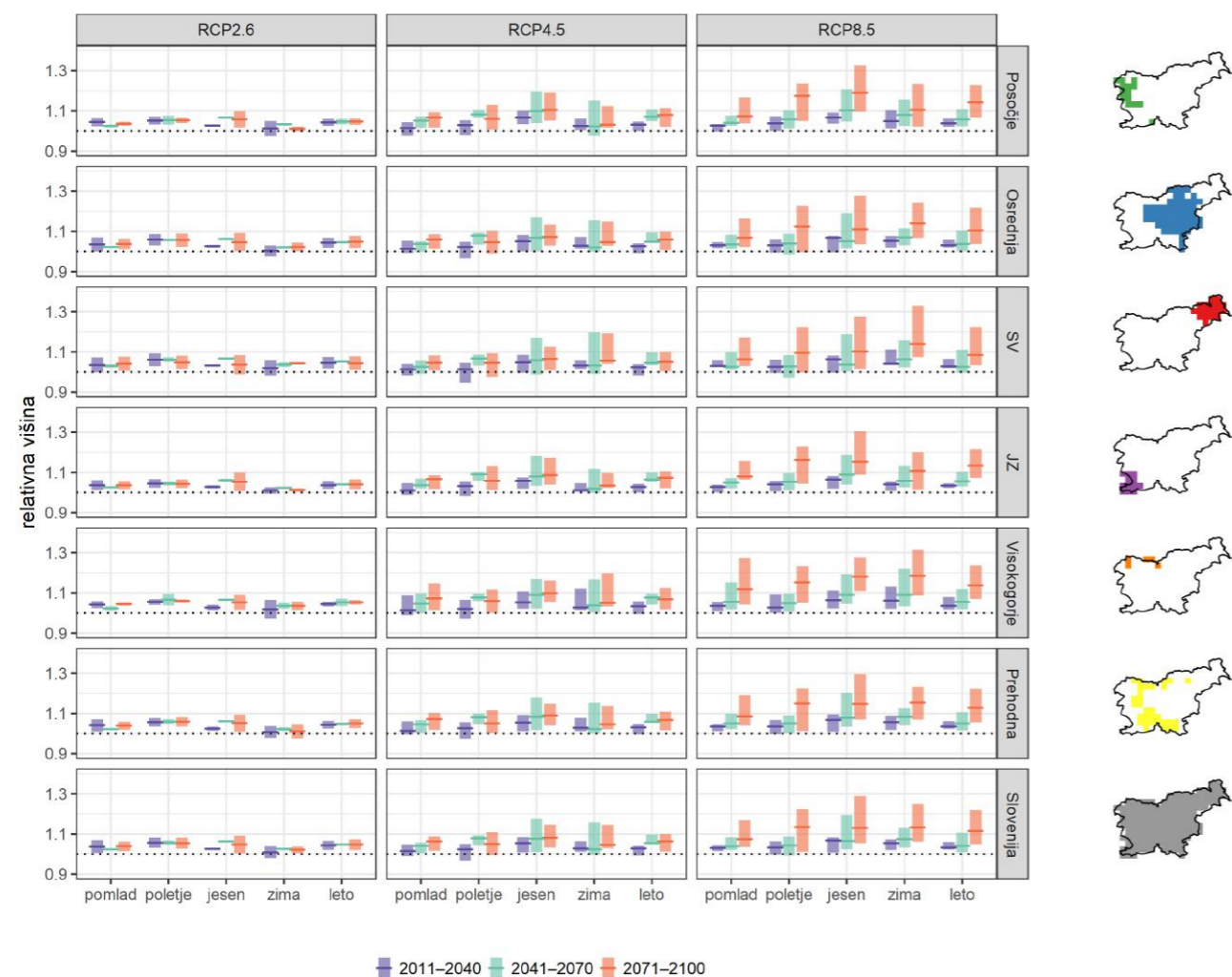
V primeru pesimističnega scenarija izpustov RCP8.5 bodo spremembe referenčne evapotranspiracije izrazitejše kot pri ostalih dveh scenarijih, predvsem v

zadnjem obdobju, ko je po Sloveniji predvideno povečanje med 10 in 20 % (slika 5.51, desno). Izjema je severovzhodna regija, kjer je predvidena sprememba manjša. Znatne spremembe pričakujemo v vseh letnih časih, ki se bodo podobno kot na letni ravni proti koncu stoletja stopnjevale (slika 5.52, desno).

Negotovost projekcij v splošnem narašča od RCP2.6 proti RCP8.5 in od bližnje prihodnosti proti koncu 21. stoletja (slika 5.53).



Slika 5.52 | Sprememba povprečne referenčne evapotranspiracije po meteoroloških letnih časih in za celo leto v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981-2010 za scenarija izpustov RCP4.5 (zgoraj) in RCP8.5 (naslednja stran). Prikazan je relativni odklon referenčne evapotranspiracije od povprečja v primerjalnem obdobju 1981-2010.



Slika 5.53 | Povprečni razponi sprememb povprečne referenčne evapotranspiracije v posameznih regijah po meteoroloških letnih časih in za celo leto za tri scenarije. Vodoravna poudarjena črta v stolpcu prikazuje mediano ansambla modelskih rezultatov, stolpec pa razpon vseh simulacij modelskega ansambla.

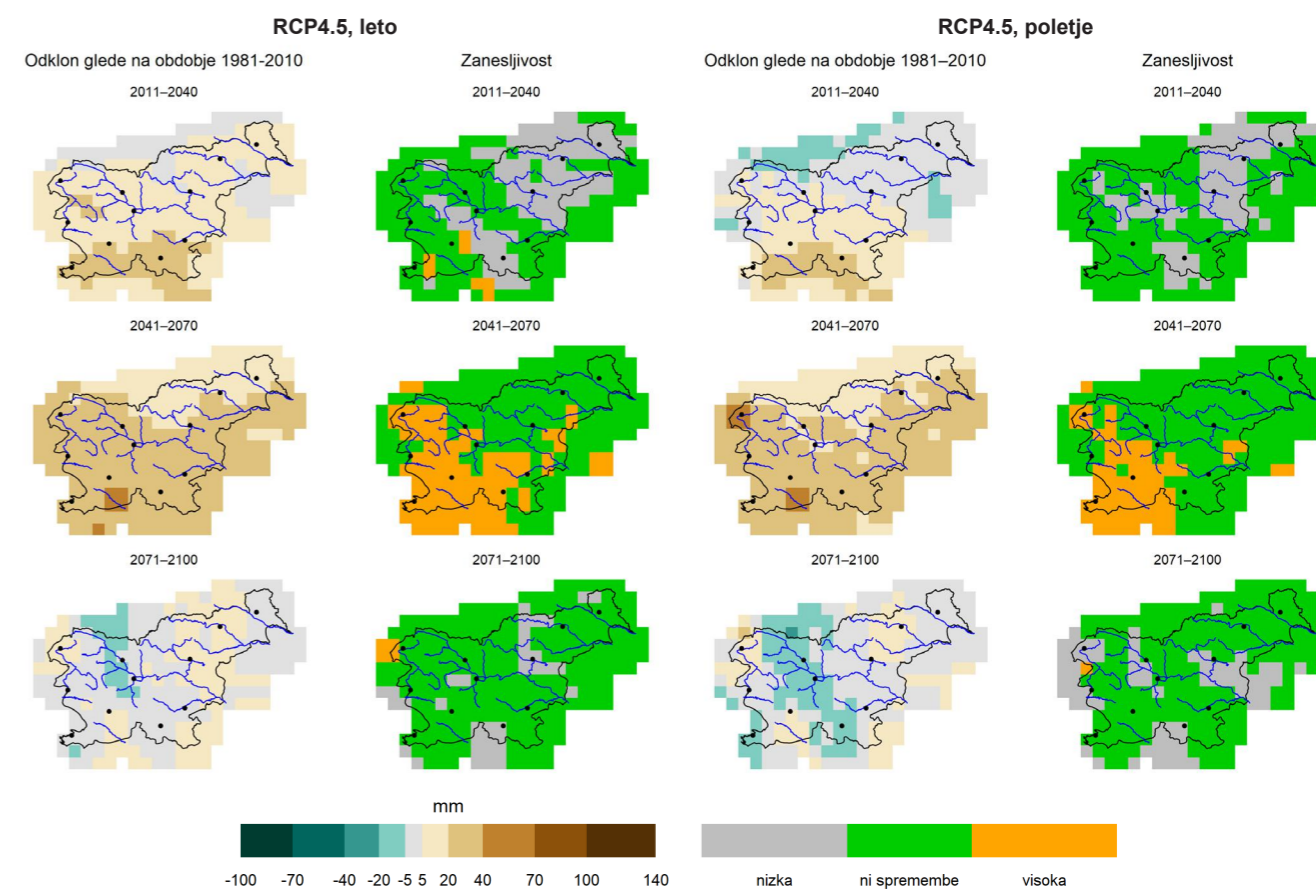
5.5.2 Spremembe vodnega primanjkljaja

Vodni primanjkljaj smo opredelili kot razliko med 60-dnevno drsečo referenčno evapotranspiracijo ET_0 in višino padavin v tem obdobju. Spremenljivka je izvedena iz ocenjene referenčne evapotranspiracije, ki je zaradi izračuna iz večjega števila modelskih meteoroloških spremenljivk obremenjena z veliko negotovostjo. V nadaljevanju predstavljamo analizo sprememb povprečja letnih ali sezonskih največjih vrednosti vodnega primanjkljaja.

Za scenarij izpustov RCP4.5 se kaže statistično zanesljivo povečanje največjega vodnega primanjkljaja v drugem obdobju (2041–2070) do 40 mm na letni

ravni in poleti nad jugozahodno Slovenijo (slika 5.54, zgoraj), jeseni pa nad nekoliko večjim območjem tudi do 70 mm (slika 5.54, spodaj). V zadnjem obdobju (2071–2100) so spremembe značilne samo jeseni in samo ponekod. Drugod si modelski rezultati nasprotujejo, vendar je tam možna sprememba do 40 mm (slika 5.54, spodaj). Rezultati so skladni s projekcijami padavin, ki v primeru scenarija izpustov RCP4.5 za toplo polovico leta predvidevajo najprej zmanjšanje, nato pa proti koncu stoletja povečanje višine padavin.

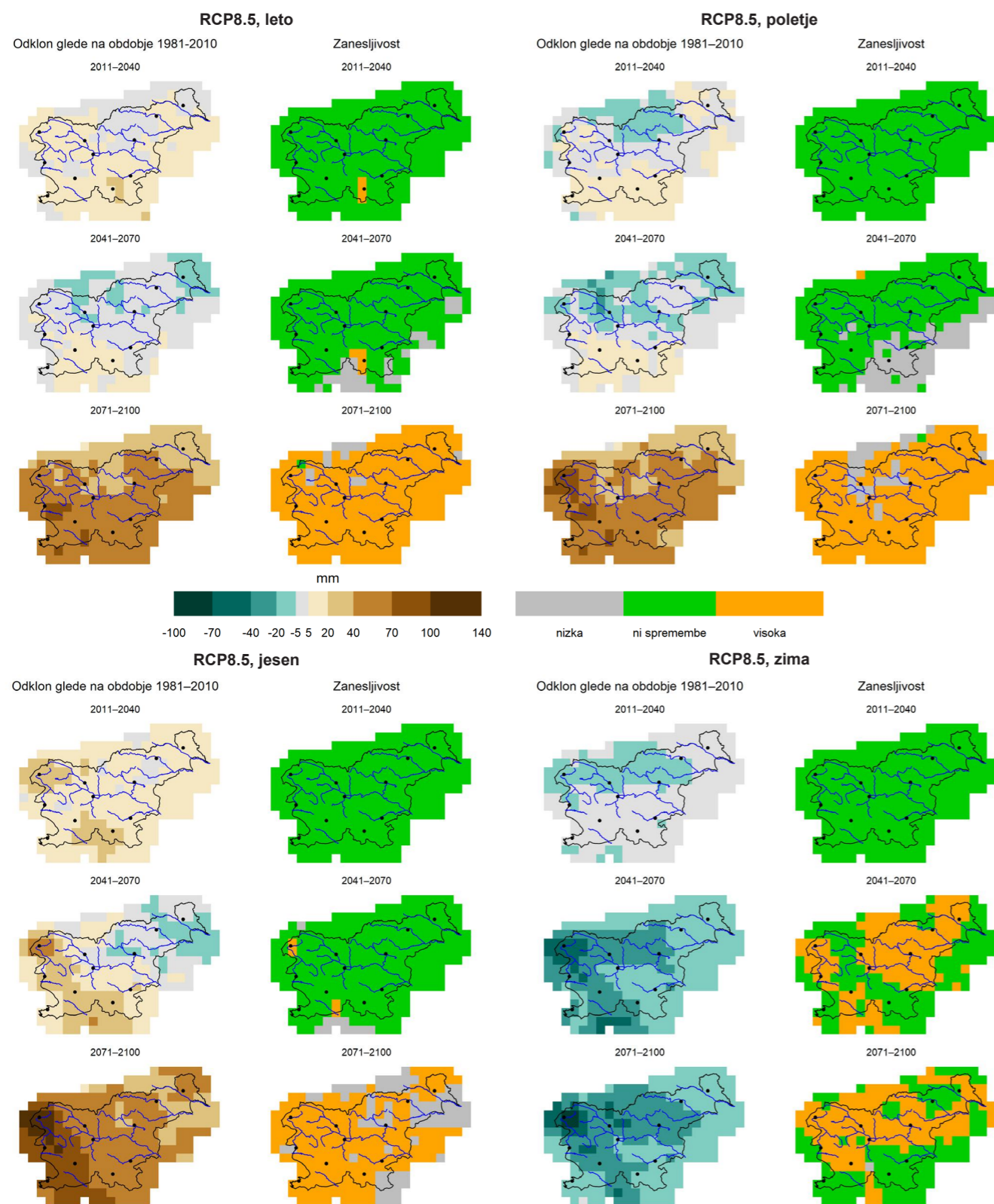
Za scenarij izpustov RCP8.5, razen za zimo, ne pričakujemo zanesljivih sprememb vse do zadnjega projekcijskega obdobja (2071–2100). Pozimi v drugem obdobju pričakujemo zmanjšanje največjega vodnega



Slika 5.54 | Sprememba v povprečnem največjem vodnem primanjkljaju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 na letni ravni (zgoraj levo), poleti (zgoraj desno) in jeseni (spodaj) ter pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarij RCP4.5

primanjkljaja do 40 mm nad precejšnjim delom Slovenije, nad Alpami pa celo zmanjšanje do 70 mm. Podoben signal se kaže tudi za zimo v zadnjem obdobju (slika 5.55, spodaj desno). V zadnjem obdobju je na letni ravni zanesljivo povečanje največjega vodnega primanjkljaju do 70 mm nad celotno državo, nad nekaterimi območji tudi do 100 mm (slika 5.55, zgoraj levo). Največje bo povečanje vodnega primanjkljaja poleti (do 70 mm, na zahodu tudi 100 mm) in jeseni (slika 5.55, zgoraj desno in spodaj levo). Jeseni se bo vodni primanjkljaj povečal do 70 mm predvsem na jugozahodu, nad Alpami pa do 140 mm. Spomladi, razen nad Alpami, ko v tretjem obdobju pričakujemo zmanjšanje do 40 mm, za vodni primanjkljaj ne pričakujemo zanesljivih sprememb.

Za scenarij izpustov RCP2.6 ni zanesljivih sprememb v vodnem primanjkljaju.



Slika 5.55 | Sprememba v povprečnem največjem vodnem primanjkljaju v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 na letni ravni (zgoraj levo), poleti (zgoraj desno), jeseni (spodaj levo) in pozimi (spodaj desno) ter pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarij RCP8.5

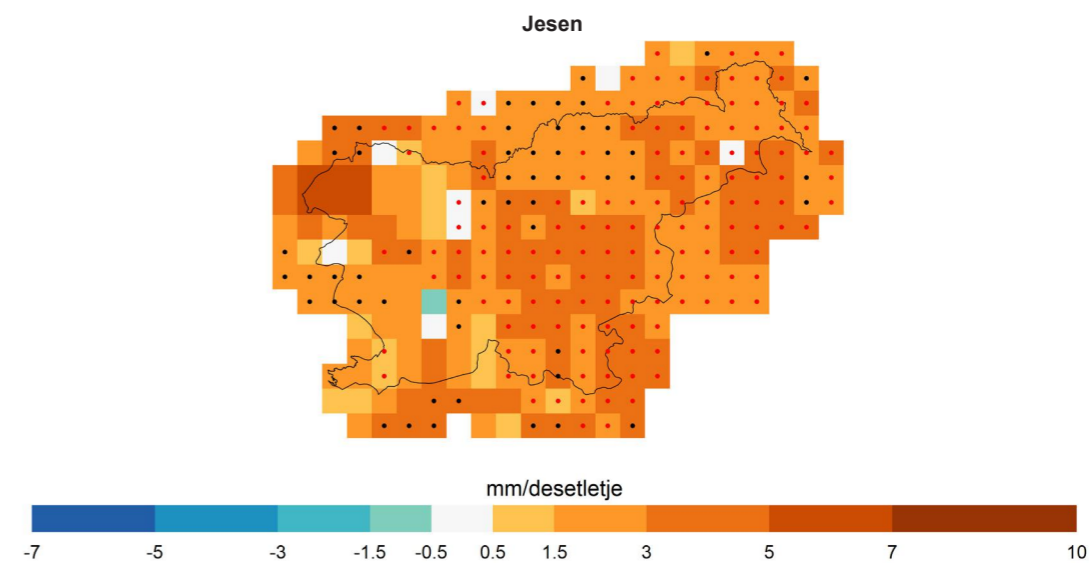
5.5.3 Spremembe povratnih nivojev največjega vodnega primanjkljaja

Podobno kot za padavine, smo tudi za največji vodni primanjkljaj spremembe povratnih nivojev ocenili za celotno prihodnje obdobje s pomočjo linearnega trenda. Linearen trend na enostaven način pove, kako hitro se s časom spreminjajo vsi povratni nivoji za izbrano količino. Sedanje vrednosti povratnih nivojev so znane iz podatkov večdesetletnih meteoroloških meritev v preteklosti. Linearni trendi so podani v spremembi na desetletje (mm/desetletje za vodni primanjkljaj). Karte prikazujejo srednjo vrednost (mediano) trendov šestih (dveh za scenarij RCP2.6) izbranih podnebnih modelov in skladnost oziroma zanesljivost ansambelskega rezultata. Vedno moramo imeti v mislih tudi to, da je ocena trenda ansambla statistična in vsebuje tudi statistično napako. Skladni statistično zanesljivi trendi so označeni s črnimi pikami, z rdečimi pa trendi, kjer rezultati ansambla niso skladni, modeli v ansamblu si niso enotni glede predznaka trenda. Ti rezultati lahko zato pomenijo velike spremembe tako navzgor kot navzdol. Kjer pik ni, trendi statistično niso zanesljivi. V tem primeru na osnovi podatkov, ki smo jih imeli na voljo, ne moremo sklepati, da bo do sprememb prišlo, oziroma so zaznane spremembe manjše kot naravna spremenljivost izjemnega vodnega primanjkljaja.

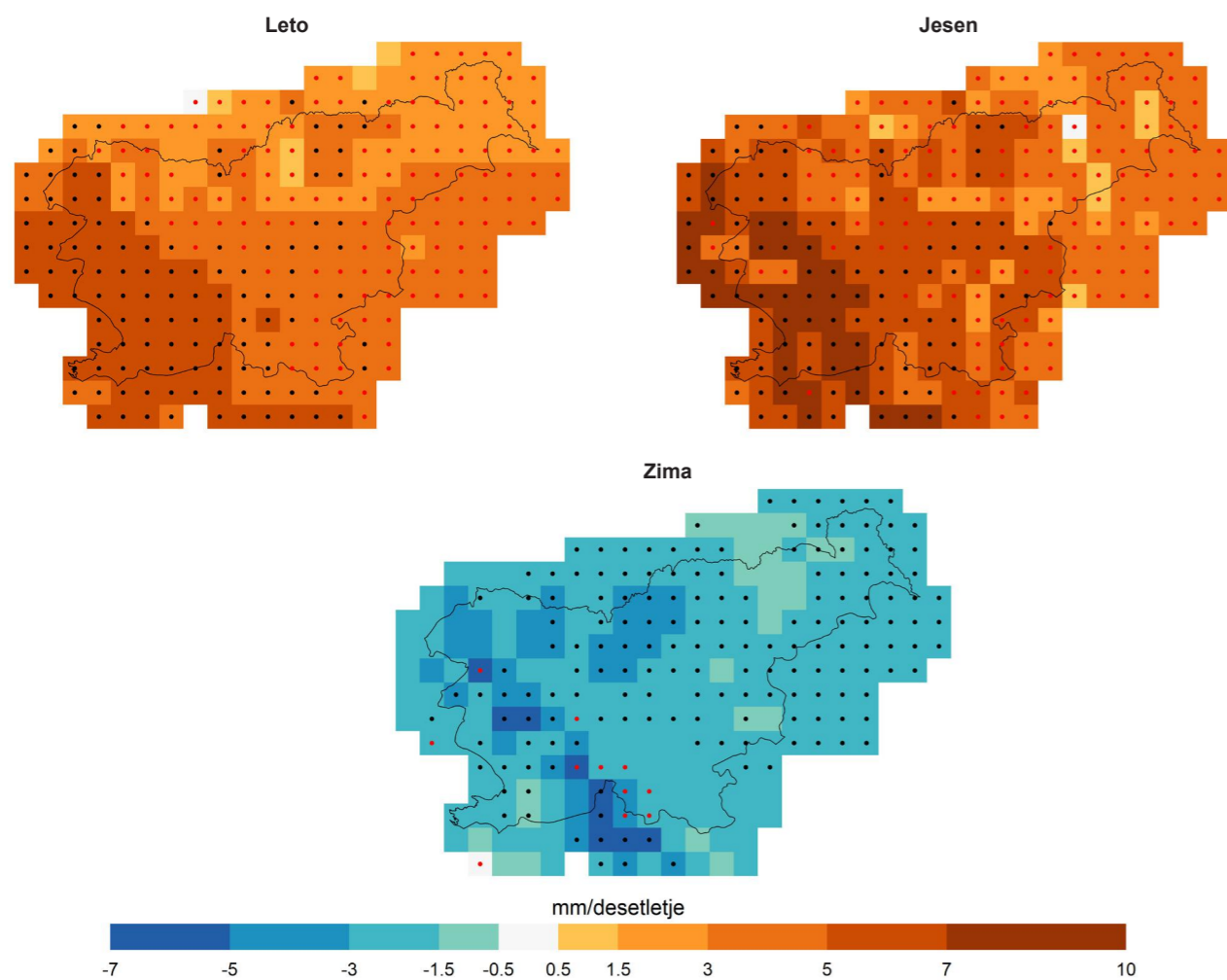
Za scenarij izpustov RCP4.5 se kaže trend v vodnem primanjkljaju edino v jeseni. Statistično je značilen nad Koroško, kjer njegova srednja vrednost znaša do 3 mm/desetletje. Nad severovzhodnima dvema tretjinama Slovenije si modeli niso enotni glede predznaka trenda. Tam je možen trend s srednjo vrednostjo do 5 mm/desetletje (slika 5.56).

Za scenarij izpustov RCP8.5 sta trenda na letni ravni in poleti praktično enaka, kar je razumljivo, saj prihaja do izjemnega vodnega primanjkljaja večinoma poleti. Statistično zanesljiv trend je za ti dve obdobji visok, s srednjo vrednostjo do 7 mm/desetletje v jugozahodni in južni Sloveniji (slika 5.57, zgoraj levo). Drugod si modeli niso enotni, lahko pa je povprečna vrednost trenda tam tudi do 5 mm/desetletje. Podobno je jeseni, srednja vrednost trenda v jugozahodni Sloveniji pa znaša tudi do 10 mm/desetletje (slika 5.57, zgoraj desno). Pozimi se bo vodni primanjkljaj zmanjšal. Trend je večinoma zanesljiv, s srednjo vrednostjo do –5 mm/desetletje (slika 5.57, spodaj).

Za scenarij RCP2.6 ni značilnih trendov v izjemnem vodnem primanjkljaju.



Slika 5.56 | Trend največjega vodnega primanjkljaja jeseni s pripadajočo zanesljivostjo za scenarij RCP4.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).



Slika 5.57 | Trend največjega vodnega primanjkljaja na letni ravni (zgoraj levo), jeseni (zgoraj desno) in pozimi (spodaj) s pripadajočo zanesljivostjo za scenarij RCP8.5 v obdobju 1981–2100. Črne pike označujejo celice z zanesljivim trendom, rdeče pike celice z nezanesljivim trendom. V ostalih celicah ni izrazitega trenda (zaznane spremembe so manjše od naravne spremenljivosti).

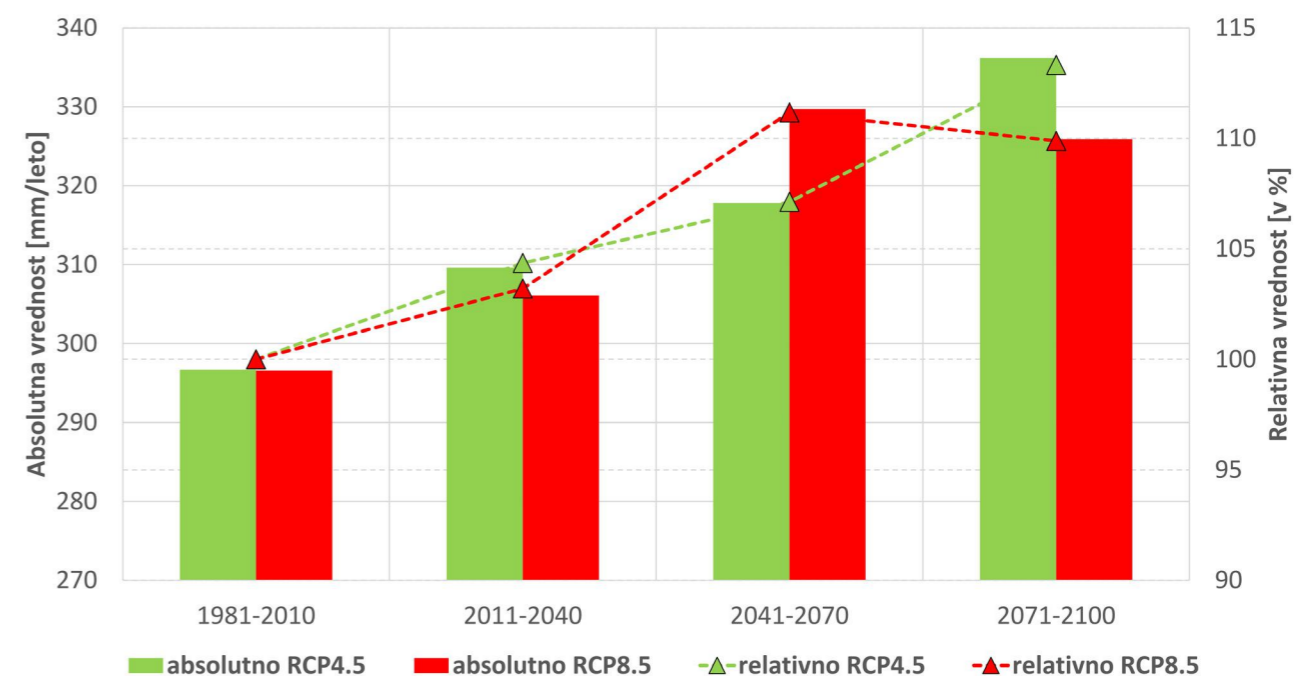
5.5.4 Spremembe povprečnega letnega napajanja podzemne vode

Povprečno letno napajanje podzemne vode smo ocenili z modelom GROWA-SI. Da bi lahko ocenili spremembe, smo z istim modelom izračunali vrednost povprečnega letnega napajanja podzemne vode v Sloveniji v primerjalnem obdobju 1981–2010, ki je znašalo 297 mm/leto. Oba scenarija izpustov RCP4.5 in RCP8.5 do konca stoletja kažeta na povečanje napajanja podzemne vode (slika 5.58, preglednica 5.1). Scenarij izpustov RCP4.5 predvideva rast napajanja podzemne vode v vseh treh projekcijskih obdobjih (povečanje za 13 % v obdobju 2071–2100 glede na 1981–2010), medtem ko scenarij izpustov RCP8.5 kaže na rast v prvih dveh obdobjih (3 % in 11 % glede na 1981–2010) ter rahel upad v zadnjem obdobju (–1,2 % glede na 2041–2070). V absolutnih vrednostih so spremembe naslednje. Model GROWA-SI do konca 21. stoletja predvideva povečanje povprečnega letnega napajanja podzemne vode za okrog 40 mm/leto po podnebnem scenariju RCP4.5 ter povečanje za okrog 30 mm/leto po podnebnem scenariju RCP8.5 (preglednica 5.1).

V prihodnjih obdobjih povprečno letno napajanje podzemne vode v Sloveniji ne kaže na večje spremembe v prostorski razporeditvi količine napajanja glede na

primerjalno obdobje 1981–2010. V večini Slovenije oba scenarija izpustov kažeta na povečevanje napajanja podzemne vode v projekcijskih obdobjih (slika 5.59). V scenariju izpustov RCP4.5 se spremembe stopnjujejo v vseh treh obdobjih, v scenariju izpustov RCP8.5 pa so največje spremembe v drugem obdobju, v zadnjem so nekoliko manj izrazite. Spremembe bodo glede na primerjalno obdobje največje na severovzhodu Slovenije. V prvem projekcijskem obdobju je v scenariju izpustov RCP4.5 predvideno povečano napajanje do 20 % na skrajnem severovzhodu Slovenije in se proti notranjosti države zmanjšuje (na 5 do 10 %). Na alpsko-dinarski pregradi bo sprememba manjša od 5 %, v Istri pa zopet večja (okoli 10 %). Prostorska porazdelitev sprememb je za vsa primerjalna obdobja podobna, stopnjuje se le velikost porasta napajanja, ki v zadnjem projekcijskem obdobju na skrajnem severovzhodu Slovenije preseže 40 %.

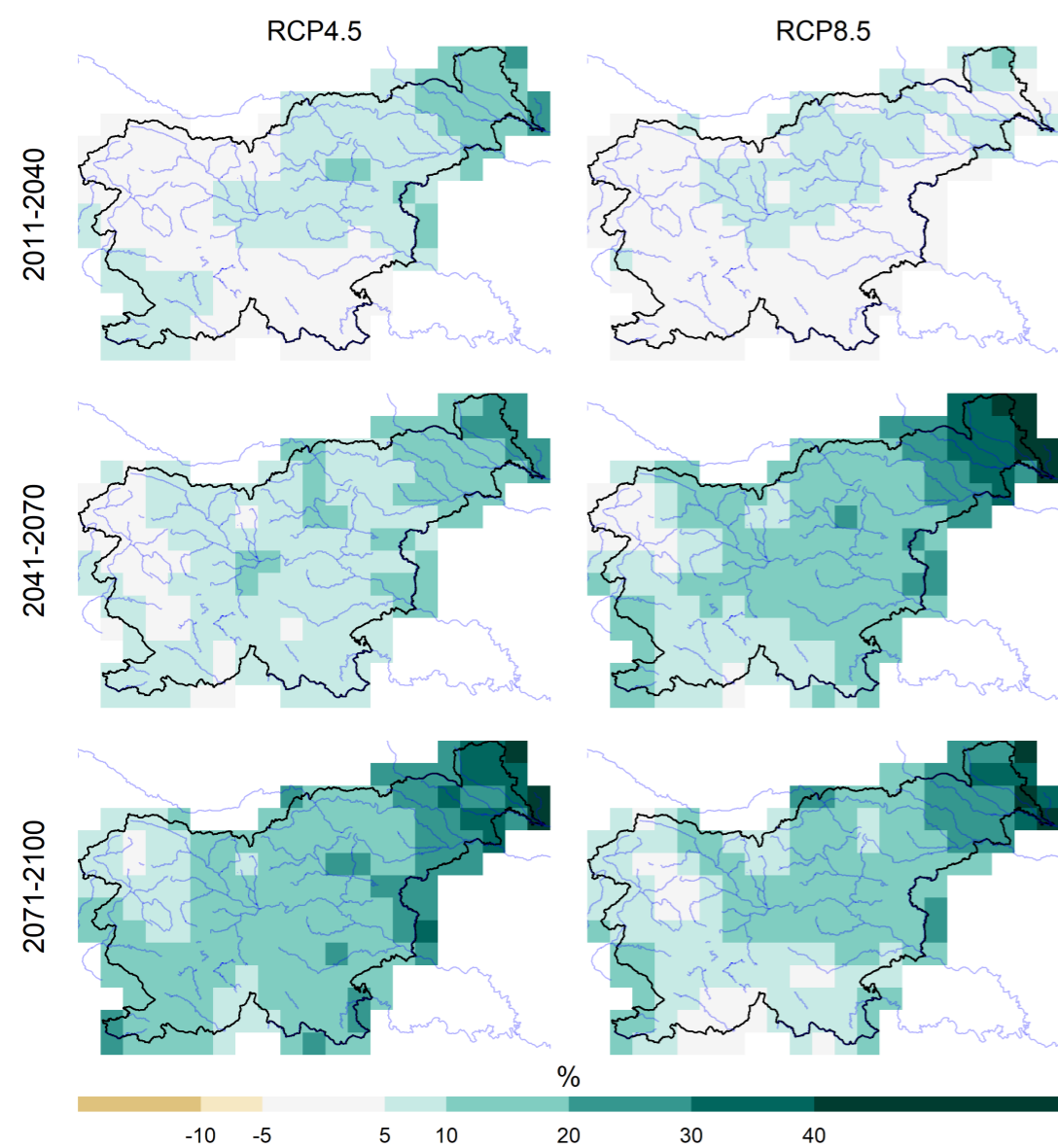
Tudi v primeru scenarija izpustov RCP8.5 je prostorska porazdelitev sprememb podobna kot v scenariju izpustov RCP4.5. Razlike so v velikosti spremembe. V prvem projekcijskem obdobju so v scenariju RCP8.5 predvidene spremembe napajanja zelo majhne. V drugem projekcijskem obdobju so v primerjavi s scenarijem RCP4.5 precej večje, v zadnjem projekcijskem obdobju pa bo predvideno povečanje napajanja manjše kot v predhodnem obdobju.



Slika 5.58 | Absolutne in relativne spremembe napajanja podzemne vode v treh projekcijskih obdobjih za scenarij RCP4.5 (zelena) in RCP8.5 (rdeča)

Preglednica 5.1 | Ocene za napajanje podzemne vode v Sloveniji po modelu GROWA-SI za tri projekcijska obdobja (v mm/leto)

Obdobje	GROWA-SI (RCP4.5)	GROWA-SI (RCP8.5)
1981–2010	297	297
2011–2040	310	306
2041–2070	318	330
2071–2100	336	326



Slika 5.59 | Spremembe povprečnega letnega napajanja podzemne vode za tri projekcijska obdobja in dva scenarija izpustov RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno) glede na primerjalno obdobje 1981–2010

5.6 SPREMEMBE HIDROLOŠKIH SPREMENLJIVK

Večjih sprememb srednjih letnih pretokov v Sloveniji v primerjavi z obdobjem 1981–2010 po vseh scenarijih izpustov ni pričakovati, z izjemo severovzhoda, kjer bi se pretoki v zmerno optimističnem scenariju izpustov do konca stoletja lahko povečali do 30 %. V primeru pesimističnega scenarija izpustov bo lahko v sredini stoletja na severovzhodu povečanje do 40 %.

Srednje letne konice se bodo po vseh scenarijih izpustov v primerjavi z obdobjem 1981–2010 povečale povsod po državi, v povprečju od 20 do 30 %. Povečanje se od bližnje prihodnosti proti koncu stoletja stopnjuje. Največje povečanje konic bo na severovzhodu države, kjer bo v primeru zmerno optimističnega scenarija izpustov znašalo do približno 30 %. V primeru pesimističnega scenarija izpustov bo povečanje proti koncu stoletja med 20 in 40 % na skoraj vseh vodomernih postajah.

Po zmerno optimističnem in pesimističnem scenariju so spremembe srednjih malih pretokov prostorsko neenotne in le ponekod v severni polovici Sloveniji kažejo na značilno povečanje za približno 20 %.

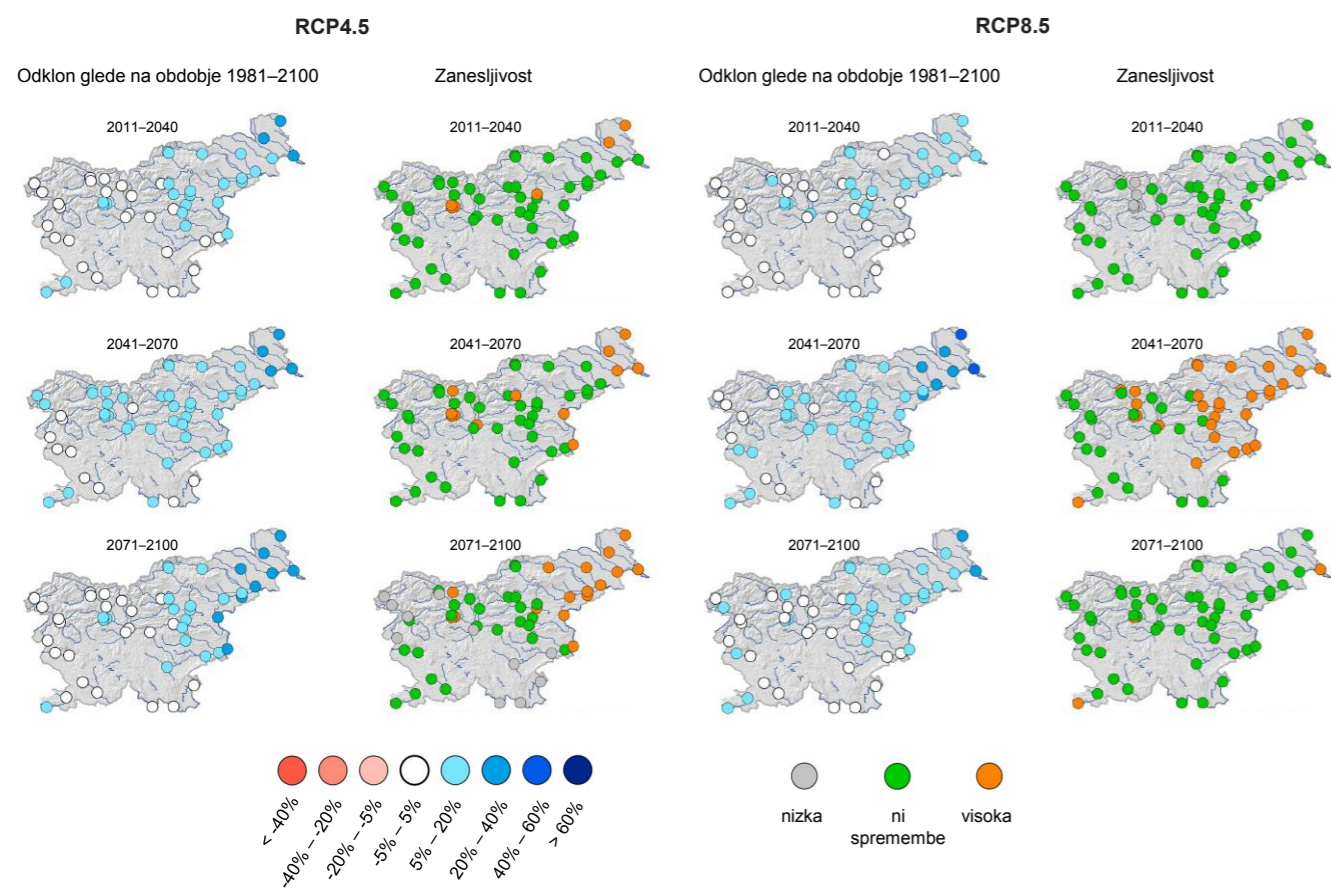
5.6.1 Spremembe srednjih pretokov

Večjih sprememb srednjih letnih pretokov v Sloveniji za različne scenarije izpustov (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) do konca stoletja glede na primerjalno obdobje 1981–2010 ni pričakovati, le za severovzhod države se kaže deloma znatno povečanje pretokov (slika 5.60). Zanesljivost predvidenih sprememb pretokov je v največji meri odvisna od zanesljivosti spremembe padavin, ki imajo največji vpliv na odtok površinskih voda. Signali sprememb pretokov dajejo za posamezne reke manjše ali večje razlike za različne scenarije izpustov, ki pa se proti koncu stoletja povečujejo (slika 5.61). Največja negotovost sprememb je za reke na severovzhodu države (pritoki rek Mure in Drave) ter za reke v jugozahodnem delu Slovenije.

Po zmerno optimističnem scenariju izpustov RCP4.5 kažejo srednji pretoki v primerjavi s primerjalnim obdobjem 1981–2010 za bližnjo prihodnost na manjše povečanje predvsem za severovzhodni del države in na obalnem območju, drugje sprememb ni pričakovati (slika 5.60). Za sredino stoletja so povečanja predvidena za večji del države z izjemo rek Notranjske, Vipave, spodnjega dela Soče in Kolpe. Za konec stoletja pa ocenjujemo, da bo bilančno stanje srednjih pretokov rek podobno kot v bližnji prihodnosti. Pri vseh obdobjih z večjo vodnatostjo izstopa predvsem Pomurje, kjer je predvideno povečanje pretokov do 30 %. V vseh treh obdobjih so spremembe deloma zanesljive za severovzhod države in na posameznih postajah v severni Sloveniji (slika 5.60).

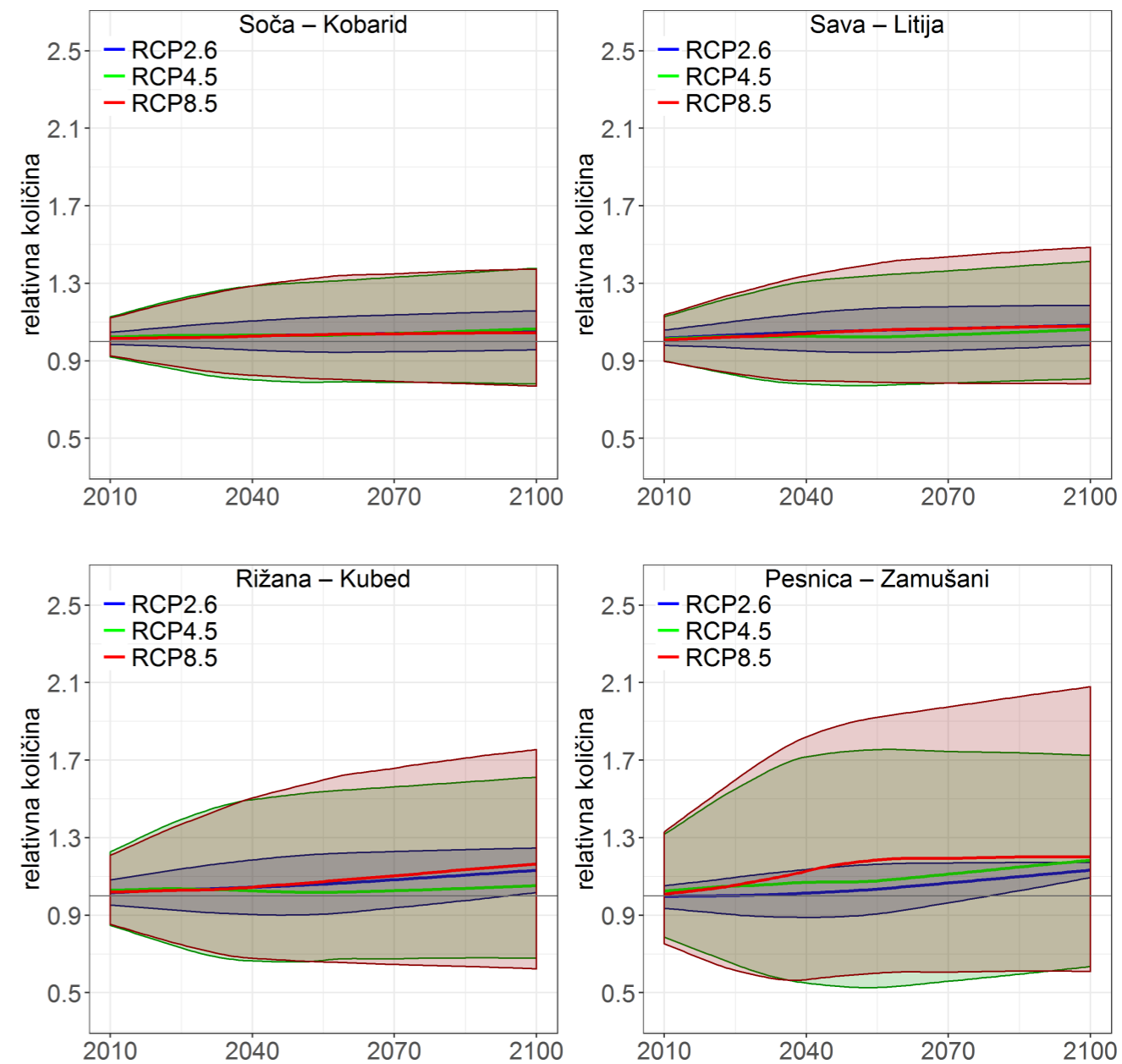
Pesimistični scenarij izpustov RCP8.5 kaže podobno kot RCP4.5. Za sredino stoletja so povečanja predvidena za večji del države, kjer se izrazito in zanesljivo povečanje kaže za večino vzhodnega dela Slovenije, celo do okrog 40 %, medtem ko za Posočje in v delih južne Slovenije sprememb ni pričakovati. Konec stoletja bo bilančno stanje srednjih pretokov podobno kot pri scenariju RCP4.5, le da je zanesljivost spremembe manjša. Tudi optimistični scenarij RCP2.6 kaže v bližnji prihodnosti na manjše povečanje na skrajnem severovzhodu države, za sredino in konec stoletja pa kaže na bilančno bolj bogate srednje pretoke skoraj povsod po državi, z izrazitejšim povečanjem srednjih pretokov v Pomurju.

Spremembe srednjega letnega pretoka skozi 21. stoletje za reki Savo in Sočo ne kažejo velikih razlik med posameznimi scenariji izpustov (slika 5.61). Pri obeh rekah negotovost modelskega ansambla za scenarij izpustov RCP4.5 približno sovпада z negotovostjo scenarija izpustov RCP8.5, medtem ko je za scenarij izpustov RCP2.6 ta pričakovano manjša zaradi manjšega števila modelov v ansamblu. Pri rekah na jugozahodu (Rižani) in severovzhodu (Pesnici), kjer so razmerja med srednjimi in malimi pretoki velika, je negotovost modelskega ansambla večja, večje so tudi razlike med scenariji izpustov na koncu stoletja. Pri Rižani odstopa scenarij izpustov RCP4.5, v primeru Pesnice pa RCP2.6 in sicer oba kažeta nekoliko manjšo spremembo srednjega pretoka v primerjavi z ostalimi scenariji izpustov. Pri Pesnici je precej raznolik tudi potek spremembe v celotnem časovnem obdobju



Slika 5.60 | Relativna sprememba srednjih letnih pretokov v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)

za posamezne scenarije izpustov; v primeru scenarija izpustov RCP8.5 je za sredino stoletja predviden višek in nato znižanje proti letu 2100, pri ostalih dveh scenarijih izpustov pa tekom stoletja zmerno naraščanje.



Slika 5.61 | Časovni potek spremembe srednjih pretokov za vodomerne postaje na Soči, Savi, Rižani in Pesnici za tri scenarije, vključno z razponi odstopanj. Prikazana je relativna vrednost glede na povprečje v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojníc največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

5.6.2 Spremembe velikih pretokov

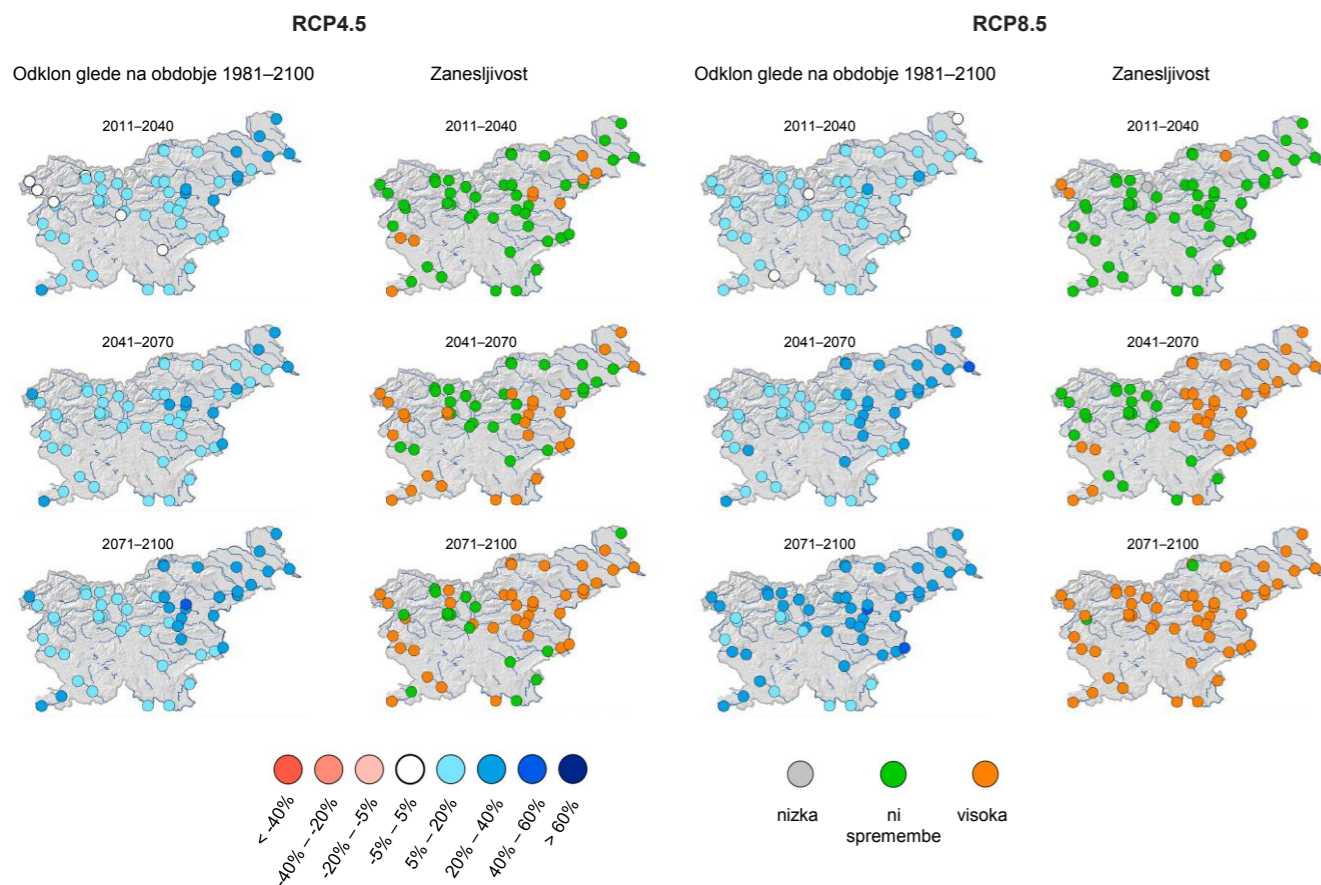
Pri spremembi velikih pretokov (srednjih letnih konic) kažejo vsi trije scenariji izpustov za vsa obdobja v prihodnosti na povečanje srednjih letnih konic po večini države, pri čemer so, podobno kot pri srednjih pretokih, največja povečanja predvidena za severovzhod in deloma vzhod države (slika 5.62).

V primeru scenarijev izpustov RCP4.5 in RCP8.5 se sprememba od bližnje prihodnosti proti koncu stoletja stopnjuje. Za bližnjo prihodnost je v scenariju izpustov RCP4.5 za severovzhodni del predvideno večje povečanje kot v primeru scenarija izpustov RCP8.5, do okrog 30 %. V sredini stoletja je največji porast pričakovan v severovzhodni Sloveniji in na Obali. Proti koncu stoletja se pri scenariju izpustov RCP4.5 kaže podobna slika kot v sredini stoletja, pri scenariju izpustov RCP8.5 pa se kaže povečanje med 20 in 40 % glede na primerjalno obdobje na skoraj vseh postajah.

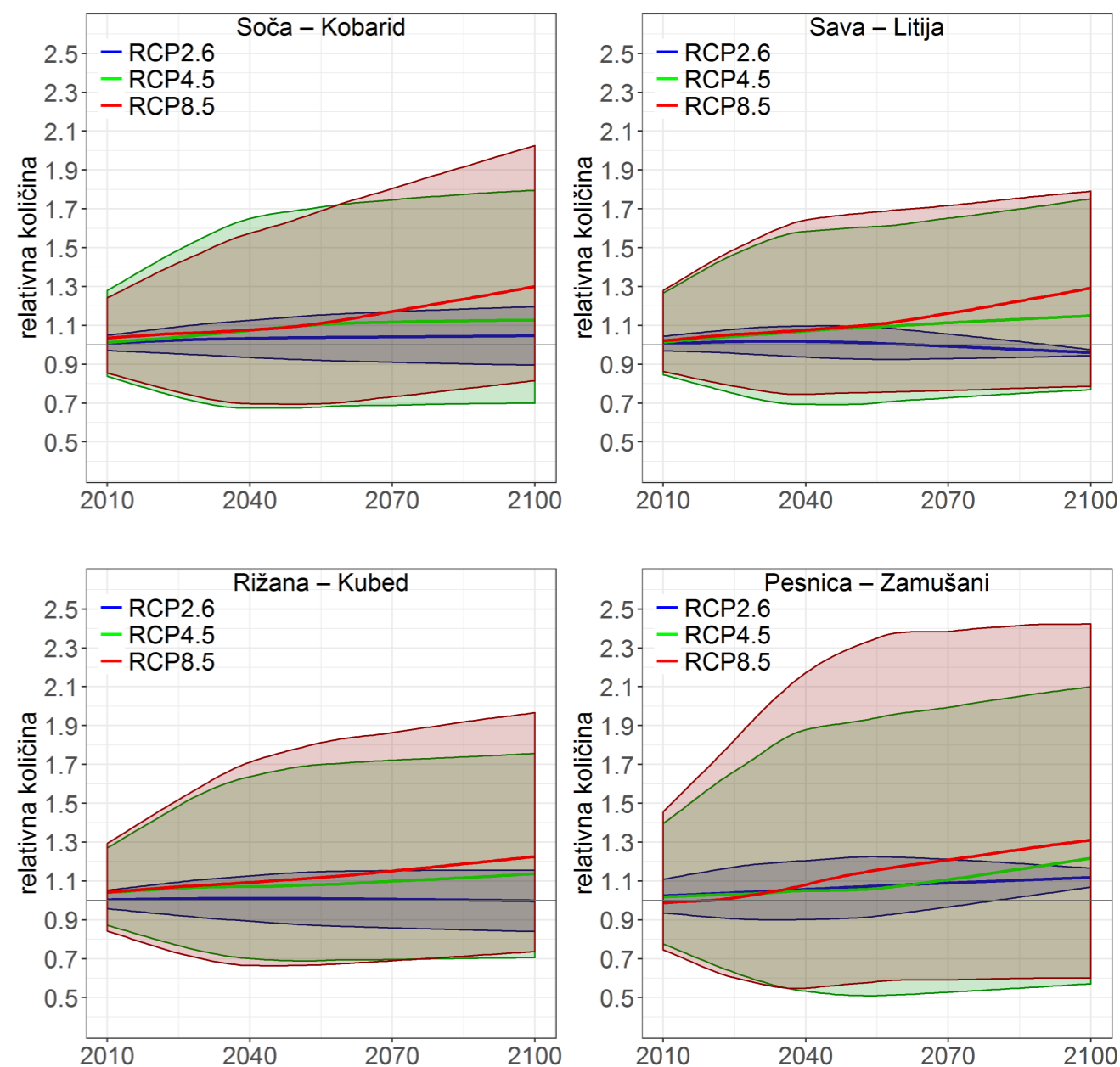
Zanesljivost sprememb oziroma število postaj z visoko zanesljivostjo spremembe se z vsakim naslednjim obdobjem stopnjuje (slika 5.62). Za oba scenarija izpustov so spremembe najbolj zanesljive v zadnjem obdobju, v primeru scenarija izpustov RCP8.5 so takrat zanesljive na skoraj vseh postajah.

Čeprav se tudi v primeru scenarija izpustov RCP2.6 kažejo povečanja velikih pretokov v vseh obdobjih, na vzhodu tudi do 30 %, pa so te spremembe nezanesljive, oziroma manjše od naravne spremenljivosti.

Negotovost modelskega ansambla je za spremembe velikih pretokov večja od negotovosti srednjih pretokov (slika 5.63). Pri prikazanih rekah je potek sprememb ob koncu stoletja podoben; največje povečanje velikih pretokov je predvideno v primeru scenarija izpustov RCP8.5, sledita RCP4.5 in RCP2.6. Najmanj izrazito povečanje velikega pretoka se kaže za Rižano oziroma za jugozahodni del Slovenije, kjer to pri scenariju



Slika 5.62 | Relativna sprememba velikih pretokov (srednjih letnih konic) v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)



Slika 5.63 | Časovni potek spremembe velikih pretokov (srednjih letnih konic) za vodomerne postaje na Soči, Savi, Rižani in Pesnici za tri scenarije, vključno z razponi odstopanj. Prikazana je relativna vrednost glede na povprečje v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojnice največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

izpustov RCP4.5 znaša okoli 10 %, pri RCP8.5 pa okoli 20 %. Pri ostalih rekah so relativne spremembe do 10 % višje.

5.6.3 Spremembe malih pretokov

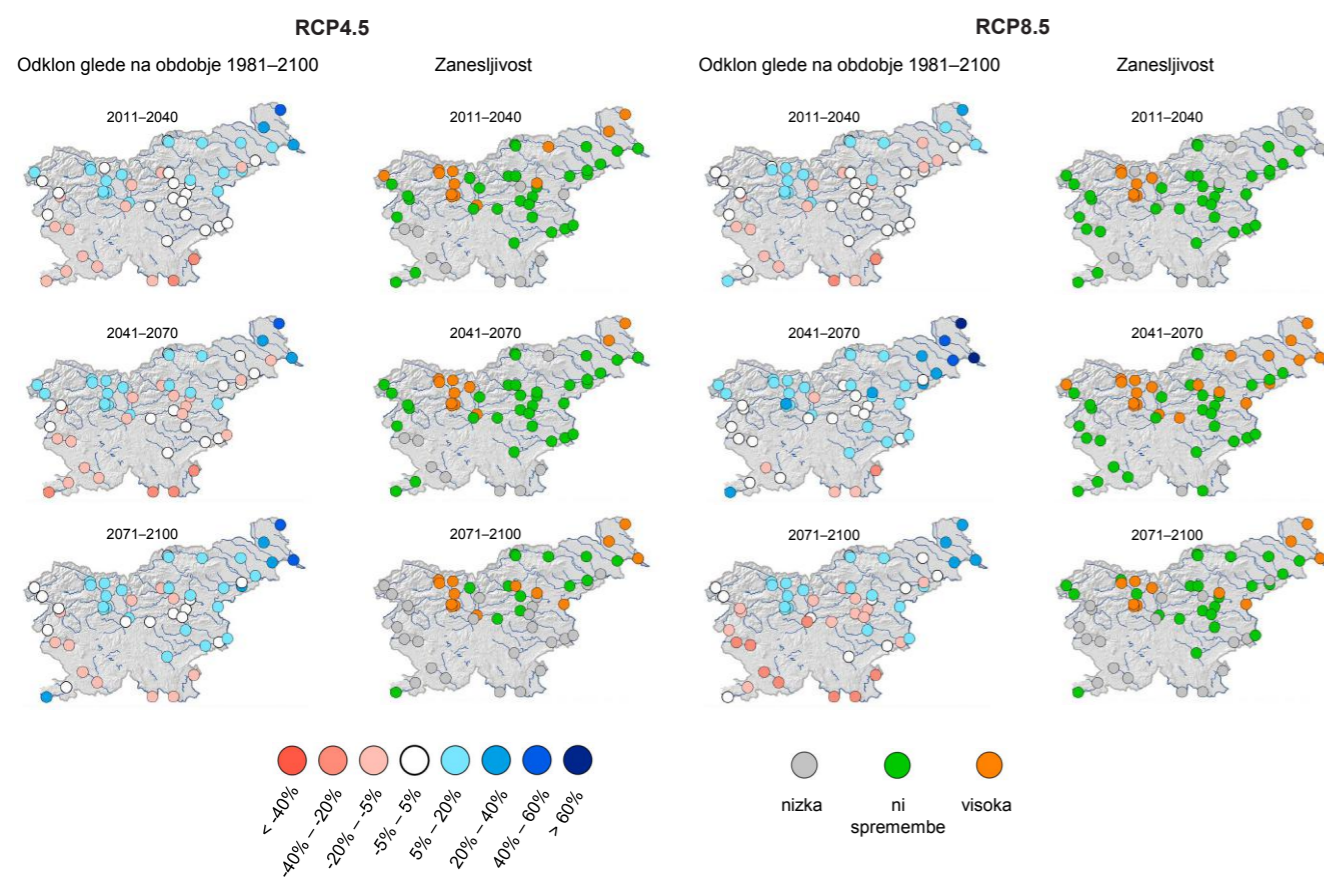
Pri srednjih malih pretokih lahko pričakujemo tako povečanje kot zmanjšanje v primeru vseh treh scenarijev izpustov. Scenarij izpustov RCP4.5 kaže v bližnji prihodnosti ter v sredini stoletja na povečanje za severno polovico države (slika 5.64). Večja in zanesljiva povečanja se kažejo za Pomurje. V Pokolpju in jugozahodni Sloveniji je predvideno zmanjšanje srednjih malih pretokov, vendar je to zmanjšanje nezanesljivo, ker si modeli nasprotujejo v predznaku sprememb. Za zadnje obdobje se kažejo podobne spremembe kot v sredini stoletja, z razliko, da je za Krko in spodnjo Savo predviden porast srednjih malih pretokov. Je pa za vse postaje v južnem in jugozahodnem delu zanesljivost sprememb nizka (slika 5.64).

V primeru scenarija izpustov RCP8.5 v bližnji prihodnosti pričakujemo podobno spremembo malih pretokov kot v scenariju izpustov RCP4.5, vendar je v tem primeru sprememba zanesljiva le v delu Gorenjske.

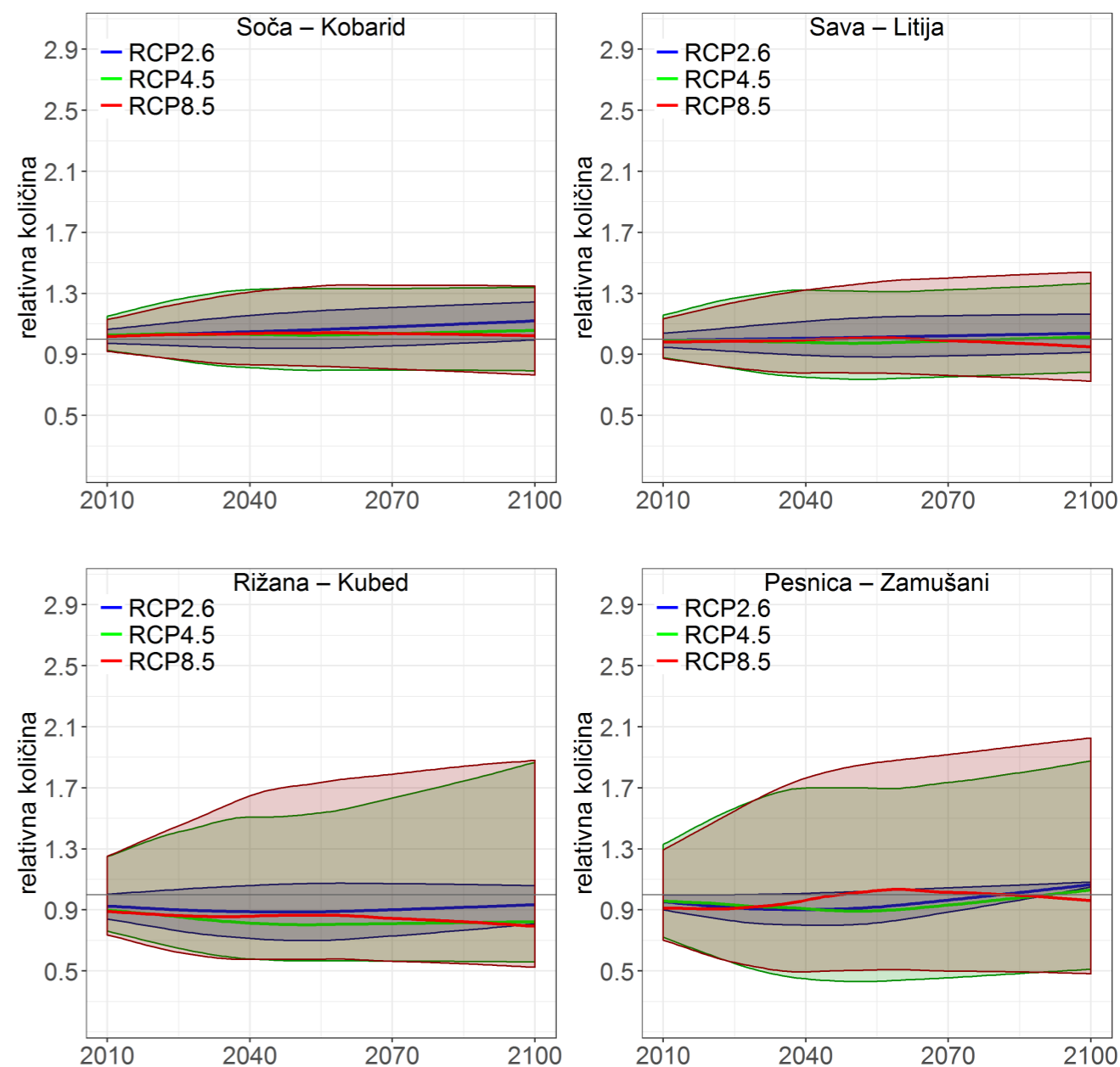
Za sredino stoletja se kaže zanesljivo povečanje malih pretokov v severni in vzhodni Sloveniji. Za južni del države je signal spremembe podoben kot za bližnjo prihodnost in nezanesljiv. Za konec stoletja se kaže podobna sprememba kot v bližnji prihodnosti, le da je signal zmanjšanja malih pretokov v južni Sloveniji nezanesljiv.

V primeru scenarija izpustov RCP2.6 so predvidene spremembe podobne kot v scenariju izpustov RCP4.5. Te spremembe so manjše od naravne spremenljivosti. Izjema je le občutno povečanje malih pretokov v Prekmurju ob koncu stoletja.

V jugovzhodnem delu Slovenije (Rižana) mediana spremembe malih pretokov do konca stoletja sicer kaže na zmanjšanje v vseh scenarijih izpustov (slika 5.65), vendar sprememba ni zanesljiva. Zmanjšanje se ponekod kaže tudi v preostali Sloveniji, predvsem v primeru scenarija izpustov RCP8.5, vendar so spremembe povsod neznačilne ali nezanesljive (slika



Slika 5.64 | Relativna sprememba malih pretokov v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 in pripadajoča zanesljivost spremembe za scenarija izpustov RCP4.5 (levo) in RCP8.5 (desno)



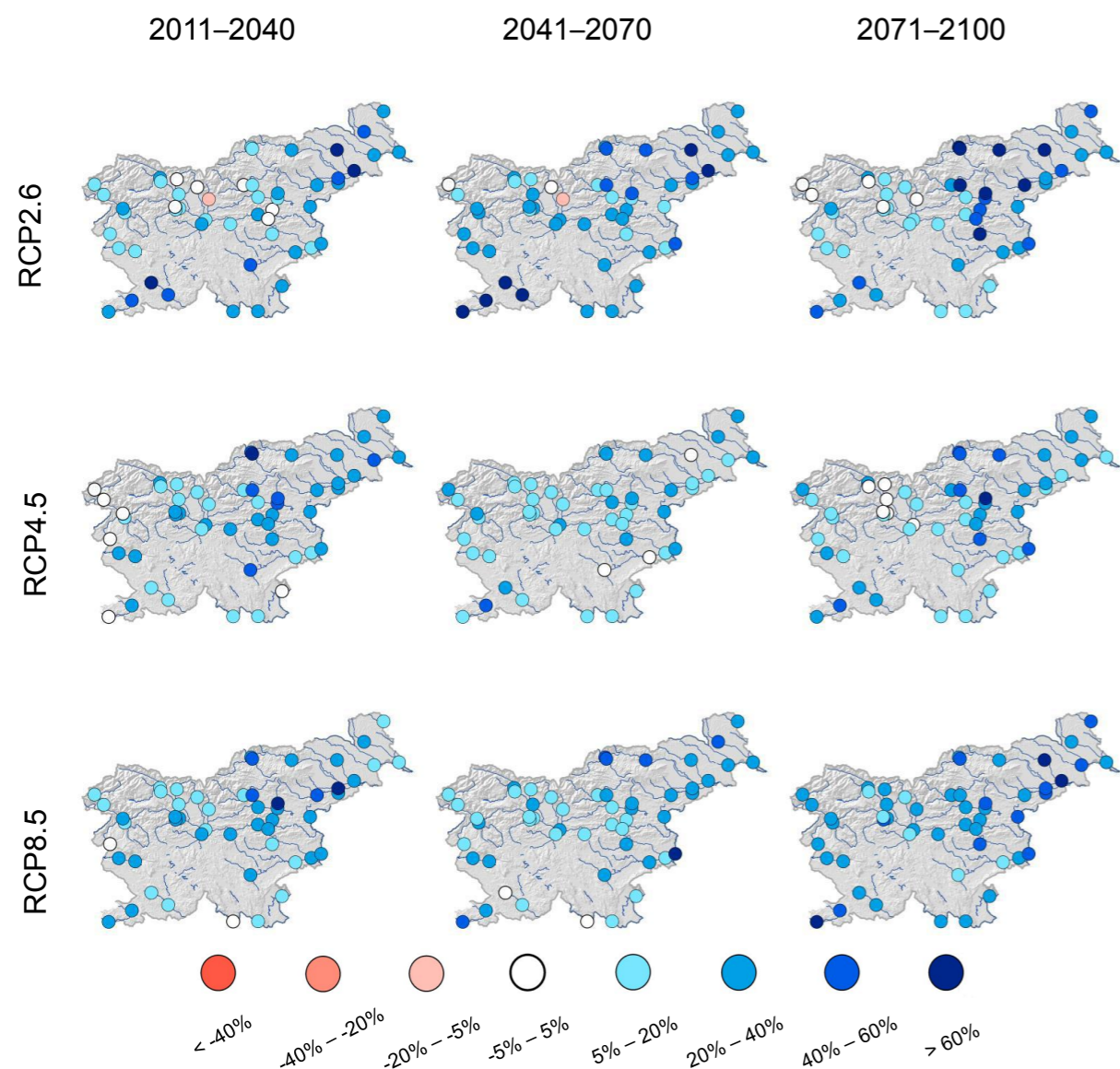
Slika 5.65 | Časovni potek spremembe malih pretokov za vodomerne postaje na Soči, Savi, Rižani in Pesnici za tri scenarije, vključno z razponi odstopanj. Prikazana je relativna vrednost glede na povprečje v obdobju 1981–2010. Črte prikazujejo glajeno mediano modelskih projekcij, zgornji in spodnji rob ovojníc največjo in najmanjšo vrednost modelskih projekcij.

5.64). Poteki sprememb in njihove razpršenosti so v primeru malih pretokov precej podobni tistim pri srednjih pretokih, le da so spremembe manjše. Z izjemo Rižane so za večino scenarijev mali pretoki ob koncu stoletja približno enaki kot v primerjalnem obdobju, le negotovost rezultatov se močno poveča.

5.6.4 Spremembe povratnih dob največjih pretokov

Za pretoke letnih visokovodnih konic s 100-letno povratno dobo v primerjalnem obdobju se v vseh scenarijih izpustov pričakuje povečanje 100-letnih nivojev za vsa obdobja v prihodnosti glede na obdobje 1981–2010, večinoma po celi državi. V primeru scenarija izpustov RCP2.6 bo največje povečanje v vzhodnem delu države in na Jadranskih rekah. V primeru scenarijev izpustov RCP4.5 in RCP8.5 povečanje 100-letnih

velikih pretokov ni tako veliko kot v scenariju RCP2.6. Večja povečanja se pričakuje za severovzhod države (slika 5.66).



Slika 5.66 | Srednja relativna sprememba velikih pretokov s 100-letno povratno dobo v treh projekcijskih obdobjih glede na obdobje 1981–2010 za scenarije RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5 po Pearsonovi porazdelitvi tretjega tipa

VIRI IN LITERATURA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, 15 str.
- Anandhi, A., Perumal, S., Gowda, P., Knapp, M., Hutchinson, S., Harrington, J., . . . Rice, C. (2013). Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA. *Climatic Change*, 120, 169-181.
- Andjelov, M., Mikulič, Z., Tetzlaff, B., Uhan, J., Wendland, F. (2016). Groundwater recharge in Slovenia - Results of a bilateral German-Slovenian Research project. *Energy & Environment*, 339, 137 str.
- Andjelov, M., Mikulič, Z., Uhan, J., Dolinar, M. (2013). Vodna bilanca z modelom GROWA-SI za količinsko ocenjevanje vodnih virov Slovenije. V Suša ponovno v letu 2013. 24. *Mišičev vodarski dan 2013*, (str. 127-133). Maribor.
- ARSO. (2016). *Program hidrološkega monitoringa površinskih voda za obdobje 2016–2020*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- ARSO. (2018). *Pregled hidroloških razmer površinskih voda v Sloveniji: Poročilo o monitoringu za leto 2016*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- Benestad, R., Haensler, A., Hennemuth, B., Illy, T., Jacob, D., Keup-Thiel, E., . . . Zsebeház, G. (april 2018). *Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use (EURO-CORDEX Guidelines Version 1.0 - 2017.08)*. Pridobljeno iz EURO-CORDEX: https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex_euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf
- Bergant, K. (2003). *Projekcije simulacij globalne klime na lokalni nivo in njihova uporaba v agrometeorologiji: doktorska disertacija*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo.
- Bergant, K. (2007). Projekcije podnebnih sprememb za Slovenijo. V Podnebne spremembe: vpliv na gozd in gozdarstvo. *Studia Forestalia Slovenica*, 130, 67-86.
- Bergant, K., Kajfež-Bogataj, L. (1999). Uporaba modelov splošne cirkulacije za izdelavo scenarijev klimatskih sprememb na območju Slovenije. *Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, Kmetijstvo*, 73, 177-186.
- Bergant, K., Kajfež-Bogataj, L., Trdan, S. (2006). Uncertainties in modelling of climate change impact in future: An example of onion thrips (Thrips Tabaci Lindeman) in Slovenia. *Ecological Modelling*, 194, 244-255.
- Bloomfield, J., Merchant, B. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 4769-4787.
- Cannon, A. J. (februar 2018). *Package `MBC`*. Pridobljeno iz <https://cran.r-project.org/web/packages/MBC/MBC.pdf>
- Ceglar, A. (2011). *Uporaba dinamičnega simulacijskega modela rasti in razvoja rastlin za napovedovanje količine pridelka v spremenjenih podnebnih razmerah: doktorska disertacija*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., . . . Whetton, P. (2007). Regional Climate Projections. V S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, . . . (ur.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Združeno Kraljestvo in New York, ZDA: Cambridge University Press.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. New York, ZDA: Springer.
- Cressie, N. (1993). *Statistics for Spatial Data*. ZDA: John Wiley & Sons, Inc.
- Črepinšek, Z., Kajfež-Bogataj, L. (2005). Modeliranje fenološkega razvoja pri rastlinah. *Acta agriculturae Slovenica*, 85 (2), 263-281.
- DHI. (2014). *MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels. Reference Manual*. Hørsholm, Danska: Danish Hydraulic Institute.
- EEA. (2004). *Impacts of Europe's changing climate: An indicator based assessment*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- EEA. (2008). *Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- EEA. (2012). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: An indicator-based report*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union.
- EEA. (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union.
- ETCCDI. (april 2017). *Climate Change Indices: Definitions of the 27 core indices*. Pridobljeno iz ETCCDI/CRD Climate Change Indices: http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- Frantar, P. K. (2008). Trendi pretokov. V *Vodna bilanca Slovenije 1971-2000* (str. 50-60). Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- Frantar, P., Hrvatin, M. (2008). Pretočni režimi. V *Vodna bilanca Slovenije 1971-2000* (str. 43-50). Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A., Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19 (3), 193-212.
- Gačnik, N., Plečko, J. (2018). *Nadgradnja ocene izrednih meteoroloških in hidroloških razmer v Sloveniji do konca 21. stoletja - poročilo projekta za sklopa 4 in 5*. Ljubljana: Agencija RS za okolje.
- Gams, I. (1989). Zemeljske temperature v Sloveniji in njihovo odstopanje od zračnih. *Geografski zbornik XXIX*.
- Gosling, S. N., Bryce, E. K., Dixon, G., Gabriel, K. M., Gosling, E. Y., Hanes, J. M., . . . Wanka, E. R. (2014). A glossary for biometeorology. *International Journal of Biometeorology*, 58, 277-308.
- Gudmundsson, L. (maj 2016). *Package `qmap`*. Pridobljeno iz <https://cran.r-project.org/web/packages/qmap/qmap.pdf>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J., Haugen, J., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* (8), 3383–3390.
- Hengl, T. (2007). *A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables, JRC Scientific and Technical Reports*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Hewitt, C. D. (2005). The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. *EGGS Newsletter*, 13, 22-25.
- HOMER. (julij 2016). *Advances in homogenisation methods of climate series: an integrated approach HOME*. Pridobljeno iz ACTION COST-ES0601: www.homogenisation.com
- Hrvatin, M. (1998). Pretočni režimi v Sloveniji. *Geografski zbornik* 38, 59-87.

- Huang, J., Shrestha, A., Tollenaar, M. (2001). Effect of temperature and photoperiod on the phenological development of wild mustard (*Sinapis arvensis* L.). *Field Crops Research*, 70, 75-86.
- Isaaks, E., Srivastava, R. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, ZDA: Oxford University Press.
- Islam, K., Khan, A., Islam, T. (2015). Correlation between Atmospheric Temperature and Soil Temperature: A Case Study for Dhaka, Bangladesh. *Atmospheric and Climate Sciences*, 5, 200-208.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O., Bouwer, L., . . . Gobiet, A. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Challenges*, 14 (2), 563-578.
- Jurko, M. (2009). *Statistična analiza trendov značilnih pretokov slovenskih rek: diplomska naloga*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, J. A., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., . . . Wang, H. J. (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. V T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, . . . (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 in New York: Cambridge University Press.
- Knez, M. (2007). *Analiza temperature tal v Ljubljani: diplomska naloga*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko.
- Li, P., Chan, S. (2000). Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. *Meteorological Applications*, 369-375.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics* (str. 281-297). Los Angeles, ZDA: University of California Press.
- McGregor, G., Bessemoulin, P., Ebi, K., Menne, B. (2015). *Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development*. Ženeva: World Meteorological Organization.
- Meier, U. (1997). *Growth Stages of Mono and Dicotyledonous Plants - BBCH Monograph*. Berlin: Blackwell Wissenschafts-Verlag.
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, B., . . . Stepanek, P. (2013). HOMER: a homogenization software - methods and applications. *IDŐJÁRÁS Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 117, 47-67.
- MPI-M. (oktober 2018). *Climate Data Operators*. Pridobljeno iz Max-Planck-Institut für Meteorologie: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>
- Muri, B. (2010). *Projekcije podnebnih sprememb na območju Slovenije z modelom RegCM3: diplomska naloga*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko.
- Nairn, J., Fawcett, R. (2013). *Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia*. Kent Town, South Australia: The Centre for Australian Weather and Climate Research.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R., Rogner, H. V. (2000). *Special Report on Emission Scenarios (SRES) - A Special Report on Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nakićenović, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Rovere, E. L., . . . Dadi, Z. (2000). *Summary for Policymakers: Emission Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nielsen, S., Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology* 4, 171-190.
- Oblak, J. (2017). *Analiza sezonske spremenljivosti pretokov rek v Sloveniji: diplomska naloga*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Oblišar, G. (2016). *Priprava ocene vpliva podnebnih sprememb na fenološki razvoj negojenih in gojenih rastlin - končno poročilo*. Ljubljana: Agencija RS za okolje.
- PCMDI. (april 2018). *CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - Overview*. Pridobljeno iz Program for Climate Model Diagnosis & Intercomparison: <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>
- Perry, K., Wu, Y., Sanders, D. (1997). Heat units to predict tomato harvest in the southwest USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84, 249-254.
- Pfeifer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänsler, A., Mudelsee, M., Otto, J., . . . Jacob, D. (2015). Robustness of Ensemble Climate Projections Analysed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. *Atmosphere*, 6, 677-698.
- Popova, Z., Ivanova, M., Pereira, L., Alexandrov, V., Kercheva, M., Doneva, K. (2015). Droughts and climate change in Bulgaria: assessing maize crop risk and irrigation requirements in relation to soil and climate region. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21, 35-53.
- Rencher, A. (2002). Chapter 13: Factor Analysis. V *Methods of Multivariate Analysis (2. izdaja)*. ZDA: John Wiley & Sons, Inc.
- Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., . . . Barbola, P. i. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 12500-12512.
- Russo, S., Sillman, J., Fischer, E. (2015). Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, 10 (12).
- SQLite. (oktober 2018). *SQLite Home Page*. Pridobljeno iz <https://www.sqlite.org/index.html>
- The PostgreSQL Global Development Group. (oktober 2018). *PostgreSQL: The World's Most Advanced open source relational database*. Pridobljeno iz <https://www.postgresql.org/>
- The R Foundation. (oktober 2018). *The R Project for Statistical Computing*. Pridobljeno iz <https://www.r-project.org/>
- Tremblay, M. (november 2016). *Wind Chill and Humidex (Critique of the Indices)*. Pridobljeno iz ptaff.ca: http://ptaff.ca/humidex/?lang=en_CA
- Valher, A. (2016). *Priprava ocene vpliva podnebnih sprememb na temperaturo tal in vodno bilanco - končno poročilo*. Ljubljana: Agencija RS za okolje.
- van Oldenborgh, G. J., Collins, M., Arblaster, J., Christensen, J. H., Marotzke, J., Power, S. B., . . . (ur.). (2013). Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections. V T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, . . . (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, ZDA: Cambridge University Press.

- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Vertačnik, G., Bertalanič, R. (2017). *Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. 3, Značilnosti podnebja v Sloveniji*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- Vertačnik, G., Vičar, Z., Bertalanič, R. (2015). *Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961-2011. 2, Kontrola in homogenizacija podnebnih podatkov*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60-69.
- Vogrinčič, V., Kočever, H., Gregorčič, B., Roškar, J. (2015). *Dosežki projekta Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- Wilcox, R. (2010). *Fundamentals of modern statistical methods (2. izdaja)*. New York, ZDA: Springer.
- WMO. (2008). *The Guide to Hydrological Practices (WMO št. 168)*. Ženeva: World Meteorological Organization.
- Zheng, D., Hunt, E. J., Running, S. (1993). A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. *Climate Research*, 2, 183-191.
- Žust, A. (2015). *Fenologija v Sloveniji*. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.
- Žust, A. (maj 2018). *Dolžina letne rastne dobe*. Pridobljeno iz Kazalci okolja v Sloveniji: Podnebne spremembe: http://kazalci.arso.gov.si/kos2/?data=indicator&ind_id=747&lang_id=302
- Žust, A., Sušnik, A. (1996). Spomladanska pozeba. *Ujma*, 10, 59-63.



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