

# Podnebje v prihodnosti - koliko vemo o njem?

dr. Klemen Bergant

Podnebje na Zemlji ni stalnica, temveč se stalno spreminja. Vzroki za podnebne spremembe so različni, bodisi naravni ali pa jim botruje človek. Tako so pojavljanje ledenih dob v preteklosti v veliki meri krojile periodične spremembe poti kroženja Zemlje okrog Sonca, nagiba osi vrtenja Zemlje glede na ravnino kroženja ter usmerjenosti te osi. Prav tako energija, ki jo s sevanjem oddaja Sonce in del katere prestreže Zemlja, ni stalna. Človek na dejavnike, ki določajo, koliko sončeve energije bo Zemlja prestregla in kako se bo ta porazdelila vzdolž različnih geografskih širin, nima vpliva.

Po drugi strani pa hitrim podnebnim spremembam, ki smo jim priča v zadnjih 150 letih in se bodo predvidoma nadaljevale tudi v tem stoletju, z veliko verjetnostjo botruje prav človek. Z izpusti različnih plinov in trdnih delcev spreminjamo lastnosti ozračja ter z naseljevanjem in obdelovanjem lastnosti zemeljskega površja. Lastnosti ozračja in zemeljskega površja pa vplivajo na to, koliko od Sonca prejete energije bo Zemlja skupaj s svojim ozračjem uspela obdržati in je porabiti za segrevanje površja, segrevanje in premikanje oceanov ter zračnih mas, rast in razvoj rastlin ipd. Poleg naravnih dejavnikov tako tudi človek spreminja podnebje.

Podnebnim spremembam ne moremo več ubežati. So dejstvo sedanjosti in še večja grožnja prihodnosti. Skupaj z nekaterimi negativnimi posledicami jih lahko že občutimo tudi v Sloveniji: pogostejši vročinski valovi, suše, hudourniške poplave, taljenje ledenikov ... Še vedno pa lahko vplivamo na to, kako izrazite bodo spremembe v prihodnosti ter kako se bomo nanje prilagodili. Zato hkrati z grožnjo predstavljajo tudi izziv. Izziv za znanost, politiko, gospodarstvo in izziv za vsakega izmed nas.

Z vidika priprave ukrepov prilagajanja na podnebne spremembe je ključnega pomena dobro poznavanje pretekle spremenljivosti podnebja in naše ranljivosti nanjo. Zato smo na Agenciji RS za okolje jeseni 2008 pričeli s triletnim projektom *Podnebna spremenljivost Slovenije*. Z njim želimo pridobiti celosten pregled nad spremenljivostjo podnebja predvsem v preteklih 50 letih, za katere obstaja obsežna podatkovna zbirka. Seveda pa morajo ukrepi prilagajanja upoštevati tudi predvidene spremembe podnebja v prihodnje. Projekcije podnebnih sprememb so tako poleg poznavanja preteklega podnebja ključnega pomena za pripravo strategij prilagajanja na podnebne spremembe.

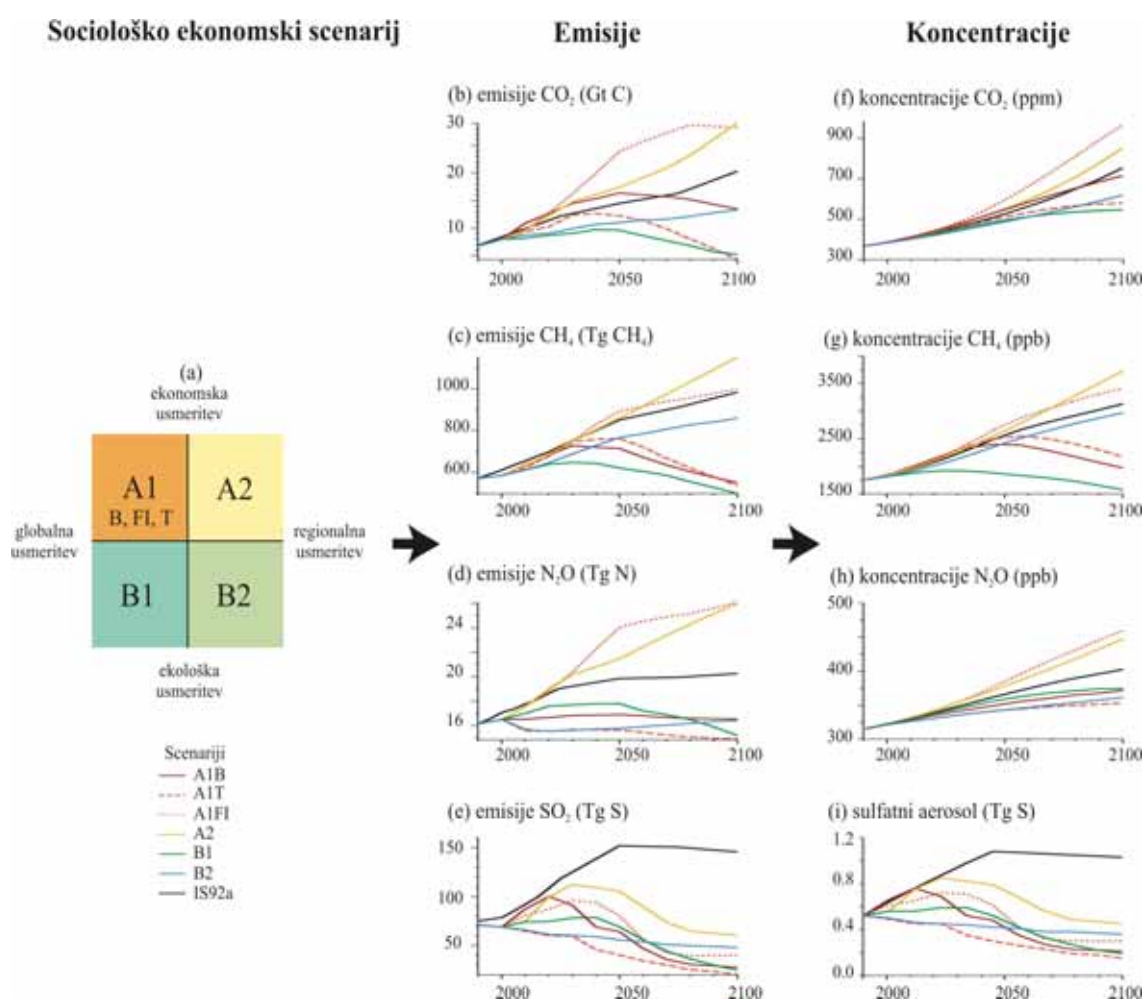
## Človek in njegov vpliv na podnebje v prihodnosti

Podnebje je sicer kaotičen sistem, ki mu ne moremo natančno napovedati stanja leta vnaprej (Lorenz, 1963). Lahko pa ob predpostavkah o razvoju družbe, posledičnih izpustov toplogrednih plinov ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  idr.) in različnih delcev ocenimo, kako bo človek vplival na lastnosti ozračja in kako se bo to odražalo na podnebju (Benestad, 2003). Ker gre v takšnih primerih za okvirne ocene sprememb povprečnega stanja ter spremenljivosti podnebja, ki temeljijo na številnih predpostavkah, jih običajno označujemo kot scenarije in ne kot napovedi.

*Scenarij je verjeten in pogosto poenostavljen opis prihodnjega podnebja, ki temelji na razumljivih in smiselnih predpostavkah o povezavah med dejavniki podnebja in omogoča ocenjevanje predvidenih posledic človeško pogojenih sprememb podnebja (IPCC, 2007).*

Prvi korak na poti k oceni prihodnjega stanja podnebja je oceniti možne razvoje družbe in posledične izpuste toplogrednih plinov in delcev v ozračje. Ker je prihodnost nepredvidljiva je Medvladni forum o spremembi podnebja – IPCC (*angl.* Intergovernmental Panel on Climate Change) pripravil široko paleto scenarijev razvoja družbe (IPCC, 2000), katerih uresničitvev naj bi

bila enako verjetna. V grobem jih lahko razdelimo v štiri glavne skupine – A1, A2, B1 in B2. Skupina scenarijev A1 predvideva hiter in globalen gospodarski razvoj, pri čemer podskupine upoštevajo različne možnosti glede skrbi za okolja in vpeljave čistejših in učinkovitejših tehnologij: A1FI – intenzivna raba fosilnih goriv, A1T - prehod na alternativne, čistejše energijske vire, in A1B – uravnotežena raba fosilnih goriv in alternativnih virov. Skupina A2 predvideva raznolik svet s hitro rastjo prebivalstva, zmernim gospodarskim razvojem in mačehovskim odnosom do okolja. Skupina scenarijev B1 predpostavlja hiter preobrat v gospodarskih strukturah v smeri oskrbovalnega in informacijskega gospodarstva, manjše porabe surovin ter vpeljave čistejših in učinkovitejših tehnologij. Tako skupina A1 kot B1 predvidevata obrat v rasti prebivalstva na sredini 21. stoletja. Pri skupini scenarijev B2 so v ospredju lokalne rešitve za zmerno gospodarsko rast, socialno enakost in okoljsko trajnost. Rast prebivalstva naj bi bila enakomerna skozi celo 21. stoletje, vendar manj izrazita kot v primeru A2 skupine. Predvideni izpusti nekaterih toplogrednih plinov ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  in  $\text{N}_2\text{O}$ ) ter žveplovega dioksida ( $\text{SO}_2$ ) kot predhodnika sulfatnih aerosolov so skupaj s posledičnimi vsebnostmi v ozračju na sliki 1 prikazani za različne scenarije razvoja družbe.

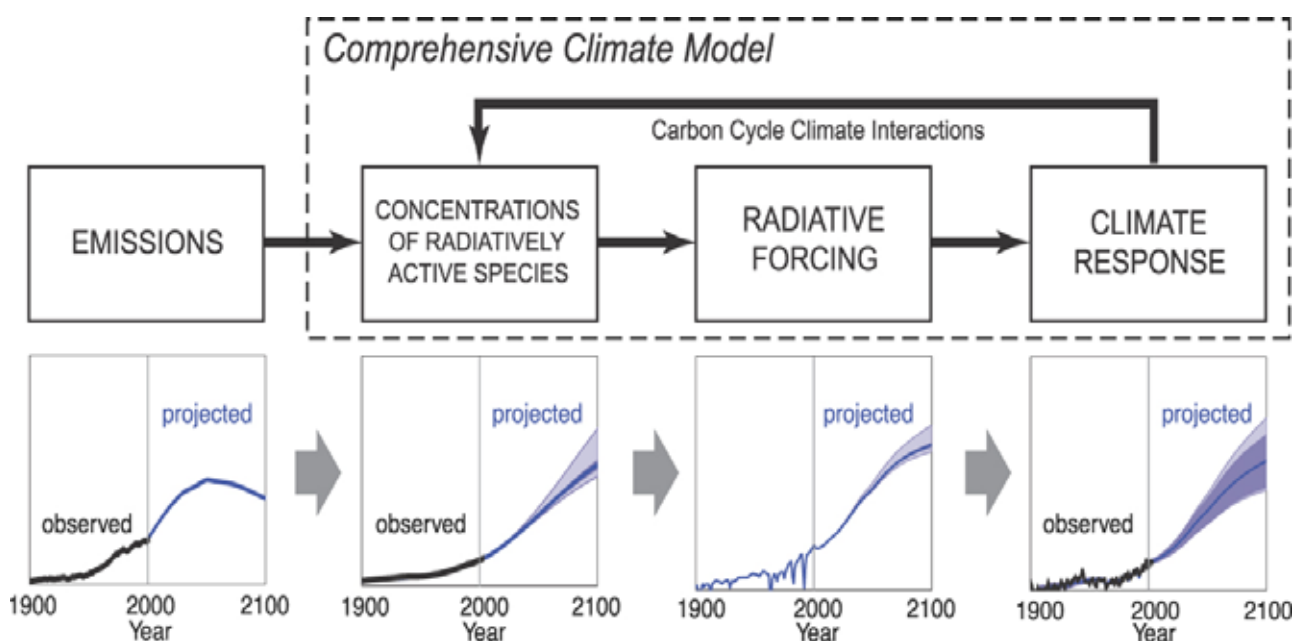


**Slika 1:** Scenariji izpustov nekaterih toplogrednih plinov ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  in  $\text{N}_2\text{O}$ ) ter žveplovega dioksida ( $\text{SO}_2$ ) v 21. stoletju skupaj s posledičnimi vsebnostmi v ozračju (IPCC, 2000).

Kljub temu, da naj bi bila uresničitev različnih scenarijev emisij enako verjetna, se kot srednji scenarij običajno obravnava SRES A1B, kot pesimistični scenarij SRES A2 in kot optimistični SRES B1 (IPCC, 2007).

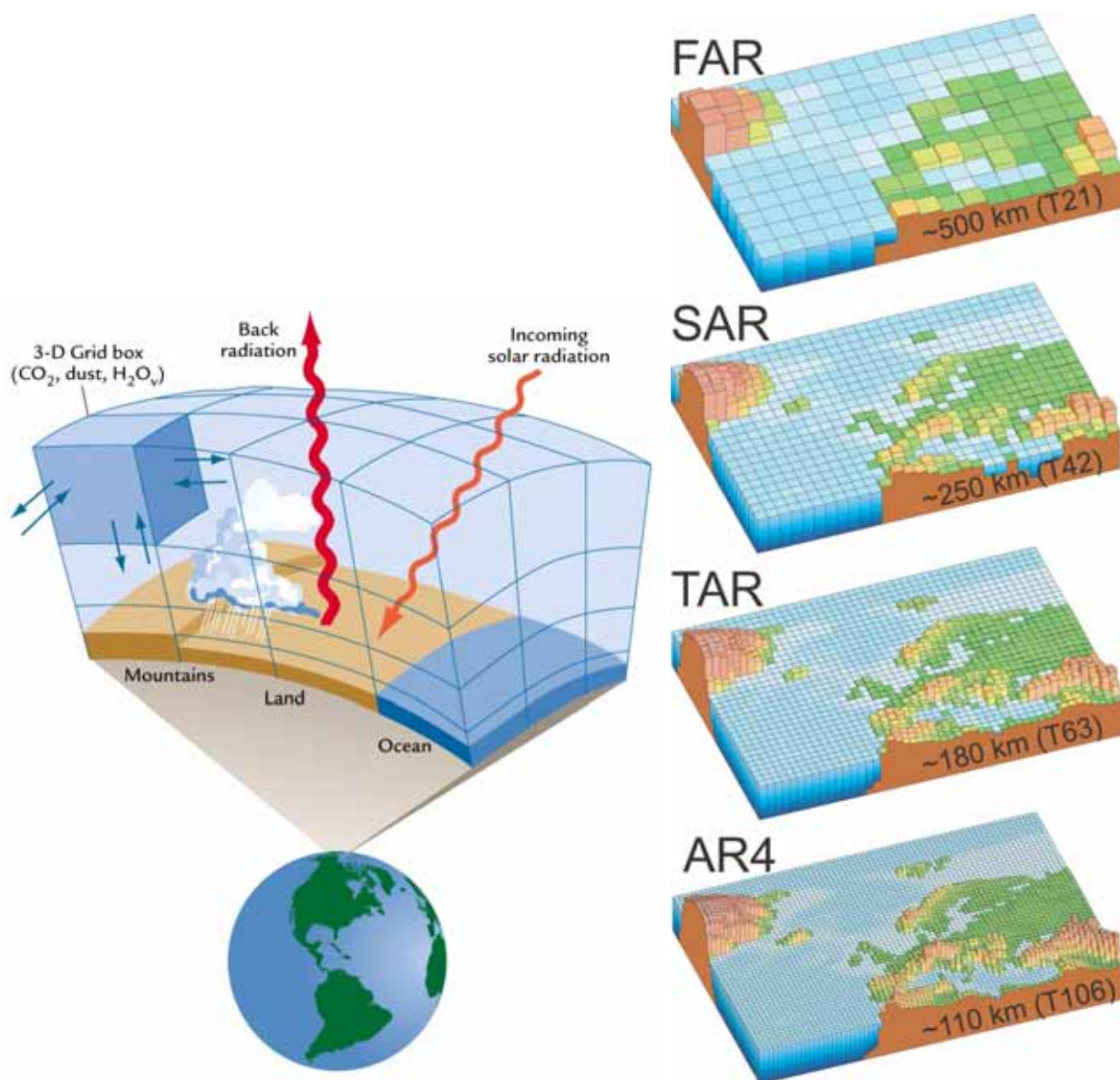
## Ocenjevanje odziva podnebne sistema na spremenjeno sestavo ozračja

Na podlagi predvidenih izpustov toplogrednih plinov in delcev v ozračje lahko ocenimo odziv podnebne sistema na spremenjeno sestavo ozračja. Postopek, kako na podlagi ocene izpustov pridemo do ocene posledičnega odziva podnebne sistema prikazuje slika 2. Najprej na osnovi scenarijev razvoja družbe ocenimo izpuste v ozračje, ki predstavljajo osnovo za oceno spremenjenih vsebnosti sevalno aktivnih (toplogrednih) plinov in delcev v ozračju. Upoštevajoč, koliko različni plini in delci prispevajo k povečanemu učinku tople grede oziroma k hladilnemu učinku zaradi zmanjšanja prepustnosti ozračja za sončno sevanje, ocenimo, kakšen je sevalni prispevek spremenjene sestave ozračja, kar vpliva na energijsko bilanco zemeljskega površja. Na koncu sledi še ocena, kako se bo podnebni sistem odzval na spremenjeno energijsko bilanco površja (IPCC, 2007).



**Slika 2:** Koraki od začetne ocene izpustov do končnega odziva podnebne sistema nanje. Na vsakem koraku vpeljemo dodatno negotovost, ki se nato odraža v negotovosti končne ocene odziva podnebja na spremenjeno sestavo ozračja (IPCC, 2007).

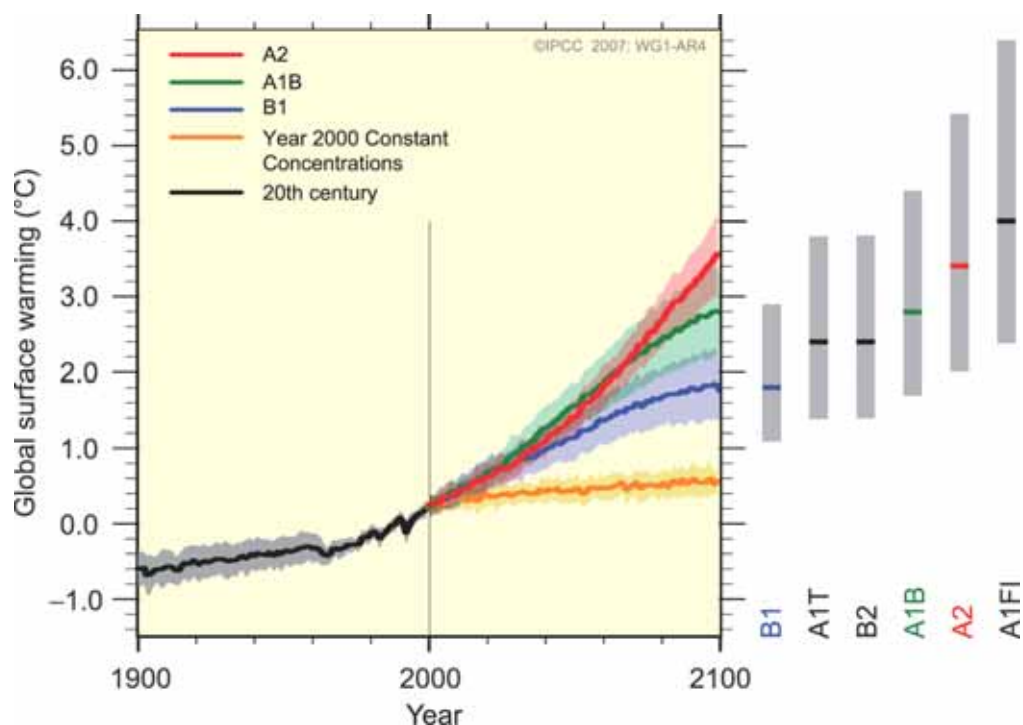
Pogosto uporabljeno orodje za proučevanje odziva podnebne sistema na spremenjeno sestavo ozračja so modeli splošne cirkulacije. Gre za tridimenzionalne numerične modele (slika 3; levo), ki vključujejo opise glavnih fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov v ozračju, oceanih, ledu in na zemeljskem površju ter njihovo medsebojno odvisnost (McGuffie in Handerson-Sellers, 1997). Stalen napredek znanosti in informacijskih tehnologij omogoča, da z modeli splošne cirkulacije računamo stanje podnebja z vse boljšo prostorsko ločljivostjo. Tako smo imeli za območje Evrope konec osemdesetih let preteklega stoletja, ko so bili pripravljeni rezultati za prvo IPCC poročilo - FAR (IPCC, 1990), na razpolago modelske izračune podnebja s horizontalno ločljivostjo 500 km in več, v prvi polovici devetdesetih let preteklega stoletja za drugo IPCC poročilo- SAR (IPCC, 1996) z ločljivostjo 250 km in več, v začetku tega stoletja za tretje IPCC poročilo - TAR (IPCC, 2001), z ločljivostjo 180 km in več, izračuni prihodnjega podnebja za zadnje poročilo IPCC - AR4 pa so bili pripravljeni v horizontalni ločljivosti približno 110 km in več (slika 3; desno).



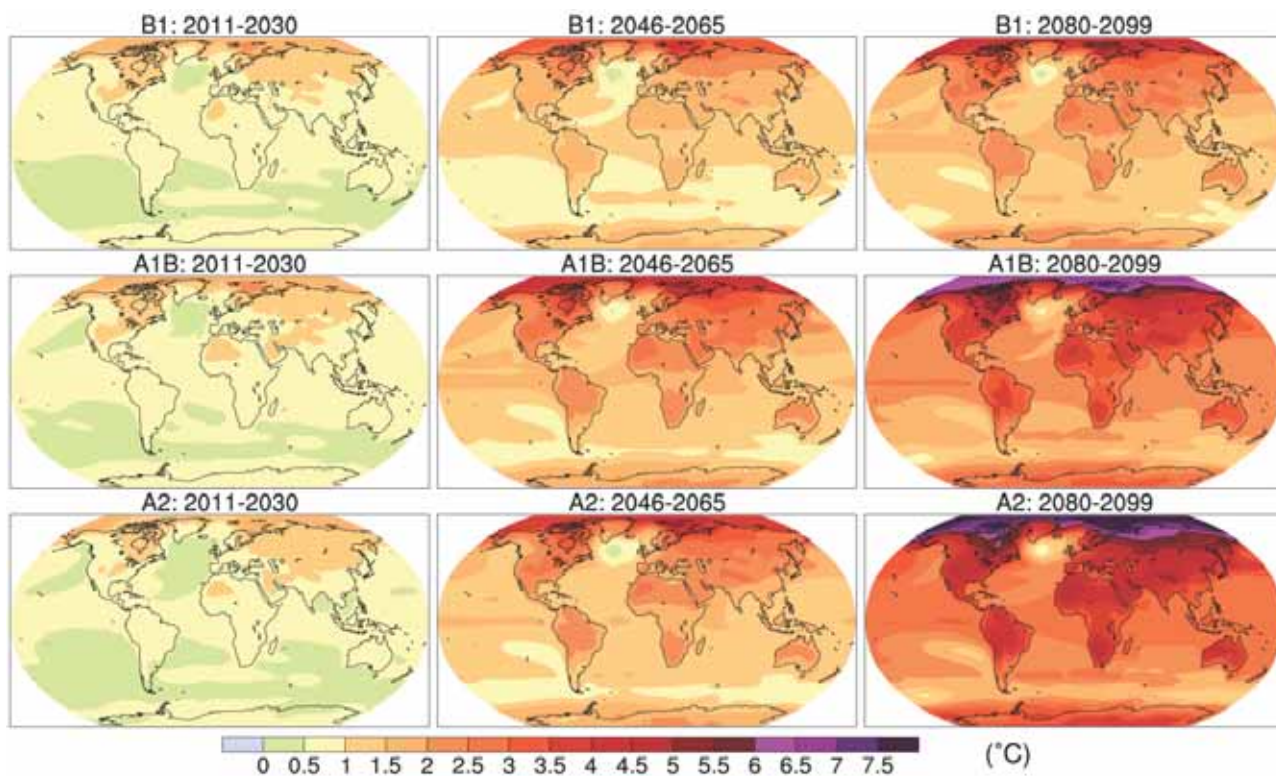
**Slika 3:** Shematičen prikaz procesov, ki jih vključuje model splošne cirkulacije (levo) (McGuffie in Handerson-Sellers, 1997) in največja razpoložljiva horizontalna ločljivost rezultatov teh modelov na območju Evrope (desno) ob pripravi prvega (FAR - 1990), drugega (SAR - 1996), tretjega (TAR - 2001) in četrtega (AR4 - 2007) IPCC poročila (IPCC, 2007).

Rezultati zadnjega IPCC poročila (IPCC, 2007) kažejo, da lahko do konca 21. stoletja pričakujemo zaradi dosedanjih in prihodnjih izpustov toplogrednih plinov globalno ogrevanje med 1,1 in 6,4 °C glede na povprečne razmere v obdobju 1980–1999, odvisno od tega, kateri izmed scenarijev izpustov toplogrednih plinov in delcev se bo v prihodnje uresničil (slika 4). Najverjetnejša ocena v primeru uresničitve optimističnega scenarija B1 je dvig globalne temperature površja za 1,8 °C, v primeru srednjega A1B scenarija za 2,8 °C in v primeru pesimističnega A2 scenarija za 3,4 °C. Prav tako rezultati IPCC poročila kažejo, da se ne glede na to, kateri scenarij izpustov je upoštevan, prostorski vzorci podnebnih sprememb ne razlikujejo bistveno, razlikuje se le njihova izrazitost v času. To je razvidno tudi iz slike 5, ki prikazuje vzorec temperaturnih sprememb glede na obdobje 1980–1999 za scenarije SRES B1, A1B in A2 za tri različna časovna obdobja v prihodnosti: 2011–2030, 2046–2065 in 2080–2099. Še posebej potrjuje navedeno trditev velika podobnost vzorcev za scenarij SRES B1 in obdobje 2080–2099 ter scenarij SRES A2 in obdobje 2046–2065. Prav tako je iz slike 5 razvidno, da se kopno ogreva intenzivneje od oceanov. Ker je glavnina kopnega na severni polobli, gre tako pričakovati, da bo ogrevanje severne poloble, s tem pa tudi Slovenije, intenzivnejše kot globalno ogrevanje.



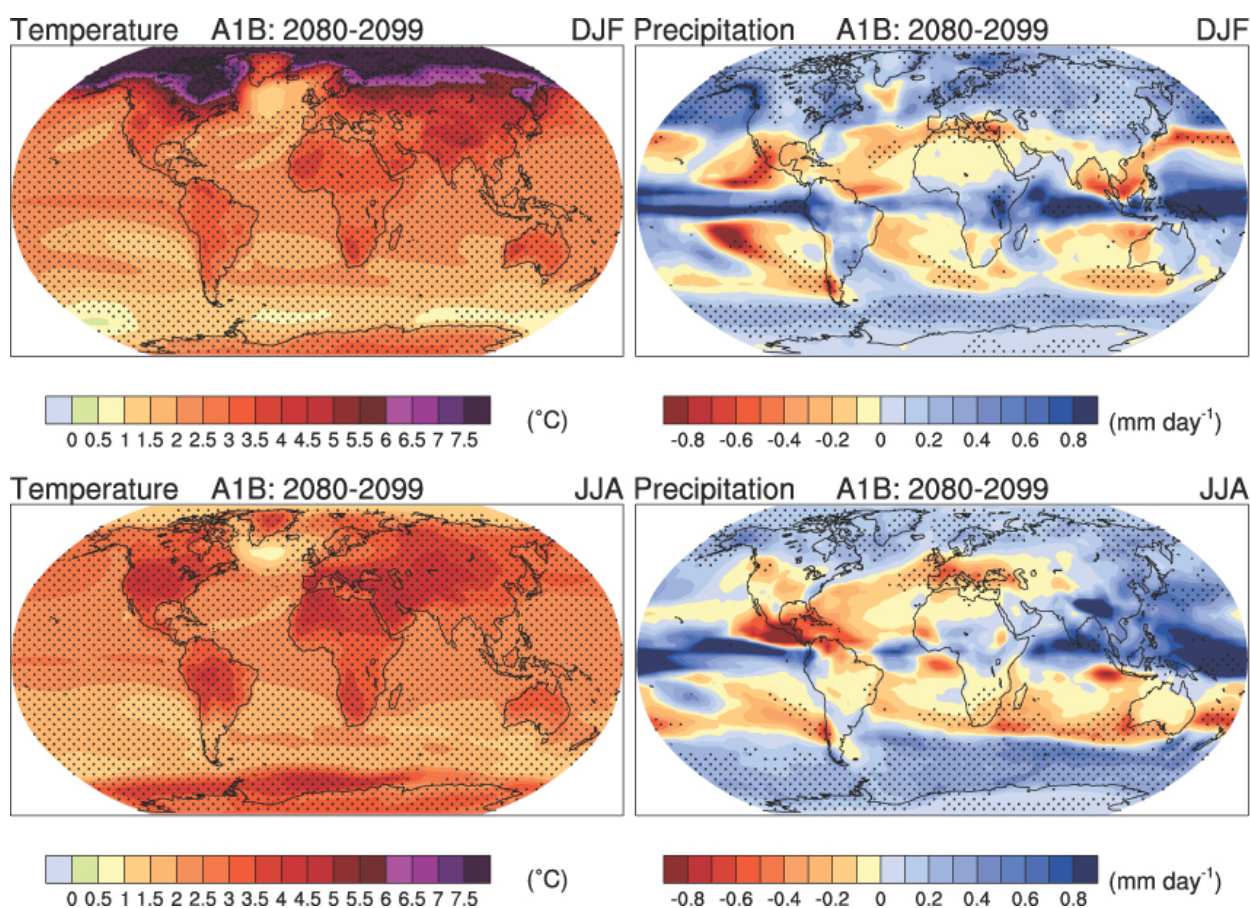


**Slika 4:** Projekcije globalnega ogrevanja površja glede na obdobje 1980–1990 upoštevajoč scenarije emisij SRES. Polne črte predstavljajo globalna povprečja preko več modelov za scenarije A2, A1B in B1, osenčena območja pa razpon  $\pm$  enega standardnega odklona od modelskega povprečja. Dodani so tudi rezultati, kjer je bila v prihodnje upoštevana stalna vsebnost toplogrednih plinov, ki je enaka izmerjeni vrednosti iz leta 2000. Ob desnem robu so dodane najverjetnejše ocene za posamezne SRES skupine scenarijev ob koncu stoletja ter možni razponi (IPCC, 2007).



**Slika 5:** Modelsko povprečje srednjih letnih vrednosti ogrevanja površja (v °C) za scenarije izpustov SRES B1 (zgoraj), SRES A1B (v sredi) in SRES A2 (spodaj) za tri različna obdobja v prihodnosti v primerjavi z obdobjem 1980–1999 in sicer za obdobje 2011–2030 (levo), 2046–2065 (v sredi) in 2080–2099 (desno) (IPCC, 2007).

Seveda lahko iz izračunov prihodnjega podnebja v ločljivosti 100 km in več dobimo le grobe ocene podnebnih sprememb za Slovenijo. Primerjave rezultatov simulacij z modeli splošne cirkulacije ter izmerjenih vrednosti sicer kažejo, da ti modeli dobro opišejo podnebje in njegovo spremenljivost v globalni oziroma obsežni prostorski skali (IPCC, 2007). Zanesljivost njihovih rezultatov je žal manjša na regionalni oziroma lokalni ravni. Na prvi pogled gre za nasprotujočo si trditev. Vendar so obsežni podnebni vzorci predvsem posledica porazdelitve sončnega obsevanja na Zemlji, vrtenja Zemlje ter vpliva velikih struktur zemeljskega površja (npr. porazdelitve kopnega in morja, topografije itd.), ki so zadovoljivo zajeti v modelih splošne cirkulacije. Regionalno oziroma lokalno podnebje pa je odziv globalnega podnebja na lastnosti površja (npr. razgibanost, vegetacija, ...) na regionalni oziroma lokalni ravni (Zorita in Storch, 1999). Modeli splošne cirkulacije zaenkrat še niso dovolj natančni, da bi lahko opisali vso podnebno raznolikost, ki smo ji priča v Sloveniji, in tako predstavljali dovolj dobro podlago za ocenjevanje vpliva ter pripravo strategij prilagajanja podnebnim spremembam po posameznih regijah. Tako je iz slike 6, ki predstavlja sintezo rezultatov številnih modelov splošne cirkulacije, zgolj razvidno, da na območju Slovenije in njene širše okolice lahko do konca tega stoletja pričakujemo, da se bodo poletja ogrela močneje kot zime ter da pozimi lahko pričakujemo nekoliko več padavin, poleti pa manj.



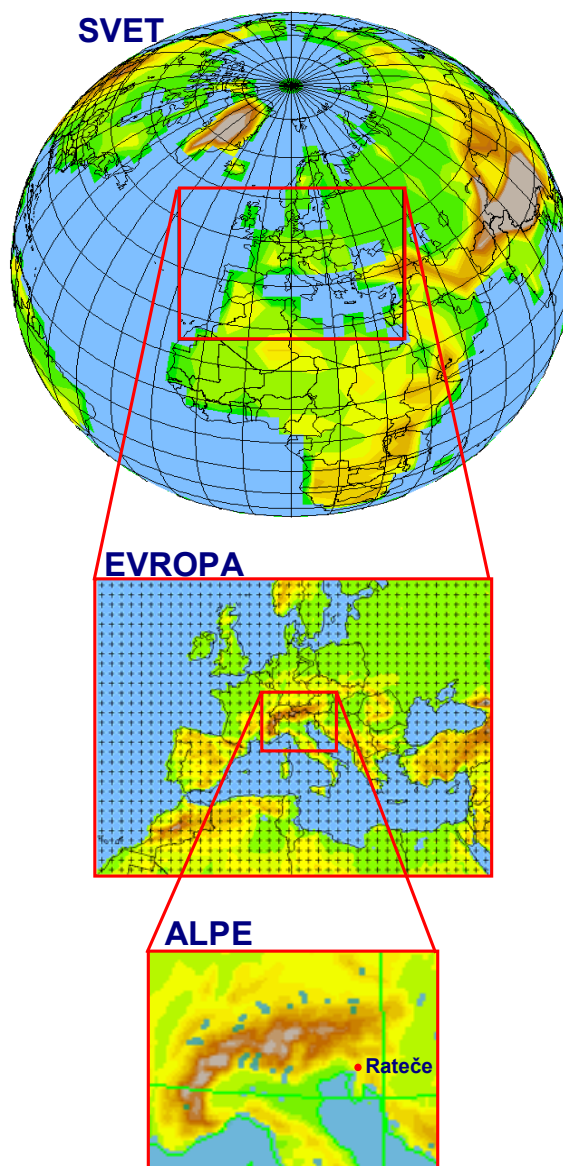
**Slika 6:** Modelsko povprečje sprememb temperature zraka (v °C; levo) in količine padavin (v mm/dan, desno) za zimo (DJF, zgoraj) in poletje (JJA; spodaj) upoštevajoč SRES A1B scenarij in obdobji 2080–2099 ter 1980–1999 (IPCC, 2007).

## Kako do prostorsko natančnejših projekcij podnebnih sprememb?

Ključno vprašanje je, kako premostiti razkorak med razpoložljivimi rezultati modelov splošne cirkulacije ter potrebami pri proučevanju vpliva podnebnih sprememb in pripravi strategij prilagajanja nanje. Za podrobnejše projekcije podnebnih sprememb moramo rezultat modelov splošne cirkulacije povečati ločljivost, kar lahko storimo na dva načina. Prvi način je s pomočjo



gnezdenja regionalnih podnebnih modelov, čemur pravimo dinamično zmanjševanje skale (za pregled pristopov glej npr. Giorgi in Mearns, 1999; Wang s sod., 2004). Drugi način pa je izdelava empiričnih modelov ki temeljijo na izmerjenih podatkih; ti modeli opisujejo odziv podnebja nekega manjšega območja ali posamezne lokacije na spremenljivost podnebja obsežnejšega območja, ki jo modeli splošne cirkulacije opišejo dovolj dobro. Temu načinu pa pravimo empirično oziroma statistično zmanjševanje skale (za pregled pristopov glej npr. Zorita in Storch, 1999; Crane s sod., 2002).



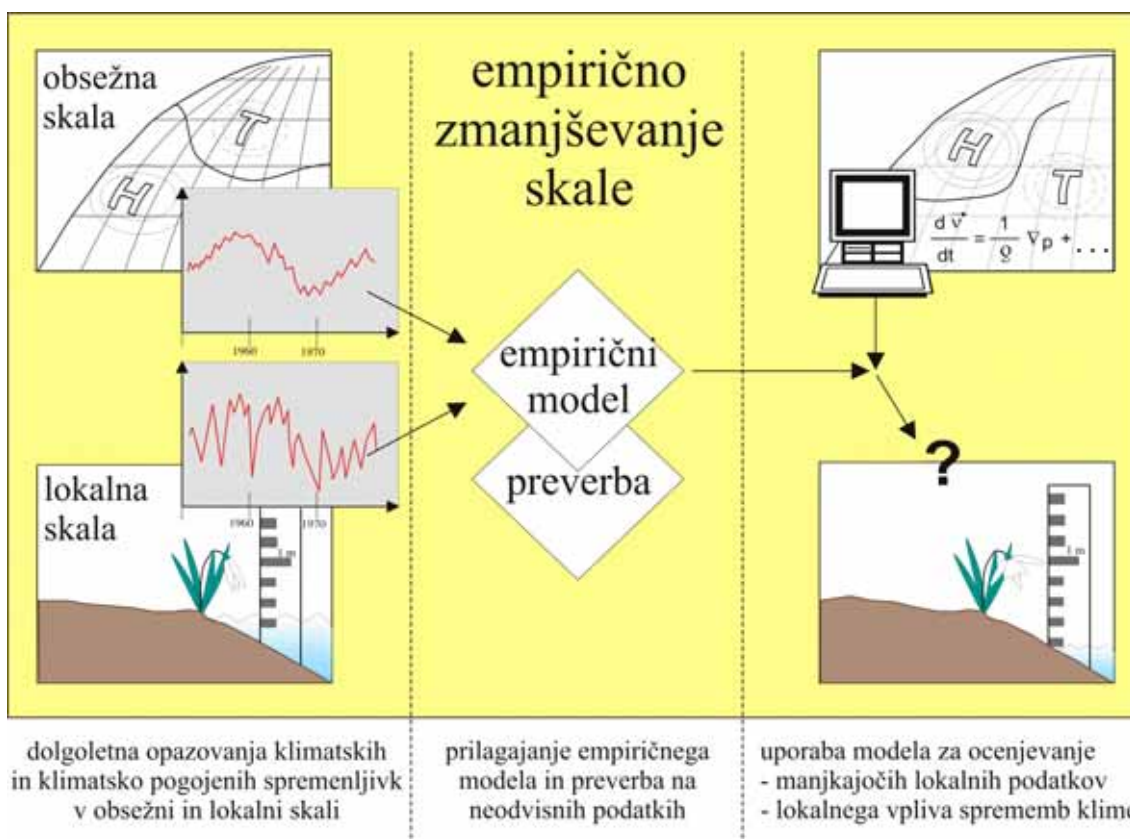
**Slika 7:** Shematičen prikaz večplastnega dinamičnega zmanjševanja skale (prirejeno po Giorgi, 2008). Osnovno predstavlja model splošne cirkulacije in želja, da bi dobili realne ocene podnebja ter njegovih sprememb na lokaciji Rateče. Z dvakratnim gnezdenjem regionalnega podnebnega modela, najprej na območju celotne Evrope in dodatno še na območju Alp, rezultate z vidika prostorske ločljivosti izboljšamo do te mere, da opišejo regionalne posebnosti podnebja Rateč in njihove okolice.

Dinamično zmanjševanje skale shematično prikazuje slika 7; prikazan je proces dvakratnega gnezdenja regionalnega podnebnega modela v model splošne cirkulacije. Razkorak, s katerim se v tem shematičnem prikazu srečamo, je po eni strani razpoložljivost grobih izračunov stanja podnebja (ločljivost približno 200 km) za celotno zemeljsko oblo in želja, da bi razpolagali s konkretnimi ocenami za lokacijo Rateče. Z gnezdenjem podrobnejšega regionalnega modela tako lahko najprej na nivoju Evrope izboljšamo ločljivost rezultatov (npr. 50 km). Če so ti rezultati za naše potrebe še vedno pregrobi, lahko za še bolj omejeno območje, npr. območje Alp, ponovno gnezdimo

regionalni podnebni model z ločljivostjo (npr. 20 km), ki bistveno bolje kot prvotni model splošne cirkulacije opiše lastnosti podnebja Rateč in njihove okolice.

Z regionalnim podnebnim modelom nikdar ne dobimo točkovnega rezultata (npr. točno za lokacijo Rateče), temveč dobimo povprečne razmere preko modelske celice, ki po velikosti ustreza ločljivosti gnezdenega modela. Tako v prej opisanem primeru dobimo povprečne razmere na območju velikosti 20 km × 20 km, kar ob podnebni raznolikosti, ki smo ji priča v Sloveniji, ne zadostuje vedno za zadovoljiv opis razmer na željeni lokaciji.

Kadar želimo oceno podnebnih sprememb na točno določeni lokaciji, kjer potekajo podnebno odvisne dejavnosti, na katere bo prihodnje podnebje vplivalo, si lahko pomagamo z empiričnim zmanjševanjem skale; shematično ga prikazuje slika 8. Pri empiričnem zmanjševanju skale skušamo s preprostimi matematičnimi modeli opisati odvisnost spremenljivosti lokalnih podnebnih razmer od spremenljivosti podnebnih razmer v obsežni skali. Modele, ki temeljijo na izmerjenih vrednostih v preteklosti nato uporabimo za projekcije podnebnih sprememb za izbrano lokacijo, v katerih uporabimo rezultate modelov splošne cirkulacije. Pri tem predpostavimo, da bo v spremenjenih podnebnih razmerah matematični opis odvisnosti med lokalno podnebno spremenljivko in podnebno spremenljivko v obsežni skali še vedno ustrezen.



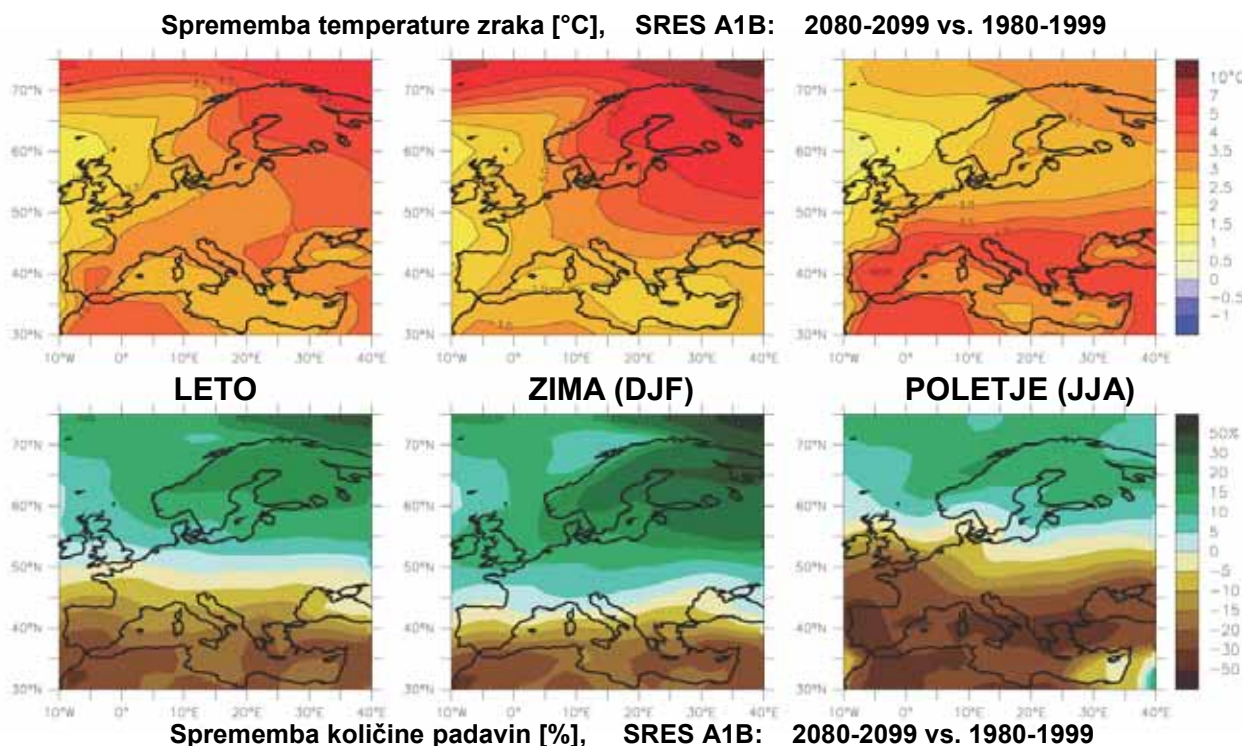
**Slika 8:** Shematičen prikaz empiričnega zmanjševanja skale (Hayen, 2002). Tako kot pri dinamičnem zmanjševanju skale osnovno predstavlja model splošne cirkulacije in želja, da bi dobili realne ocene podnebja ter njegovih sprememb na izbrani lokaciji, npr. Rateče. Namesto gnezdenja dinamičnih regionalnih podnebnih modelov pa uporabimo preproste matematične modele, ki temeljijo na izmerjenih podatkih in povezujejo spremenljivost podnebnih vzorcev v obsežni skali ter na izbrani lokaciji.

## Projekcije podnebnih sprememb do konca 21. stoletja za Slovenijo in njeno širšo okolico

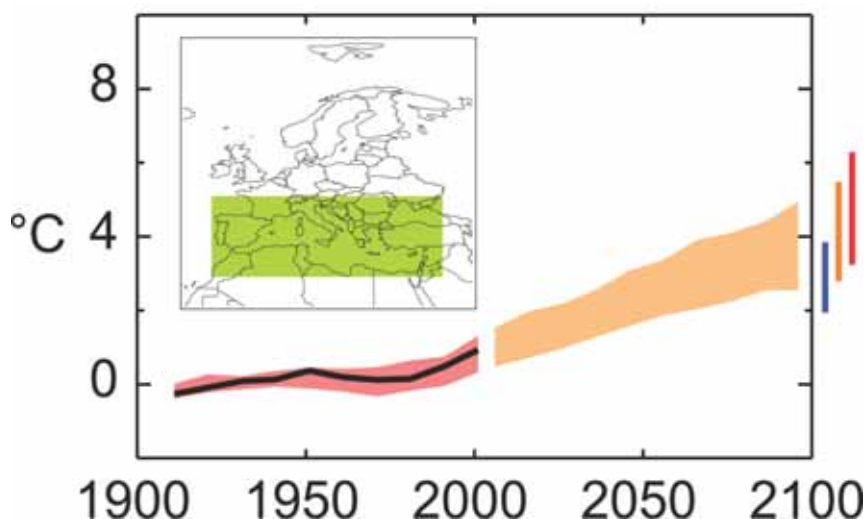
Podrobnejši pogled na sintezo rezultatov različnih modelov splošne cirkulacije za področje Evrope (za podrobnosti glej IPCC, 2007) kaže, da ob uresničitvi srednjega scenarija emisij SRES A1b lahko do konca tega stoletja pričakujemo na območju Slovenije dvig temperature med 3 in 3,5 °C, pri čemer se bodo poletja ogrela najbolj izrazito, in sicer 4 do 4,5 °C (slika 9). Količina padavin



naj bi se na letnem nivoju zmanjšala za približno do 10%; s tem bodo poletja bistveno bolj suha, in sicer za 15 do 20%, pozimi pa lahko celo pričakujemo dvig količine padavin za do 10%. Ker različni modeli dajo nekoliko različne ocene sprememb, je to potrebno upoštevati pri interpretaciji takšnih rezultatov. Prav tako na izrazitost sprememb vpliva izbira scenarija emisij. Vpliv obojega je za primer temperature zraka na območju južne Evrope in Sredozemlja, kamor sodi tudi Slovenija, prikazano na sliki 10.



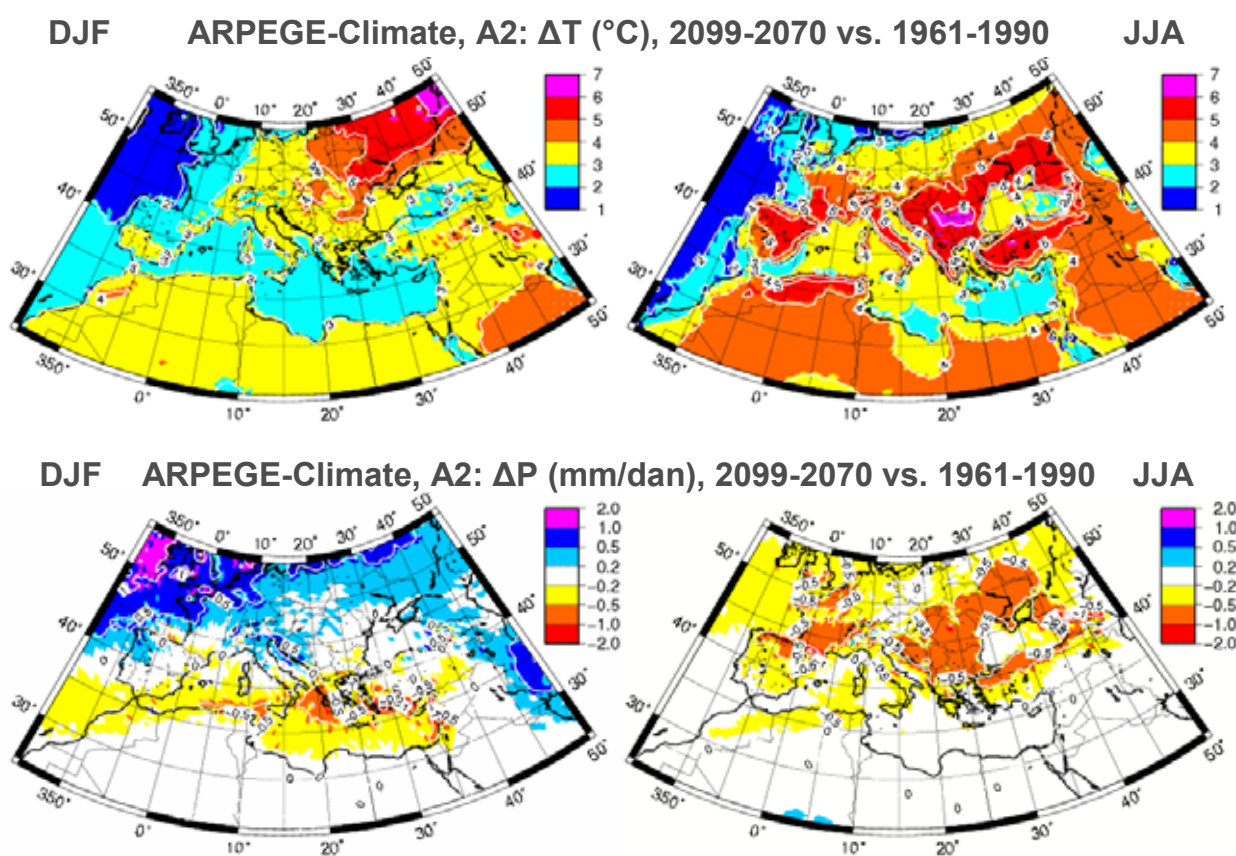
**Slika 9:** Sprememba temperature zraka in količine padavin na območju Evrope upoštevajoč povprečje preko 21 modelov splošne cirkulacije in scenarij emisij SRES A1B. Prikazane so spremembe za obdobje 2080–2099 v primerjavi z obdobjem 1980–1999 za leto kot celoto (levo), zimo (v sredini) in poletja (desno) (IPCC, 2007).



**Slika 10:** Odstopanje temperature zraka od povprečja v obdobju 1901–1950 na kopnem delu južne Evrope in Sredozemlja za obdobje v preteklosti 1906–2005, in sicer izmerjene vrednosti (črna črta) in razpon modelskih rezultatov (rdeča ovojnica). Dodan je tudi razpon projekcij z različnimi modeli splošne cirkulacije do konca 21. stoletja upoštevajoč scenarij SRES A1B (oranžna ovojnica) in možen razpon temperaturnih sprememb ob koncu 21. stoletja v primeru uresničitve scenarija SRES B1 (moder stolpec), A1B (oranžen stolpec) in A2 (rdeč stolpec) (IPCC, 2007).

Zaradi slabe prostorske ločljivosti uporabljenih modelov splošne cirkulacije, prikazani rezultati ne kažejo nobenih regionalnih oziroma lokalnih podrobnosti, ki jih dejansko lahko pričakujemo zaradi razgibanosti reliefa, še posebej na območju Alp, ter zaradi vpliva oceanov in morij. Podnebje Sredozemlja je npr. izrazito pogojeno z bližnjimi hribovji, dolinami, lokalnimi vetrovi in prisotnostjo velikega vodnega telesa; njihovi vplivi niso ustrezno zajeti ob ločljivosti slabši od 50 km (Li s sod., 2006). Primera natančnejših izračunov za območje Evrope prikazujeta sliki 11 in 12.

V prvem primeru gre za študijo strokovnjakov francoske meteorološke službe, MeteoFrance; ti so uporabili model splošne cirkulacije s spremenljivo ločljivostjo ARPAGE-Climate, največjo ravno nad območjem Sredozemlja (približno 50 km), sklopljen z modelom Sredozemskega morja OPAMED ločljivosti 10 km (za podrobnosti glej Somot s sod., 2008). Slika 11 prikazuje rezultate ocen spremembe temperature zraka in količine padavin nad južno Evropo in Sredozemljem za obdobje 2099–2070 v primerjavi z obdobjem 1961–1990 ob uresničitvi scenarija SRES A2.

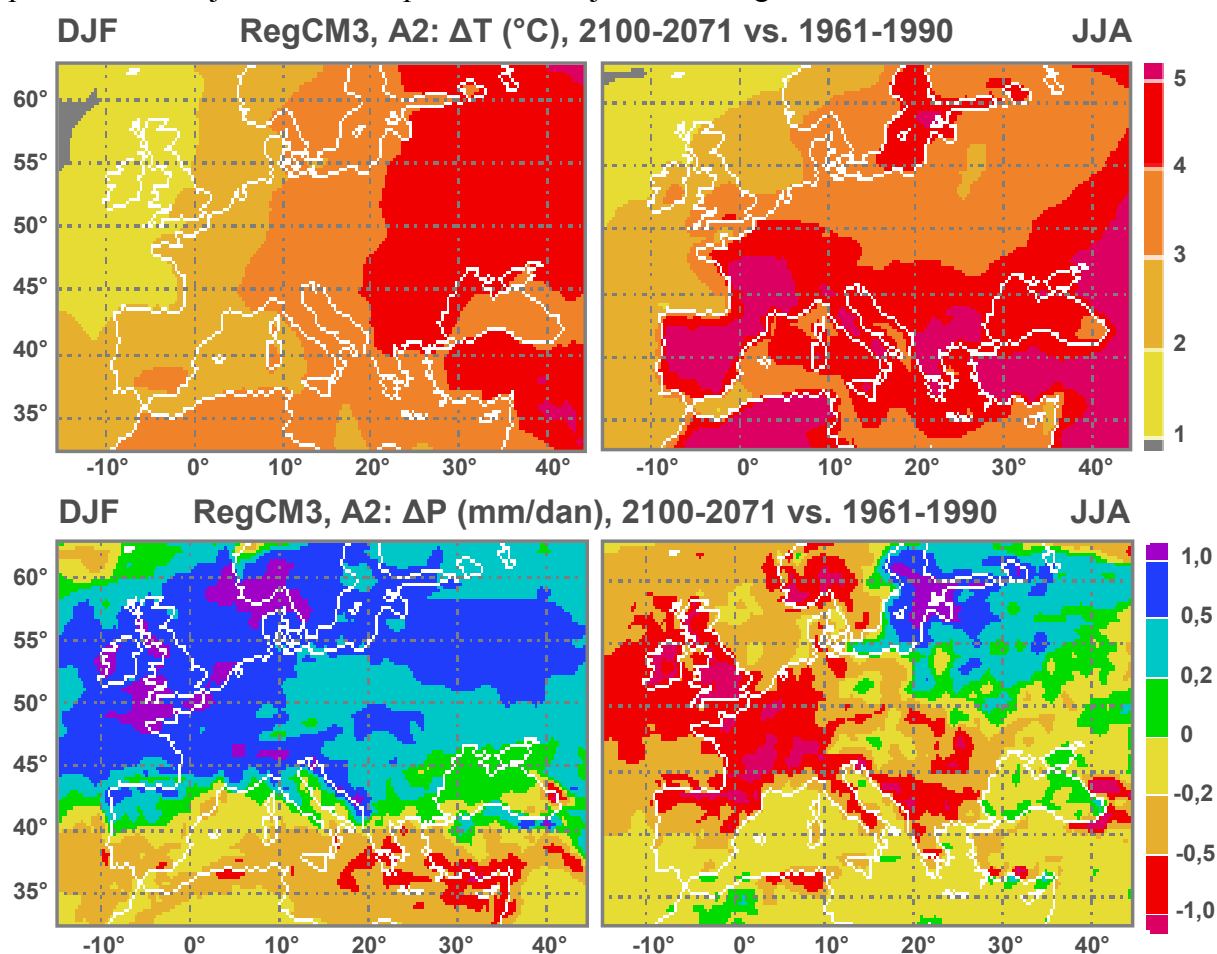


**Slika 11:** Sprememba temperature zraka (v  $^{\circ}\text{C}$ , zgoraj) in količine padavin (v mm/dan, spodaj) v zimskem (levo) in poletnem času (desno) ob primerjavi obdobj 2070–2099 in 1961–1990 pri uporabi modela ARPAGE-Climate, sklopljenega z modelom OPAMET, upoštevajoč scenarij SRES A2 (Somot s sod., 2008).

Tudi ti rezultati za območje Slovenije kažejo, da ob uresničitvi scenarija SRES A2 lahko pozimi pričakujemo dvig temperature za 3 do 4  $^{\circ}\text{C}$ , poleti pa celo za 5 do 6  $^{\circ}\text{C}$ . Prav tako rezultati kažejo, da se bo količina padavin na območju Slovenije pozimi povečala v povprečju za 0,2 do 1,0 mm/dan poleti pa zmanjšala za podobno vrednost. Alpe so praktično edino območje južne Evrope in Sredozemlja, ki pozimi lahko pričakuje nekoliko več padavin; ostala območja pa bodo tako poleti kot pozimi predvidoma deležna manjše količine padavin, kot smo je v povprečju vajeni danes.

V drugem primeru, ki je prikazan na sliki 12, gre za študijo strokovnjakov bližnjega Mednarodnega centra za teoretsko fiziko – ICTP v Trstu; ti so gnezдили regionalni podnebni model RegCM3 z ločljivostjo 50 km v globalni atmosferski model HadAM3H, upoštevajoč scenarij SRES A2 (za podrobnosti glej Giorgi s sod., 2004). Ocene sprememb količine padavin in temperature zraka ob primerjavi obdobj 2071–2100 in 1961–1990 kažejo podobne rezultate, kot so bili dobljeni

z modelom ARPAGE-Climate. Tudi ti za območje Slovenije predvidevajo pozimi dvig temperature za 3 do 4 °C, poleti pa za 4 do 5 °C. Prav tako kažejo na dvig količine pozimi v povprečju za 0,2 do 1 mm/dan in zmanjšanje količine padavin poleti za podobno vrednost. V obeh primerih pa lahko, še posebej pri padavinah, opazimo mnogo več regionalnih posebnosti, ki jih v rezultatih modelov splošne cirkulacije zaradi slabe prostorske ločljivosti ni mogoče zaslediti.

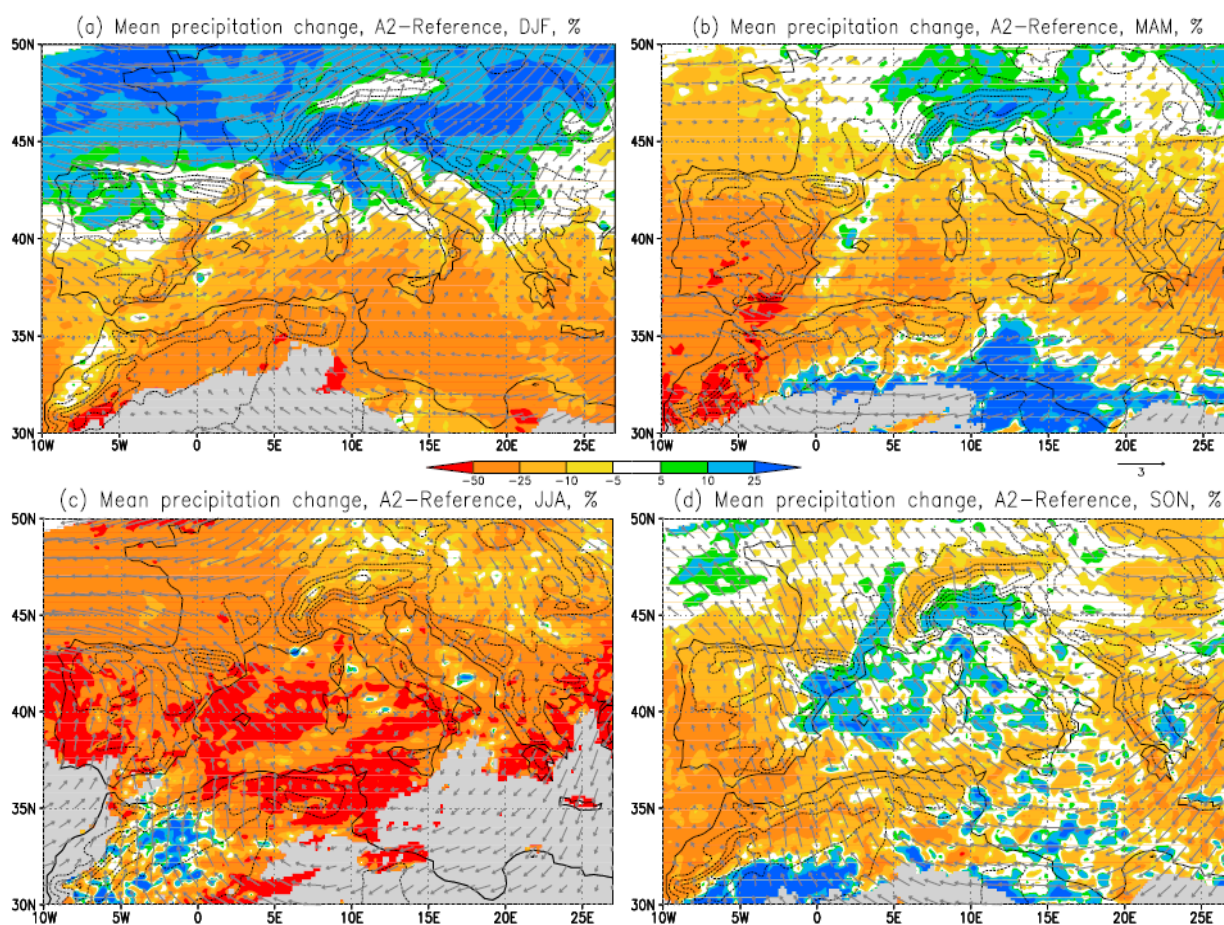


**Slika 12:** Sprememba temperature zraka (v °C, zgoraj) in količine padavin (v mm/dan, spodaj) v zimskem (levo) in poletnem času (desno) ob primerjavi obdobj 2071–2100 in 1961–1990 pri uporabi regionalnega podnebnege modela RegCM3 gnezdenega v globalni model HadAM3H, upoštevajoč scenarij SRES A2 (Giorgi s sod., 2004).

Ista skupina znanstvenikov je izvedla tudi eksperiment dvojnega gnezdenja in v rezultate prvotnega gnezdenja modela RegCM3 z ločljivostjo 50 km ugnezдила isti model, vendar z ločljivostjo 10 km (za podrobnosti glej Gao s sod., 2006). Slike 13, 14 in 15 prikazujejo rezultate dvakratnega gnezdenja modela RegCM3 za različne padavinske spremenljivke. Iz slike 13 je razvidno, da se ob ločljivosti 20 km sam vzorec rezultatov sprememb povprečne količine padavin ne spremeni bistveno v primerjavi s sliko 12, dobi pa drobnejše strukture, ki so posledica boljšega opisa topografije. Pozimi lahko pričakujemo porast količine padavin na območju večjega dela Francije, večjega dela Alp in jugovzhodne Evrope, predvsem zaradi intenzivnejše nevihtne aktivnosti nad severnim Atlantikom ter krepitev jugozahodne komponente vetrov s toplimi, vlažnimi zračnimi masami (Gao in sod., 2006). Slednje vpliva predvsem na višjo količino padavin na južnem delu Alp in s tem tudi v Sloveniji. Na območju Slovenije tako lahko do konca tega stoletja ob uresničitvi scenarija SRES A2 pričakujemo pozimi porast količine padavin tudi do 25% in več. Na območju južnega Sredozemlja pa gre pričakovati tudi v zimskem času manjšo količino padavin, kot smo je v povprečju vajeni danes. Spomladi se območje, kjer pričakujemo manjšo količino padavin, pomakne še bolj severno in prekriva celoten Iberski, Apeninski in Balkanski polotok, Francijo in območje gorovja Atlas. Predvsem za vzhodni del Slovenije rezultati še kažejo porast padavin, vendar bistveno manj kot v zimskem času, v zahodnem delu pa ne gre pričakovati opaznih sprememb. Poleti lahko na celotnem območju južne Evrope in Sredozemlja pričakujemo



manjšo količino padavin, predvsem zaradi krepitve anticiklonalne cirkulacije, ki je še posebej izrazita nad Severnim Atlantikom in zahodno Evropo. Na območju Slovenije lahko pričakujemo izrazito zmanjšanje količine padavin, tudi do 50%. Najmanj izrazit je vzorec sprememb za jesenski čas, ko na območju Slovenije ne gre pričakovati opaznih sprememb.

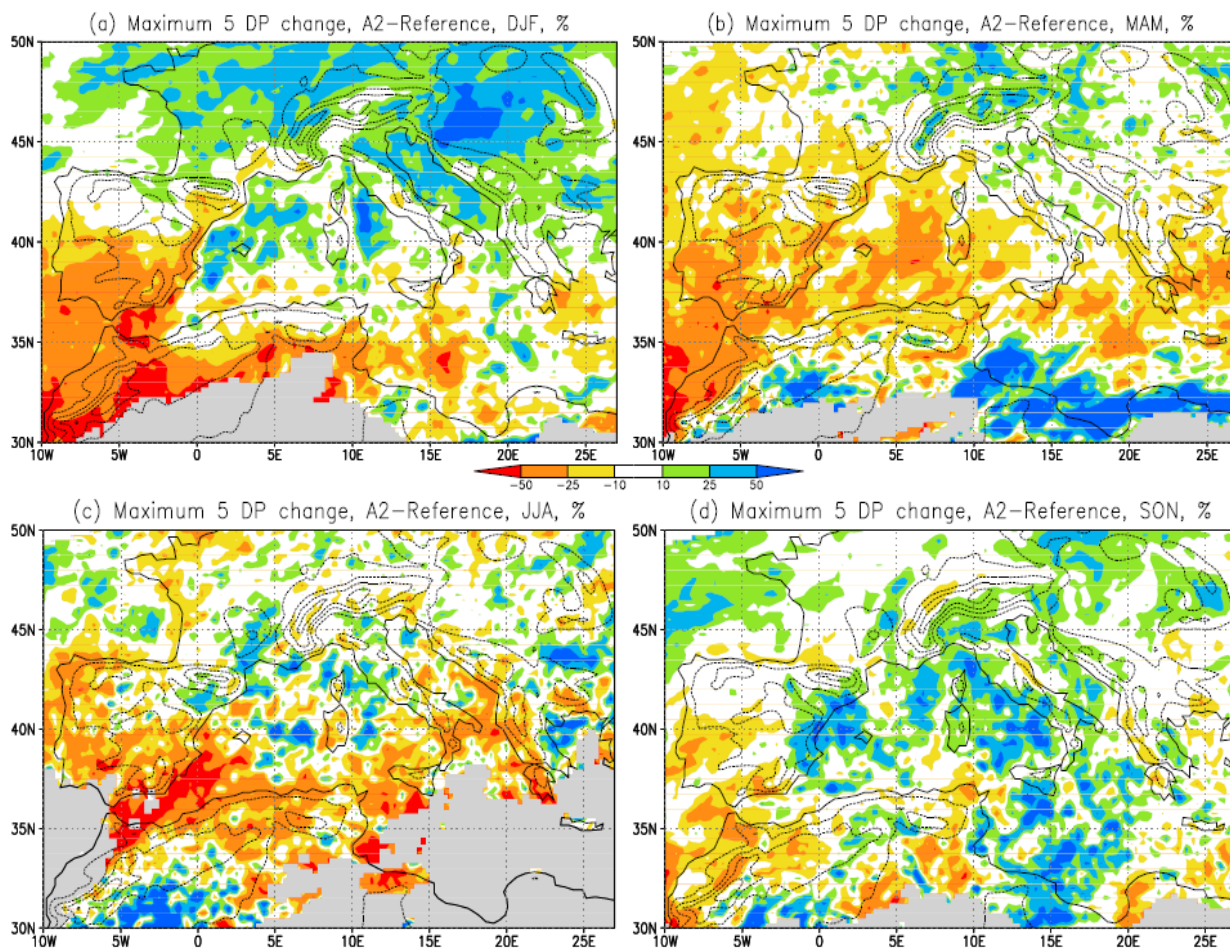


**Slika 13.** Sprememba povprečne količine padavin (v %) v zimskem (levo zgoraj), spomladanskem (desno zgoraj), poletnem (levo spodaj) in jesenskem (desno spodaj) času ob primerjavi obdobj 2071–2100 in 1961–1990 pri uporabi dvakratnega gnezdenja regionalnega podnebne modela RegCM3 v globalni model HadAM3H upoštevajoč scenarij SRES A2 (Gao s sod., 2006).

Poleg sprememb povprečnih količin padavin je pomemben predvsem vpliv podnebnih sprememb na nekatere izredne dogodke, kot so daljša obdobja suše ali močni nalivi. V ta namen sta kot merili verjetnosti pojava poplav ali suše na izbranem območju pogosto uporabljeni spremenljivki največjih 5-dnevnih padavin (slika 14) in najdaljšega suhega obdobja (slika 15). Rezultati dvakratnega gnezdenja regionalnega podnebne modela RegCM3 v globalni atmosferski model HadAM3H kažejo, da območja z večjimi največjimi 5-dnevnimi količinami padavin in krajšimi suhimi obdobji običajno sovpadajo z območji porasta povprečne količine padavin in obratno. So pa območja, kjer lahko pričakujemo porast največjih 5-dnevnih količin padavin obsežnejša kot območja, kjer pričakujemo porast povprečne količine padavin. Še posebej poleti lahko zasledimo tudi območja, kjer sicer pričakujemo manjšo povprečno količino padavin, vendar kljub temu porast največjih 5-dnevnih količin padavin. To pomeni, da bodo sicer nevihtne padavine poleti na teh območjih manj pogoste in jih bo v povprečju manj, vendar pa bodo močnejše, kar kljub splošnemu zmanjšanju količine padavin lahko privede do pogostejših hudourniških poplav.

Pozimi lahko pričakujemo porast največjih 5-dnevnih količin padavin na območju zahodne in osrednje Evrope in posledično zmanjšanje trajanja najdaljšega suhega obdobja. To nakazuje na pogostejše in intenzivnejše nevihte v tem obdobju, kar velja tudi za Slovenijo. Spomladi in jeseni na območju Slovenije tako z vidika maksimalnih 5-dnevnih količin padavin kot trajanja najdaljšega

suhega obdobja ne gre pričakovati večjih sprememb. Tako poleti kot jeseni pa lahko pričakujemo v povprečju daljša maksimalna obdobja brez padavin, kar pomeni dolgotrajnejše in intenzivnejše suše. To bo še posebej izrazito v poletnem času, ko vsaj v zahodnem delu Slovenije lahko pričakujemo tudi nekoliko manjše maksimalne 5-dnevne padavine. Za razliko od poletja pa jeseni, kljub predvidoma daljšim maksimalnim obdobjem brez padavin pričakujemo intenzivnejše maksimalne 5-dnevne količine padavin.

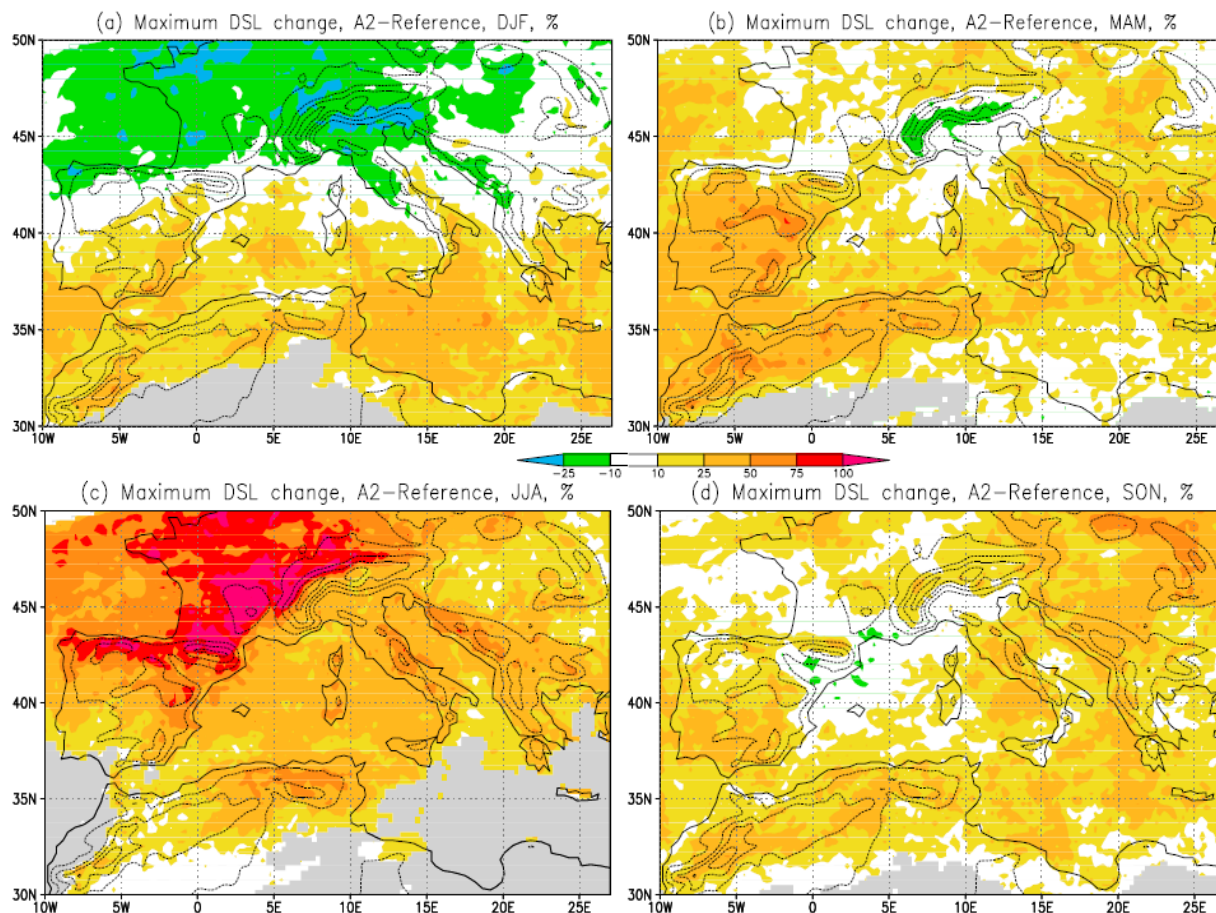


**Slika 14.** Sprememba največje 5-dnevne količine padavin (v %) v zimskem (levo zgoraj), spomladanskem (desno zgoraj), poletnem (levo spodaj) in jesenskem (desno spodaj) času ob primerjavi obdobj 2071–2100 in 1961–1990 pri uporabi dvakratnega gnezdenja regionalnega podnebne modela RegCM3 v globalni model HadAM3H upoštevajoč scenarij SRES A2 (Gao s sod., 2006).

Kadar potrebujemo ocene podnebnih sprememb na točno določeni lokaciji, si pomagamo z empiričnimi modeli; z njimi povežemo spremenljivost podnebnih vzorcev v obsežni skali s spremenljivostjo izbrane podnebne spremenljivke na izbrani lokaciji. Izdelamo jih na podlagi meritev, uporabimo pa bodisi na rezultatih modelov splošne cirkulacije ali regionalnih podnebnih modelov. Primer rezultatov takšnega pristopa za pet slovenskih krajev je ločeno za toplo (apr–sept) in hladno polovico (okt–mar) leta prikazan na slikah 16 in 17. Izbrani kraji so predstavniki različnih podnebnih območij Slovenije (Ogrin, 1998), in sicer Ljubljana za zmerno-celinsko podnebje osrednje Slovenije, Murska Sobota za zmerno-celinsko podnebje SV Slovenije, Novo mesto za zmerno-celinsko podnebje JV Slovenije, Rateče za gorsko podnebje in Bilje za submediteransko podnebje. Empirični modeli so bili izdelani na podlagi podatkov Agencije RS za okolje za povprečno mesečno temperaturo zraka in količino padavin v obdobju 1961–2005 v izbranih krajih ter NCEP/NCAR reanaliz nad območjem osrednje Evrope. Pri tem se je potrebno zavedati, da so zaradi narave odvisnosti lokalnih podnebnih spremenljivk od podnebnih vzorcev nad območjem celotne srednje Evrope empirični modeli za temperaturo zraka zanesljivejši od empiričnih modelov



za količino padavin, še posebej za poletne mesece. S podnebno spremenljivostjo nad širšim območjem osrednje Evrope namreč ne moremo pojasniti lokalno pogojenih padavin, ki nastanejo zaradi termične konvekcije ali zaradi prisilnega dviga ob orografskih pregradah.

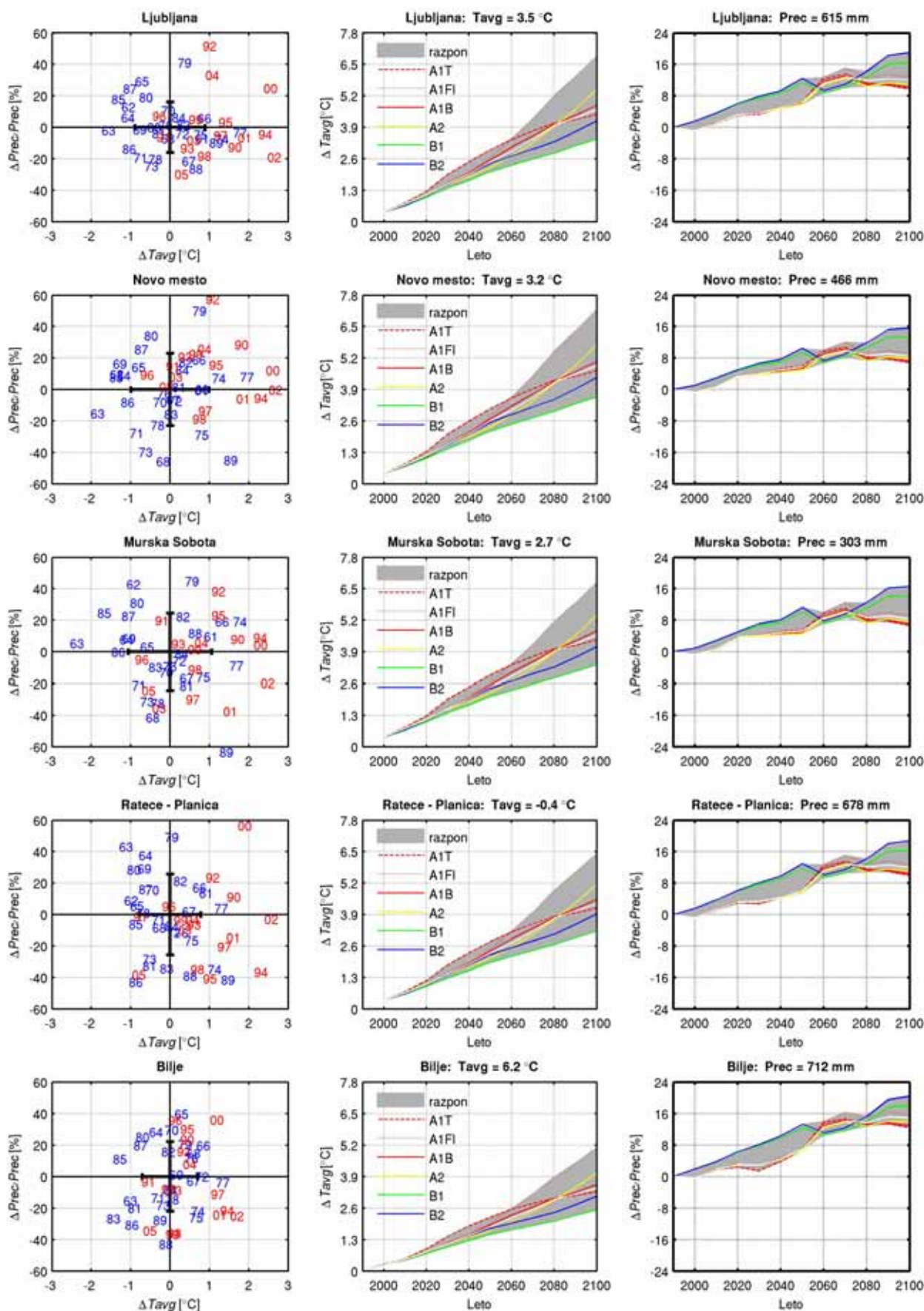


**Slika 15.** Sprememba najdaljšega obdobja brez padavin (v %) v zimskem (levo zgoraj), spomladanskem (desno zgoraj), poletnem (levo spodaj) in jesenskem (desno spodaj) času ob primerjavi obdobj 2071–2100 in 1961–1990 pri uporabi dvakratnega gnezdenja regionalnega podnebnegega modela RegCM3 v globalni model HadAM3H upoštevajoč scenarij SRES A2 (Gao s sod., 2006).

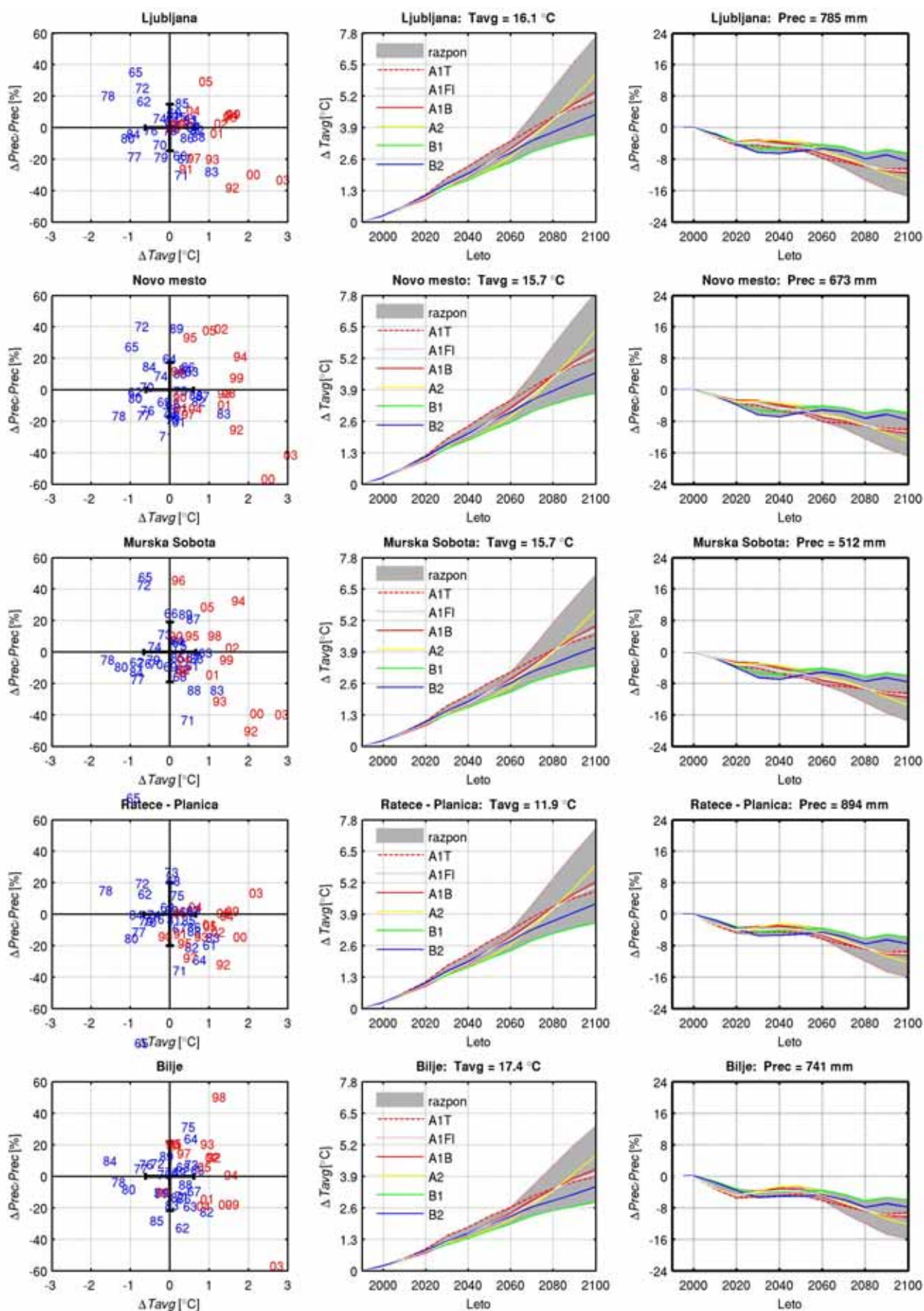
Izdelani modeli so bili uporabljeni za projiciranje rezultatov štirih različnih modelov splošne cirkulacije do konca 21. stoletja upoštevajoč scenarije SRES A2 in B2, in sicer avstralskega modela CSIRO/Mk2, britanskega modela UKMO/HadCM3, ameriškega modela DOE-NCAR/PCM in nemškega modela MPI-DMI/ECHAM4-OPYC3 na izbranih pet lokacij v Sloveniji. Lokalne projekcije podnebnih sprememb so bile naknadno še prirejene ostalim štirim SRES scenarijem, A1T, A1B, A1FI in B1 (za podrobnosti glej Bergant, 2007).

Poleg projekcij za prihodnost sliki 16 in 17 prikazujeta v prvem stolpcu razpršenost odstopanj parov povprečne temperature zraka in količine padavin v hladni (slika 16) in v topli (slika 17) polovici leta glede na dolgoletni povprečji v obdobju 1961–1990. Iz slik je razvidno, da se podnebne razmere iz leta v leto lahko močno razlikujejo. Tako imamo enkrat izredno namočena (npr. topla polovica leta 1965 in 1972) ali hladna obdobja (npr. topla polovica leta 1978), drugač spet suha in vroča (npr. izrazito toplo in suho poletje 2003). Poleg tega je iz slik 16 in 17 razvidno, da skoraj vsa leta od 1990 dalje izstopajo od povprečja 1961–1990 v smeri proti višjim temperaturam, tako v hladni kot v topli polovici leta. To kaže na vedno višje temperature in potrjuje trditve, da posledice globalnega ogrevanja lahko zasledimo tudi v meritvah temperature na območju Slovenije.





**Slika 16:** Razporeditev let v obdobju 1961–2005 glede na odstopanja povprečne temperature zraka ( $T_{avg}$ ) in količine padavin ( $Prec$ ) v topli polovici leta od povprečja v obdobju 1961–1990 za izbranih pet lokacij (Ljubljana, Novo mesto, Maribor, Rateče – Planica, Bilje; levo) skupaj z okvirnimi projekcijami spremembe temperature zraka ( $T_{avg}$ : sredina) in količine padavin ( $Prec$ : desno) do konca 21.stoletja glede na različne scenarije emisij toplogrednih plinov (SRES A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2).



**Slika 17:** Razporeditev let v obdobju 1961–2005 glede na odstopanja povprečne temperature zraka (Tavg) in količine padavin (Prec) v hladni polovici leta od povprečja v obdobju 1961–1990 za izbranih pet lokacij (Ljubljana, Novo mesto, Maribor, Rateče – Planica, Bilje: levo) skupaj z okvirnimi projekcijami spremembe temperature zraka (Tavg: sredina) in količine padavin (Prec: desno) do konca 21.stoletja glede na različne scenarije emisij toplogrednih plinov (SRES A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2).

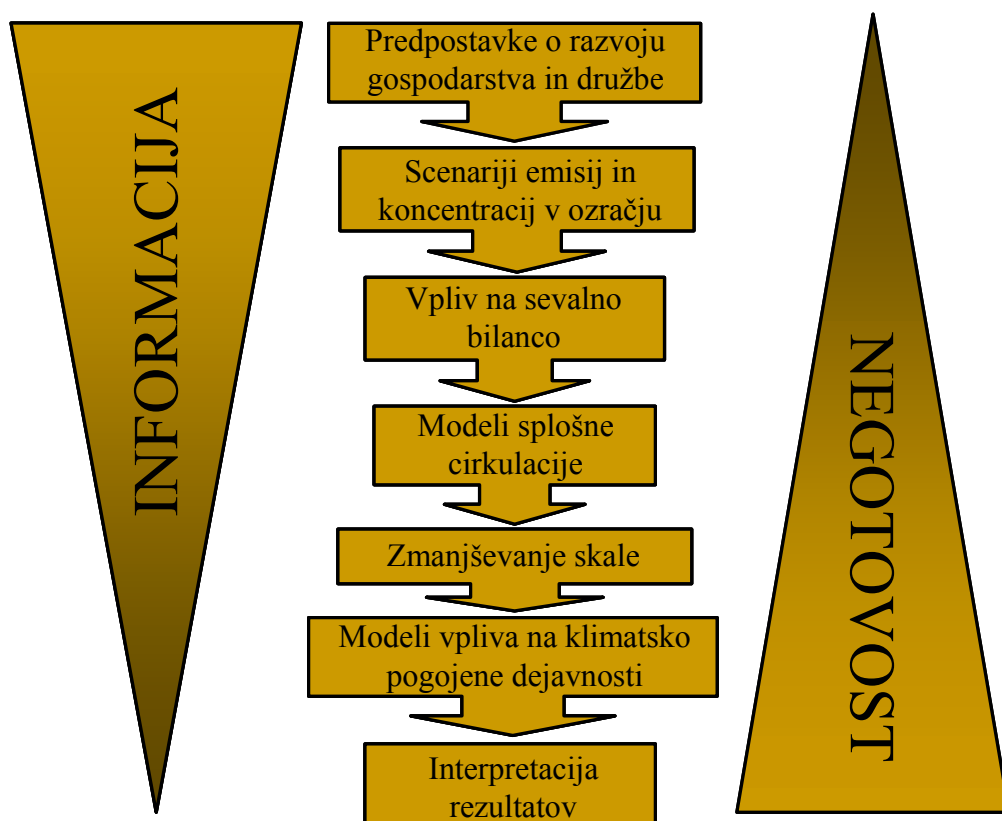
Iz slik 16 in 17 je tudi razvidno, da lahko pričakujemo izrazitejši dvig temperature v topli polovici leta v primerjavi s hladno polovico. Prav tako gre pričakovati zmanjšanje količine padavin v topli polovici leta in porast količine padavin v hladni polovici leta, kar je v skladu z že prej navedenimi rezultati. Rezultati projekcij za izbranih pet lokacij in posamezne letne čase kažejo, da se bodo glede na obdobje 1961–1990 do konca 21. stoletja najbolj ogrela poletja (med 3.5 °C in 8 °C), sledile bodo zime (med 3.5 °C in 7 °C), pomladi (med 2.5 °C in 6 °C) in jeseni (med 2.5 °C in 5 °C). V pomladnih in jesenskih mesecih glede na izvedene projekcije ne pričakujemo izrazitih sprememb v količini padavin, v zimskih mesecih je predviden porast količine padavin (do + 30%), v poletnih mesecih pa zmanjšanje količine padavin (do –20%) (Bergant, 2007). Izrazitejšemu ogrevanju v poletnih mesecih verjetno botruje manjša količina kot tudi pogostost padavin, ki sicer v poletnih mesecih hladijo površje in tudi zrak ob njem. Izmed petih izbranih lokacij izstopajo Bilje, za katere projekcije za vse letne čase kažejo nekoliko nižji dvig temperature zraka kot za ostale štiri lokacije (poletje: 3.0 °C do 5.5 °C, zima: 2.5 °C do 4 °C, pomlad: 2.5 °C do 4.5 °C, jesen: 2 °C do 4 °C). Ker smo podobne rezultate dobili tudi za lokaciji Slap pri Vipavi in Portorož, bi lahko sklepali, da gre vzrok iskati v bližini Jadranskega in Sredozemskega morja. V splošnem namreč velja, da bo zaradi razlike v toplotni kapaciteti ogrevanje nad kontinentalnimi območji izrazitejše kot nad obmorskimi oziroma oceanskimi območji (IPCC, 2007). Res pa je, da je kakovost podatkov, na katerih temeljijo izdelani empirični modeli, prav za submediteransko območje najslabša, kar vpliva tudi na kakovost končnih izračunov.

### **Negotovosti, ki spremljajo projekcije podnebnih sprememb**

Kakovost modelov pa je le eden od virov negotovosti pri projekcijah podnebnih sprememb. Modeli, ki jih uporabljamo za ocenjevanje prihodnjega stanja podnebja, predstavljajo le poenostavljen opis podnebnega sistema. Zato je kakovost izračunov s takšnimi modeli odvisna od teoretičnega poznavanja procesov, ki jih vključuje model, in natančnosti njihovega zapisa v modelu, od natančnosti poznavanja začetnih razmer, s katerimi zaženemo model in od robnih pogojev, ki jih modelu postavimo tekom izračunavanja prihodnjih stanj ozračja – npr. prihodnjih vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju. Gre torej za dva temeljna vira negotovosti v rezultatih podnebnih sprememb; omejeno poznavanje procesov in sedanjih razmer ter nenapovedljivost prihodnosti z vidika uresničitve izbranih scenarijev izpustov toplogrednih plinov in delcev v ozračje. Zato projekcije podnebnih sprememb za izbrano območje, ki predstavljajo ključni vhodni podatek v študijah vpliva podnebnih sprememb ter pri pripravi strategij prilagajanja, spremlja določena negotovost (Knutti, 2008); ta se v procesu prehoda od globalnih scenarijev razvoja družbe do lokalnih ocen podnebnih sprememb kopiči (slika 18).

Kako se bo v prihodnje razvijala družba in kakšne bodo zaradi tega emisije toplogrednih plinov ter njihove vsebnosti v ozračju, lahko le sklepamo glede na sedanje trende, kar predstavlja osnovni vir negotovosti v ocenah podnebnih sprememb. Zato je IPCC izdelal številne scenarije izpustov, ki so bili uporabljeni v tretjem in četrtem IPCC poročilu (IPCC, 2001; IPCC, 2007). Razlike med temi scenariji kot njihovimi predhodniki iz drugega poročila IPCC (IPCC, 1995) pa kažejo na primarni vir negotovosti v projekcijah podnebnih sprememb. Prav tako ne poznamo vseh podrobnosti podnebnega sistema in njegovega odziva na spremembe sestave ozračja in druge spremembe podnebnih dejavnikov. In tudi če bi do potankosti poznali odvisnost odziva podnebnega sistema na sestavo ozračja, lahko podnebje modeliramo le z omejeno prostorsko natančnostjo, ki ne zajame vseh regionalnih in lokalnih posebnosti podnebja izbranega območja. Slovenija je temu še posebej izpostavljena, saj leži na prepletu alpskega, sredozemskega in panonskega podnebnega vpliva, zaradi česar je ob veliki razgibanosti površja raznolikost podnebnih razmer na njenem območju izredna. Slednje predstavlja velik izziv, tako za dinamično kot empirično modeliranje podnebja v prihodnje, zaenkrat pa je tudi to vzrok, da so projekcije podnebnih sprememb za Slovenijo podvržene precejšnji negotovosti, še posebej kadar nas zanimajo padavine na majhnem območju.





**Slika 18:** Naraščanje negotovosti v postopku izdelave regionalnih/lokalnih scenarijev podnebnih sprememb in njihovega vpliva ob oženju informacije od splošnih predpostavk o razvoju gospodarstva in družbe do posledic za podnebno pogojene dejavnosti na izbrani regiji ali lokaciji (Bergant s sod., 2006).

Zaradi tega Urad za meteorologijo na Agenciji RS za okolje sodeluje pri projektu Katedre za meteorologijo na Univerzi v Ljubljani in Centra za raziskave atmosfere na Univerzi v Novi Gorici, *Numerično modeliranje podnebja z visoko ločljivostjo za pripravo scenarijev podnebnih sprememb za Slovenijo za 21. stoletje*. Osnovni namen projekta je kritično ovrednotiti razpoložljive rezultate regionalnih podnebnih modelov, ki vključujejo tudi območje Slovenije, ter jih primerjati z rezultati lastnih simulacij, pri katerih bo v globalni model ARPAge-Climate gnezden numerični model ALADIN z ločljivostjo 9 km. Modeliranje podnebja v tako visoki ločljivosti nam bo omogočilo predvsem podrobnejši vpogled v predvidene spremembe podnebja z vidika pogostosti izrednih vremenskih dogodkov, kot so suše, vročinski valovi, hudourniške poplave, neurja ipd. Dokler ne bodo izdelani natančnejši scenariji podnebnih sprememb za Slovenijo, pa si lahko pri študijah ranljivosti in vpliva ter pri pripravi strategij prilagajanja pomagamo z razpoložljivimi ocenami podnebnih sprememb in izkušnjami posledic ob izrednih dogodkih v preteklosti.

## Literatura

- Benestad, R. E. 2003. What can present climate models tell us about climate change? *Climatic Change* 59: 311-331.
- 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.
- Bergant, K. 2007. Projekcije podnebnih sprememb za Slovenijo [V: Jurc, M. (ur.). *Podnebne spremembe: vpliv na gozd in gozdarstvo*]. *Studia forestalia Slovenica*, 130, 67-86.
- Crane, R. G., Yarnal, B., Barron, E. J., Hewitson, B. 2002. Scale interactions and regional climate: examples from Susquehanna river basin. *Human and Ecological Risk Assessment*, 8(1):147-158.
- Gao, X., Pal, J. S., Giorgi, F. 2006. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophysical Research Letters*, 33: 1-4 (doi:10.1029/2005GL024954).
- Giorgi, F., Mearns, L. O. 1999. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104: 6335-6352.
- Giorgi, F., Bi, X., Pal, J. S. 2004. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100). *Climate Dynamics*, 23: 839-858.

- Giorgi, F. 2008. Uncertainties in regional climate change projections. Predstavitev na konferenci »Bridging the Gap«, Portorož, 15. maj 2008. [http://www.bridgingthegap.si/pdf/Adapation to climate change/Filippo Giorgi UNCERTAINTIES IN REGIONAL CLIMATE CHANGE PROJECTIONS.pdf](http://www.bridgingthegap.si/pdf/Adapation%20to%20climate%20change/Filippo%20Giorgi%20UNCERTAINTIES%20IN%20REGIONAL%20CLIMATE%20CHANGE%20PROJECTIONS.pdf)
- Heyen, H. 2002. Statistical downscaling. Slika iz spletne strain (29. okt. 2002). URL = <http://w3g.gkss.de/G/mitarbeiter/heyen/NEXT/stdown.html>
- IPCC. 1990. Scientific Assessment of Climate Change: Report of Working Group I [Houghton, J.T., G.J. Jenkins in J.J. Ephraums]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 365 str.
- IPCC. 1995. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B. A. Callender, N. Harris, A. Kattenberg in K. Maskell]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 572 str.
- IPCC. 2000: IPCC Special Report: Emission Scenarios [Nakićenović, in R. Swart (ur.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 570 str.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, in C.A. Johnson (ur.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 str.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor in H.L. Miller (ur.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 str.
- Lorenz, E. 1967. The nature and theory of general circulation of the atmosphere. WMO Publication 218, 59-96.
- Li, L., Bozec, A., Somot, S., Béranger, K., Bouruet-Aubertot, P., Sevault, F., Crépon, M. 2006. Regional atmospheric, marine processes and climate modelling (chapter 7). [V: Lionello, P., Malanotte, P., Boscolo, R. (ur.), Mediterranean Climate Variability], Elsevier B.V., Amsterdam, 373-397.
- McGuffie K., Henderson-Sellers A. 1997. A climate modeling primer. Chichester, John Wiley and Sons: 253 str.
- Ogrin, D. 1998. Podnebje. (ur.) Fridl, J., Kladnik, D., Adamič, M., Perko, D. V: Geografski atlas, Ljubljana, DZS: 110-111 s.
- Somot S., Sevault F., Deque M., Crepon M. 2008. 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere–ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, 63 (2-3): 105-111.
- Wang, Y., Leung, L. R., McGregor, J. L., Lee, D.-K., Wang, W.-C., Ding, J., Kimura, F. 2004. Regional climate modeling: Progress, challenges, and prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(6): 1599-1628.
- Zorita, E., Storch von, H. 1999 The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, 12:2474-2489.