

**Agrovoc descriptors:** climatic change; water balance; soil water balance; soil water deficit; models; drought

**Agris category code:** P40; P10

COBISS koda 1.02

## Možni vplivi podnebnih sprememb na vodno bilanco tal v Sloveniji

Tjaša IPAVEC<sup>1</sup>, Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ<sup>2</sup>

Prispelo 1. aprila 2008, sprejeto 31. julija 2008

Received April 1, 2008, accepted July 31, 2008

### IZVLEČEK

Novejše projekcije podnebnih sprememb v vedno večji meri kažejo na spreminjanje vodne bilance tal, ki ima tudi povraten učinek nanje. Obravnavali smo časovno dinamiko vode v tleh za Ljubljano in Mursko Soboto za zadnjih 46 let in preko podnebnih scenarijev do konca stoletja. Za osnovo smo izbrali tridesetletno obdobje 1961-1990, s tem smo nato primerjali obdobje 1991-2006 in projekcije po treh različnih scenarijih podnebnih sprememb, ki smo jih pripravili v obliki inkrementalnih sprememb temperature in padavin kot kombinacijo različnih projekcij za Slovenijo. Z modelom SIMPEL smo določili spremembe potencialne evapotranspiracije (metoda EPIC Penman-Monteith), vodnega primanjkljaja (razlika med količino padavin in potencialno evapotranspiracijo) in števila sušnih dni. Pri vseh treh spremenljivkah se kažejo naraščajoči trendi že za obdobje 1961-2006. Opazovali smo tudi spreminjanje variabilnosti, ki je izrazilo predvsem pri številu sušnih dni in nam prinaša dodatno povečevanje tveganja suš. Glavne rezultate smo predstavili z izračuni verjetnosti za pojav določenega števila sušnih dni. Pri tem verjetnosti za več kot 35 sušnih dni v vegetacijskem obdobju (od aprila do septembra) v drugem obravnavanem obdobju ter pri projekcijah po srednjem in še toliko bolj po visokem scenariju podnebnih sprememb bistveno presežajo verjetnosti v prvem obdobju in pri projekcijah po blagem scenariju.

**Ključne besede:** vodna bilanca tal, podnebne spremembe, suša, vodnobilančni model SIMPEL, vodni primanjkljaj

### POTENTIAL CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER BALANCE IN SLOVENIA

#### ABSTRACT

The latest climate change projections increasingly indicate the changing of soil water balance, which is then reflected back in climate change. This paper examines soil moisture availability time dynamics in Ljubljana and Murska Sobota in the last 46 years and under climate change scenarios for these locations through the end of the century. The basis was a thirty-year period 1961-1990 serving as a comparison with the period 1991-2006 and with projections of climate changes under three scenarios, presented in the form of incremental temperature and precipitation changes as a combination of alternative projections for Slovenia. Using the SIMPEL model, we determined variability of potential evapotranspiration (the EPIC Penman-Monteith method), water deficit (difference between the volume of precipitation and potential evapotranspiration) and the number of dry days. The analysis showed growing trends for all

<sup>1</sup> univ. dipl. meteor.

<sup>2</sup> prof., dr., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

three variables in the period 1961-2006. Another subject of observation was variability change which is evident above all in the number of dry days and increases the risk of drought. The main results are presented by means of calculations of probability for the occurrence of a certain number of dry days. The probability of over 35 dry days in the vegetation period (April-September) of the second analysed period, under the medium and increasingly so high climate change scenario is much higher than such a probability in the first analysed period and under the low scenario.

**Key words:** soil water balance, climate change, drought, water-balance model SIMPEL, water deficit

## 1 UVOD

Podnebne spremembe so že nekaj časa precej aktualna tema, z njo pa se v ospredje prebijajo tudi sorodne raziskave. Opaznih sprememb v klimatskem sistemu je vedno več, med drugim tudi v naših krajih vse pogosteje srečujemo vremensko pogojene težave v kmetijstvu. Z raziskavami na temo spreminjanja vodne bilance tal se med drugim ukvarja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Pri obravnavanju vodne bilance tal uporabljajo vodnobilančni model IRRFIB, s katerim napovedujejo predvsem potrebne količine namakanja, uporablja pa se tudi za preučevanje suš. V želji po alternativni si bomo pogledali izračune vodne bilance tal z nemškim modelom SIMPEL.

Zaradi vedno izrazitejših težav s sušami so po svetu, predvsem v ZDA, že ustanovili sušne centre, po katerih se bo zgledoval tudi novonastali slovenski na ARSO, namenjen celotni JV Evropi. Ukvarjal se bo z raziskovanjem in napovedovanjem suš, pri čemer je potrebno poenotiti modele in pri tem upoštevati veliko pomanjkanje podatkov sploh pred letom 1990, ponekod pa tudi še sedaj. V Sloveniji v to smer še ni veliko storjenega, zato so pomembne vse raziskave, povezane z ekstremnimi pojavi v vodnem ciklu, kar je bila dodatna spodbuda za usmeritev tega dela.

V delu je glavni namen predstaviti pričakovano sušnost v drugi polovici tega stoletja na podlagi izračunov vode v tleh z modelom SIMPEL. Za osnovo so uporabljeni izračuni v letih 1961-1990, za primerjavo oz. oceno že opazovanih sprememb izračuni v letih 1991-2006, za napoved do konca stoletja pa projekcije treh različnih scenarijev podnebnih sprememb temperature in padavin glede na leta 1961-1990. Postavili smo hipotezo, da se bo vodna bilanca tal v Sloveniji spreminjala. Pri tem pričakujemo povečanje števila sušnih dni in primanjkljaja vode v tleh, kakor tudi povečano variabilnost sušnosti.

Poleg sprememb temperature in padavin, ki so precej dobro znane, je za nas pomembno tudi opaženo spreminjanje evapotranspiracije in vodne bilance tal. Povprečna letna količina vode v tleh se opazno znižuje v subtropskem pasu, Sredozemlju in višjih geografskih širinah, kjer se zmanjšuje snežna odeja, povečuje pa se v vzhodni Afriki, centralni Aziji in ponekod drugod, kjer narašča količina padavin (IPCC, 2007). V Anatoliji je študija pokazala, da se v prvih mesecih rasti dejanska evapotranspiracija zaradi podnebnih sprememb poveča, nato pa začne hitro

upadati, ko postane količina vode v tleh zelo omejena (Komuscu in sod., 1998). Raziskave v Indiji pa zanimivo kažejo, da se je kljub splošnemu zvišanju temperature v zadnjih desetletjih evapotranspiracija zmanjšala, kar so povezali z naraščanjem relativne vlažnosti in zmanjševanjem obsevanja. Za večje območje (ZDA in Rusija) in daljše časovno obdobje so prav tako opazili zmanjševanje evapotranspiracije, ki so jo pripisali povečanju oblačnosti, ki zmanjšuje direktno obsevanje (Chattopadhyay in Hulme, 1997).

Pomemben del raziskav evropskega projekta PRUDENCE opozarja na dejstvo, da moramo poleg višjih temperatur pričakovati tudi izrazito povečano poletno variabilnost, ki zaenkrat še ni bila opažena. Pri projekcijah sprememb padavin nastopajo veliko večje negotovosti kot pri projekcijah sprememb temperatur. Upoštevati moramo različne scenarije podnebnih sprememb, poleg tega pa še dejstvo, da imajo različni robni pogoji za regionalne modele učinek na projekcije podnebnih ekstremov, ki je povsem primerljiv z učinkom različnih emisijskih scenarijev.

Globalne spremembe evapotranspiracije naj bi uravnotežile globalne spremembe padavin, vendar se to lokalno zaradi sprememb v atmosferskem prenosu vodne pare ne bo povsod odražalo (IPCC, 2007). Izračuni za Afriko kažejo, da je izrednega pomena povezava med temperaturo in evapotranspiracijo, ki je eksponentna in še dodatno utežena z učinki vetra in relativne vlažnosti. Tako bo v srednjih geografskih širinah, kjer so bazne temperature nižje, enak dvig temperature povzročil bistveno manjše povečanje evapotranspiracije kot v toplejših tropskih predelih. Poleg tega poveča razliko še dejstvo, da je v srednjih geografskih širinah ogrevanje napovedano predvsem pozimi, ko je evapotranspiracija skoraj zanemarljiva. Tako bodo tropski predeli z manjšim ogrevanjem izkusili večje naraščanje potreb po vodi (Feddema, 1992 in 1999). V Indiji trendi za prihodnost kažejo naraščanje evapotranspiracije, česar ni lahko razložiti, saj se je v zadnjem obdobju evapotranspiracija zmanjševala. Morda bodo precej višje temperature kljub običajnemu višanju relativne vlažnosti učinkovale nasprotno in jo nižale, kar bi povzročilo izrazito naraščanje evapotranspiracije (Chattopadhyay in Hulme, 1997). Relativno majhne spremembe temperature in padavin, skupaj z nelinearnim vplivom na evapotranspiracijo in površinski odtok vode, imajo lahko velik vpliv na zemeljski ekosistem preko sprememb količine vode v tleh, ki se bo verjetno najbolj kazal v sušnih in polsušnih pokrajinah (Sakura in Tang, 2003; Komuscu in sod., 1998).

Herbst in Hörmann (1998) sta pokazala, da lahko globalno zvišanje temperature za 2 °C, čeprav se evapotranspiracija pri tem ne spremeni bistveno, resno vpliva na ravnovesje vode v tleh med vegetacijskim obdobjem.

Verjetno je, da se bo največji učinek podnebnih sprememb na tla pokazal preko sprememb uporabe tal zaradi podnebnih sprememb (Rounsevell in sod., 1999). Feddema (1999) omenja precej poročil (Walker in Rowntree, 1977; Shukla in Mintz, 1982; Manabe in Wetherald, 1987; Xue in Shukla, 1993), ki potrjujejo, da modeli napovedujejo velik vpliv sprememb vode v tleh na lokalno cirkulacijo in vzorce razporeditve padavin.

Indijska raziskava poudarja, da bodo zelo verjetno imele spremembe relativne vlažnosti nad celinskimi tropskimi predeli večji vpliv na vodno ravnotežje kot le na temperature. Najbolj občutljivi sta predmonsunsko in zimsko obdobje, med katerima so že sedaj največji vodni primanjkljaji, medtem ko se v monsunskem obdobju količina vode v tleh ne bo bistveno spremenila (Mehrotra, 1999). Vse spremembe bodo prizadele vodne vire in s tem kmetijski sektor, ki je v Indiji eden glavnih prispevkov k državnemu gospodarstvu (Chattopadhyay in Hulme, 1997).

Upoštevaajoč globalne napovedi bodo v Afriki vrednosti potencialne evapotranspiracije narasle precej bolj kot količina padavin, kar seveda pomeni zmanjšanje presežka vode v tleh. Tako naj bi se v povprečju po celem kontinentu vodni presežek zmanjšal za 10 mm. Spremembe so v povprečju majhne, a postanejo na posameznih lokacijah zelo pomembne. Projekcije vodnih presežkov in primanjkljajev kažejo največje sušenje južno od ekvatorja v južno-centralni Afriki, v Ugandi, in v mokrem delu zahodnoafriške obale. Nekoliko milejše sušenje se obeta na mnogih drugih predelih, kot sta območje Sahela in južna Afrika. Pomembno je razumeti, da ima v teh marginalnih podnebnih lokacijah že majhna sprememba vodne bilance lahko zelo velik vpliv na ekosisteme in človeške aktivnosti. Ogrožena bo dobrobit ljudi, poleg tega pa so pomembni tudi povratni podnebni učinki, ki jih je težko predvideti. Na mnogih območjih bodo zaloge vode v tleh porabljene v prezgodnjem delu sušnega obdobja. Dodatno bo še poslabšanje kakovosti tal, ki bo prineslo manjšo možnost zadrževanja vode v tleh (Feddema, 1999).

Raziskave za ameriški srednji zahod pa kažejo nekoliko drugačno sliko, saj pravijo, da bodo, ne glede na to, v katero smer se bodo razvile, spremembe količine vode v tleh zelo majhne (1 do 2 %). Sušenje naj bi torej bilo manjše od predhodno napovedanega (Senevirante in sod., 2002). Za Anatolijo v Turčiji so izračuni pokazali, da se bodo vodni primanjkljaji poleti po vseh scenarijih povečali. Poskus je pokazal, da ima še 20 % povečanje količine padavin zelo majhen pozitiven učinek na hitro naraščanje primanjkljajev vode v tleh (Komuscu in sod., 1998). Projekcije za Veliko Britanijo pa kažejo le majhne spremembe vode v tleh z ustaljenim vzorcem rahlega presežka vode pozimi in rahlega primanjkljaja poleti (Naden in Watts, 2001).

Za Slovenijo naj bi se po izračunih v okviru projekta PRUDENCE spomladi primanjkljaj povečal za 50 do 100 mm, poleti pa za 230 do 280 mm. Obširno analizo vodnih primanjkljajev v Sloveniji lahko preberemo v magistrskem delu Andreje Sušnik (2005).

Na splošno je suša stanje primanjkljaja vode take stopnje, da ima neugoden vpliv na rastline, živali in ljudi na obsežnem območju (Warrick, 1975).

Evropska agencija za okolje definira sušo kot rezultat združevanja meteoroloških, fizičnih in človeških dejavnikov. Pri tem je osnovni vzrok pomanjkanje padavin in čas, porazdelitev ter jakost primanjkljaja v povezavi z obstoječo zalogo in porabo vode. Glavni meteorološki dejavniki, ki vplivajo na pojav suše, so vzorec atmosferske cirkulacije zraka, pomanjkanje padavin, temperatura in evapotranspiracija. Dodatni fizični in človeški dejavniki pa so obseg naravne zaloge

vode ter socioekonomski dejavniki, ki kontrolirajo porabo vode, kot npr. spreminjanje števila prebivalstva, življenjski standard (Sušnik, 2005).

Van Lanen in Peters (2000) sta pripravila zelo praktično razvrstitev suš v tri glavne skupine: meteorološka, agrometeorološka (kmetijska) in hidrološka suša (suša na vodnih virih - v podzemnih in površinskih vodah). V to delitev je že vključeno stopnjevanje pogostosti, jakosti in trajanja suše.

Meteorološka suša (imenovana tudi klimatološka) je po definiciji Evropske agencije za okolje posledica primanjkljaja padavin v daljšem časovnem obdobju, ki ga lahko izrazimo z odklonom od povprečne klimatske vrednosti in trajanja suhega obdobja. Značilna pri tem je povezava z visokimi temperaturami zraka, vetrom in nizko relativno vlago, ki povzročajo večje izhlapevanje, manjšo infiltracijo ipd.

Pri definiranju agrometeorološke suše poleg primanjkljaja padavin upoštevamo še fizikalne in biološke lastnosti rastlin v povezavi s sistemom tla - rastlina - atmosfera in razmerjem med porabo vode pri rastlinah in njihovo dejansko oskrbo. Agrometeorološka suša povzroča zmanjšanje pridelka ali poslabšanje njegove kvalitete. Njeno napovedovanje je povezano z namakanjem in s tem z ekonomičnostjo kmetovanja.

Hidrološka suša za meteorološko in agrometeorološko časovno zaostaja, saj traja dlje, da se pomanjkanje padavin pokaže v pretokih vode, pri vlagi v tleh, gladini podzemne vode ipd. Poleg podnebja vplivajo na hidrološko sušo tudi spremembe rabe tal, poslabšanje lastnosti tal, gradnja jezov in drugo. V nekaterih primerih lahko ti dejavniki spremenijo pogostost primanjkljaja vode tudi, če ni meteorološke suše, ker lahko poraba vode za npr. namakanje, rekreacijo, hidroenergijo in ostalo predstavlja še dodatno obremenitev za vodne vire.

Obstaja nekaj različnih metod za opredelitev suše. Najenostavnejši so sušni indeksi, ki jih delimo na indekse, ki potrebujejo meteorološke in agrometeorološke podatke, ter indekse, ki potrebujejo tudi podatke o rastlini in tleh. Najbolj splošni se lahko uporabljajo za velika območja. Sem sodijo standardizirani indeks padavin SPI, Palmerjev indeks jakosti suše PDSI in vlažnostni indeks poljščin CMI. Poleg indeksov poznamo še modelne ocene vodne bilance. Najbolj učinkovito je združevanje meritev na terenu in matematičnega modeliranja.

Preglednica 1 predstavlja delitev let od 1961 do 2004 po sušnosti, ki jo je pripravila Sušnikova (2005) za vse regije, glede na sušni indeks, ki združuje tedensko povprečje primanjkljaja vode in njegovo trajanje. Prikazani so le rezultati za Ljubljano in Mursko Soboto, s katerima se bomo še ukvarjali. Že za ti dve lokaciji se rezultati precej razlikujejo, kot vidimo, pa sta v obe smeri najbolj ekstremni zadnji vključeni leti, kar ne preseneča, saj smo že omenili, da podnebne spremembe prinašajo predvsem več ekstremov.

Preglednica 1: Ljubljana in Murska Sobota: leta 1961-2004, razporejena glede na sušni indeks (Sušnik, 2005)

Table 1: Ljubljana and Murska Sobota: years 1961-2004, arranged by the drought index (Sušnik, 2005)

ekstremno mokra (extremely wet)	zelo mokra (very wet)	mokra (wet)	normalna (normal)	suha (dry)	zelo suha (very dry)	ekstremno suha (extremely dry)
<b>Ljubljana</b>						
2004		1961, 1962, 1965, 1966, 1968, 1972, 1974, 1975, 1978, 1989, 1996	1963, 1964, 1967, 1969, 1970, 1976, 1977, 1979, 1980, 1981, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1991, 1994, 1995, 1999, 2002	1971, 1982, 1988, 1990, 1993, 2000	1992, 1997, 1998, 2001	2003
<b>Murska Sobota</b>						
2004		1964, 1965, 1966, 1970, 1972, 1974, 1978, 1979, 1989, 1996	1961, 1962, 1963, 1967, 1968, 1969, 1973, 1975, 1976, 1980, 1981, 1982, 1984, 1985, 1987, 1990, 1991, 1995, 1997, 1998, 1999, 2002	1977, 1983, 1986, 1988, 1993, 1994	1971, 1992, 2000, 2001	2003

V Sloveniji je potrebno proučiti različne možnosti pri preprečevanju posledic suše: gojenje kultur, odpornejših na sušo, zmanjševanje denarne pomoči pri gojenju slabo odpornih kultur, vpis namakalnih sistemov v zemljiško knjigo, analiziranje stanja razpoložljivih in dejansko izkoriščenih kapacitet vseh vodnih virov, ki so potencialno primerni za namakanje, in med drugim analiziranje učinkovitosti zgodnjega napovedovanja suše, izvajanja specifičnih agrometeoroloških aplikacij ter monitoringa kmetijske suše z indikatorji (Računsko sodišče Republike Slovenije, 2007).

## 2 MATERIAL IN METODE

Na vodni cikel predvsem regionalno resno vplivajo podnebne spremembe, prav tako pa ima sam pomemben vpliv na podnebne spremembe. Spremembe zemeljskega sevalnega ravnovesja vplivajo na vetrove, temperature, vodni transport, dinamiko oblakov in drugo. Spremembe temperature vplivajo na jakost evapotranspiracije, količino oblačnosti, vodo v tleh, obliko in količino snežnih padavin. Spremembe padavin vplivajo na trajanje, časovno razporeditev in obsežnost poplav in suš ter določajo površinski odtok vode. Podnebne spremembe preko vodnega cikla vplivajo na vodne vire in kmetijstvo, kar postaja zaskrbljujoč problem po celem svetu (Tao in sod., 2003; Mehrotra, 1999).

Za razumevanje morebitnih sprememb v rasti rastlin je v vodnem ciklu bistvenega pomena voda v tleh, pri čemer pa se moramo zavedati, da bodo tudi spremembe v produktivnosti vplivale nazaj na vodo v tleh.

Za določanje sušnih obdobij največkrat uporabljamo izračune vodne bilance. Razliko med potencialno evapotranspiracijo (ET<sub>p</sub>) in količino padavin (RR) imenujemo vodni primanjkljaj (RR-ET<sub>p</sub>), poleg le-tega računajo vodnobilančni modeli tudi dejansko količino vode v tleh. Te izračune lahko preverimo z meritvami, ki pa se le redko kje izvajajo.

Na količino vode v tleh najbolj vplivajo infiltracija, pronicanje, kapilarni dvig, površinski odtok in izsuševanje (Rounsevell in sod., 1999). Celoten volumen zadržane vode na enoto površine predstavlja zadrževalno sposobnost površine, ki je odvisna od nepravilnosti površine in nagiba. Ko je zadrževalna sposobnost površine presežena, se začne površinski odtok in globinsko pronicanje. Infiltracija oz. vstop vode v tla preko površine je ključni člen v vodnem ciklu. Odvisna je od lastnosti tal, dežja, profila ... Natančnejši opis pojavov med drugim lahko preberemo v doktorskem delu Zupančeve (2003).

V literaturi zasledimo širok izbor modelov za sistem tla - rastlina, ki večinoma računajo glavne procese, a ima vsak svoje prednosti in slabosti. Modeli, ki vsebujejo funkcionalno reprezentacijo strukture tal in vodnega ravnovesja, so relativno eno-stavni za parametrizacijo in so primerni za ocenjevanje vplivov vremena, dostopnosti vode v tleh in erozije na pridelek. Modeli z mehanično reprezentacijo strukture tal in vodnega ravnovesja pa nudijo podrobnejšo reprezentacijo vode v tleh, a zahtevajo zapletenejšo parametrizacijo. Za slednje pa vseeno lažje določimo natančnejše vrednosti parametrov iz izmerjenih podatkov. Obstoječi modeli so precej kompleksni, a kljub temu ostaja še veliko dela z razvijanjem boljših metod za večjo uporabnost modelov, boljše določanje parametrov in reševanje problemov za večje skale. Modeli bodo bolje sprejeti, ko bodo enostavnejši za uporabo, sploh ker postajajo vedno bolj podrobni (Connolly, 1998).

V Evropski skupnosti se uporablja kar nekaj namakalnih modelov. Izmed teh je mo-dele SWAP, AMBAV, IRRFIB in CROPWAT priporočila COST akcija 718 Evropske skupnosti za meteorološke aplikacije za kmetijstvo. Model IRRFIB uporabljajo na ARSO za določanje in napovedovanje sušnosti ter napovedi potrebnega namakanja. Služil nam je za osnovo, s katero smo primerjali vodnobilančni model SIMPEL, ki smo ga želeli preizkusiti.

Model SIMPEL, ki je nemškega izvora in prosto dostopen na internetu, lahko uspešno uporabljamo pri okoli 95 % vseh vrst zemljin. Napisan je v programu Microsoft Excel in obstaja v več različnih verzijah. Ločeno ima vhodno datoteko, datoteko za računanje evapotranspiracije in datoteko z modelom vodne bilance. Zaradi neupoštevanja stranskega pritoka in, v primeru prekoračenja infiltracijske kapacitete, površinskega odtoka so rezultati nezanesljivi pri nagnjenih površinah, težko prepustnih zemljinah ter pri visokih dnevni temperaturnih nihanjih.

Izmed meteoroloških podatkov potrebujemo dnevne vrednosti naslednjih meteoroloških spremenljivk: povprečna dnevna temperatura zraka, dnevna količina padavin, trajanje sončnega obsevanja ali energija globalnega obsevanja, povprečna dnevna relativna vlaga, povprečna dnevna hitrost vetra. Model zahteva še povprečno letno vrednost pritiska.

Glavni ekofiziološki podatki so višina rastlin, spreminjanje indeksa listne površine skozi leto, debelina koreninskega sistema, albedo rastlin, prevodnost listov. Pedološki podatki pa so poljska kapaciteta (PK), točka venenja (TV), začetek redukcije, faktor sušenja, albedo tal. Poleg tega potrebujemo še geografsko širino in nadmorsko višino.

Pri modelu SIMPEL lahko izbiramo med uporabo različnih metod za izračun potencialne evapotranspiracije: Haude, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Turc, Penman-Wendling, Makkink, Wendling (obala), Penman-Monteith (iglasti gozd) in EPIC Penman-Monteith. Potek ETp po mesecih je pri vseh metodah približno enak, vendar se vrednosti nekoliko razlikujejo. Najbolj kompleksen je izračun po metodi Penman-Monteith, povzet po modelu EPIC, ki ga bomo tudi uporabljali. Pri tem potrebujemo konstante, povezane z metodo.

Model izračuna in upošteva poleg dejanske evapotranspiracije, kjer upošteva intercepcijo padavin v višjih plasteh (listje in površinska plast), še infiltracijo, površinski odtok vode in tok vode iz zemlje v podtalnico. Za nas najpomembnejša rezultata sta količina vode v tleh in vodni primanjkljaj.

Ne glede na to, kako računamo količino vode v tleh, moramo določiti kriterij, ki bo definiral sušen dan. Pri modelu SIMPEL ta kriterij v osnovi ni določen. Brez dodatnega zapletanja izračunov smo določili, da so sušni dnevi vsi, pri katerih je količina vode v tleh pod 1,01TV. Vrednosti TV za mejo smo se izognili, saj pod to mejo količina vode praktično ne pade.

Za vrednotenje in analizo podatkov je bil uporabljen statističen programski paket SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) za Microsoft Windows. Uporabili smo ANOVA

primerjavo povprečij in varianc dveh vzorcev. Za sledenje in tendenco sprememb uporabljamo analizo trenda s pomočjo linearne regresije, o katerem pa lahko govorimo le, če imamo na voljo dovolj dolg niz podatkov (vsaj 30 let pri klimatoloških analizah). Za ocenjevanje, kako dobro izbrani vzorec opisuje celotno dogajanje, uporabimo objektivne izračune statistične zanesljivosti. Glede na statistične karakteristike trenda mora biti koeficient determinacije  $r^2$  vsaj 0,097 za 40-letni niz in 0,088 za 44-letni niz z upoštevanjem 95 % zanesljivosti (Sušnik, 2005). Verjetnosti, da se zgodi določen dogodek, smo izračunali s pomočjo prehoda na standardizirano normalno porazdelitev. Več o uporabljenih statističnih metodah lahko preberemo v delovnem gradivu Košmeljeve (2000).

Za analizo smo izbrali iz osrednje Slovenije Ljubljano, iz Pomurja Mursko Soboto in iz Primorske Bilje. A za kakovostno analizo potrebujemo polne in čim bolj homogenizirane nize podatkov, zato smo se morali postaji Bilje zaradi pomanjkanja podatkov odpovedati, saj v obdobju 1961-1990 na tej lokaciji nimamo meritev energije sončnega obsevanja in prav tako ne meritev trajanja sončnega obsevanja. V Ljubljani je izbrana postaja Bežigrad (46, 07°; 14, 52°; 299 m), v Murski Soboti pa Rakičan (46, 65°; 16, 18°; 188 m).

Meteorološke podatke smo pridobili na Uradu za meteorologijo na ARSO. Za Ljubljano ni podatkov o energiji globalnega obsevanja (RG [ $Jcm^{-2}$ ]) pred letom 1964, za Mursko Soboto pa pred letom 1993. Model SIMPEL v takih primerih potrebuje vsaj podatke o trajanju sončnega obsevanja (S [h]), iz katerega po Angstromovi enačbi določi energijo.

Lastnost tal, ki močno vpliva na vodnobilančne razmere, je vodno zadrževalna sposobnost oziroma vezava rastlini razpoložljive vode. ARSO ima v bazo vodnobilančnih izračunov vključene hipotetične tipe tal, v katere so razvrščena tla meteoroloških postaj (Sušnik, 2005). Podatke so pripravili na Centru za pedologijo Biotehniške fakultete. V Ljubljani imamo tip tal s slabo zadrževalno sposobnostjo, ki so globoka do 30 cm, v Murski Soboti pa tip tal s srednjo zadrževalno sposobnostjo, ki so globoka 30 do 60 cm. Pri tem je v Ljubljani razpoložljiva voda v 10 cm sloju 9,6 mm, v Murski Soboti pa 14,4 mm. Poljska kapaciteta v 10 cm sloju je v Ljubljani 22,9 mm in v Murski Soboti 33 mm. Točka venenja prav tako v 10 cm sloju je v Ljubljani 13,3 mm, v Murski Soboti pa 18,6 mm.

Vse izračune smo opravili za travo, ki jo smatramo kot referenčno rastlino, ki je visoka 0,12 m, z albedom 0,23. Indeks listne površine določimo za vsak dan posebej, kot se spreminja z rastjo. V našem primeru, ko gre za travo, smo letno spreminjanje določili od 1,5 do 2,5, pri čemer so vmesne vrednosti določene z linearno interpolacijo.

Za osnovno, bazno - primerjalno obdobje, smo izbrali tridesetletje 1961-1990, ki se največkrat uporablja za izhodišče. Preučevali smo le vpliv spremenjene temperature in količine padavin, vsi ostali vhodni podatki so ostali nespremenjeni. Tako smo iz podatkov za leta 1961-1990 pripravili nova tridesetletja, recimo 2061-2090, po treh različnih scenarijih podnebnih sprememb.

Spremembe so predstavljene le za vegetacijsko obdobje, v katerem smo računali, torej od aprila (A) do septembra (S). Za primerjavo smo analizirali obdobje 1991-2006. Zanimalo nas je, kako se že opaženo višanje temperatur in nižanje količine padavin kaže pri količini vode v tleh in številu sušnih dni. Tako smo preučevali tudi spremembe, ki so že nastopile v obdobju zadnjih 16-ih let, in z njimi primerjali projekcije sprememb za konec stoletja. Tu moramo upoštevati dejstvo, da imamo za analizirano obdobje realne podatke, kjer se spreminjata na primer tudi sončno obsevanje in relativna vlažnost, medtem ko pri projekcijah sprememb upoštevamo le spremembe temperature in padavin.

Preglednica 2 prikazuje uporabljene inkrementalne spremembe temperature in padavin, ki smo jih nanесли na dnevne vrednosti padavin in povprečnih temperatur baznega tridesetletja, torej spremembe smo dodali podatkom za vsak dan v tem tridesetletju posebej. Vrednosti sprememb smo pripravili kot kombinacijo različnih sezonskih projekcij za Slovenijo.

Spremembe so predstavljene le za vegetacijsko obdobje, v katerem smo računali, torej od aprila (A) do septembra (S). Za primerjavo smo analizirali obdobje 1991-2006. Zanimalo nas je, kako se že opaženo višanje temperatur in nižanje količine padavin kaže pri količini vode v tleh in številu sušnih dni. Tako smo preučevali tudi spremembe, ki so že nastopile v obdobju zadnjih



16-ih let, in z njimi primerjali projekcije sprememb za konec stoletja. Tu moramo upoštevati dejstvo, da imamo za analizirano obdobje realne podatke, kjer se spreminjata na primer tudi sončno obsevanje in relativna vlažnost, medtem ko pri projekcijah sprememb upoštevamo le spremembe temperature in padavin.

Preglednica 2: Inkrementalne spremembe temperature in padavin po treh različnih scenarijih podnebnih sprememb

Table 2: Incremental temperature and precipitation changes according to three different scenarios

Scenarij (Scenario)	Blagi (Low)			Srednji (Medium)			Visoki (High)		
	AM	JJA	S	AM	JJA	S	AM	JJA	S
Meseci (Months)									
Sprememba povprečne dnevne temperature (Average daily temperature change) [°C]	+1	+3	+2	+3	+3	+3	+4	+7	+5
Sprememba dnevnih padavin (Average precipitation change) [°C]	0	0	0	-20	-20	-20	-30	-45	-15

### 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Statistično smo obdelali rezultate potencialne evapotranspiracije, vodnega primanjkljaja in števila sušnih dni.

Spreminjanje povprečja in variabilnosti vegetacijske (april – september) ali sezonske (junij – avgust) vsote potencialne evapotranspiracije je bilo v našem primeru odvisno le od sprememb temperature zraka. To je verjetno tudi vzrok, da presežejo vrednosti v obdobju 1991-2006, ko so bile temperature večinoma zelo visoke, tudi tiste, izračunane po visokem scenariju.

Za Mursko Soboto se sezonska povprečja, izračunana po vseh treh scenarijih in za obdobje 1991-2006, pri 95 % stopnji zanesljivosti statistično značilno razlikujejo od povprečja za obdobje 1961-1990. Povprečji, izračunani za vegetacijsko obdobje, pa se pri blagem in srednjem scenariju ne razlikujeta od povprečja za obdobje 1961-1990.

Z linearno regresijo smo ugotovili, da za obdobje 1961-1990 za sezono ni statistično značilnega naraščanja, v obdobju 1961-2006 pa povprečna potencialna evapotranspiracija narašča s koeficientom linearnega trenda  $k = 1,9$  mm/leto ( $r^2 = 0,45$ ), kar pomeni spreminjanje povprečja za 5 % na 10 let. V vegetacijskem obdobju imamo že v obdobju 1961-1990 naraščanje s  $k = 2,8$  mm/leto ( $r^2 = 0,15$ ), kar je 4 % na 10 let, v obdobju 1961-2006 pa s  $k = 3,1$  mm/leto ( $r^2 = 0,31$ ), kar je 4,3 % na 10 let.

Za Ljubljano velja podobno, le da se od povprečja v obdobju 1961-1990 pri 95 % stopnji zaupanja statistično značilno ne razlikuje le povprečje, izračunano za blagi scenarij v vegetacijskem obdobju. Linearna regresija kaže na naraščanje povprečij. V obdobju 1961-1990 s koeficientom linearnega trenda  $k=1,2$  mm/leto ( $r^2 = 0,15$ ) v sezoni in s  $k = 2,0$  mm/leto ( $r^2 = 0,16$ ) ter v obdobju 1961-2006 s  $k = 1,7$  mm/leto ( $r^2 = 0,41$ ) v sezoni in s  $k = 2,4$  mm/leto ( $r^2 = 0,37$ ) v vegetacijskem obdobju. Pri vseh

trendih je to spreminjanje povprečja za 3 % na 10 let, le pri obdobju 1961-2006 v sezoni gre za 4 % na 10 let.

Pri vodnem primanjkljaju (RR-ETp) so rezultati nekoliko drugačni. Izračunana povprečja za blagi scenarij se v nobenem primeru ne razlikujejo statistično značilno od povprečij v obdobju 1961-1990. Prav tako z linearno regresijo nismo za obdobje 1961-1990 v nobenem primeru dobili statistično značilnega naraščajočega trenda. Za obdobje 1961-2006 naraščajo povprečne vrednosti primanjkljaja (postajajo vedno bolj negativne) za Mursko Soboto s  $k = -2,7$  mm/leto ( $r^2 = 0,12$ ) v sezoni, kar pomeni spreminjanje povprečja za 25 % na 10 let, in s  $k = -3,7$  mm/leto ( $r^2 = 0,11$ ) v vegetacijskem obdobju (18 % na 10 let) ter za Ljubljano prav tako s  $k = -2,7$  mm/leto ( $r^2 = 0,12$ ) v sezoni in s  $k = -3,8$  mm/leto ( $r^2 = 0,11$ ) v vegetacijskem obdobju, pri čemer gre zaradi nizkih povprečij (-10 mm v sezoni in 42 mm v vegetacijskem obdobju) za velike spremembe: v sezoni spreminjanje povprečja za 269 % na 10 let in v vegetacijskem obdobju za 91 % na 10 let.

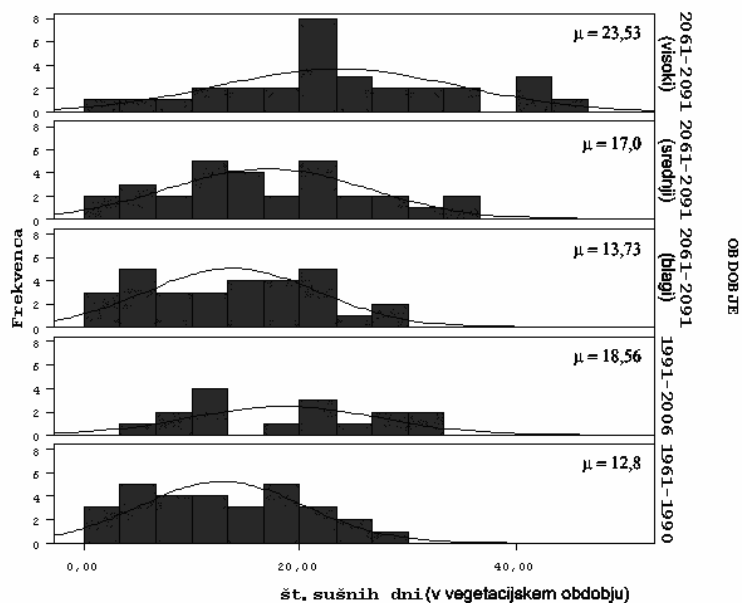
Pri analiziranju vodnega primanjkljaja so povprečja obdobja 1991-2006 najbolj podobna povprečjem po srednjem scenariju. Gre za obdobje, ko spremembe podnebja že opažamo. Tako vidimo, da projekcije niso neko govorjenje v prazno, ampak so te spremembe že prisotne v zadnjih letih, le da bo verjetnost za taka in sušnejša leta konec stoletja še večja. Za vegetacijsko obdobje za Mursko Soboto pa se povprečje obdobja 1991-2006 pri 95 % stopnji zaupanja ne razlikuje statistično od povprečja obdobja 1961-1990. V Ljubljani smo imeli v obdobju 1961-1990 pozitivno povprečje RR-ETp, torej presežek, tako ostane še po blagem scenariju, v vseh ostalih primerih pa imamo primanjkljaj.

Variabilnost se z različnimi scenariji niti ne spremeni bistveno, le za obdobje 1991-2006 imamo izrazito povečano variabilnost. Pri potencialni evapotranspiraciji se tudi povprečje ne spreminja dosti, medtem ko se pri vodnem primanjkljaju povprečja precej razmaknejo. Tak rezultat lahko pripišemo že omenjenemu vplivu le sprememb temperature na spremembe potencialne evapotranspiracije in vplivoma tako sprememb temperature kot tudi padavin na spremembe primanjkljaja.

Pri izračunih števila sušnih dni se povprečja v vegetacijskem obdobju pri 95 % stopnji zanesljivosti statistično značilno razlikujejo od povprečja v obdobju 1961-1990 le v obdobju 1991-2006 in pri visokem scenariju podnebnih sprememb. V sezoni se za Mursko Soboto le povprečje pri blagem scenariju ne razlikuje statistično značilno od povprečja v obdobju 1961-1990, za Ljubljano pa se povsem drugače le povprečje pri visokem scenariju razlikuje od povprečja v obdobju 1961-1990.

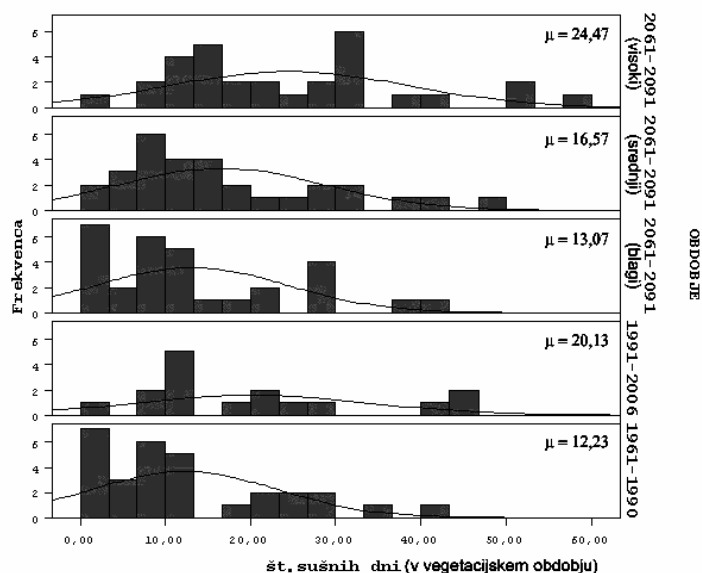
Linearna regresija kaže naraščajoč trend le za obdobje 1961-2006, ne pa za 1961-1990. Za Mursko Soboto imamo v sezoni naraščanje števila sušnih dni s  $k=0,3$  dan/leto ( $r^2 = 0,28$ ), kar je 33 % na 10 let, prav tako v vegetacijskem obdobju ( $r^2 = 0,10$ ), kar je 19 % na 10 let. Za Ljubljano pa imamo v sezoni manjše naraščanje s  $k = 0,2$  dan/leto ( $r^2 = 0,09$ ), kar pomeni 10 % na 10 let, in prav tako v vegetacijskem obdobju ( $r^2 = 0,14$ ), kar je 15 % na 10 let.

Grafa na slikah (Slika 1 in Slika 2) nas opozarjata na izrazito večanje variabilnosti števila sušnih dni.



Slika 1: Pogostostna porazdelitev števila sušnih dni. Spremembe povprečja in variabilnosti za Ljubljano.

Figure 1: Frequency distribution of the number of dry days. Changes in average and variability values for Ljubljana.



Slika 2: Pogostostna porazdelitev števila sušnih dni. Spremembe povprečja in variabilnosti za Mursko Soboto.

Figure 2: Frequency distribution of the number of dry days. Changes in average and variability values for Murska Sobota.

Izračunali smo še verjetnosti za pojav določenega števila sušnih dni. Iz preglednic preprosto razberemo, da se predvsem za Ljubljano obdobje 1991-2006 precej ujema s srednjim scenarijem, za Mursko Soboto pa že skoraj z visokim. Upoštevati moramo, da v tem obdobju obravnavamo le 16 let in imamo manjši vzorec in zato že v osnovi večjo variabilnost.

Preglednica 3: Verjetnost za pojav sušnih dni v vegetacijskem obdobju (april – september) v Ljubljani, pri čemer so v oklepajih predstavljene kumulativne verjetnosti

Table 3: Probability of the dry days appearance in the vegetation period (April – September) in Murska Sobota with cumulative values in brackets

	1961-1990	1991-2006	blagi scenarij (low)	srednji scenarij (medium)	visoki scenarij (high)
<b>povprečno št. sušnih dni (average number of dry days)</b>	12,8	18,56 (+45 %)	13,73 (+7 %)	17,0 (+33 %)	23,53 (+84 %)
<b>standardni odklon (standard deviation) [dni (days)]</b>	7,56	8,66	7,92	9,19	11,0
<b>št. sušnih dni (number of dry days)</b>	<b>verjetnost [%] za pojav sušnih dni (probability of the dry days appearance)</b>				
<5	15	6	14	10	5
5-10 (>5)	21 (85)	10 (94)	18 (86)	12 (90)	6 (95)
10-15 (>10)	25 (64)	18 (84)	24 (68)	19 (78)	11 (89)
15-20 (>15)	22 (39)	23 (66)	23 (44)	22 (59)	15 (78)
20-25 (>20)	12 (17)	20 (43)	13 (21)	18 (37)	18 (63)
25-30 (>25)	4 (5)	14 (23)	6 (8)	11 (19)	17 (45)
30-35 (>30)	1 (1)	6 (9)	2 (2)	5 (8)	13 (28)
>35	0	3	0	3	15

Preglednica 4: Verjetnost za pojav sušnih dni v vegetacijskem obdobju (april – september) v Murski Soboti, pri čemer so v oklepajih predstavljene kumulativne verjetnosti

Table 4: Probability of the dry days appearance in the vegetation period (April – September) in Murska Sobota with cumulative values in brackets

	1961-1990	1991-2006	blagi scenarij (low)	srednji scenarij (medium)	visoki scenarij (high)
<b>povprečno št. sušnih dni (average number of dry days)</b>	12,23	20,13 (+65 %)	13,07 (+7 %)	16,57 (+35 %)	24,47 (+100 %)
<b>standardni odklon (standard deviation) [dni (days)]</b>	10,95	13,77	11,22	12,10	14,07
<b>št. sušnih dni (number of dry days)</b>	<b>verjetnost [%] za pojav sušnih dni (probability of the dry days appearance)</b>				
<5	25	14	24	17	8
5-10 (>5)	17 (75)	9 (86)	15 (76)	12 (83)	7 (92)
10-15 (>10)	18 (58)	13 (77)	18 (61)	16 (71)	10 (85)
15-20 (>15)	16 (40)	14 (64)	16 (43)	16 (55)	12 (75)
20-25 (>20)	12 (24)	14 (50)	13 (27)	15 (39)	15 (63)
25-30 (>25)	7 (12)	12 (36)	7 (14)	11 (24)	13 (48)
30-35 (>30)	3 (5)	10 (24)	4 (7)	7 (13)	12 (35)
>35	2	14	3	6	23

#### 4 SKLEPI

Izbrana tema in njej podobne, povezane z vodo v tleh, sušnostjo ipd., so nekje na meji večih znanstvenih področij, kot so meteorologija, agronomija, pedologija in druge, zato dostikrat ostanejo zapostavljene.

Pri pripravi scenarijev podnebnih sprememb je pomembno, da upoštevamo več različnih projekcij za obravnavani del sveta, saj so učinki zelo regionalno značilni.

Potencialna evapotranspiracija se po scenarijih sprememb ne spreminja tako opazno kot vodni primanjkljaj in število sušnih dni, ker nanjo spremembe padavin ne vplivajo. Vsi izračuni kažejo povečevanje vodnega primanjkljaja in s tem tudi števila sušnih dni v vegetacijskem obdobju. Še večji problem od sprememb povprečij pa predstavlja spreminjanje variabilnosti pojava sušnih dni. To lahko prinese veliko večje izzive pri soočanju s problemi, povezanimi z vodo, ne le v kmetijstvu, pač pa tudi pri hidroelektrarnah, vodnih virih in njihovi uporabi, morda celo zdravju ljudi.

Obdobje 1991-2006 že odraža spremembe, kar daje večjo veljavo projekcijam za konec stoletja. Variabilnost je zaradi manjšega obravnavanega vzorca sicer že v osnovi večja, glede na obdobje 1961-1990 pa imamo pri vseh spremenljivkah naraščanje, ki je pri potencialni evapotranspiraciji celo višje od vrednosti pri visokem scenariju, saj smo imeli v obdobju 1991-2006 visoko temperaturno

povprečje. V obdobju 1961-1990 večinoma ni statistično značilnega naraščajočega trenda pri obravnavanih spremenljivkah, medtem ko je za obdobje 1961-2006 trend vedno statistično značilno naraščajoč.

Verjetnost za pojav več kot 35 sušnih dni se je v Murski Soboti iz 2 % v obdobju 1961-1990 spremenila na 14 % v obdobju 1991-2006. Po blagem scenariju naj bi bila ta verjetnost 3 %, po srednjem 6 % in po visokem kar 23 %. Visoki scenarij opozarja, da bodo morda zadnja leta, ki so se nam sedaj zdela ekstremna, postala nekaj običajnega. V Ljubljani v obdobju 1961-1990 sploh ni bilo verjetnosti za pojav več kot 35 sušnih dni, kot ostaja tudi po blagem scenariju, imamo pa v obdobju 1991-2006 3 % verjetnost za več kot 35 sušnih dni, prav tako tudi po srednjem scenariju, po visokem pa že kar 15 %.

V tej smeri je vsekakor potrebno še veliko raziskovalnega dela. Podobne raziskave bi morali pripraviti za čim več krajev po Sloveniji, se soočiti z manjkajočimi podatki in uporabiti različne vodnobilančne modele. Z boljšim spremljanjem in napovedovanjem suš bi se jim lahko tudi uspešneje prilagodili, kar pa spet zahteva preizkušanje različnih metod, obširnejše meritve in umerjanje modelov.

## 5 LITERATURA

- Connolly R. D. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review. *Soil and Tillage Research*, 48 (1998): 1-19.
- Eitzinger J., Stastna M., Zalud Z., Dubrovsky M. A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. *Agricultural Water Management*, 61 (2003): 195-217.
- Feddema J. J. Future African water resources: interactions between soil degradation and global warming. *Climatic Change*, 42 (1999): 561-596.
- Herbst M., Hoermann G. Predicting effects of temperature increase on the water balance of beech forest - an application of the 'Kausha' model. *Climatic Change*, 40 (1998): 683-698.
- IPCC. 2007. Technical Paper on Climate Change and Water. Draft for Government and Expert Review: 146 str.
- Komuscu A. U., Erkan A., Sukriye O. Possible impacts of climate change on soil moisture availability in the southeast Anatolia development project region (GAP): an analysis from an agricultural drought perspective. *Climatic Change*, 40 (1998): 519-545.
- Košmelj K. Statistične metode. Metode znanstveno-raziskovalnega dela. Delovno gradivo 1999/2000 (1999): 198 str.
- Košmelj K., Kastelec D. Statistične tabele. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo (1996): 15 str.
- Manabe S., Wetherald R. T., Milly P. C. D., Delworth T. L., Stouffer R. J. Century-scale change in water availability: CO<sub>2</sub> quadrupling experiment. *Climatic Change*, 64 (2004): 59-76.

- Mehrotra R. Sensitivity of runoff, soil moisture and reservoir design to climate change in central Indian river basins. *Climatic Change*, 42 (1999): 725-757.
- Naden P. S., Watts C. D. Estimating climate-induced change in soil moisture at the landscape scale: an application to five areas of ecological interest in the U.K. *Climatic Change*, 49 (2001): 411-440.
- Računsko sodišče Republike Slovenije. Revizijsko poročilo o smotnosti ravnanja Republike Slovenije pri preprečevanju in odpravi posledic suše v kmetijstvu. Številka: 1207-3/2006-22 (2007): 85 str.
- Rounsevell M. D. A., Evans S. P., Bullock P. Climate change and agricultural soils: impacts and adaptation. *Climatic Change*, 43 (1999): 683-709.
- Senevirante S. I., Pal J. S., Eltahir E. A. B., Schaer C. Summer dryness in a warmer climate: a process study with a regional climate model. *Climate Dynamics*, 20 (2002): 69-85.
- Sušnik A. Vodni primanjkljaj v Sloveniji in možni vplivi podnebnih sprememb. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo (2005): 160 str.
- Tao F., Yokozawa M., Hayashi Y., Lin E. Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 95 (2003): 203-215.

#### INTERNETNI VIRI:

- IPCC working group I. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. <http://www.ipcc.ch> [uporabljeno 14. 5. 2007].
- IPCC working group II. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. <http://www.ipcc.ch> [uporabljeno 14. 5. 2007].
- PRUDENCE final report. 2005. <http://prudence.dmi.dmk> [uporabljeno 14. 5. 2007].
- UNCCD, Fact Sheets: Basic facts about desertification and the Convention. 2005. <http://www.unccd.int> [uporabljeno 5. 9. 2007]