

ZAKLJUČNO POROČILO
O REZULTATIH OPRAVLJENEGA RAZISKOVALNEGA DELA
NA PROJEKTU V OKVIRU CILJNEGA RAZISKOVALNEGA
PROGRAMA (CRP) »KONKURENČNOST SLOVENIJE 2006 – 2013«

I. Predstavitev osnovnih podatkov raziskovalnega projekta

1. Naziv težišča v okviru CRP:

5. Povezovanje ukrepov za doseganje trajnostnega razvoja

2. Šifra projekta:

V4-0499

3. Naslov projekta:

Dinamično modeliranje spremenjene rasti in razvoja kmetijskih rastlin v Sloveniji na osnovi regionalnih scenarijev bodočega podnebja

3. Naslov projekta

3.1. Naslov projekta v slovenskem jeziku:

Dinamično modeliranje spremenjene rasti in razvoja kmetijskih rastlin v Sloveniji na osnovi regionalnih scenarijev bodočega podnebja

3.2. Naslov projekta v angleškem jeziku:

Dynamic modelling of future crop growth and development in Slovenia on the basis of regional climate scenarios

4. Ključne besede projekta

4.1. Ključne besede projekta v slovenskem jeziku:

model WOFOST, podnebne spremembe, regionalni klimatski modeli, koruza

4.2. Ključne besede projekta v angleškem jeziku:

model WOFOST, climate change, regional climate models, maize

5. Naziv nosilne raziskovalne organizacije:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta

5.1. Seznam sodelujočih raziskovalnih organizacij (RO):

6. Sofinancer/sofinancerji:

Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano

7. Šifra ter ime in priimek vodje projekta:

9593

Lučka Kajfež Bogataj

Datum: 23.9.2010

Podpis vodje projekta:

prof. dr.Lučka Kajfež Bogataj

Podpis in žig izvajalca:

II. Vsebinska struktura zaključnega poročila o rezultatih raziskovalnega projekta v okviru CRP

1. Cilji projekta:

1.1. Ali so bili cilji projekta doseženi?

- a) v celoti
 b) delno
 c) ne

Če b) in c), je potrebna utemeljitev.

1.2. Ali so se cilji projekta med raziskavo spremenili?

- a) da
 b) ne

Če so se, je potrebna utemeljitev:

2. Vsebinsko poročilo o realizaciji predloženega programa dela¹:

Delo je potekalo v večih fazah. V prvi fazi je šlo za prilagoditev modela WOFOST na lokalne razmere v Sloveniji, saj je bila prvotna verzija modela umerjena za izračune na Nizozemskem, kjer je model nastal. V ta namen smo analizirali dostopne podatke o količini pridelka za različne lokacije v Sloveniji (vir podatkov – Kmetijski Inštitut Slovenije) in jih uporabili pri kalibraciji modela. S postopki analize občutljivosti smo ugotovili, na perturbacijo katerih parametrov modela je izračun pridelka najbolj občutljiv, s kalibracijo z meritvami količine pridelka pa smo te parametre nato tudi optimalno določili. Kalibracijsko-validacijski postopek smo opravili za vodilno poljščino v Sloveniji, t. j. koruzo. S pomočjo umerjenega modela WOFOST smo za tri lokacije določili variabilnost pridelka in ugotovili dejavnike, ki ob prevladujočih podnebnih razmerah v večji meri to variabilnost tudi pojasnijo.

V drugi fazi smo prilagojeni model WOFOST uporabili pri študiji vpliva podnebne variabilnosti na količino pridelka in ugotovili, da ima podnebna variabilnost značilen vpliv na količino pridelka na izbranih lokacijah v Sloveniji. Preučili smo odziv modela pri različnih klimatskih robnih pogojih in poleg povprečnih vrednosti osnovnih meteoroloških spremenljivk, ki vplivajo na pridelek, spreminjali tudi njihove variabilnosti.

V tretji fazi smo analizirali nekaj obstoječih podatkovnih baz scenarijev podnebnih sprememb za območje Slovenije. Pri analizi smo uporabili predhodne študije za območje Slovenije ter rezultate evropskega projekta ENSEMBLES. Na osnovi simulacij podnebnih sprememb smo lahko določili povezave med spremembami povprečnih vrednosti ter variabilnosti ključnih meteoroloških spremenljivk. Validacija simulacij različnih klimatskih modelov nad območjem Slovenije nam je pokazala tudi, kakšna je negotovost projekcij nad podnebno precej variabilnim območjem Slovenije.

Več v PRILOGI 1.

¹ Potrebno je napisati vsebinsko raziskovalno poročilo, kjer mora biti na kratko predstavljen program dela z raziskovalno hipotezo in metodološko-teoretičen opis raziskovanja pri njenem preverjanju ali zavračanju vključno s pridobljenimi rezultati projekta.

3. Izkoriščanje dobljenih rezultatov:

3.1. Kakšen je potencialni pomen² rezultatov vašega raziskovalnega projekta za:

- a) odkritje novih znanstvenih spoznanj;
- b) izpopolnitev oziroma razširitev metodološkega instrumentarija;
- c) razvoj svojega temeljnega raziskovanja;
- d) razvoj drugih temeljnih znanosti;
- e) razvoj novih tehnologij in drugih razvojnih raziskav.

3.2. Označite s katerimi družbeno-ekonomskimi cilji (po metodologiji OECD-ja) sovpadajo rezultati vašega raziskovalnega projekta:

- a) razvoj kmetijstva, gozdarstva in ribolova - Vključuje RR, ki je v osnovi namenjen razvoju in podpori teh dejavnosti;
- b) pospeševanje industrijskega razvoja - vključuje RR, ki v osnovi podpira razvoj industrije, vključno s proizvodnjo, gradbeništvom, prodajo na debelo in drobno, restavracijami in hoteli, bančništvom, zavarovalnicami in drugimi gospodarskimi dejavnostmi;
- c) proizvodnja in racionalna izraba energije - vključuje RR-dejavnosti, ki so v funkciji dobave, proizvodnje, hranjenja in distribucije vseh oblik energije. V to skupino je treba vključiti tudi RR vodnih virov in nuklearne energije;
- d) razvoj infrastrukture - Ta skupina vključuje dve podskupini:
 - transport in telekomunikacije - Vključen je RR, ki je usmerjen v izboljšavo in povečanje varnosti prometnih sistemov, vključno z varnostjo v prometu;
 - prostorsko planiranje mest in podeželja - Vključen je RR, ki se nanaša na skupno načrtovanje mest in podeželja, boljše pogoje bivanja in izboljšave v okolju;
- e) nadzor in skrb za okolje - Vključuje RR, ki je usmerjen v ohranjevanje fizičnega okolja. Zajema onesnaževanje zraka, voda, zemlje in spodnjih slojev, onesnaženje zaradi hrupa, odlaganja trdnih odpadkov in sevanja. Razdeljen je v dve skupini:
- f) zdravstveno varstvo (z izjemo onesnaževanja) - Vključuje RR - programe, ki so usmerjeni v varstvo in izboljšanje človekovega zdravja;
- g) družbeni razvoj in storitve - Vključuje RR, ki se nanaša na družbene in kulturne probleme;
- h) splošni napredek znanja - Ta skupina zajema RR, ki prispeva k splošnemu napredku znanja in ga ne moremo pripisati določenim ciljem;
- i) obramba - Vključuje RR, ki se v osnovi izvaja v vojaške namene, ne glede na njegovo vsebino, ali na možnost posredne civilne uporabe. Vključuje tudi varstvo (obrambo) pred naravnimi nesrečami.

² Označite lahko več odgovorov.

3.3. Kateri so **neposredni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

Prilagoditev dinamičnega modela WOFOST na lokalne razmere v Slovenij je pomembna za bodoče raziskave rastlinske pridelave, saj je model pomembno metodološko orodje za agronomijo. S pomočjo umerjenega modela WOFOST se lahko določa variabilnost pridelka in ugotovi dejavnike, ki ob prevladujočih podnebnih razmerah v večji meri to variabilnost tudi pojasnijo. Gre torej za poglobljanje temeljnega znanja.

Analiza obstoječih podatkovnih baz scenarijev podnebnih sprememb za območje Slovenije in validacija simulacij različnih klimatskih modelov nad območjem Slovenije je pokazala, kakšna je negotovost projekcij nad podnebno precej variabilnim območjem Slovenije, kar je pomembno za razvoj blaženja (racionalna raba energije) in prilagajanja podnebnim spremembam pri nas. Ta znanja so pomembna tudi v zvezi s pripravljenostjo in ravnanjem ob naravnih nesrečah.

3.4. Kakšni so lahko **dolgoročni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

Dolgoročno bodo rezultati projekta pomagali pri izpolnjevanju ciljev Strategije slovenske kmetijstva za prilagajanje podnebnim spremembam in sicer pri ocenah ranljivosti posameznih območij Slovenije in pri iskanju novih rešitev, zlasti pri rastlinski pridelavi in pridelavi krme.

3.5. Kje obstaja verjetnost, da bodo vaša znanstvena spoznanja deležna zaznavnega odziva?

- a) v domačih znanstvenih krogih;
- b) v mednarodnih znanstvenih krogih;
- c) pri domačih uporabnikih;
- d) pri mednarodnih uporabnikih.

3.6. Kdo (poleg sofinancerjev) že izraža interes po vaših spoznanjih oziroma rezultatih?

Urad za podnebne spremembe pri vladi RS
Ministrstvo za okolje in prostor
Tuje raziskovalne inštitucije, na primer JRC v Italiji
privatni sektor

3.7. Število diplomantov, magistrrov in doktorjev, ki so zaključili študij z vključenostjo v raziskovalni projekt?

4 diplome

4. Sodelovanje z tujimi partnerji:

4.1. Navedite število in obliko formalnega raziskovalnega sodelovanja s tujimi raziskovalnimi inštitucijami.

Prof. Lučka Kajfež Bogataj sodeluje z tujimi raziskovalnimi inštitucijami in sicer:

- je članica komiteja GCOS (Global climate observation system) Steering Committee pri WMO
- je vodja WG3 EC-COST 734 Projekta (Impacts of Climate Change and Variability on European Agriculture
- je bila članica organizacijskega odbora (Member of International Organizing Committee (WIOC) za 3. klimatsko konferenco WCC-3.
- sodeluje na WP5 delu projekta EuroGEOSS (7th FP project of the EC).

4.2. Kakšni so rezultati tovrstnega sodelovanja?

Rezultati sodelovanja na projektu EuroGEOSS so za Slovenijo in njeno kmetijstvo zelo relevantni. Omogočajo nam prednosti kot so:

- izgradnja meta podatkovne baze podatkov za sušne podatke v Sloveniji,
- izgradnja med povezljivosti med EDO portalom (European Drought Observatory) in DMCSEE,
- nova spletna storitev – WMS (web mapping service),
- izgradnja novih metodoloških pristopov na področju raziskovanja in upravljanja z sušami,
- diseminacija rezultatov na mednarodni ravni in na ravni Jugovzhodne Evrope,
- uporaba nove programske opreme (CatMDEdit, Inspire metadata editor),
- produkcija in objava novih sušnih produktov v okviru DMCSEE.

5. Bibliografski rezultati³ :

Za vodjo projekta in ostale raziskovalce v projektni skupini priložite bibliografske izpise za obdobje zadnjih treh let iz COBISS-a) oz. za medicinske vede iz Inštituta za biomedicinsko informatiko. Na bibliografskih izpisih označite tista dela, ki so nastala v okviru pričujočega projekta.

³ Bibliografijo raziskovalcev si lahko natisnete sami iz spletne strani:<http://www.izum.si/>

6. Druge reference⁴ vodje projekta in ostalih raziskovalcev, ki izhajajo iz raziskovalnega projekta:

KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka. Kako živeti s podnebnimi spremembami: blaženje, prilagajanje ali trpljenje? : 1. posvet Sekcije za okolje in energetiko Gospodarske zbornice Dolenjske in Bele krajine "Okolju prijazno - uspešno podjetje", Otočec, 22. apr. 2009. 2009.

KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka. Podnebne spremembe; kakšne izbire imamo? : Občni zbor Društva kmetijskih inženirjev in tehnikov Gorenjske, Naklo, 12.2.2009.

KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka. Prehranska varnost in podnebne spremembe : Hrana - pravica ali privilegij? Okrogla miza v okviru Evropskega tedna globalnega učenja, Ljubljana, Center Evropa, 19. nov. 2009. 2009. [COBISS.SI-ID 6174841]

KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka, ZAVŠEK M., BERLOŽNIK, B., SUŠNIK, A., STRAŽAR, S., CEGNAR, T., GREGORIČ, G., ROŠKAR, J., MAJER, D., VERBIČ, J., KRAMBERGER, B., JURC, M., ŠESTAN, S., ERJAVEC, E., ERJAVEC, J.. Strategija prilagajanja slovenskega kmetijstva in gozdarstva podnebnim spremembam. Ljubljana: [Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano], 2008. 15 str., [COBISS.SI-ID 5586041]

KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka. Podnebne spremembe med znanostjo in politiko : [predavanje v okviru projekta Znanje žanje, Ljubljana, Velika dvorana Državnega zbora, 15. december 2009]. Ljubljana, 2009. http://www.dz-rs.si/index.php?id=390&no_cache=1&show_sporocilo=2521&cHash=d7ab3404a1.

KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka. Živeti s podnebnimi spremembami : 12. srečanje turističnih kmetij Slovenije, Semič, 23. mar. 2010.

⁴ Navedite tudi druge raziskovalne rezultate iz obdobja financiranja vašega projekta, ki niso zajeti v bibliografske izpise, zlasti pa tiste, ki se nanašajo na prenos znanja in tehnologije.

Navedite tudi podatke o vseh javnih in drugih predstavitev projekta in njegovih rezultatov vključno s predstavitvami, ki so bile organizirane izključno za naročnika/naročnike projekta.

PRILOGA 1

Dinamično modeliranje spremenjene rasti in razvoja kmetijskih rastlin v Sloveniji na osnovi regionalnih scenarijev bodočega podnebja

VSEBINSKO POROČILO

Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ, Zalika ČREPINŠEK, Andrej CEGLAR

Ljubljana, september 2010

1. Uvod

Podnebje na Zemlji se zaradi človeških posegov v podnebni sistem vse hitreje spreminja (Luterbacher s sod., 2004). Vsebnost CO₂ v ozračju že 200 let zaradi intenzivnega izkoriščanja fosilnih goriv, deforestacije ter sprememb v rabi tal, stalno narašča. Posledice podnebnih sprememb je čutiti tudi v Sloveniji, saj se je temperatura v obdobju od leta 1951 do 2000 dvignila za 1.1°C. Opažena je že povečana pogostnost obilnih padavinskih dogodkov, tudi tam, kjer je zabeležen trend zmanjševanja letne količine padavin. Opazovane spremembe količine in prostorske razporeditve padavin so bolj raznolike kot spremembe temperature. Navkljub globalnemu povečanju padavin, se je pogostnost suš povečevala predvsem kot posledica spremenjene splošne cirkulacije zraka.

Podnebne razmere odločilno vplivajo na kmetijsko pridelavo, saj s svojo medletno variabilnostjo povzročajo velika nihanja v količini pridelka. Kmetijstvo je odvisno od podnebnih razmer, saj imajo temperatura zraka in tal, sončno obsevanje, zračna vlaga, količina in razporeditev padavin odločilen vpliv na kmetijsko pridelavo. Vse večja pogostnost ter intenzivnost vremenskih ujm povečuje regionalno ranljivost kmetijstva. Podnebne spremembe prispevajo pomemben del k povečanju ranljivosti kmetijske pridelave, kar ob nepravilnem ter nepravočasem prilagajanju postavlja kmetijstvo na težko in drago preizkušnjo. Predvidene podnebne spremembe bodo spremenile pridelek (tako kvantitativno kot kvalitativno) in lokacijo proizvodnje, kar predstavlja veliko grožnjo kmetijskemu prihodku ter morebitno opustitev zemljišč v nekaterih predelih.

Za ocenjevanje vpliva podnebnih sprememb na količino pridelka lahko uporabimo fizikalne modele, ki razlagajo rast pridelka na osnovi procesov, ki se dogajajo v rastlini in upoštevajo, kako na te procese vplivajo okoljske razmere. Eden izmed teh modelov je WOFOST, ki je bil razvit na Nizozemskem, kjer je trenutno tudi v široki uporabi. Model je bil za ovrednotenje vpliva podnebnih sprememb na potencialno pridelavo uporabljen že v mnogih študijah. Kot primer navajamo študijo vpliva podnebnih sprememb na potencialen pridelek pšenice in koruze na območju Evropske unije (Wolf in Van Diepen, 2007). Njune simulacije kažejo na to, da različni scenariji podnebnih sprememb kažejo na veliko variabilnost pridelka obeh poljščin, tako na regionalnem nivoju kot tudi na nivoju celotne Evropske Unije.

Podobne raziskave so se začele z razvojem dinamičnih modelov rastlinske produkcije, ko je De Wit z univerze v Wageningenu s pionirskim delom na tem področju odprl razvojno pot modeliranju rastlinske produkcije (Van Ittersum s sod., 2003). Njegov namen je bil doseči razumevanje procesov ter ovrednotiti vpliv kompleksnih okoljskih interakcij na nivoju razvoja ter produktivnosti posamezne rastline. Na tej osnovi temelji tudi razvoj dinamičnega modela WOFOST (WORLD FOOD STUDIES), ki simulira produkcijski potencial rastlin, ki je odraz okoljskih razmer (tla, vreme), rastlinskih lastnosti ter ravnanja z njimi (gnojenje, namakanje) (Van Diepen s sod., 1989). Z modelom WOFOST so analizirali medletno variabilnost pridelka ter ranljivost pridelave, variabilnost pridelka na različnih tipih tal, razlike med kultivarji, strategije sajenja poljščin ter kritičnih obdobji za uporabo kmetijske mehanizacije (Boogard s sod., 1998). Model je primeren tudi za študijo vpliva podnebnih sprememb na količino in kakovost pridelka, saj pri simulaciji upošteva kompleksne interakcije fizioloških procesov v rastlini (Van Diepen s sod., 1987; Wolf in van Diepen, 1991; Wolf, 1993; Alexandrov s sod., 2002; Alexandrov s sod., 2005). Vse večji tržni pomen dobiva tudi sezonska napoved pridelka, kjer so dinamični model rastlinske produkcije sklopili z sezonskimi napovedmi klimatskih modelov (Dubrovsky, 2003; Cantelaube s sod., 2004; Cantelaube in Terres, 2004).

V tuji literaturi najdemo novejšje študije vpliva podnebnih sprememb na kmetijsko produkcijo, ki temeljijo na dinamičnem modeliranju rasti in razvoja kmetijskih rastlin. Primer nedavne študije so preliminarni rezultati EU projekta PESETA, ki na evropskem nivoju podajajo spremembo količine pridelkov do konca stoletja. Za tovrsten izračun so bile uporabljene simulacije različnih globalnih klimatskih modelov (ang. GCM – global climate model) ter regionalnih klimatskih modelov (ang. RCM – regional climate model), katerih prostorska ločljivost pa je premajhna za ovrednotenje vpliva na regionalnem oz. lokalnem nivoju, kar je v disertaciji ugotovil tudi Bergant (2003). Zaradi majhnosti ter podnebne raznolikosti na območju Slovenije predvidevamo, da je neposredna uporaba rezultatov globalne oz. evropske študije projekcij pridelka neprimerna za interpretacijo na lokalnem nivoju, kar bi lahko omejevalo tudi oblikovanje strategij prilagajanja slovenskega kmetijstva podnebnim spremembam. Za ovrednotenje vpliva podnebnih sprememb na količino pridelka smo zato na lokalnem nivoju uporabili dinamični model rastlinske produkcije WOFOST (Van Diepen s sod., 1989; De Koning in Van Diepen, 1992; Boogard s sod., 1998), ki razlaga rast pridelka na osnovi procesov, ki se dogajajo v rastlini, in upošteva, kako na te procese vplivajo okoljske razmere.

Dosedanje raziskave občutljivosti pridelka na vremenske razmere so pokazale, da poleg povprečnih meteoroloških pogojev na rast rastlin ter končni pridelek pomembno vpliva tudi variabilnost vremena. Brown in Rosenberg (1997) sta analizirala občutljivost rastlinske produkcije v osrednjem delu Združenih Držav Amerike s simulacijskim modelom EPIC. Izdelala sta različne scenarije vremenskih razmer, kjer sta v posameznih scenarijih določevala odziv pridelka na spremembe povprečja ter variabilnosti okoljskih spremenljivk (temperatura, količina padavin, sončno sevanje ter koncentracija CO₂). Ugotovila sta, da je odziv pridelka posledica kompleksnih interakcij meteoroloških spremenljivk, kar kaže na to, da je poleg temperature in količine padavin pri študijah vpliva podnebnih sprememb potrebno upoštevati tudi ostale meteorološke ter okoljske spremenljivke (med pomembnejšimi je koncentracija CO₂). Porter in Semenov (2005) v svoji študiji ugotavljata, da na stabilnost pridelka (kvantitativno in kvalitativno) v največji meri vplivajo podnebna variabilnost in spremembe ter frekvenca ekstremnih vremenskih dogodkov. Njune simulacije so pokazale, da ima variabilnost temperature na rast ter pridelek pšenice podoben vpliv, kot spreminjanje njene povprečne vrednosti. Razvoj in končni pridelek poljščin je kritično odvisen tudi od obdobja nastanka ekstremnih vremenskih razmer (t. j. pojav ekstremnih vremenskih razmer v občutljivih razvojnih fazah) (Slafer in Rawson, 1995). Pri študijah ranljivosti kmetijske pridelave na podnebne spremembe je zato še posebno pomembno opredeliti kritična obdobja povečane variabilnosti in posledično pojavnosti ekstremnih vremenskih dogodkov (Semenov, 2007), česar smo se lotili tudi v naši študiji.

V agro-klimatoloških aplikacijah je pomembno ustrezno izbrati časovno skalo izračuna (Bergant, 2003). Zaradi hitrega odziva rastlin na spremenljive okoljske pogoje je v simulacijskih modelih smiselno izbrati dnevno časovno skalo. Večina dinamičnih rastlinskih modelov, ki so namenjeni izračunu simulacije rasti ter končnega pridelka obravnavane poljščine, uporablja dnevno časovno skalo. Tu je potrebno poudariti, da je odziv rastline na spremembe v okolju opazen na veliko krajših časovnih skalah (pri natančnejši obravnavi fizioloških procesov je potrebno preiti vsaj na urno časovno skalo), vendar to presega namen našega dela. Za študijo vpliva podnebnih sprememb na rast in razvoj rastlin ter končni pridelek smo uporabili stohastični generator vremena (generiranje dnevnih vrednosti meteoroloških spremenljivk). Stohastični generator vremena je pogosto uporabljeno orodje v študijah vpliva podnebnih sprememb (Semenov in Barrow, 1997; Dubrovsky s sod., 2000; Jindong in Shili, 2001; Trnka s sod., 2003). Za ovrednotenje vpliva podnebnih sprememb na rast in razvoj rastlin je potrebno čim boljše simulirati ekstremne vremenske dogodke, kot so vročinski valovi, trajanje obdobj brez padavin ter maksimalne dosežene dnevne temperature. Validacija stohastičnega generatorja LARS-WG je pokazala dobro ujemanje z različnimi statističnimi merami meteoroloških spremenljivk v Evropi (Semenov in Barrow, 1997),

ravno tako pa je generator dobro simuliral ekstremne vremenske dogodke, ki pomembno vplivajo na kmetijsko pridelavo (Semenov, 2008).

Za določevanje vpliva podnebnih sprememb na kmetijsko produkcijo uporabljamo projekcije podnebnih sprememb. Poznavanje vremenskih vzorcev je potrebno tako na primerni regionalni kot tudi na časovni skali. Izračunu vzorcev podnebnih sprememb so namenjeni modeli splošne cirkulacije (MSC), ki pa imajo slabo prostorsko ločljivost in njihovih rezultatov ne moremo direktno interpretirati na lokalnem nivoju podnebno zelo raznolike Slovenije. Za interpretacijo ter uporabo rezultatov MSC na lokalnem nivoju lahko uporabimo različne metode zmanjševanja skale (dinamične in empirične). Z empiričnim zmanjševanjem skale zajamemo klimatsko raznolikost različnih območij, saj letni hod meteoroloških spremenljivk odraža klimatske značilnosti posamezne lokacije (Bergant, 2003). Dinamično zmanjševanje skale vključuje gnezdenje regionalnih klimatskih modelov znotraj MSC. Obe izmed metod zmanjševanja skale imata določene prednosti in slabosti (Mearns s sod., 2003). Prednost dinamičnega zmanjševanja skale je predvsem v tem, da ta ohrani fizikalno konsistentnost informacije MSC, medtem ko empirično zmanjševanje skale temelji na empirično določeni povezavi med meteorološkimi spremenljivkami na globalni ter regionalni/lokalni skali (Mearns s sod., 2003). Žal so simulacije z RCM računsko precej zahtevne (za eno simulacijo je ponavadi potrebno kar veliko časa), kar do določene mere omejuje njihovo uporabnost.

2. Faze dela

Naše delo je potekalo v večih fazah. V prvi fazi je bil namen prilagoditi model WOFOST na lokalne razmere v Sloveniji, saj je bila prvotna verzija modela umerjena za izračune na Nizozemskem, kjer je model nastal. V ta namen smo analizirali dostopne podatke o količini pridelka za različne lokacije v Sloveniji (vir podatkov – Kmetijski Inštitut Slovenije), ki smo jih kasneje uporabili pri kalibraciji modela. S postopki analize občutljivosti smo ugotovili, na perturbacijo katerih parametrov modela je izračun pridelka najbolj občutljiv, s kalibracijo z meritvami količine pridelka pa smo te parametre nato tudi optimalno določili. Postopek validacije modela na neodvisnem vzorcu podatkov je podal oceno kakovosti (s pomočjo kalibracije) prilagojenega modela. Kalibracijsko-validacijski postopek smo opravili za vodilno poljščino v Sloveniji, t. j. kuzuza. S pomočjo umerjenega modela WOFOST smo lahko določili variabilnost pridelka in ugotovili dejavnike, ki ob prevladujočih podnebnih razmerah v večji meri to variabilnost tudi pojasnijo.

V drugi fazi smo prilagojeni model WOFOST uporabili pri študiji vpliva podnebne variabilnosti na količino pridelka. Predvidevamo, da ima podnebna variabilnost značilen vpliv na količino pridelka na izbranih lokacijah v Sloveniji. Preučili smo odziv modela pri različnih klimatskih robnih pogojih, kjer smo poleg povprečnih vrednosti osnovnih meteoroloških spremenljivk, ki vplivajo na pridelek, spreminjali tudi njihove variabilnosti (izdelava t.i. sintetičnih scenarijev podnebnih sprememb (Mearns s sod., 1992, 1996; Semenov in Porter, 1995; Jasper s sod., 2004). Za generiranje sintetičnih nizov izbranih meteoroloških spremenljivk na osnovi sintetičnih scenarijev sprememb povprečnih vrednostih ter variabilnosti smo uporabili stohastični generator vremena. Prikazan je tudi pristop za ovrednotenje vpliva ekstremnih vremenskih pogojev (suša, visoke temperature) na količino pridelka ter bilanco vode v tleh, s čimer smo lahko bolj nazorno prikazali ranljivost pridelave omenjenih poljščin v spremenjenih podnebnih razmerah. Poleg meteoroloških spremenljivk smo v študijo vključili tudi spremembe koncentracije CO₂, katere posledica je spremenjena fotosintetska aktivnost rastlin ter učinkovitost izrabe vode, ki se je pri C₃ rastlinah izražala drugače, kot pri C₄ rastlinah (Kajfež-Bogataj, 2005).

V tretji fazi smo analizirali nekaj obstoječih podatkovnih baz scenarijev podnebnih sprememb za območje Slovenije. Pri analizi smo uporabili predhodne študije za območje Slovenije (Bergant,

2003) ter rezultate evropskega projekta ENSEMBLES. Na osnovi simulacij podnebnih sprememb smo lahko določili povezave med spremembami povprečnih vrednosti ter variabilnosti ključnih meteoroloških spremenljivk, kar nam je pomagalo postaviti v okvirje napoved količine pridelka na osnovi izdelanih projekcij pridelka ob upoštevanju sintetičnih scenarijev. Validacija simulacij različnih klimatskih modelov nad območjem Slovenije nam je pokazala tudi, kakšna je negotovost projekcij nad podnebno precej variabilnim območjem Slovenije.

3. Metode dela

3.1 Splošen opis modela WOFOST

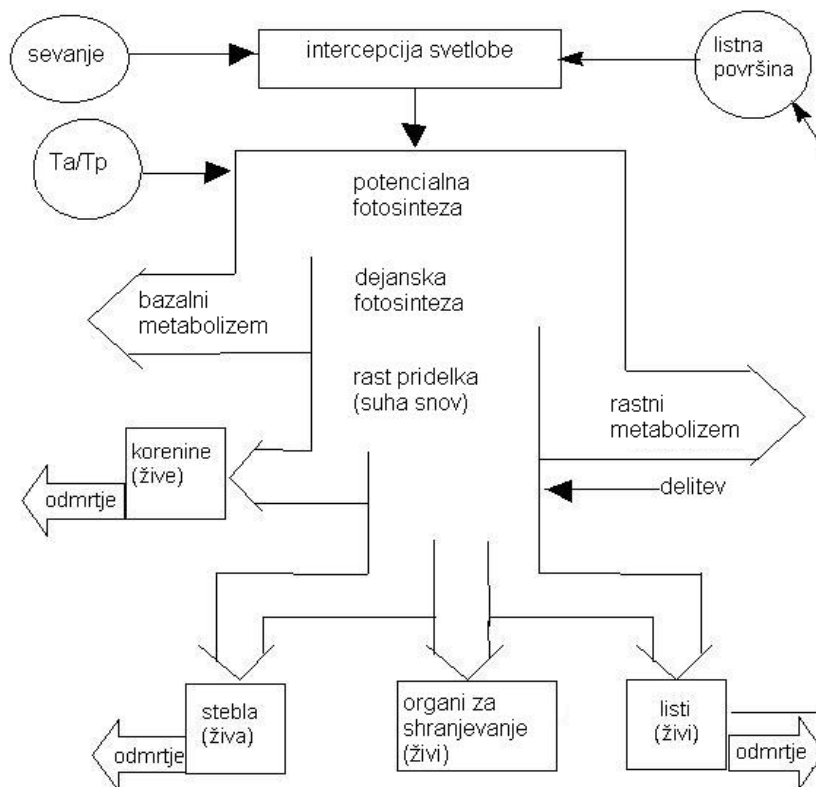
V zadnjih desetletjih agrometeorološko modeliranje predstavlja pomembno orodje za raziskave povezane z analizo tveganja pri pridelku, variabilnostjo pridelka skozi leta, variabilnostjo zaradi različnih tipov tal ali zaradi raznovrstnih agrohidroloških razmer (Thornley in Johnson, 1990). Modeli lahko simulirajo razlike med kultivarji, optimizirajo setvene strategije, nakažejo vpliv podnebnih sprememb ali kritičnih obdobj za izvajanje agrotehničnih ukrepov. V literaturi najdemo tako zelo kompleksne kot tudi preprostejše matematične modele za napovedovanje rasti in razvoja kmetijskih rastlin (Whisler s sod., 1986; Boote s sod., 1996). Najbolj razširjeni starejši modeli so CERES (Ritchie in Otter, 1984), ARCWHEAT (Weir s sod., 1984), EPIC (Williams s sod., 1989) in SUCROS (Van Keulen in Seligman, 1987), ki so bili verificirani, kalibrirani in uporabljeni tudi v Evropi. Zelo uporabni so generični modeli, ki simulirajo rast in razvoj več kmetijskih rastlin hkrati, kar jim omogočajo različni moduli. Tak model je WOFOST, znani pa so še INTERCOM (Van Ittersum s sod., 2003), STICS (Brisson s sod., 2003) in CropSyst (Stöckle s sod., 2003).

WOFOST (WORld FOod STudy) je bil razvit in dokumentiran na Nizozemskem že leta 1986 (Wolf in sod.). Mnoge evropske države so model že prilagodile na svoje razmere. Z modelom je možno tudi dekadno kvantitativno napovedovanje pridelka na državni ali regionalni ravni in kvalitativni monitoring razmer za rast pšenice, ovsa, koruze, riža, krompirja, sladkorne pese, stročnic, soje, oljčne repice, sončnic, tobaka in bombaža za celotno EU. WOFOST je model za simulacijo rasti poljščin, ki v kombinaciji z GIS-om in rutino za napoved pridelka tvori CGMS (Crop Growth Monitoring System). Kombiniran je lahko z mapo tal, parametri kultur in prostorsko informacijo o rastiščih ter uporablja dnevne meteorološke podatke za oceno stanja rastlin. Razvoj in zgodovina modela sta opisana podrobneje v članku Kajfež-Bogataj in Pogačar (2009a,b). Trenutno je dostopna verzija WOFOST 7.1.2, ki ima prijazen uporabniški vmesnik, zato je precej enostavna za uporabo (Supit s sod., 2008).

WOFOST računa rast pridelka v dnevni časovni skali na osnovi fizioloških procesov, ki se dogajajo v rastlinski odeji in upošteva, kako na te procese vplivajo okoljske razmere (Boogaard s sod., 1998). Glede vhodnih meteoroloških spremenljivk WOFOST uporablja maksimalno in minimalno temperaturo, globalno obsevanje, povprečno dnevno hitrost vetra na višini 2 m, povprečni dnevni pritisk vodne pare in količino padavin. Glede talnih karakteristik model potrebuje vhodne podatke o začetni količini vode, ki se zadržuje na površju, največjo možno količino vode na površju, začetni dostopni količini vode v tleh in maksimalno količino vode v začetni koreninski coni. Če upoštevamo vpliv podtalnice, ne potrebujemo zadnjih dveh podatkov, temveč začetne podatke o podtalnici, lahko pa dodamo še vpliv drenaže in v tem primeru vstavimo v model globino drenaže. Definirati moramo tudi maksimalno globino koreninske cone in maksimalni delež padavin, ki se ob padavinskem dogodku večje intenzitete ne infiltrira (ob intenzivnejših padavinah se pore na površini zapolnijo in tla niso sposobna infiltrirati vse padavinske vode). Vrednosti infiltracije so tako določene glede na višino padavin, ki so padle v enem dnevu. WOFOST

upoštevata tudi stres zaradi pomanjkanja kisika v koreninski coni ob preobilici vode. Časovni korak v modelu je 1 dan. Vpliv hranil (dušik, fosfor in kalij) na pridelek se računa v štirih korakih (Janssen s sod., 1990). Najprej izračunamo potencialne zaloge hranil iz razmerja med kemijskimi lastnostmi zgornje 20 centimetrske plasti tal in maksimalno količino tistih hranil, ki jih poljščina lahko sprejme. V drugem koraku izračunamo dejansko asimilacijo vsakega hranila kot funkcijo potencialne zaloge hranila. S tem dobimo tri območja za višino pridelka, ki so odvisna od dejanske asimilacije dušika, fosforja in kalija (obravnavano neodvisno). V četrtem koraku pa ta tri območja pridelka združimo po parih in za končno oceno pridelka povprečimo ocene le-teh. WOFOST tako ponuja izračun dejanske produkcije pri omejeni količini hranil.

Osnova za izračune produkcije suhe snovi je stopnja asimilacije CO₂ v rastlinski odeji, ki je odvisna od absorbirane energije sevanja in je funkcija vpadajočega sevanja in listne površine poljščine. Del nastalih ogljikovih hidratov se porabi za zagotavljanje energije za vzdrževanje že obstoječe žive biomase (bazalni metabolizem), ostala nastala suha snov pa se porazdeli med korenine, liste, stebila in založne organe. Pri tem model uporabi porazdelitvene faktorje, ki so funkcija fenološke faze, slednjo pa v modelu določata temperatura in dolžina dneva (Spitters s sod., 1989). Del, ki se porazdeli v liste, določa razvoj listne površine in s tem dinamiko intercepcije svetlobe. Suho maso rastlinskih organov dobimo z integracijo njihove dnevne stopnje rasti.



Slika 1: Proces rasti poljščin, kot jo simulira WOFOST. Ta in Tp sta dejanska in potencialna transpiracija (Pogačar in Kajfež-Bogataj, 2009a).

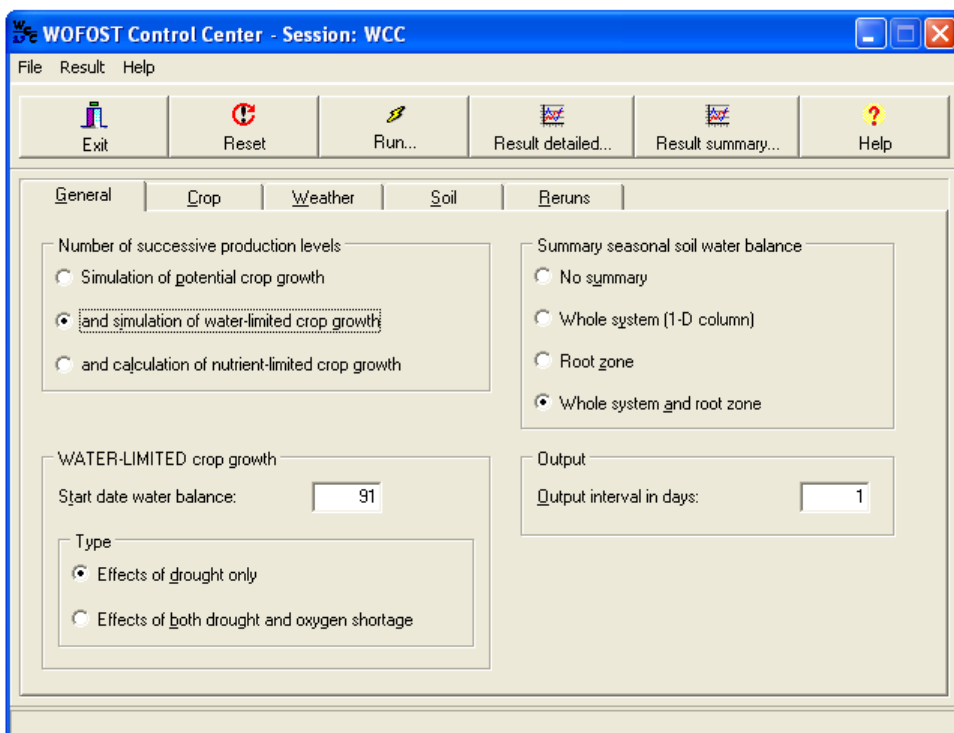
Akumulacija in distribucija suhe snovi po rastlini je simulirana od setve do dozoretja na osnovi fizioloških procesov (slika 1), kot jih določajo odzivi poljščin na dnevne vremenske situacije, stanje vode v tleh (odraža ga razmerje med dejansko in potencialno transpiracijo -Ta/Tp) in setvena praksa (gostota setve ipd.). Izbiramo lahko med potencialno in dejansko (omejena količina vode) simulacijo. Potencialna je definirana s temperaturo, dolžino dneva, sončnim obsevanjem in karakteristikami poljščin, dejansko pa določa dostopnost vode, ki je določena na osnovi vodne bilance, katere izračun integrira podatke o značilnostih korenin, fizikalnih lastnosti tal, količini

padavin in evapotranspiraciji. Slednja se računa po Penmanovi metodi. Predvidevamo lahko tudi optimalno zalogo hranil in računamo celotno količino nadzemne suhe snovi in suhe snovi v semenih na hektar. WOFOST za izbrano poljščino simulira fenološki razvoj, suho težo korenin, listov, stebel in založnih organov, celotno nadzemno produkcijo, žetveni indeks, evapo(transpi)racijo, asimilacijo, bazalni metabolizem, globino dejanske koreninske cone, vsebnost vode v tleh ter sušne in mokre dni. V simulacijo še niso vključene morebitne morfološke ali fiziološke prilagoditve rastlin na spremenjene okoljske razmere. Prav tako niso upoštevani morebitni vplivi erozije, zmrzali, škodljivcev, bolezni, izgub pri shranjevanju ipd.

3.2 Aplikacije modela WOFOST

Model WOFOST je dinamični model za simulacijo rasti in razvoja rastlin (predvsem poljščin), ki je implementiran v FORTRAN-ovi kodi. Poleg kode vsebuje tudi uporabniku prijazen grafični vmesnik (Pogačar in Kajfež-Bogataj, 2009 b), ki omogoča nastavitve. Na voljo imamo pet zavihkov: splošno, poljščina, vreme, tla, ponovitve.

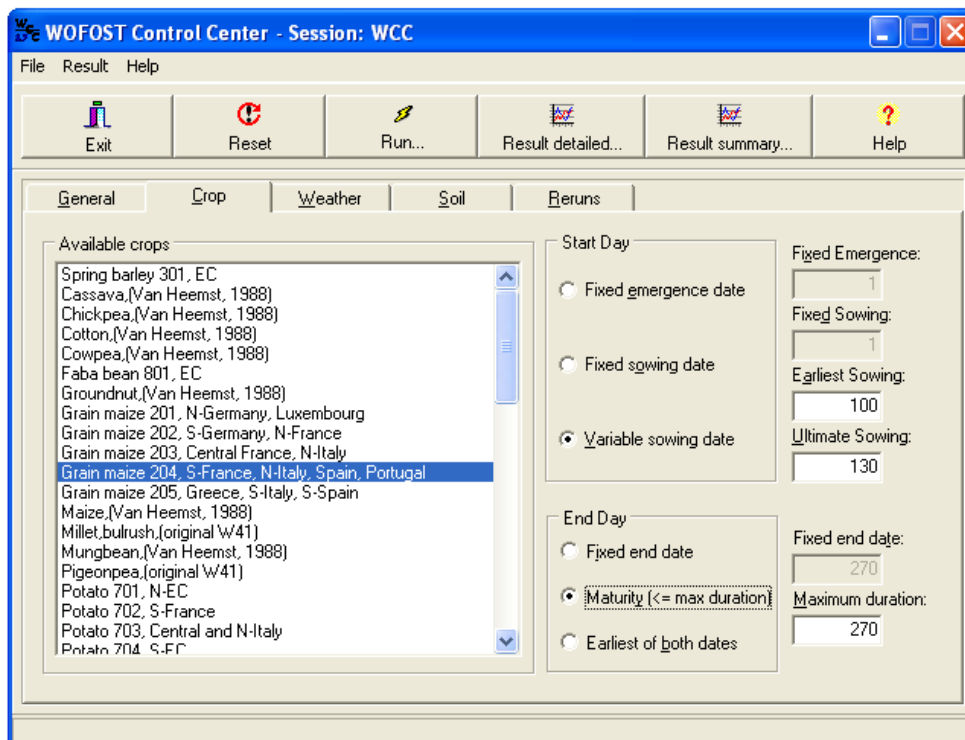
Pri splošnem zavihku (slika 2) si izberemo, kakšno simulacijo želimo: potencialno, dejansko pri omejeni količini vode ali dejansko pri omejeni količini hranil. Določimo, kateri zaporedni dan v letu (julijanski dan) naj se začne simulacija vodne bilance tal in ali bomo upoštevali le vpliv suše ali tudi primanjkljaja kisika (preveč vode). Za izpis rezultatov določimo, za kateri del tal želimo povzetek vodne bilance: za cel sistem, za koreninsko cono, za oboje ali pa ne želimo povzetka. Izberemo še časovni interval (v dnevih) za izpis.



Slika 2: Zavihek 'splošno' pri nastavitvah modela WOFOST 7.1.2.

Nato pri zavihku 'poljščina' (Slika) izberemo, katero poljščino bomo obravnavali. Veliko jih že imamo na izbiro, lahko pa tudi dodamo svojo, vendar moramo zelo dobro poznati njene karakteristike. Navodila za dodajanje so priložena modelu. Definirati moramo tudi začetni in končni dan simulacije rasti. Pri začetnem dnevu se lahko odločimo za točen datum setve ali vznika, ki ga kot julijanski dan vpišemo v polje, ali pa izberemo spremenljiv datum setve, pri čemer moramo vpisati spodnjo in zgornjo mejo za ta datum, model pa bo poiskal najprimernejši čas glede

na simulirane razmere. Pri končnem dnevu lahko prav tako vpišemo točen datum, lahko pustimo poljščino rasti do zrelosti, a pri tem vpišemo maksimalno trajanje, ali pa pustimo modelu, da izbere zgodnejšega izmed obeh datumov.

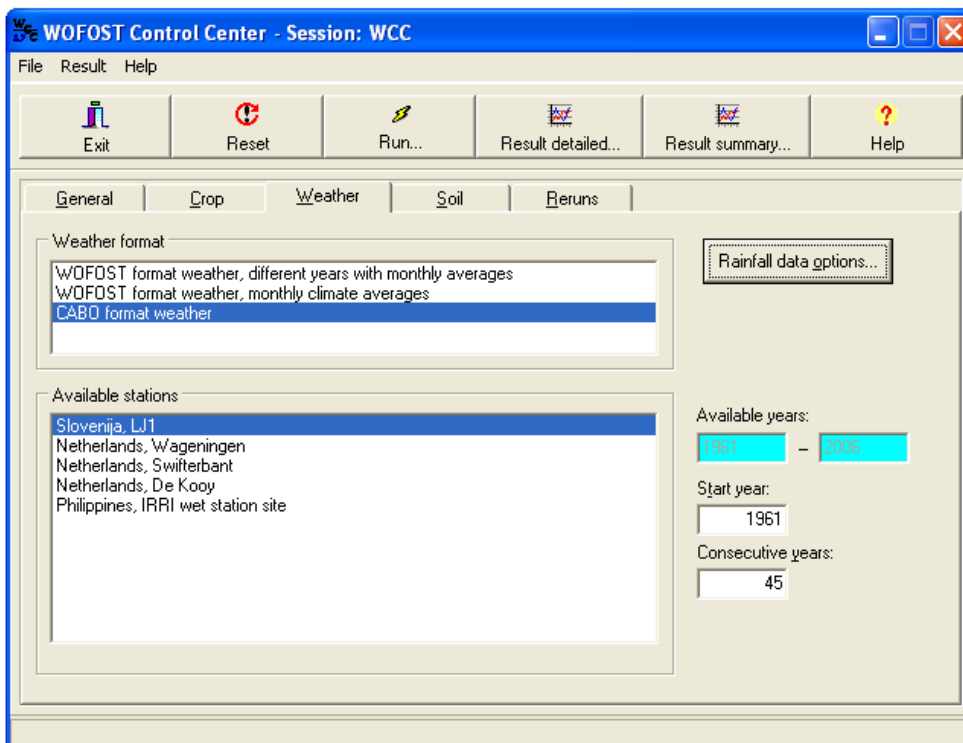


Slika 3: Zavihek 'poljščina' pri nastavitvah modela WOFOST 7.1.2.

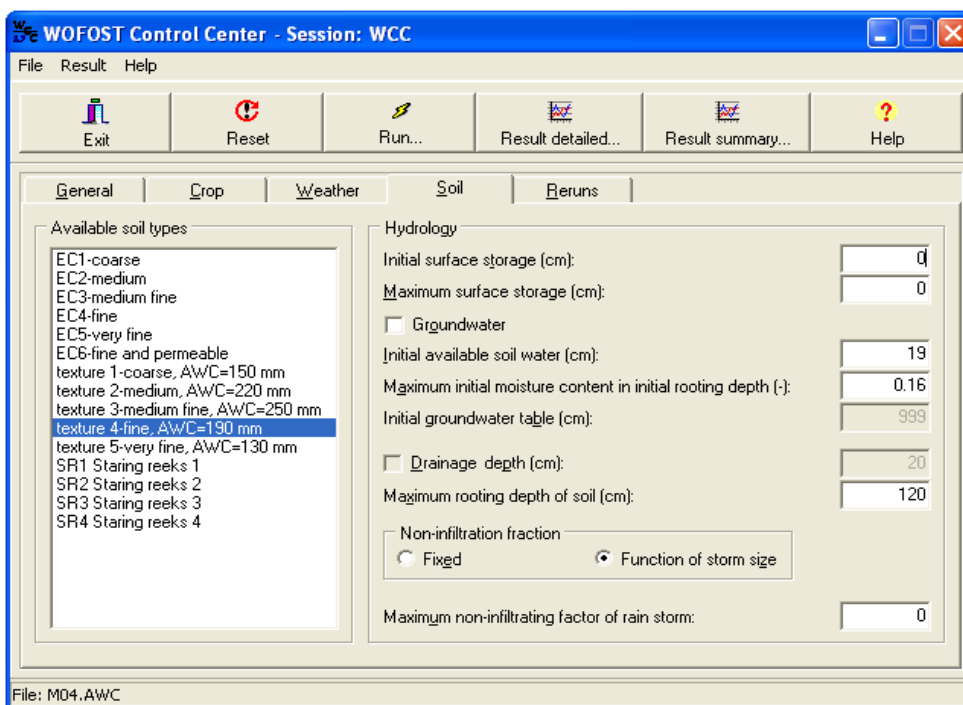
Zavihek 'vreme' (Slika 4) nam omogoča, da izberemo format, v katerem imamo meteorološke podatke, dodatne možnosti imamo še za podatke o količini padavin (če so v drugačnem formatu). Na voljo so podatki s treh nizozemskih postaj in ene na Filipinih, lahko pa dodamo svojo – kot že lahko vidimo možnost izbire Ljubljane. Pri tem uporabimo CABO format z dnevni vrednostmi spremenljivk, ki je opisan v navodilih. Vpisati moramo še začetno leto obravnave in število zaporednih let, za katera želimo izračune. Kot vhodne vremenske podatke lahko v WOFOST vključimo tudi vremenske oz. klimatske scenarije za prihodnje podnebje do konca stoletja. Za to lahko uporabimo simulacije različnih regionalnih klimatskih modelov.

Pri zavihku 'tla' (slika 5) imamo na razpolago na tri različne načine definirana tla s 4, 5 oz. 6 tipi tal. Tudi tu lahko na precej zapleten način (potrebujemo veliko podatkov o tleh) dodamo nov tip tal. Vpisati moramo začetno količino vode, ki se zadržuje na površju, največjo možno količino vode na površju, začetno dostopno količino vode v tleh in maksimalno količino vode v začetni koreninski coni. Če izberemo upoštevanje vpliva podtalnice, ne potrebujemo zadnjih dveh podatkov, temveč začetne podatke o podtalnici, poleg tega pa lahko izberemo še drenažo in v tem primeru vpišemo globino drenaže.

Definirati moramo tudi maksimalno globino koreninske cone in maksimalni delež padavin, ki se ne infiltrira. Izberemo lahko še ali se infiltrira določena količina padavin ali pa so vrednosti infiltracije določene glede na velikost nevihte (količino padavin).

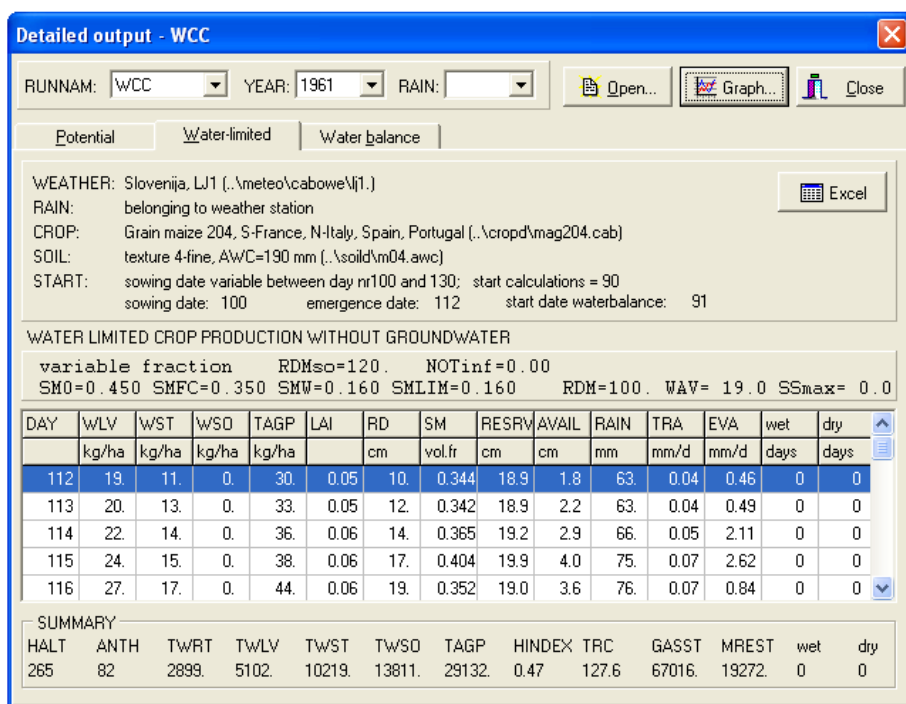


Slika 4: Zavihek 'vreme' pri nastavitvah modela WOFOST 7.1.2.

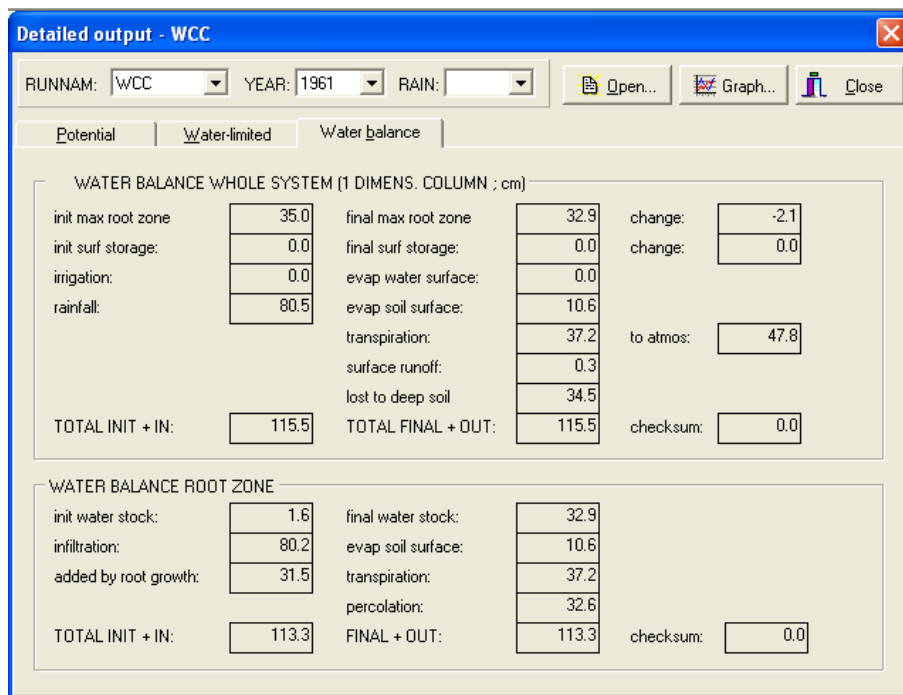


Slika 5: Zavihek 'tla' pri nastavitvah modela WOFOST 7.1.2.

Zadnji zavihek nam omogoča, da si nastavimo ponovitve simulacij s spremenjenimi parametri, ki si jih sami izberemo. Ko nastavimo vse vhodne parametre, zaženemo model ('Run...'). Rezultati se nam izpišejo v obliki tabele, ki nam jo model lahko tudi prenese v Excel. Izbiramo lahko med razčlenjenim izpisom po dnevih ('Result detailed...') in povzetkom rezultatov ('Result summary...').



Slika 6: Prikaz rezultatov v modelu WOFOST 7.1.2.



Slika 7: Zavihek, ki prikazuje vodno bilanco.

Pri razčlenjenem izpisu (slika 6) izberemo leto, za katerega želimo izpis. Na voljo imamo zavihke z rezultati za potencialno simulacijo ('Potential'), simulacijo pri omejeni količini vode ('Water-limited') in z vodno bilanco ('Water balance'). Pri vodni bilanci so predstavljene glavne komponente le-te za celotni sistem in za koreninsko cono (slika 7). V tabeli 1 predstavljamo spremenljivke, ki se kot rezultat izpišejo pri potencialni simulaciji.

Tabela 1: Spremenljivke pri razčlenjenem izpisu rezultatov potencialne simulacije.

ime spremenljivke	enote	pomen
DAY		julijanski dan v letu
IDSEM	d	število dni od vznika
DVS		razvojna faza poljščine
TSUM	°C	termalni čas
WLV	kg/ha	suha teža živih listov
WST	kg/ha	suha teža živih stebel
WSO	kg/ha	suha teža živih založnih organov
TAGP	kg/ha	celotna nadzemna produkcija
LAI	m ² /m ²	indeks listne površine
TRA	mm/d	stopnja transpiracije
GASS	kg(CH ₂ O)/ha/d	stopnja asimilacije
MRES	kg(CH ₂ O)/ha/d	stopnja bazalnega metabolizma
DMI	kg/ha/d	stopnja rasti suhe snovi
v povzetku še:		
HALT		dan žetve
ANTH	d	število dni do cvetenja
TWRT	kg/ha	celotna suha teža korenin
TWLV	kg/ha	celotna suha teža listov
TWST	kg/ha	celotna suha teža stebel
TWSO	kg/ha	celotna suha teža založnih organov
HINDEX		žetveni indeks: teža založnih org./teža nadzemnega dela poljščine
TRANSP	cm	celotna transpiracija
TRC		transpiracijski koeficient: kg(H ₂ O)/kg(suha snov)
GASST	kg(CH ₂ O)/ha	celotna asimilacija
MREST	kg(CH ₂ O)/ha	celotni bazalni metabolizem

Pri rezultatih simulacije pri omejeni količini vode imamo prav tako spremenljivke, ki so v tabeli 1 odebeljene, poleg njih pa še dodatne, ki so predstavljene v tabeli 2.

Tabela 2: Preostale spremenljivke pri razčlenjenem izpisu rezultatov simulacije pri omejeni količini vode.

ime spremenljivke	enote	pomen
RD	cm	globina dejanske koreninske cone
SM	cm ³ /cm ³	vsebnost vode v tleh
RESRV	cm	količina dostopne vode v potencialni koreninski coni
AVAIL	cm	količina dostopne vode v dejanski koreninski coni
RAIN	mm	celotna količina padavin v simulacijskem obdobju
EVA	mm/d	stopnja evaporacije iz tal ali iz vode na površju
wet	kg/ha	št. dni z zmanjšano rastjo poljščin zaradi pomanjkanja kisika
dry	kg/ha	št. dni z zmanjšano rastjo poljščin zaradi pomanjkanja vode

Pri povzetku rezultatov prav tako lahko izbiramo med zavihkoma z rezultati za potencialno simulacijo ('Potential') in simulacijo pri omejeni količini vode ('Water-limited'). Rezultati se nam izpišejo po posameznih letih, poleg tega pa dobimo tudi izračun povprečij, standardnih odklonov in variacijskih koeficientov za simulirano obdobje (dolžina obdobja je navedena pod spremenljivko DUR) za spremenljivke, ki so v tabeli 3 odebeljene. V tabeli 4 so zbrane in opisane vse spremenljivke, ki so izračunane pri potencialni simulaciji (večinoma so enake kot pri razčlenjenem izpisu).

Tabela 3: Spremenljivke pri povzetku rezultatov potencialne simulacije

ime spremenljivke	enote	pomen
YR		leto
RUNNAM		oznaka simulacijskega zagona
SOW		dan setve
→	d	število dni med setvijo in vznikom
EM		dan vznika
ANT	d	število dni do cvetenja
FLWR		dan, ko poljščina zacveti
HALT		dan žetve
TWRT	kg/ha	celotna suha teža korenin
TWLV	kg/ha	celotna suha teža listov
TWST	kg/ha	celotna suha teža stebel
TWSO	kg/ha	celotna suha teža založnih organov
TAGP	kg/ha	celotna nadzemna produkcija
LAIM	ha/ha	maksimalni indeks listne površine
HINDEX		žetveni indeks: teža založnih org./teža nadzemnega dela poljščine
TRC		transpiracijski koeficient: kg(H ₂ O)/kg(suha snov)
GASST	kg(CH ₂ O)/ha	celotna asimilacija
MREST	kg(CH ₂ O)/ha	celotni bazalni metabolizem
TRANSP	cm	celotna transpiracija
EVSOL	cm	celotna evaporacija s površja tal

Pri dejanski simulaciji z omejeno količino vode se poleg že znanih pojavijo še spremenljivke, ki so zbrane v tabeli 4.

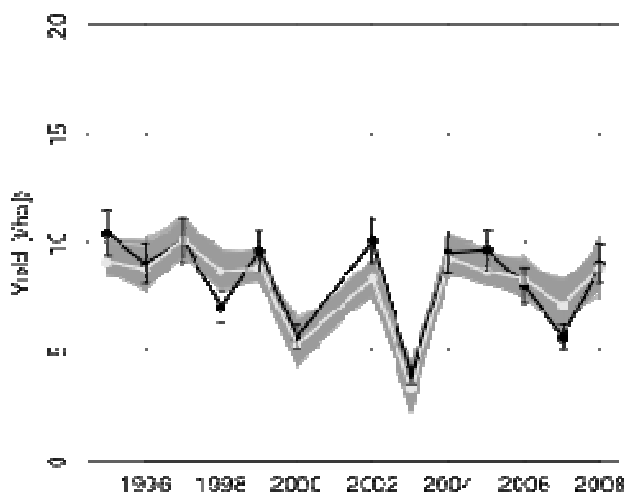
Tabela 4: Preostale spremenljivke pri povzetku rezultatov simulacije pri omejeni količini vode.

ime spremenljivke	enote	pomen
RAINT	cm	celotna količina padavin v simulacijskem obdobju
DELWAT	cm	razlika med končno in začetno količino dostopne vode v koreninski coni
TRAT	cm	celotna transpiracija
LOSST	cm	celotna količina vode, ki se je s perkolacijo izgubila globlje v tla in rastlini ni več dostopna
TSR	cm	celotni površinski odtok med simulacijo
RYLD		relativni pridelek (pridelek pri omejeni količini vode/potencialni pridelek)
RAGP		relativna nadzemna produkcija

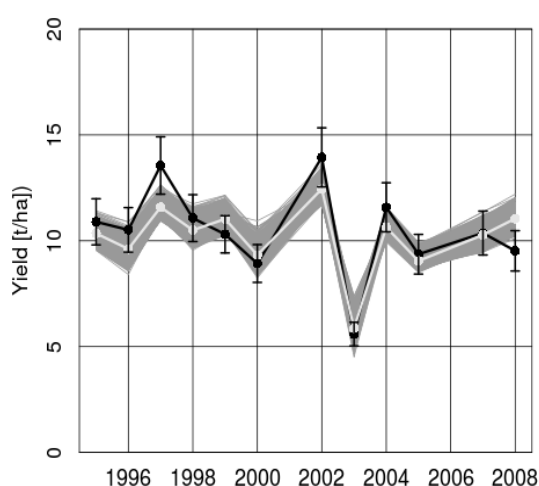
Pri razčlenjenih rezultatih nam model izriše tudi grafe posameznih spremenljivk hkrati za vsa simulirana leta, kar je nekoliko nepregledno, če si izberemo daljše obdobje. Žal pa grafov ne moremo izvoziti.

3.3 Izbira rastline, kalibracija ter validacija dinamičnega modela rastlinske produkcije

Za simulacijo z modelom WOFOST smo izbrali koruzo (*Zea mays* L. hibrid Furio). Hibrid Furio je bil izbran na podlagi visoke stabilnosti in višine pridelka (obdržal se je vse do leta 2008, s pridelovanjem pa so pričeli že v letu 1995). Koruza je poleg pšenice najbolj razširjena poljščina v Sloveniji. Pridelujemo jo na okoli 40 % vseh njiv, kar je največji delež v setveni sestavi med vsemi evropskimi državami (Čergan s sod., 2008). Izpad pridelka koruze ter ostalih poljščin postaja zaradi neugodnih vremenskih razmer vse bolj pogost. Raziskave kažejo, da se količina padavin v Sloveniji na letni ravni značilno ne spreminja, je pa vse bolj izrazita sezonska prerazporeditev padavin (Kajfež-Bogataj s sod., 2007). Zaznaven je upad količine padavin v obdobju, ko je koruza od njih najbolj odvisna (pozno spomladi ter poleti), kar sovпада tudi z obdobjem cvetenja ter polnjenja zrnja, ko je koruza najbolj občutljiva na pomanjkanje vode. Po drugi strani postaja jesenski maksimum padavin vse bolj izrazit, kar s stališča spravila koruze lahko povzroči veliko škode.



Slika 8: Simulacija višine pridelka (Yield) koruze (hibrid Furio) v Murski Soboti. Črne točke označujejo meritve višine pridelka skupaj z napako meritev. S sivo barvo je označen ansambel modelskih simulacij; s tem označujemo njihovo negotovost, ki je posledica nenatančnega poznavanja parametrov. S svetlo sivo je označeno ansambelsko povprečje znotraj posameznih let.



Slika 9: Simulacija višine pridelka (Yield) koruze (hibrid Furio) v Novem mestu. Črne točke označujejo meritve višine pridelka skupaj z napako meritev. S sivo barvo je označen ansambel modelskih simulacij; s tem označujemo njihovo negotovost, ki je posledica nenatančnega poznavanja parametrov. S svetlo sivo je označeno ansambelsko povprečje znotraj posameznih let.

Za samo kalibracijo modela smo potrebovali podatke o suhi teži nadzemnega dela rastline, suhi teži založnih organov ter indeksu listne površine tekom celotne rastne sezone. Vir omenjenih podatkov, podatkov o količini pridelka ter nastopu fenoloških faz na različnih lokacijah v Sloveniji (Murska Sobota – Rakičan, Jablje, Bilje) je Kmetijski Inštitut Slovenije. Vir meteoroloških podatkov je bila

Agencija Republike Slovenije za okolje; za izbrano obdobje smo uporabili sledeče podatke: *dnevna količina padavin, maksimalna dnevna temperatura, minimalna dnevna temperatura, dnevno globalno obsevanje, povprečna dnevna vlažnost zraka ter povprečna dnevna hitrost vetra*. Vir pedoloških podatkov (*efektivna poljska kapaciteta*) za izbrane lokacije je Center za pedologijo in varstvo okolja (CPVO) na Biotehniški fakulteti.

V prvi fazi smo v več korakih opravili kalibracijo modela: analiza občutljivosti nam pokaže, na katere parametre je izračun najbolj občutljiv, nato pa lahko s pomočjo optimizacijskih algoritmov določimo optimalen nabor teh parametrov modela, ki vodi k najmanjšemu odstopanju modelske simulacije od realnih vrednosti (Boons-Prins s sod., 1993). Za določitev stopnje ujemanja modelskega izračuna z merjenimi pridelki smo uporabili različne statistične pokazatelje, kot so odklon, povprečni kvadrirani odklon ter korelacijski koeficient (Wallach, 2006).


Simulacije pridelka z umerjenim modelom WOFOST so prikazane na slikah 8 in 9 in sicer za Mursko Soboto in Novo mesto. Uporaba Bayesovega postopka kalibracije nam omogoča izdelavo ansambla za višino pridelka. Tako lahko za vsako leto posebej ocenimo negotovost modelskih simulacij, ki so posledica nenatančnega poznavanja parametrov modela. Rezultati se v splošnem dobro ujemajo z meritvami pridelka; nekoliko večja odstopanja dobimo le v letih 1998 ter 2002. Variabilnost modelskih simulacij se po letih nekoliko razlikuje, vendar je medletna variabilnost višine pridelka, ki je posledica naravne klimatske variabilnosti, večja od variabilnosti simulacij pridelka znotraj posameznih let. To je pomembna informacija, saj bi v nasprotnem primeru prevelika razpršenost modelskih simulacij, ki je posledica negotovosti parametrov, zameglila informacijo o naravni variabilnosti višine pridelka.

Stopnjo ujemanja modelskega izračuna z merjenimi pridelki za lokacijo Novo Mesto, kjer je prevladujoči tip teksture tal glinasta ilovica z nizko vsebnostjo organske snovi, prikazuje levi del slike 9. Kalibracijsko-validacijski postopek kaže, da model dobro opiše časovno variabilnost pridelka koruze, čeprav v letu 1997 preceni in v letu 2008 podceni velikost pridelka.

3.4 Vrednotenje negotovosti

Korigirane projekcije rezultatov osmih RCM na izbranih lokacijah ter dnevni časovni skali smo uporabili pri simulacijah z modelom WOFOST. Ob vseh podanih rezultatih je potrebno poudariti, da simulacijo obravnavanih spremenljivk spremljajo številni viri negotovosti (Slika 10). Hulme in Carter (1999) sta definirala dva poglobljena vira negotovosti v klimatskih študijah: nepopolno poznavanje klimatskega sistema, kar se odraža v strukturi klimatskih modelov, ter "nepoznano" znanje, ki izhaja iz inherentne determiniranosti družbe v prihodnosti ter samega klimatskega sistema. Pomembna vira negotovosti sta tako povezana z modelsko strukturo ter parametrizacijskimi shemami v klimatskih modelih, glavni vir pa je emisijski scenarij, ki se manifestira skozi obnašanje družbe. Ob uporabi RCM pri dinamičnem zmanjševanju skale število virov negotovosti narašča, saj so simulacije RCM odvisne od ločljivosti numeričnih shem, fizikalnih parametrizacij ter robnih pogojev. Rezultate simulacij dinamičnega modela WOFOST v spremenjenih podnebnih razmerah smo zato podali z oceno negotovosti, kjer smo upoštevali kombiniran vpliv metode odpravljanja sistematičnih napak, izbire RCM ter negotovosti, povezane s simulacijo fizioloških procesov v modelu WOFOST. Vse simulacije v okviru projekta ENSEMBLES so potekale na osnovi predpostavljenega scenarija A1B (IPCC, 2007).

Naraščanje negotovosti v rezultatih



Emisijski scenarij	Klimatski model	Empirično zmanjševanje skale	Agro-meteorološki model
<ul style="list-style-type: none"> - Projekcije rasti populacije - Projekcije emisij - Projekcije globalne gospodarske dinamike 	<ul style="list-style-type: none"> - Negotovost parametrov - Strukturna negotovost - Analitična rešljivost - Implementacijske napake 	<ul style="list-style-type: none"> - Negotovost parametrov - Strukturna negotovost - Analitična rešljivost - Realizavija stohastičnih procesov - Stacionarnost - Implementacijske napake 	<ul style="list-style-type: none"> - Negotovost parametrov - Strukturna negotovost - Analitična rešljivost - Implementacijske napake

Slika 10: Različni viri negotovosti v klimatskih študijah. Največji vir negotovosti izhaja iz neznanih vzorcev obnašanja družbe v prihodnosti, na osnovi česar so izdelani emisijski scenariji.

Da bi čim bolje ovrednotili negotovosti, ki spremljajo naše simulacije, smo višino pridelka ter ostale preučevane spremenljivke podali v obliki ansambla, kjer je strukturna negotovost podana z vključitvijo 8 različnih klimatskih modelov, negotovost simulacij modela WOFOST pa na osnovi vzorčenja posteriornih porazdelitev modelskih parametrov. Vhodne meteorološke podatke na dnevni časovni skali za model WOFOST smo pripravili za obdobje med leti 1961 ter 2090, kjer smo vključili simulacije vseh obravnavanih klimatskih modelov. Za ocenjevanje sprememb ter negotovosti simulirane višine pridelka z modelom WOFOST smo naredili skupno dobrih 10 milijonov simulacij za obravnavano obdobje.

4. Izračun variabilnosti pridelka ob spremenljivih podnebnih razmerah

Občutljivost količine pridelka smo analizirali na osnovi spremenljivih vremenskih pogojev, ki jih simulira stohastični generator vremena LARS-WG (Semenov in Barrow, 1997; Semenov, 2008). Stohastični generator smo najprej kalibrirali, čemur je sledila validacija na neodvisnem nizu podatkov za izbrane lokacije v Sloveniji. Preverili smo tudi zmožnost generatorja za simulacijo ekstremnih padavinskih ter temperaturnih dogodkov, ki lahko bistveno vplivajo na rastlinsko produkcijo tekom rastne sezone (Semenov, 2008). Spremenjene podnebne razmere smo po zgledu Browna (1997) uporabili kot vhodni podatek za dinamični model WOFOST, s katerim smo simulirali končni pridelek. Občutljivost pridelka na različne vremenske razmere smo preučili s pomočjo sočasnega spreminjanja povprečnih vrednosti ter variabilnosti ključnih meteoroloških parametrov (količina padavin, temperatura, relativna vlažnost). Razvoj in posledično pridelek izbranih poljščin v fenoloških fazah, ko je občutljivost na vreme največja, smo ovrednotili z agroklimatološkimi indeksi (Ceglar s sod., 2008; Semenov, 2008). Eden izmed pomembnejših indeksov je indeks sušnega stresa poljščin, ki je definiran kot razmerje med pridelkom v dejanskih vremenskih razmerah ter potencialnim pridelkom, kadar so rastline v rastnem obdobju zadostno preskrbljene z vodo. S simulacijo v spremenjenih podnebnih razmerah smo določili tudi spremembe v datumu nastopa ter trajanju posameznih fenofaz.

Okvirni scenariji podnebnih sprememb so za določene lokacije v Sloveniji bili že narejeni (Bergant, 2003). Pri tem je bila uporabljena metodologija z empiričnim zmanjševanjem skale MSC (linearna metoda ocenjevanja lokalnih klimatskih spremenljivk s pomočjo multiple linearne

regresije na časovnih amplitudah empiričnih ortogonalnih spremenljivk (Hansen-Bauer s sod., 1999). Poleg rezultatov empiričnega zmanjševanja skale (Bergant, 2003) smo za oceno sprememb ključnih klimatoloških spremenljivk uporabili tudi simulacije različnih RCM (dinamično zmanjševanje skale), ki so rezultat evropskega projekta ENSEMBLES in se nahajajo v njihovi podatkovni bazi (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) (Hewitt, 2005). Na osnovi t. i. »vodene analize občutljivosti« (Hulme in Brown, 1998) smo s pomočjo rezultatov klimatskih modelov določili možne pričakovane spremembe regionalne klime. Izdelana metodologija omogoča izdelavo projekcij pridelka izbranih poljščin.

5. Rezultati

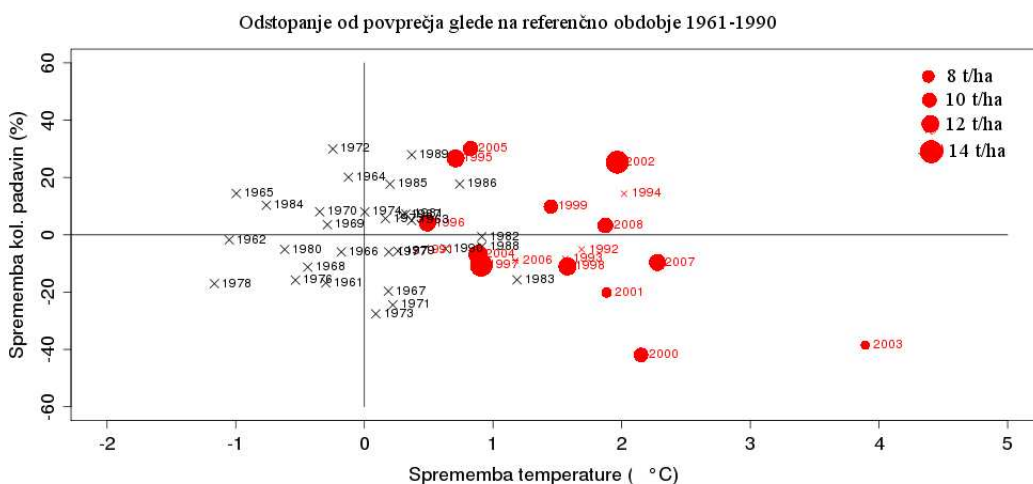
Klimatske spremembe s seboj prinašajo številne negotovosti. Z večjo pogostnostjo ekstremnih vremenskih dogodkov se poveča tudi možnost večjih izpadov pridelka koruze ter ostalih poljščin. Na vremenske okoliščine v rastni sezoni ne moremo vplivati, a s primernimi ukrepi lahko zmanjšamo tveganje za upad pridelka. Med tovrstne ukrepe uvrščamo izbiro primernega hibrida (z višjo stopnjo tolerance na sušo), časa setve, načina obdelave tal ter izbire območij za gojenje koruze (tla z večjo zadrževalno sposobnostjo za vodo). Pri tovrstni optimizaciji pridelave koruze (ter ostalih poljščin) si lahko pomagamo z modeliranjem višine pridelka, kjer je končni rezultat odvisen od okoljskih razmer tekom rastne sezone. V naši študiji vpliva klimatskih sprememb na višino pridelka smo v ta namen uporabili dinamični model WOFOST (Boograd s sod., 1998).

K poglobljenemu razumevanju vpliva vremenskih razmer tekom rastne sezone na višino pridelka ter razdelitev negotovosti modelskih simulacij med različne vire, pripomore tudi analiza izmerjenih podatkov o višini pridelka koruze. Simulacije višine pridelka pri izdelavi scenarijev za različna časovna obdobja smo primerjali z referenčnim obdobjem med leti 1961 ter 1990. To obdobje je bilo izbrano za referenčnega, ker so se konec osemdesetih let prejšnjega stoletja začele dogajati izrazite spremembe lokalnih klimatskih razmer (Žagar s sod., 2006). Izmerjene podatke v obdobju med leti 1961 ter 2008 smo zato razvrstili v dva časovna okvirja: prvi obsega referenčno obdobje (1961-1990), drugi pa preostanek, torej 1991-2008. Na sliki 11 so prikazana odstopanja povprečne temperature ter skupne količine padavin v vegetacijskem obdobju po posameznih letih od povprečnih vrednosti za referenčno obdobje. Da bi ločili primerjalno obdobje od referenčnega, smo leta po 1990 označili z rdečo barvo. Izmerjene višine pridelka po letu 1995 so sorazmerne velikosti kroga.

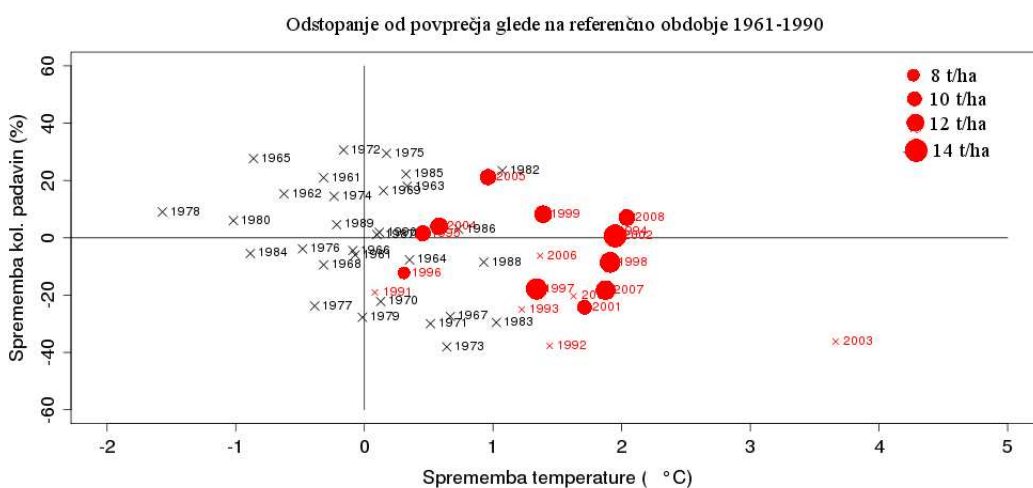
Graf nosi veliko informativno vrednost, saj se z vidika kmetijske pridelave kritično območje nahaja v spodnjem desnem kvadrantu, kjer so označena leta z višjo temperaturo ter manjšo količino padavin v vegetacijski dobi glede na referenčno obdobje (Slika 11). Vse točke, ki označujejo leta v primerjalnem obdobju, se nahajajo v desnih kvadrantih, kar pomeni, da so bila vsa vegetacijska obdobja po letu 1990 toplejša kot v referenčnem obdobju. Izrazito izstopa predvsem leto 2003, ko sta bila visoka temperatura ter nizka količina padavin vzrok nizkemu pridelku koruze v Rakičanu. Poleg leta 2003 je bil nizek pridelek zabeležen še v letih 2000 ter 2001. Nizki pridelki so se večinoma pojavljali v letih z majhno količino padavin v vegetacijski sezoni. V teh letih je imela nizka količina padavin bistveno večji vpliv na samo višino pridelka, kot temperatura. Pridelek v letih 2002 ter 2008 je bil bistveno večji kot v suhih letih 2000 ter 2001, čeravno je bila vegetacijska sezona skoraj stopinjo Celzija toplejša. Kljub visoki količini padavin v vegetacijski sezoni pa lahko v obdobju od cvetenja do mlečne zrelosti pade manjši del teh padavin, kar povzroči tudi manjši pridelek.

Tudi v Ljubljani in Novem mestu so imela po letu 1995 so imela vsa leta nadpovprečno visoko temperaturo zraka, količina padavin pa je bila v polovici let podpovprečna. To je seveda vplivalo na višino pridelka in sicer je bil v sušnih letih 2000, 2003 in 2001 zmanjšan.

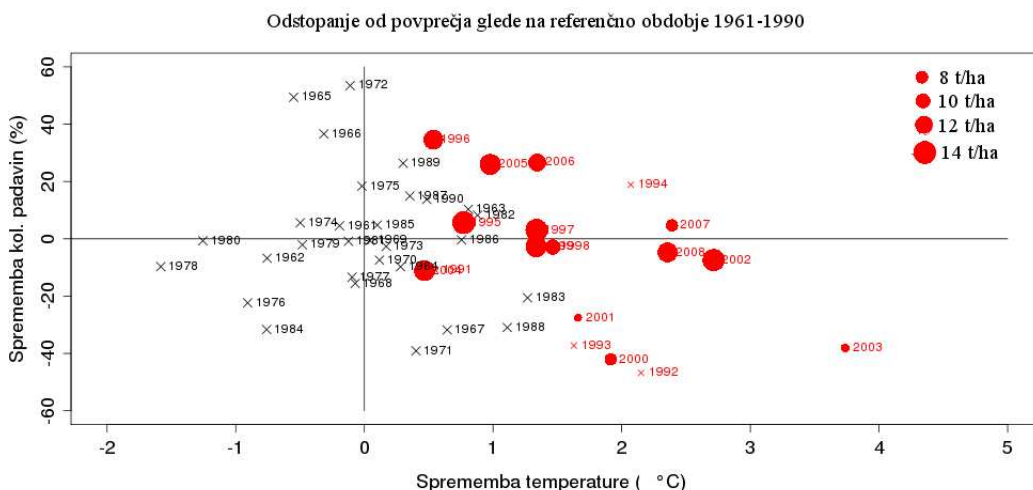
A)



B)



C)



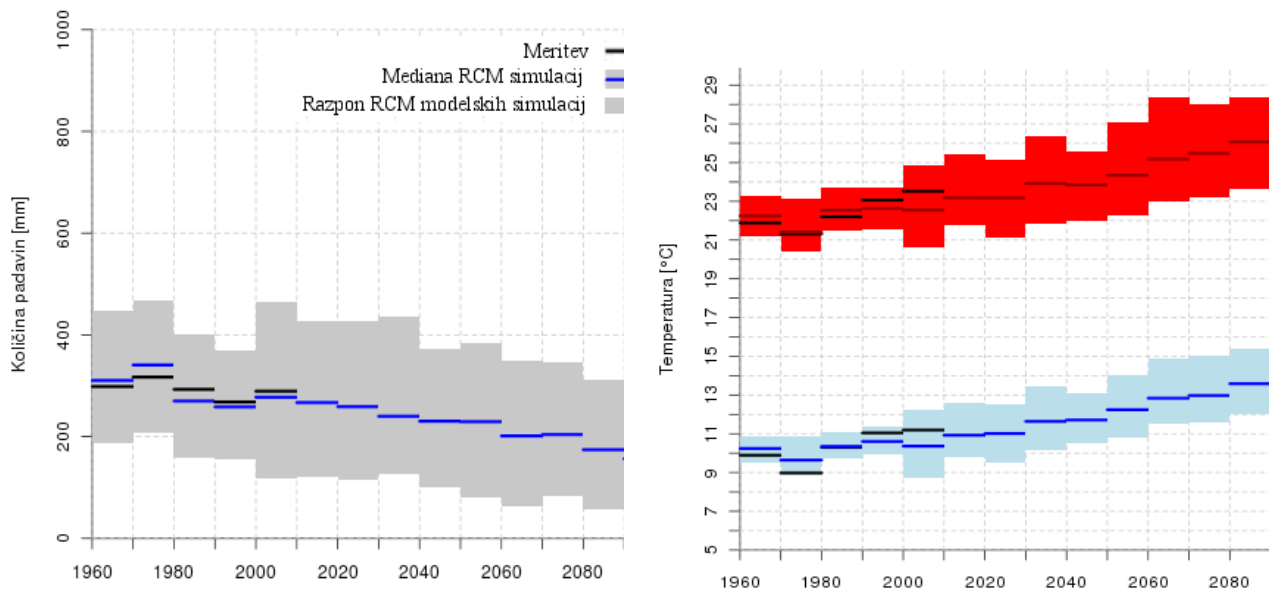
Slika 11: Razporeditev let v obdobju 1961 – 2008 glede odstopanj povprečne temperature zraka in količine padavin v vegetacijski sezoni od povprečju v obdobju 1961 – 1990. Z rdečo barvo so označena leta v primerjalnem obdobju med 1990 ter 2008. Velikost krogov kaže na višino izmerjenega pridelka koruze v posameznih letih za A) Ljubljano B) Mursko Soboto in C) Novo mesto.

Modeliranje vrednosti trajanja rastne sezone pri koruzi, izračunano za 10-letna obdobja na osnovi meritev in simulacije regionalnih klimatoloških modelov (RCM) za obdobje 1961-2008; ter za obdobje 2009 do 2080 samo na osnovi simulacij RCM za Ljubljano, Mursko Soboto in Novo mesto prikazuje slika 13. Siva barva na sliki označuje razpon RCM modelskih simulacij in kaže na negotovost napovedi, s katero se soočamo pri vplivu podnebnih sprememb na razvoj rastlin. Za lažjo oceno srednjih vrednosti po obdobjih je podana tudi mediana vrednosti trajanja rastne sezone pri koruzi. Iz simulacij sledi, da se bo trajanje rastne dobe koruze zmanjševalo zaradi temperaturno pospešenega razvoja rastlin.

Na sliki 14 so podane modelirane količine padavin, izračunane za 10-letna obdobja na osnovi meritev in simulacij regionalnih klimatoloških modelov (RCM) za obdobje 1961-2008 in za obdobje 2009 do 2080 samo na osnovi simulacij RCM, ponovno za vse tri lokacije. Tudi tu siva barva označuje razpon RCM modelskih simulacij. Kljub negotovosti napovedi je splošen trend v upadanju količine padavin.

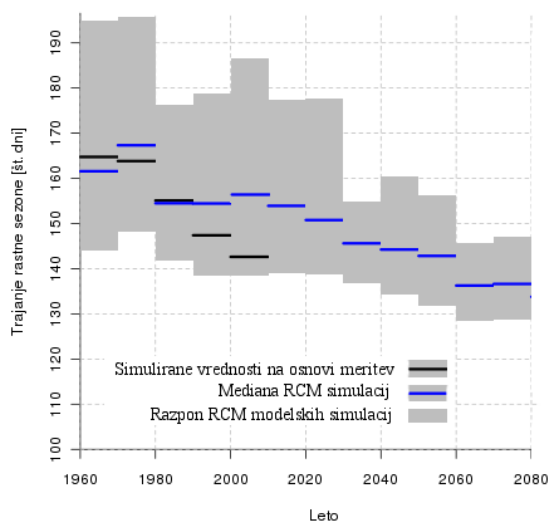
Modelirane maksimalne in minimalne temperature zraka, spet izračunane za 10-letna obdobja najprej na osnovi meritev (obdobje 1961-2008) in kasneje s simulacijo RCM (obdobje 2009 do 2080) za vse tri kraje kažejo na postopno dvigovanje temperature zraka do konca stoletja (slika 15). Stopnja ogrevanja se ne razlikuje bistveno med obravnavanimi lokacijami.

Scenariji do sredine 21. stoletja ne kažejo na bistvene spremembe skupne količine padavin v vegetacijski sezoni, vendar je ob tem potrebno upoštevati razporeditev teh padavin po mesecih. V poletnih mesecih kaže na večji upad količine padavin, kar v kombinaciji z visokimi temperaturami lahko vodi k manjšemu pridelku. Na sliki 12 so prikazani variacijski razponi, upoštevajoč simulacije vseh obravnavanih klimatskih modelov ter s tem strukturne negotovosti projekcij maksimalne ter minimalne temperature in količine padavin. V splošnem je opaziti večji upad količine padavin po sredini stoletja, maksimalna ter minimalna temperatura pa se bosta (sodeč po scenariju) do sredine stoletja dvignili za okrog 2 °C glede na povprečje v referenčnem obdobju.

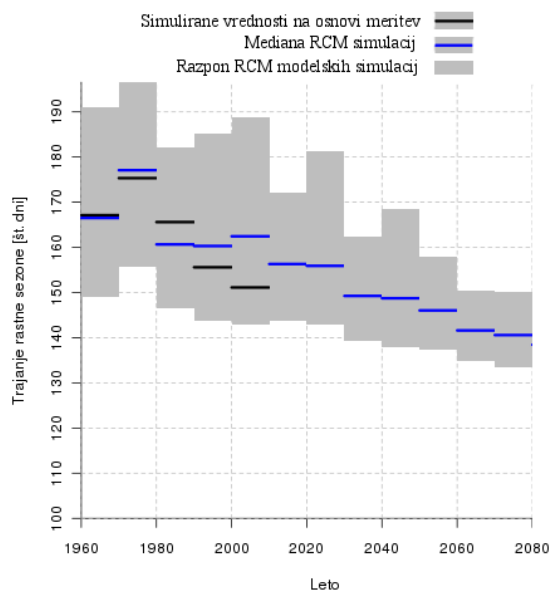


Slika 12: Scenariji količine padavin (levo) ter temperature (desno) v vegetacijski sezoni za Mursko Soboto. Z modro je označena minimalna, z rdečo pa maksimalna temperatura. Na obeh grafih so prikazana 10-letna povprečja z modelskim razponom (upoštevajoč simulacije 8 regionalnih klimatskih modelov).

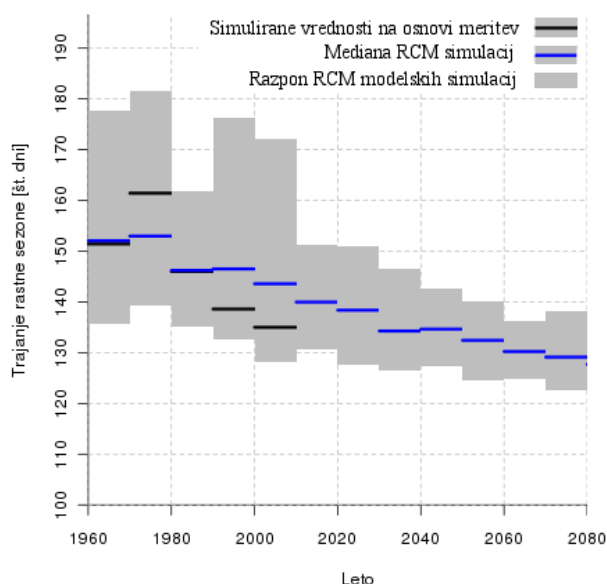
A)



B)



C)

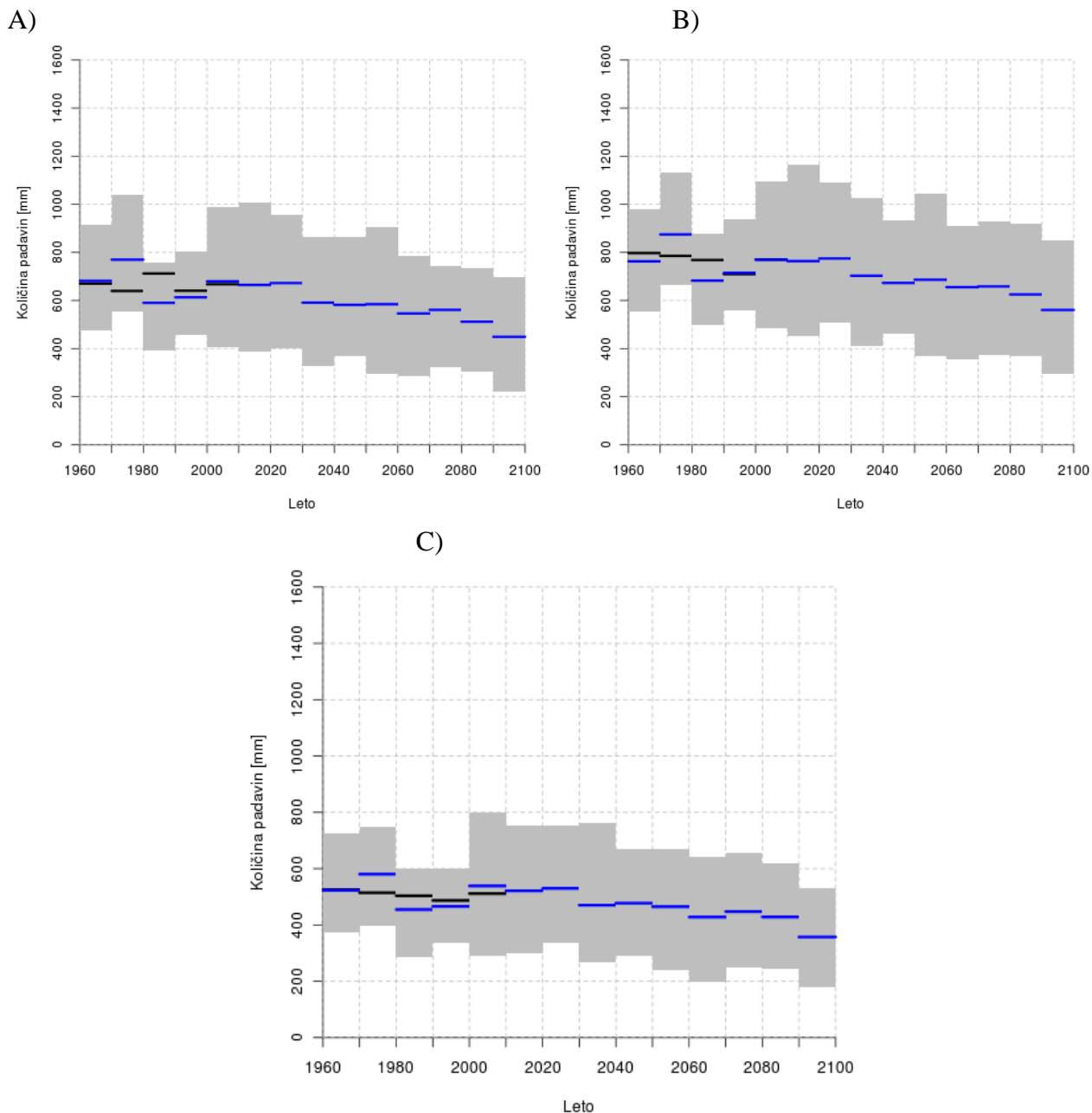


Slika 13: Modelirane vrednosti trajanja rastne sezone pri koruzi, izračunane za 10-letna obdobja na osnovi meritev (črne oznake) in simulacij regionalnih klimatoloških modelov (RCM) (modre oznake) za obdobje 1961-2008; za obdobje 2009 do 2080 samo na osnovi simulacij RCM za A) Ljubljano B) Mursko Soboto in C) Novo mesto. Siva barva označuje razpon RCM modelskih simulacij.

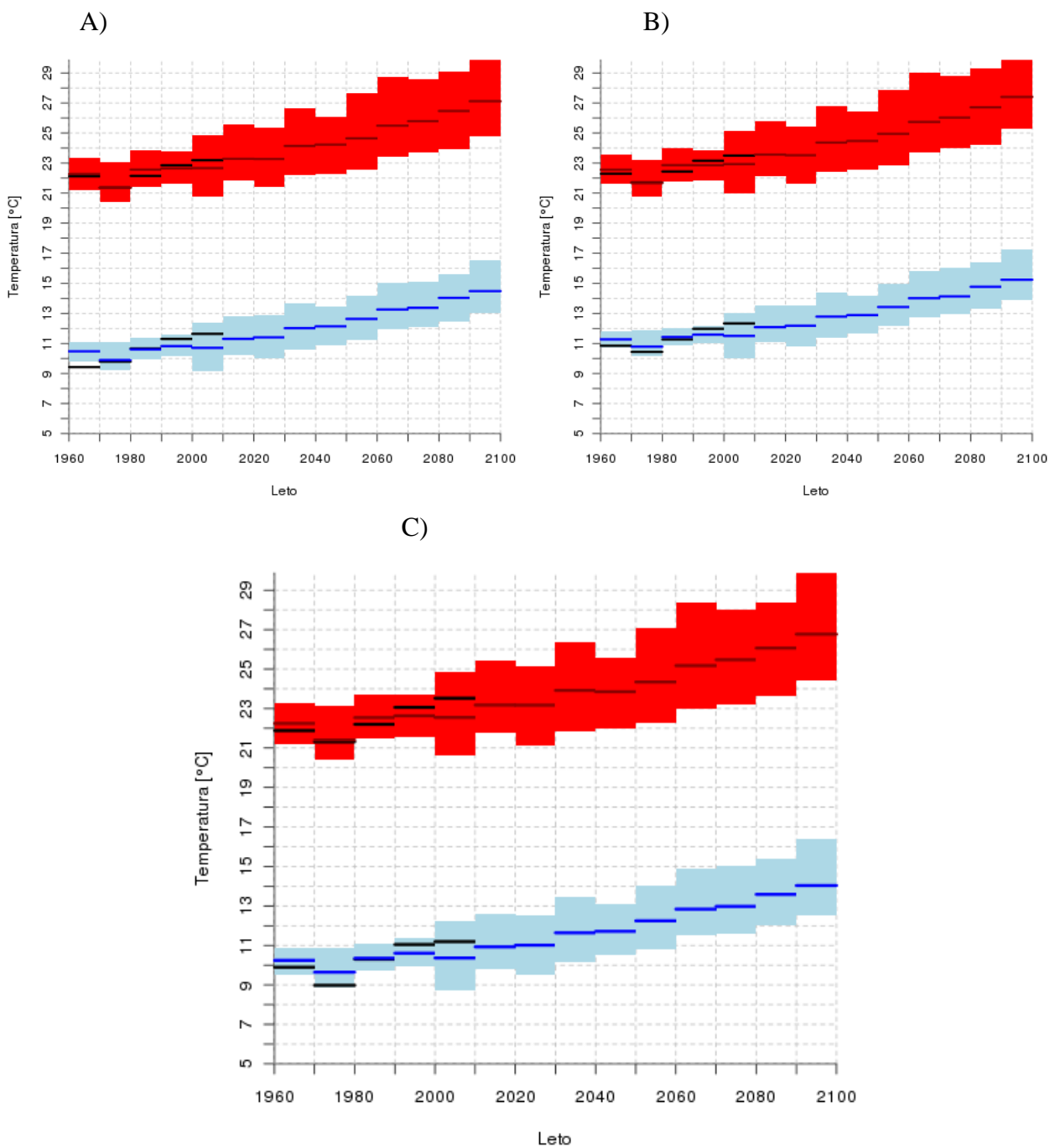
Najpomembnejši del rezultatov predstavljajo modelirane višine pridelka koruze, izračunane za 10-letna obdobja na osnovi meritev meteoroloških parametrov in simulacij RCM za obdobje 1961-2008; za obdobje 2009 do 2080 pa samo na osnovi simulacij RCM za Ljubljano, Mursko Soboto in Novo mesto. Razpon RCM modelskih simulacij je tudi tu velik (slika 16)

Ocenili smo tudi tveganje za zmanjšanje pridelka koruze pod 8 t/ha glede na prevladujočo teksturo tal. Analiza je bila narejena na osnovi meritev meteoroloških spremenljivk za obdobje 1960-2008 za Novo mesto, Ljubljano in Mursko Soboto in sicer za naslednje talne tipe: glina z dodatkom organske snovi, glina, glinasta ilovica, meljasta ilovica, ilovica, peščena ilovica in grobi pesek

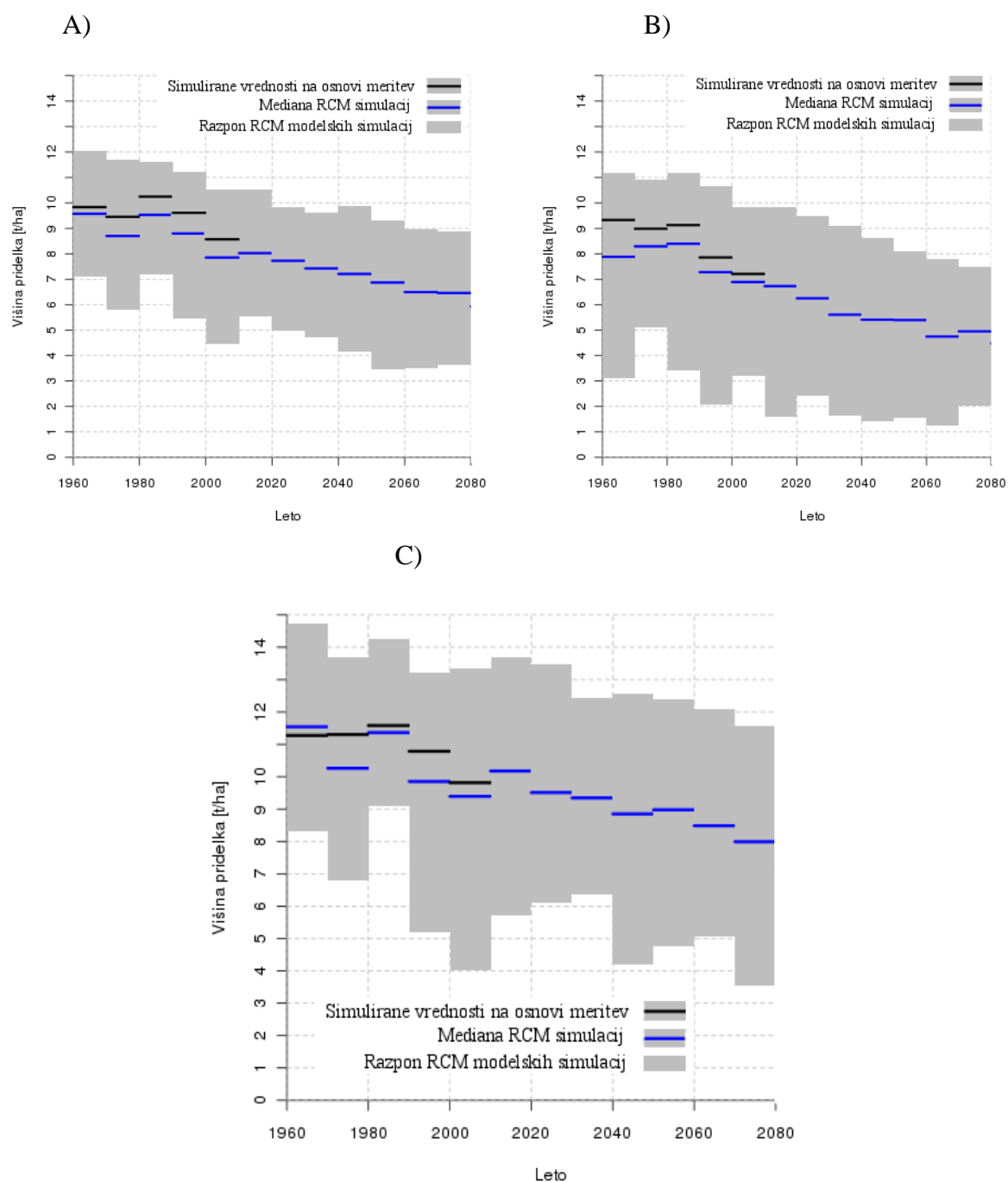
(slika 17). V zadnjem desetletju je tveganje za zmanjšán pridelek v vseh krajih povečano, še zlasti pri talnih tipih peščena ilovica in grobi pesek.



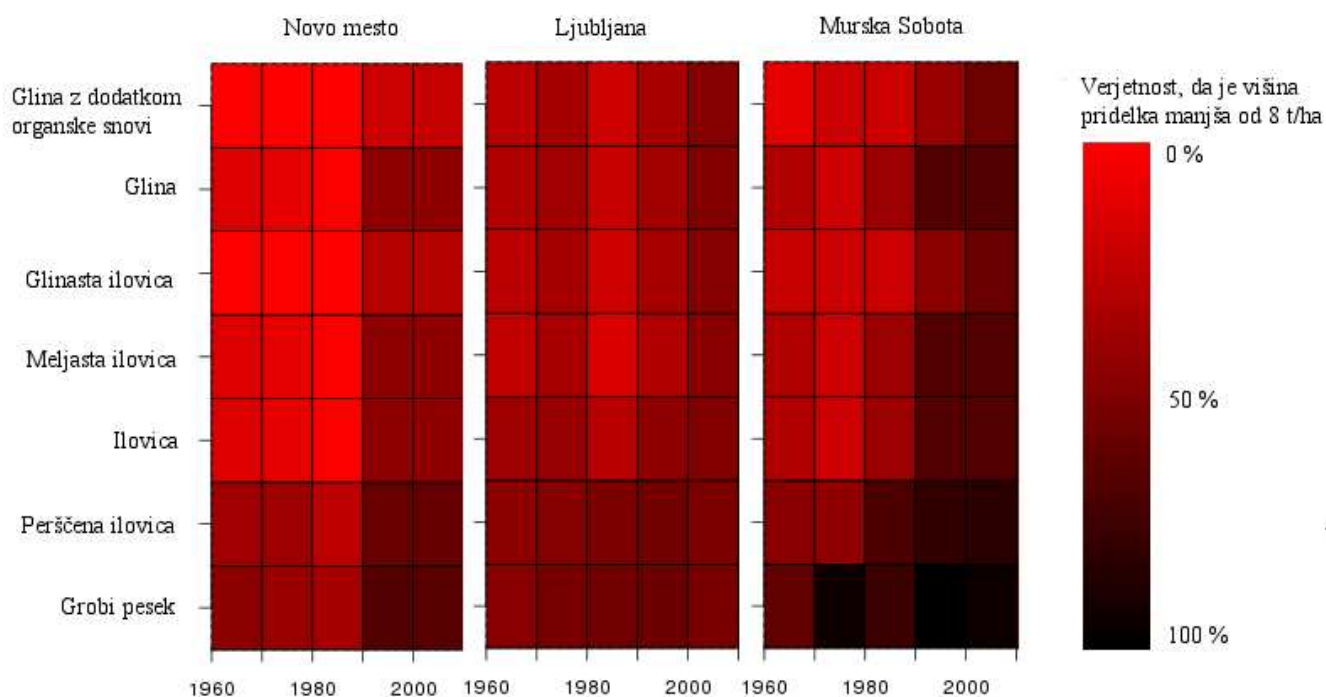
Slika 14: Modelirane količine padavin, izračunane za 10-letna obdobja na osnovi meritev (črne oznake) in simulacij regionalnih klimatoloških modelov (RCM) (modre oznake) za obdobje 1961-2008; za obdobje 2009 do 2080 samo na osnovi simulacij RCM za A) Ljubljano B) Mursko Soboto in C) Novo mesto. Siva barva označuje razpon RCM modelskih simulacij.



Slika 15: Modelirane maksimalne temperature zraka (rdeče območje) in minimalne temperature zraka (modro območje), izračunane za 10-letna obdobja na osnovi meritev (črne oznake) in simulacij regionalnih klimatoloških modelov (RCM) (modre oznake) za obdobje 1961-2008; za obdobje 2009 do 2080 samo na osnovi simulacij RCM za A) Ljubljano B) Mursko Soboto in C) Novo mesto.

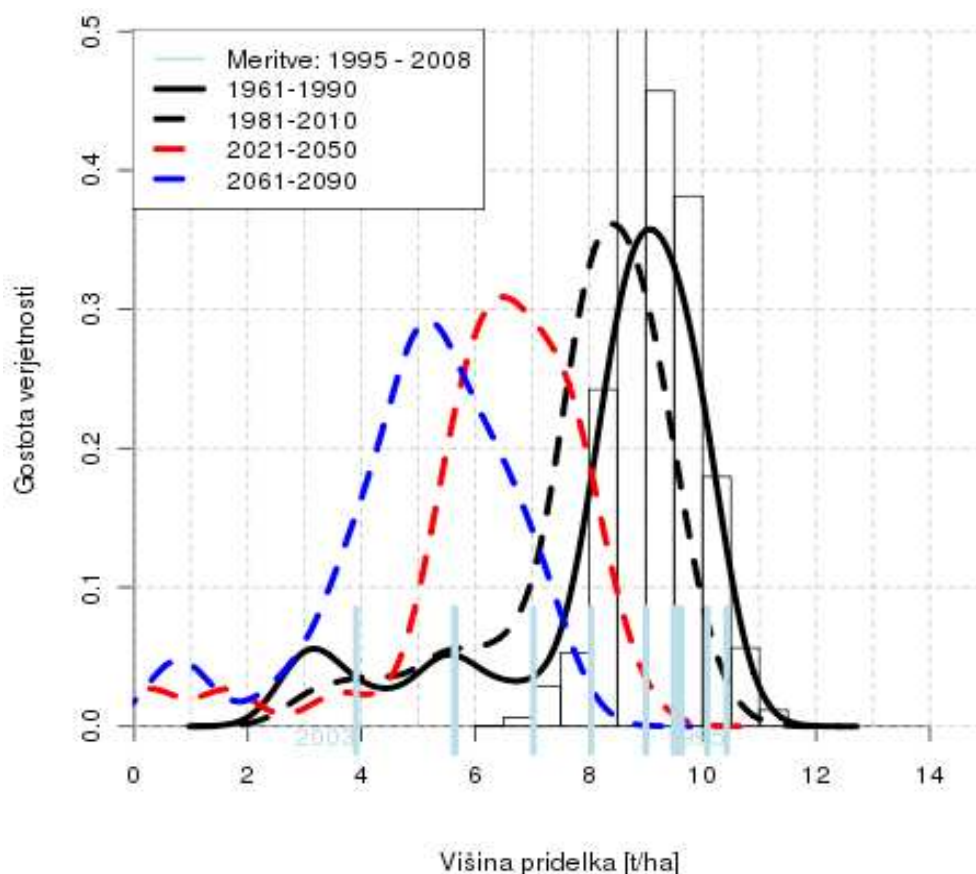


Slika 16: Modelirane višine pridelka koruze, izračunane za 10-letna obdobja na osnovi meritev meteoroloških parametrov (črne oznake) in simulacij regionalnih klimatoloških modelov (RCM) (modre oznake) za obdobje 1961-2008; za obdobje 2009 do 2080 samo na osnovi simulacij RCM za A) Ljubljano B) Mursko Soboto in C) Novo mesto. Siva barva označuje razpon RCM modelskih simulacij



Slika 17: Ocena tveganja za zmanjšanje pridelka koruze pod 8 t/ha glede na prevladujočo teksturo tal, narejena na osnovi meritev meteoroloških spremenljivk za obdobje 1960-2008 za Novo mesto, Ljubljano in Mursko Soboto.

Da bi v izdelavi scenarijev pridelka koruze upoštevali kar vse obravnavane vire negotovosti, smo v ta namen izdelali funkcije gostote verjetnosti pridelka (Slika 18). Ta nam prikazuje, kakšna je verjetnost za določeno višino pridelka na primeru Murske Sobote. Na sliki lahko primerjamo porazdelitve, ki se nanašajo na različna obdobja. Vrhova porazdelitev pridelka v sredini ter ob koncu stoletja sta pomaknjena k nižjim vrednostim, poleg tega pa lahko opazimo tudi nekoliko večjo širino krivulj, kar pomeni večjo variabilnost pridelka. Pomik porazdelitev v levo pomeni, da bodo višine pridelka, ki so v sedanjih razmerah nizke (kot posledica suše ali vročinskega stresa), povsem nekaj običajnega. Z večjo variabilnostjo pa prihajajo tudi večje razlike med leti.



Slika 18: Porazdelitev simulirane višine pridelka v sedanjih klimatskih razmerah (referenčno obdobje 1961-1990 ter primerjalno obdobje 1981-2010) ter prihodnjih klimatskih razmerah (obdobji 2021-2050 ter 2061-2090) na osnovi simulacij klimatskih modelov. V izračunu gostote porazdelitev so bili upoštevani viri negotovosti parametrov modela WOFOST, strukture klimatskih modelov ter napake meritev pridelka. V izračunih smo predpostavili emisijski scenarij A1B.

6. Sklepi

V študiju vpliva klimatskih sprememb na višino pridelka koruze smo poleg ocen za spremembo povprečne višine pridelka ovrednotili tudi negotovost samih napovedi. Ocena negotovosti je ključnega pomena, saj lahko le na ta način prikažemo, kako gotovi smo, da bo do izračunanih sprememb res prišlo. Žal je vse vire negotovosti v tako obsežnem računskem sistemu težko zajeti, zato je pomembno, da se zavedamo tudi predpostavk, na osnovi katerih smo prišli do končnih rezultatov. Primer obravnave višine pridelka koruze v Murski Soboti je pokazal, da so pričakovane spremembe v okviru naravne klimatske variabilnosti v višini pridelka tekom 21. stoletja višje kot negotovosti parametrov WOFOST-a ter negotovosti izbire klimatskega modela. Tako lahko ob predpostavki, da se bo uresničil emisijski scenarij A1B, z veliko gotovostjo rečemo, da se bo višina pridelka koruze (hibrida Furio) zmanjševala, hkrati pa se bo povečevala variabilnost samega pridelka.

Študija na področju občutljivosti kmetijske pridelave na vremensko variabilnost je omogočila poglobljanje znanja o kompleksnih interakcijah med klimatskim sistemom ter fenološkim razvojem izbranih kmetijskih rastlin, umerjen model rastlinske produkcije pa služi lahko tudi kot osnova za izbiro optimalnih rastlin oz. kolobarjev ter strategije namakanja v Sloveniji za nove podnebne razmere. Rezultati na osnovi kvantitativne ocene kmetijskega pridelka omogočajo boljše prilagajanje kmetijske pridelave v Sloveniji novemu podnebju. Prilagajanje pa je sorazmerno počasen proces, s katerim bi bilo zato potrebno začeti čimprej.

7. Literatura

- Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., Oberforster, M. 2002. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Global Change Biology*, 8, 372-389.
- Baigorria, G. A., Jones, J. W., O'Brien, J. J. 2008. Potential predictability of crop yield using an ensemble climate by a regional circulation model. *Agric. and forest Met.*, 148, 1353-1361.
- Bergant, K. 2003. Projekcije simulacij globalne klime na lokalni nivo in njihova uporaba v agrometeorologiji. Doktorska disertacija, Ljubljana, 170 str.
- Boogard, H. L., Van Diepen, C. A., Rötter, R. P., Cabrera, J. C. M. A., Van Laar, H. H. 1998. WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 5.1. Techn. Doc. 52, Alterra, WUR, Wageningen, The Netherlands, 144 str.
- Boons-Prins, E. R., De Koning, G. H. J., Van Diepen, C. A., Penning de Vries, F. W. T. 1993. Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European Community. Simulation Reports CABO-TT 32. CABO-DLO, WAU-TPE, Wageningen.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, 88, 704-716.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B. and Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.
- Brown, R. A., Rosenberg, N. J. 1997. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 83, 171-203.
- Cantelaube, P., Terres, J.M., Doblaz-Reyes, F.J. 2004. Climate variability influences on European agriculture. Analysis for winter wheat production. *Climate Research*, 27: 135-144.
- Cantelaube, P., Terres, J.M. 2004. Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus A*, 57, 3, 476-487.
- Ceglar, A., Kajfež-Bogataj, L. 2008. Obravnavna meteorološke suše z različnimi indikatorji. *Acta agriculturae Slovenica*, 91(2), 407-425.
- Challinor, A. J., Wheeler, T. R. 2008. Use of a crop model ensemble to quantify CO₂ stimulation of water-stressed and well watered crops. *Agricultural and forest meteorology*, 148, 1062-1077.
- Challinor, A. 2009. Towards the development of adaptation options using climate and crop yield forecasting at seasonal to multi-decadal timescales. *Environmental Science and Policy*, 12, 4, 453-465.
- Chen, C., Wang, E., Yu, Q. 2010. Modelling the effects of climate variability and water management on crop water productivity and water balance in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97, 8, 1175-1184.
- Ceglar, A., Črepinšek, Z., Kajfež-Bogataj, L., Pogačar, T. 2010. The simulation of phenological development in dynamic crop model: the Bayesian comparison of different methods. *Agricultural and Forest Meteorology* (v tisku). DOI 10.1016/j.agrformet.2010.09.007.
- Čergan, Z. 2008. Morfologija koruze. V: Čergan, Z., Jejčič, V., Knapič, M., Modic, Š., Moljk, B., Poje, T., Simončič, A., Sušin, J., Urek, G., Verbič, J., Vrščaj, B., Žerjav, M. *Koruzna, Založba Kmečki glas*, Ljubljana, str. 22-40.
- de Jong, R., Li1, K. Y. , Bootsma, A., Huffman, T., Roloff, G., Gameda, S. 2007. Crop Yield and Variability under Climate Change and Adaptative Crop Management Scenarios. Final Report for Climate Change Action Fund Project A080.
- De Koning, G.H.J., Van Diepen, C.A. 1992. Crop production potential of rural areas within the European communities. IV. Potential, water-limited and actual crop production. Working document W68, Netherlands Scientific Council for Government Policy, The Hague, The Netherlands, 83 str.
- Ding-Rong, W., Zhu, O., Xiao-Min, Z., Qiang, Y., Yi, L. 2003. The applicability research of WOFOST model in north China plain. *Acta Phytocologica Sinica*, 27(5), 594-602.

- Dixon, B. L., Hollinger, S. E., Garcia, P., Tirupattur, V. 1994. Estimating Corn Yield Response Models to Predict Impacts of Climate Change. *Journal of Agricultural and Resource Economics*. 19(1), 58-68.
- Dubrovsky, M., Zalud, Z., Stastna, M. 2000. Sensitivity of CERES-Maize yields to statistical structure of daily weather series. *Climatic Change* 46, 447- 472.
- Dubrovsky, M., Šťastná, M., Trnka, M., Žalud, Z. 2001. Determination of the production for Winter Wheat under 1×CO₂ and 2×CO₂ climatic conditions. *Bioklimatologické pracovné dni 2001*.
- Dubrovsky, M., Zalud, Z., Eitzinger J., Trnka, M., Semeradova, D. 2003. PERUN System and its application for assessing the crop yield potential of the Czech republic. *Geophysical Research Abstracts*, str. 5.
- Dubrovsky, M., Žalud, Z., Šťastná, M., Trnka, M. 2000. Impact of climate change on crop production potential - objectives and methodology. V: *Sborník z konference "Bioklimatologia a zivotne prostredie"*. 1. vyd. Košice: 2000.
- Easterling, W.E., Aggarwal, P.K., Batima, P., Brander, K.M., Erda, L., Howden, S.M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J.-F., Schmidhuber, J., Tubiello, F. N., 2007. Food, fibre and forest products. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 273-313.
- Eitzinger, J., Gruszczynski, G., Schneider, W., Suppan, F., Koukal, T., Trnka, M., 2005. Comparison of different methods for estimation of drought impacts on crop yield on the field scale in Austria. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 08568.
- Ewert, F.I, Rodriguez, D., Jamieson, P., Semenov, M.A., Mitchell, R.A.C., Goudriaan, J., Porter, J.R., Kimball, B.A., Pinter, P.J., Manderscheid, R., Weigel, H.J., Fangmeier, A., Fereres, E., Villalobos, F. 2002. Effects of elevated CO₂ and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93, 249-266.
- Grieser, J., Gommel, R., Bernardi, M. 2007. From Climate Change to Crop-Yield Change. *EGU2007-A-09480*.
- Hanssen-Bauer, I., Achberger, C., Benestad, R. E., Chen, D., Forland, E. J. 2005. Statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia. *Climate Research*, 29, 255-268.
- Havlinka, P., Trnka, M., Semeradova, D., Dubrovsky, M., Žalud, Z., Možny, M., 2008. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. *Agricultural and forest meteorology*, 149, 3-4, 431-442.
- Hewitt, C.D. 2005. The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. *EGGS newsletter*, 13, 22-25.
- Högy, P., Fangmeier, A. 2008. Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, 48, 580-591.
- Hulme, M., Brown, O. 1998. Portraying climate scenario uncertainties in relation to tolerable regional climate change. *Climate Research*, 10, 1-14.
- Janssen, B. H, Guilking, F. C. T., Eijk, D. van der., Smaling, E. M. A., Wolf J., Reuler, H. van. 1990. A system for quantitative fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46 (1990), 299-318.
- Jasper, K., Calanca, P., Gyalistras, D., Fuhrer, J. 2004. Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research*, 26, 113-129.
- Jindong, W., Shili, W. 2001. Incorporating stochastic weather generators into studies on climate impact: methods and uncertainties. *Advance in Atmospheric Sciences*, 18(5), 937-949.
- Kajfež-Bogataj, L. 2005. Podnebne spremembe in ranljivost kmetijstva. *Acta agriculturae Slovenica*. 85, 25-40.
- Keulen, H. van, Wolf, J. (Eds.) 1986. Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen.

- Koning, G. H. J. de, Diepen, C. A. van. 1992. Crop production potential of the rural areas within the European Communities. IV: Potential, water-limited and actual crop production. Technical working document W68. The Hague.
- Lanen, H. A. J, Diepen, C. A. van, Reinds, G. J., Koning, G. H. J. de, Bulens, J. D., Bregt, A. K. 1992. Physicalland evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European Communities. *Agricultural systems*, 39, 307-328.
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H. 2004. European seasonal and annual temperature variability. Trends and extremes since 1500. *Science* 303, 1499-1503.
- Mathe-Gaspar, G., Fodor, N., Pokovai, K., Janos-Kovacs, G. 2005. Crop modelling as a tool to separate the influence of the soil and weather on crop yields. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 165-169.
- Mearns, L.O., Rosenzweig, C., Goldberg, R. 1992. Effect of changes in interannual climatic variability on CERES-Wheat yields: sensitivity and 2 x CO₂ general circulation model studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62, 159-189.
- Mearns, L.O., Rosenzweig, C., Goldberg, R. 1996. The effect of changes in daily and interannual climatic variability on CERES-Wheat: a sensitivity study. *Climatic Change*, 32, 257-292.
- Meza, J., F., Silva, D., Vigil, H. 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems*, 1, 21-30.
- Pogačar, T., Kajfež-Bogataj, L. 2009a. WOFOST: model za napovedovanje pridelka - 1. del, *Acta agric. Slov.*, 93, 2, 231-243.
- Pogačar, T., Kajfež-Bogataj, L. 2009b. WOFOST: model za napovedovanje pridelka - 2. del, *Acta agric. Slov.*, 93, 2, 245-257.
- Porter, J. R., Semenov, M. A. 2005. Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360, 2021-2035.
- Ritchie, J.T., Otter, S. 1984. Description and performance of CERES-Wheat a user-oriented wheat yield model USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory Temple TX, 159-175.
- Semenov, M. A., Barrow, E. M. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35, 397-414.
- Semenov, M.A. 2007. Development of high resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144, 127-138.
- Semenov, M.A. 2008. Ability of a stochastic weather generator to reproduce extreme weather events, *Climate Research*, 35, 203-212.
- Semenov, M.A., Porter, J.R. 1995. Climatic variability and the modelling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73, 265-283.
- Slafer, G. A., Rawson, H. M. 1995. Base and optimum temperatures vary with genotype and stage of development in wheat. *Plant Cell Environment*, 18, 671-679.
- Spitters, C. J. T., Keulen, H. van, Kraalingen, D. W. G. van, 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. V: Rabbinge, R., Ward, S., Laar, H. van (Eds.). 1989. Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen.
- Stöckle, C., Donatelli, M., Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289-307.
- Sun, L., Li, H., Ward, M. N. 2005. Climate Variability and Corn Yields in Semiarid Ceará, Brazil. *Journal of applied meteorology and climatology*. 46, 226-240.
- Supit, I., Goot, E. van der, 2008. Updated system description of the WOFOST crop growth simulation model, dokument za Evropsko komisijo. <http://supit.net/main.php?q=aXRlbV9pZD01OQ==> [Uporabljeno 23. 9. 2010].
- Tebaldi, C., Lobell, D. B. 2008. Towards probabilistic projections of climate change impacts on global crop yields. *Geophysical research letters*, 35, L08705.

- Thaler, S., Eitzinger, J., Rischbeck, P.M., Dubrovsky, M., Trnka, M. 2008. Climate change impacts and possible adaptations on selected crops in Marchfeld, Eastern Europe. Austrian Science and Research Liason Office (ASO). Global environmental change: Challenges to science and society in southeastern Europe, 19-21 May 2008, Sofia.
- Thornley, J.H.M., Johnson, I.R. 1990. Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford University Press, 684 str.
- Todisco, F., Vergni, L. 2008. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agricultural and forest meteorology*, 148, 1-11.
- Trnka, M., Dubrovsky, M., Semerádová, D., Žalud, Z. 2003. Projections of uncertainties in climate change scenarios into expected winter wheat yields. *Theoretical and Applied Climatology*, 77, 229-249.
- Van Diepen, C. A., Wolf, J., Van Keulen, H., Rappoldt, C. 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5, 16-24.
- Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L., Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18, 201-234.
- Van Keulen H., Seligman, N.G. 1987. Simulation of water use nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monograph*, Pudoc, Wageningen.
- Weir, P.L., Bragg, J.R., Porter, J.R., Rayner, J.H. 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci. Cambridge* 102, 371-382.
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W. 2006. Working with dynamic crop models. First edition. Hardbound, 462 str.
- Whisler, R., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon, J.M. McKinion, Reddy, V.R. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40, 141-208.
- Williams, J.R., C.A. Jones, J.R. Kiniry, Spanel, D.A. 1989. The EPIC crop growth model. *Trans. ASAE* 32, 497-511.
- Wolf, J. 1993. Effects of climate change on the grain maize production potential in E. C. Report Department of Theoretical Production Ecology, Wageningen University, The Netherlands, 60 str.
- Wolf, J., Berkhout, J. A. , Diepen C. A. van, Immerzeel, C. van, 1989. A study on the limitations to maize production in Zambia using simulation models and a geographic information system. V: Bouma, J., Brecht, A. K. (Eds.). *Land qualities in space and time, proceedings of a symposium, International society of soil science (ISSS), Pudoc, Wageningen, 1989: 209-215.*
- Wolf, J., van Diepen, C. A. 1991. Effects of climate change on crop production in the Rhine basin. Report 52. RIZA, SC-DLO, Wageningen.
- Wolf, J., van Diepen, C.A. 2007. Effects of climate change on yield potential of wheat and maize crops in the European Union. *Studies. Environmental Science, Volume 65, Part 2, 745-750.*
- Žagar, T., Kajfež-Bogataj, L., Črepinšek, Z. 2006. Časovna analiza nekaterih klimatskih spremenljivk v Sloveniji. *Acta agriculturae Slovenica*. 87-2, 285-298.