

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Tjaša POGAČAR

**MODELIRANJE VPLIVA VREMENA IN PODNEBJA
NA RAST IN PRIDELEK TRAVNE RUŠE V
SLOVENIJI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Tjaša POGAČAR

**MODELIRANJE VPLIVA VREMENA IN PODNEBJA NA RAST IN
PRIDELEK TRAVNE RUŠE V SLOVENIJI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

**MODELLING OF WEATHER AND CLIMATE IMPACTS ON
GROWTH AND YIELD OF GRASS SWARD IN SLOVENIA**

DOCTORAL DISSERTATION

Ljubljana, 2015

Na podlagi Statuta Univerze v Ljubljani ter po sklepu Senata Biotehniške fakultete in sklepa Senata Univerze z dne 4. 11. 2010 je bilo potrjeno, da kandidatka izpolnjuje pogoje za neposreden prehod na doktorski Podiplomski študij bioloških in biotehniških znanosti ter opravljanje doktorata znanosti s področja agronomije. Za mentorico je bila imenovana prof. dr. Lučka Kajfež Bogataj.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: doc. dr. Zalika ČREPINŠEK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Član: doc. dr. Klemen BERGANT
Univerza v Novi Gorici, Center za raziskave atmosfere

Član: doc. dr. Jure ČOP
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Datum zagovora: 21. 12. 2015

Podpisana izjavljam, da je disertacija rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Tjaša Pogačar

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dd
DK	UDK 551.586:551.506.8:581.54:633.2:631.559 (043.3)
KG	model rastlinske pridelave/travna ruša/umerjanje/navadna pasja trava/trpežna ljuljka/travniški mačji rep/pridelek suhega zelinja/suša
AV	POGAČAR (IPAVEC), Tjaša, univ. dipl. meteorol.
SA	KAJFEŽ BOGATAJ, Lučka
KZ	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Podiplomski študij bioloških in biotehniških znanosti, področje agronomije
LI	2015
IN	MODELIRANJE VPLIVA VREMENA IN PODNEBJA NA RAST IN PRIDELEK TRAVNE RUŠE V SLOVENIJI
TD	Doktorska disertacija
OP	XXI, 133 str., 26 pregl., 60 sl., 7 pril., 137 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Na rast in pridelek travne ruše imata velik vpliv podnebje in vreme. Obravnava začetka cvetenja navadne pasje trave v obdobjih 1968–1983 in 1998–2013 je pokazala, da to v drugem obdobju nastopi prej. Korelacije s povprečnimi temperaturami zraka so v drugem obdobju manj izrazite in časovno zamaknjene nazaj. Za modeliranje smo izbrali nizozemski model LINGRA-N. Uporabili smo podatke iz dveh poskusov na trajnem travinju in petih na travnih monokulturah v Jabljah in Rakičanu. Parametre smo za vsak poskus posebej umerjali na podatkih lihih let z metodo zmanjševanja korena povprečne kvadratne napake (<i>RMSE</i>) simuliranih vrednosti pridelka suhega zelinja travne ruše (pridelek) glede na izmerjene. Kakovost simulacij smo preverili z <i>RMSE</i> v sodih in vseh letih ter z Willmottovim kazalcem ujemanja. Modela s podatki za trajno travinje in travniški mačji rep v Rakičanu nismo uspeli dovolj dobro umeriti. Najboljši so rezultati umerjanja za navadno pasjo travo v Jabljah. Rast in pridelek travne ruše smo simulirali v obdobju 1964–2013 za štiri različne umeritve modela: za navadno pasjo travo, trpežno ljuljko in travniški mačji rep v Jabljah ter za trpežno ljuljko v Rakičanu. Potencialni pridelek ni v nobenem primeru statistično značilno odvisen niti od posameznih meteoroloških spremenljivk niti od njihove kombinacije. Na primerih izstopajočih let lahko zaključimo, da se pridelek zmanjša v izrazito sušnih ali sušnih in vročih letih. Pri potencialnem pridelku se je pokazal negativen trend v Jabljah za trpežno ljuljko in travniški mačji rep. Spremenjena variabilnost pridelka se v Jabljah kaže v drugi polovici obdobja s pojavljanjem osamelcev. Variabilnost faktorja zmanjšanja rasti zaradi suše se je v drugi polovici obdobja povečala. Pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka za 1, 2 in 3 °C (in koncentraciji CO₂ 360, 540 in 720 ppm) glede na obdobje 1964–1988 se je v večini primerov mediana pridelka zmanjšala. Ob nespremenjeni koncentraciji CO₂ so pridelki še manjši. V vseh treh primerih v Jabljah so se pri pridelku začeli pojavljati osamelci (eden do trije). Kaže se nadaljnja potreba po modeliranju za različne travne monokulture, še večji izziv pa bo uspeti pri trajnem travinju.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dd

DC UDC 551.586:551.506.8:581.54:633.2:631.559 (043.3)

CX crop model/grass sward/calibration/cock's foot/perennial ryegrass/timothy grass/herbage dry matter yield/drought

AU POGAČAR (IPAVEC), Tjaša

AA KAJFEŽ BOGATAJ, Lučka

PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Postgraduate Study of Biological and Biotechnical Sciences, Field: Agronomy

PY 2015

TI MODELLING OF WEATHER AND CLIMATE IMPACTS ON GROWTH AND YIELD OF GRASS SWARD IN SLOVENIA

DT Doctoral dissertation

NO XXI, 133 p., 26 tab., 60 fig., 7 ann., 137 ref.

LA sl

AL sl/en

AB The major part of grass sward yield variability can be attributed to weather and climate conditions. The analysis of the beginning of flowering of cock's foot in periods 1968–1983 and 1998–2013 showed a significant shift to earlier dates in the second period. Correlations of the beginning of flowering and average air temperatures are weaker in the second period and mostly shifted back by one month. The Dutch LINGRA-N model was chosen for the modelling part of the research. Two experiments on permanent grassland and five on grass monocultures in Jablje and Rakičan were used. Parameters were calibrated with odd years' data for each experiment separately using the root mean square error (*RMSE*) minimisation method between the simulated and measured herbage dry matter yield (yield). Validation was performed using *RMSE* for even and all years, and Willmott's index of agreement. Calibration was successful neither on permanent grassland nor on timothy grass in Rakičan. The best results were obtained from calibration on cock's foot in Jablje. The grass sward growth and yield was simulated over the period 1964–2013 using four different versions of the calibrated model: for cock's foot, perennial ryegrass and timothy grass in Jablje, and for perennial ryegrass in Rakičan. The potential yield is not in any case dependent on separate meteorological variables nor on their combination. Based on specific years' results it can be concluded that the yield is reduced in extremely dry or dry and hot years. A negative trend was detected in the potential yield for perennial ryegrass and timothy grass in Jablje. Changed variability in the simulated yield is showing in the appearance of outliers in the second half of the period in Jablje. The variability of the growth reduction factor due to drought increased. With the increase of minimum and maximum air temperatures by 1, 2 and 3°C (with CO₂ concentrations 360, 540 and 720 ppm, respectively) with regard to the period 1964–1988, the yield median decreased in most of the cases. The medians were even lower when the CO₂ concentration stayed unchanged. Outliers (one to three) appeared in Jablje. There is a further need for modelling for various grass monocultures, and as a greater challenge also for permanent grasslands.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	X
KAZALO PRILOG	XVI
KRATICE IN SIMBOLI	XVII
SLOVARČEK POJMOV	XX
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 NAMEN RAZISKAVE	2
1.3 HIPOTEZE.....	4
2 PREGLED OBJAV.....	5
2.1 TRAVNA RUŠA	5
2.1.1 Vrste trav	6
2.2 FENOLOŠKI RAZVOJ TRAVNE RUŠE	8
2.3 PRIDELKI IN GNOJENJE	10
2.4 KOŠNJA.....	12
2.5 MODELI ZA SIMULIRANJE RASTI IN PRIDELKA TRAVNE RUŠE.....	13
2.6 UPORABA MODELA LINGRA	21
2.7 RAZISKAVE VPLIVOV VREMENSKIH RAZMER NA RAST IN PRIDELEK TRAVNE RUŠE....	23
2.7.1 Vpliv suše	24
2.8 RAZISKAVE VPLIVOV PODNEBNIH SPREMENB NA RAST IN PRIDELEK TRAVNE RUŠE ..	28
2.9 PRIČAKOVANE SPREMENBE TEMPERATUR ZRAKA IN PADAVIN V SLOVENIJI	32
2.10 PODNEBNE SPREMENBE IN FENOLOŠKI RAZVOJ	34
2.11 ANALIZA OBČUTLJIVOSTI IN UMERJANJE MODELA	35
2.12 NEGOTOVOSTI, KI SE POJAVLJAJO PRI MODELIRANJU	37
3 MATERIAL IN METODE DE LA	39
3.1 FENOLOŠKI PODATKI.....	39
3.2 TRAVNIŠKI POSKUSI – VHODNI PODATKI ZA UMERJANJE IN UPORABO MODELA	
LINGRA-N	40
3.2.1 Meritve pridelka suhega zelinja travne ruše	41
3.2.2 Gospodarjenje s travno rušo	48
3.2.3 Ekofiziološki parametri travne ruše	50
3.2.4 Pedološki vhodni podatki	54
3.2.5 Meteorološki vhodni podatki	55

3.3	ANALIZA FENOLOŠKIH PODATKOV	62
3.4	MODEL LINGRA-N	62
3.4.1	Opis izračunov, ki jih uporablja LINGRA-N	64
3.4.2	Izhodni podatki	73
3.5	UMERJANJE IN PREVERJANJE MODELA	75
3.6	SIMULACIJE RASTI IN PRIDELKA TRAVNE RUŠE	77
4	REZULTATI Z DISKUSIJO	79
4.1	REZULTATI ANALIZE FENOLOŠKIH PODATKOV	79
4.1.1	Primerjava začetka cvetenja v dveh obdobjih	79
4.1.2	Povezave nastopa cvetenja in temperaturnih razmer	82
4.1.3	Vsote aktivnih temperatur zraka	84
4.2	REZULTATI UMERJANJA MODELA LINGRA-N	85
4.2.1	Vplivnejši parametri	85
4.2.2	Poskusa S72 in S9	86
4.2.3	Poskusi v Jabljah (J) in Rakičanu (R)	87
4.3	MODELSKI REZULTATI	96
4.3.1	Pridelek v obravnavanem 50-letnem obdobju	96
4.3.2	Vpliv suše na pridelek	98
4.3.3	Analiza letnega poteka potencialnega pridelka in komponent rasti v povezavi z vplivnimi spremenljivkami v izbranih letih	101
4.3.4	Učinkovitost izrabe sončnega obsevanja in dušika	106
4.3.5	Primer uporabe modela LINGRA-N za simulacijo vpliva povišanih temperatur zraka	109
4.4	ZAKLJUČKI	114
5	SKLEPI	118
6	POVZETEK (SUMMARY)	120
6.1	POVZETEK	120
6.2	SUMMARY	122
7	VIRI	124
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Datumi začetka latenja in cvetenja nekaterih vrst trav v osrednji Sloveniji (fenološka postaja Ljubljana, 1997–2014) (Fenologija v Sloveniji, 2015: 71).....	10
Preglednica 2: Izbor in splošen opis modelov, razvitih za napovedovanje rasti travne ruše (Barrett in Laidlaw, 2005: 81)	15
Preglednica 3: Pregled lastnosti nekaterih modelov za rast in pridelek travne ruše (Taubert in sod., 2012: 86).....	17
Preglednica 4: Prikaz zapisov opažanj večjih vplivov suše na travinje v Agrometeoroloških biltenih ARSO v obdobju 1973–2009 (Sušnik in Pogačar, 2010a: 303).....	27
Preglednica 5: Izbrane fenološke postaje za analizo cvetenja navadne pasje trave (<i>Dactylis glomerata</i> L.), ki so delovale v obdobjih 1968–1983 in 1998–2013 in nimajo več kot treh manjkajočih podatkov. Dodane so najbližje meteorološke postaje in razdalje med postajama. Oranžno: postaje, ki jih lahko zaradi neprimernosti meteorološke postaje uporabimo le za analizo fenoloških podatkov.	40
Preglednica 6: Pregled uporabljenih poskusov, obdobj, v katerih so potekali, njihovih lokacij, najbližjih meteoroloških postaj in izvajalcev (J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep, BF-Biotehniška fakulteta, KIS-Kmetijski inštitut Slovenije).....	45
Preglednica 7: Pregled let, v katerih so potekali poskusi v Jabljah in Rakičanu za izbrane vrste trav (DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep). Oranžno: leta, ki smo jih izločili zaradi prevelikih odstopanj, povezanih večinoma s starostjo travne ruše.	46
Preglednica 8: Povprečni datumi košenj pred umerjanjem ter stopnja gnojenja z dušikom za vse obravnavane poskuse (S72-poskus v Ljubljani, S9-poskus v Brestanici, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep)	48
Preglednica 9: Parametri iz datoteke MANAGG.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali.	49
Preglednica 10: Parametri iz datoteke CROPG1.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali.	50
Preglednica 11: Tabelarični parametri iz datoteke CROPG1.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja.	

Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali (<i>RUE</i> -učinkovitost izrabe sončnega obsevanja).....	53
Preglednica 12: Parametri iz datoteke SOILG1.dat modela LINGRA-N za Jablje s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali.	54
Preglednica 13: Podatki o vsebnosti vode v tleh pri poljski kapaciteti, točki venenja in pri nasičenju za Ljubljano (S72), Brestanico (S9), Jablje in Rakičan	55
Preglednica 14: Dnevni meteorološki podatki, ki jih potrebujemo za simulacije z modelom LINGRA-N.....	56
Preglednica 15: Obravnavanim poskusom najbližje meteorološke postaje in obdobje, za katerega smo potrebovali podatke, ter zaradi manjkajočih podatkov potrebni kombinaciji z drugo postajo (S9-poskus v Brestanici, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep).....	56
Preglednica 16: Letne in dnevne izhodne spremenljivke modela LINGRA-N.....	74
Preglednica 17: Koraki (1.–4.) postopnega umerjanja parametrov modela. Kratice so razložene v preglednicah 9–12.....	75
Preglednica 18: Nadaljnji koraki (5.–12.) postopnega umerjanja parametrov modela, zadnja dva koraka sta specifična za J-DG. Kratice so razložene v preglednicah 9–12.....	75
Preglednica 19: Povprečni dan nastopa cvetenja navadne pasje trave ($\bar{a}$) in pripadajoč standardni odklon (σ) v prvem (1968–1983) in drugem obdobju (1998–2013) ter razlika med povprečjema za 12 obravnavanih fenoloških postaj.....	82
Preglednica 20: Korelacije dneva nastopa cvetenja s povprečnimi temperaturami zraka za en mesec, dva ali tri od januarja do maja za 8 fenoloških postaj (v oklepaju sta navedeni pripadajoči meteorološki postaji, preostale so istoimenske) za vsako obdobje posebej. Izpisani so le koeficienti korelacije, ki so statistično značilni pri stopnji značilnosti 0,05 (za vsako postajo je v vsakem obdobju oranžno obarvan največji).	83
Preglednica 21: Povprečna vsota aktivnih temperatur zraka ($\overline{T_{sum}}$) in pripadajoč standardni odklon (σ) v prvem (1968–1983) in drugem obdobju (1998–2013) za 8 fenoloških postaj (v oklepaju sta navedeni pripadajoči meteorološki postaji, preostale so istoimenske).....	84
Preglednica 22: Levo: privzete vrednosti parametrov modela LINGRA-N, katerih vpliv je majhen in jih nismo umerjali. Desno: privzete vrednosti parametrov, katerim vrednosti določimo po navodilih avtorja modela. Kratice so opisane v poglavju 3.5 (Preglednica 9–Preglednica 12).....	85

Preglednica 23: Privzete vrednosti parametrov modela LINGRA-N, ki smo jih umerili za obdobje 1998–2013 (z manjkajočimi leti), in rezultati umeritve za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep (J-PP) v Jabljah ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP). Kratice so opisane v poglavju 3.5 (Preglednica 9–Preglednica 12)..... 88

Preglednica 24: Število meritev (n), povprečni letni izmerjeni pridelek ($\bar{o}$) in standardni odklon (σ_o) ter povprečni letni simulirani pridelek ($\bar{p}$) in standardni odklon (σ_p) pri obravnavanih poskusih (S72-poskus v Ljubljani, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep) 93

Preglednica 25: Koren povprečne kvadratne napake ($RMSE$), njegova relativna vrednost ($RMSE\%$), njegov sistematični ($RMSE\%_s$) in nesistematični ($RMSE\%_u$) del, relativna vrednost za soda leta ($RMSE\%_{soda}$) ter kazalec ujemanja (d_w) za oceno kakovosti modela LINGRA-N pri obravnavanih poskusih (S72-poskus v Ljubljani, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep)..... 95

Preglednica 26: Z oranžno so označena leta, ko je pridelek zmanjšan (pod 90 % povprečne vrednosti)*: polno, ko je hkrati znižan tudi modelski faktor zmanjšanja rasti zaradi suše ($TRANRF < 0,9$), in mrežasto, ko ni (J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep). 101

KAZALO SLIK

Slika 1: Navadna pasja trava (<i>Dactylis glomerata</i> L.), trpežna ljujka (<i>Loilum perenne</i> L.) in travniški mačji rep (<i>Phleum pratense</i> L.) (Fenologija v Sloveniji, 2015: 69, 71; Robertson, 2015)	7
Slika 2: Razvojne faze trave (Siliranje ..., 2011).....	9
Slika 3: Prostorska porazdelitev produktivnosti travne ruše v Evropi (Smit in sod., 2008: 214).....	11
Slika 4: Povprečna (1990–2001) dejanska stopnja rasti v sezoni v kraju Crossnacreevy na Irskem in štiri različne modelske simulacije stopnje rasti (Barrett in sod., 2004: 331)	16
Slika 5: Opazovana (°) in z modelom LINGRA simulirana (-) skupna masa zelinja v Wageningnu, La Coruni in Saerheimu v letu 1984 pri poskusih brez namakanja (Schapendonk in sod., 1998: 94).....	21
Slika 6: Delež površin po kmetijskih kulturah, ki so doživele škodo po suši leta 2006 (Komisija za odpravo posledic škode v kmetijstvu, 2006, cit. po Sušnik, 2006)	26
Slika 7: Z modelom LINGRA-CC simulirani letni pridelek suhega zelinja trpežne ljujke kot funkcija intervala košnje in indeksa listne površine po košnji (<i>CLAI</i>) pri trenutni (a) in podvojeni (b) koncentraciji CO ₂ v ozračju (Rodriguez in sod., 1999: 366).....	30
Slika 8: Odstopanje povprečne temperature zraka v obdobju 2021–2050 v primerjavi s povprečjem obdobja 1961–1990 po scenariju A1B (Prihodnje ..., 2014).....	33
Slika 9: Odstopanje povprečnih padavin v obdobju 2021–2050 v primerjavi s povprečjem obdobja 1961–1990 po scenariju A1B (Prihodnje ..., 2014).....	34
Slika 10: Izmerjeni pridelek suhega zelinja trpežne ljujke v primerjavi s simuliranim z modelom LINGRA v namakanih (a) in nenamakanih razmerah (b). Prazni simboli označujejo podatke iz južne Evrope, polni pa iz severne Evrope, poskusi so potekali od 1 do 5 let v obdobju 1982–1986 (Schapendonk in sod., 1998: 93).....	37
Slika 11: Shematični prikaz pomembnosti izbire primerne modela glede na dostopne podatke (Characterization ..., 2015)	38
Slika 12: Karta fenoloških postaj (ARSO, 2014), ki delujejo v letu 2014. Označene so postaje, ki smo jih uporabili v analizi. Dopisani sta postaji Bukovžlak (neposredna okolica Celja) in Novi Lazi (neposredna okolica Iskrbe), ki smo ju uporabili, v letu 2014 pa nista več operativni.	39

Slika 13: Povprečni letni pridelki suhega zelinja trajnega travinja na poskusih S72, S80 in S87, gnojenih za optimalni pridelek na poskusnem polju na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani	42
Slika 14: Primerjava povprečnih letnih pridelkov suhega zelinja trajnega travinja pri dvo- in trikosnem sistemu na poskusu S72 v Ljubljani	43
Slika 15: Povprečni letni pridelki suhega zelinja trajnega travinja na poskusih S8, S9 in S10 v okolici Brestanice, gnojenih za optimalni pridelek	44
Slika 16: Poskusno polje v Jabljah (Verbič, 2014).....	44
Slika 17: Poskusno polje v Rakičanu (Verbič, 2014).....	45
Slika 18: Povprečni letni pridelki suhega zelinja vseh vrst trav in metuljnic skupaj po letih rabe za sortne poskuse v Jabljah v obdobju 1992–2006 (Verbič, 2014).....	47
Slika 19: Prikaz lokacij poskusov v Jabljah (rdeči krog) in meteorološke postaje Letališče JP Brnik (modri krog) (Atlas okolja, 2014).....	57
Slika 20: Prikaz lokacij poskusov v Rakičanu (rdeči krog) in meteorološke postaje Murska Sobota (modri krog) (Atlas okolja, 2014)	57
Slika 21: Levo: povprečne najnižje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($T_{min_{VO}}$), povprečne poletne najnižje dnevne temperature zraka (T_{min_P}), povprečne najvišje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($T_{maks_{VO}}$) in povprečne poletne najvišje dnevne temperature zraka (T_{maks_P}) na Brniku v obdobju 1964–2013. Desno: padavine v vegetacijskem obdobju (RR_{VO}), poletne padavine (RR_P) in vsote globalnega obsevanja v vegetacijskem obdobju (RD_{VO}) na Brniku v obdobju 1964–2013.	58
Slika 22: Razčlenitev časovne vrste najvišjih dnevnih temperatur zraka (T_{maks}) na Brniku v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento.....	59
Slika 23: Levo: povprečne najnižje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($T_{min_{VO}}$), povprečne poletne najnižje dnevne temperature zraka (T_{min_P}), povprečne najvišje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($T_{maks_{VO}}$) in povprečne poletne najvišje dnevne temperature zraka (T_{maks_P}) v Murski Soboti v obdobju 1964–2013. Desno: padavine v vegetacijskem obdobju (RR_{VO}), poletne padavine (RR_P) in vsote globalnega obsevanja v vegetacijskem obdobju (RD_{VO}) v Murski Soboti v obdobju 1964–2013.	60
Slika 24: Razčlenitev časovne vrste dnevnih padavin (<i>padavine</i>) v Murski Soboti v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento.....	61
Slika 25: Meteorološka vodna bilanca v vegetacijskem obdobju po letih v obdobju 1964–2013 na Brniku (zgoraj) in v Murski Soboti (spodaj)	61

Slika 26: Shematični prikaz najpomembnejših povezav v modelu LINGRA-N (Wolf, 2006)	64
Slika 27: Primer vpliva sušnega stresa, izraženega s faktorjem zmanjšanja rasti zaradi suše (<i>TRANRF</i>), na delež biomase, ki se razporedi v korenine (<i>FRT</i>) (prirejeno po Agrometeorological modelling ..., 2004: 35)	66
Slika 28: Relativna stopnja odmiranja listov zaradi staranja (<i>RDR_{tb}</i>) kot funkcija povprečne dnevne temperature zraka (<i>T</i>) (prirejeno po Bouman in sod., 1996)	69
Slika 29: Relativna stopnja odmiranja listov zaradi samozasenčenja (<i>RDR_{sh}</i>) kot funkcija indeksa listne površine (<i>LAI</i>) (prirejeno po Bouman in sod., 1996).	70
Slika 30: Relativna stopnja odmiranja listov zaradi sušnega stresa (<i>RDR_{dr}</i>) kot funkcija faktorja zmanjšanja rasti zaradi suše (<i>TRANRF</i>) (prirejeno po Bouman in sod., 1996).	70
Slika 31: Poenostavljena shema delovanja modela LINGRA-N: vhodni podatki (oranžno), glavni deli simulacij (črno), izhodni podatki in nekaj povezav med njimi (zeleno). Razlaga kratic: poglavje 3.4.1.7 in Preglednica 16.	73
Slika 32: Okviri z ročaji za začetek cvetenja navadne pasje trave v dveh obdobjih (1968–1983 in 1998–2013) za 6 fenoloških postaj: Bukovžlak, Vače, Novi Lazi, Ljubljana, Mokronog, Novo mesto.....	80
Slika 33: Okviri z ročaji za začetek cvetenja navadne pasje trave v dveh obdobjih (1968–1983 in 1998–2013) za 6 fenoloških postaj: Podlipje, Postojna, Rateče, Slovenske Konjice, Starše, Zibika.....	81
Slika 34: Letni pridelek suhega zelinja poskusa S72 na travniku v Ljubljani: izmerjene vrednosti pridelka, rezultat simulacije 1., 2., 5. in 7. koraka pri umerjanju modela in simulacija pridelka (<i>GRASS</i>) z umerjenim modelom.....	87
Slika 35: Z umerjenim modelom izračunani letni pridelek suhega zelinja (<i>GRASS</i>) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljujko (J-LP) in travniški mačji rep (J-PP) v Jabljah za obdobje umerjanja 1998–2013	89
Slika 36: Z umerjenim modelom izračunani letni pridelek suhega zelinja (<i>GRASS</i>) za trpežno ljujko v Jabljah (J-LP) in Rakičanu (R-LP) za obdobje umeritve 1998–2013.....	89
Slika 37: Letni pridelek suhega zelinja navadne pasje trave v Jabljah (J-DG): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka pred umerjanjem modela (brez), rezultat simulacije 1., 2. in 6. koraka pri umerjanju modela in simulacija pridelka (<i>GRASS</i>) z umerjenim modelom (simuliran pridelek).....	90

Slika 38: Letni pridelek suhega zelinja trpežne ljuljke v Jabljah (J-LP): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka pred umerjanjem modela (brez) in simulacija pridelka (<i>GRASS</i>) z umerjenim modelom (simuliran pridelek).....	91
Slika 39: Letni pridelek suhega zelinja travniškega mačjega repa v Jabljah (J-PP): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka pred umerjanjem modela (brez) in simulacija pridelka (<i>GRASS</i>) z umerjenim modelom (simuliran pridelek)	92
Slika 40: Letni pridelek suhega zelinja trpežne ljuljke v Rakičanu (R-LP): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka s parametri, umerjenimi za J-LP (parametri Jablje) in simulacija pridelka (<i>GRASS</i>) z umerjenim modelom (simuliran pridelek)	92
Slika 41: Razsevni diagrami (simulirani letni pridelek proti povprečnemu letnemu izmerjenemu) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep (J-PP) v Jabljah ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za obravnavana leta v obdobju 1998–2013	94
Slika 42: Letni pridelek suhega zelinja (<i>GRASS</i>) za vse štiri primere za celotno obdobje 1964–2013. Zgoraj levo navadna pasja trava v Jabljah (J-DG), zgoraj desno trpežna ljuljka v Jabljah (J-LP), spodaj levo travniški mačji rep v Jabljah (J-PP), spodaj desno trpežna ljuljka v Rakičanu (R-LP).....	96
Slika 43: Razčlenitev časovne vrste dnevnih simulacij potencialnega pridelka suhega zelinja (<i>YIELD</i>) navadne pasje trave v Jabljah v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento.....	97
Slika 44: Okvira z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (<i>GRASS</i>) navadne pasje trave v Jabljah (J-DG) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnavanega 50-letnega obdobja.....	98
Slika 45: Razsevna diagrama, ki prikazujeta letni potencialni pridelek (<i>YIELD</i>) v odvisnosti od poletnega povprečja najvišje dnevne temperature zraka (T_{maks} ; levo) in v odvisnosti od količine padavin v vegetacijskem obdobju (RR_{vo} ; desno) za navadno pasjo travo v Jabljah za celotno obdobje 1964–2013	99
Slika 46: Faktor zmanjšanja rasti zaradi suše (<i>TRANRF</i>) za vse štiri primere za celotno obdobje 1964–2013. Zgoraj levo navadna pasja trava v Jabljah (J-DG), zgoraj desno trpežna ljuljka v Jabljah (J-LP), spodaj levo travniški mačji rep v Jabljah (J-PP), spodaj desno trpežna ljuljka v Rakičanu (R-LP)	100

Slika 47: Potencialni pridelek (*YIELD*, levo) in volumska vsebnost vode v koreninskem območju (*SMACT*, desno) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988)..... 102

Slika 48: Masa odmrlih listov (*WLVD*) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988)..... 103

Slika 49: Masa korenin (*WRT*) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988)..... 104

Slika 50: Indeks listne površine (*LAI*, levo) ter kumulativno fotosintetsko aktivno sevanje (*PAR*) in kumulativno prestreženo fotosintetsko aktivno sevanje (*PARAB*) (desno) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988) 105

Slika 51: Učinkovitost izrabe sončnega obsevanja (*RUE*) za vse štiri primere za celotno obdobje 1964–2013. Zgoraj levo navadna pasja trava v Jabljah (J-DG), zgoraj desno trpežna ljuljka v Jabljah (J-LP), spodaj levo travniški mačji rep v Jabljah (J-PP), spodaj desno trpežna ljuljka v Rakičanu (R-LP). 107

Slika 52: Indeks preskrbljenosti z dušikom (*NNI*, levo) in učinkovitost izrabe dušika (*NUE*, desno) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za celotno obdobje 1964–2013 108

Slika 53: Okviri z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) navadne pasje trave v Jabljah (J-DG) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂) 109

Slika 54: Letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) navadne pasje trave v Jabljah (J-DG) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 110

Slika 55: Okviri z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljuljke v Jabljah (J-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih

temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)..... 111

Slika 56: Letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljuljke v Jabljah (J-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnavanega 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 111

Slika 57: Okviri z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) travniškega mačjega repa v Jabljah (J-PP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)..... 112

Slika 58: Letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) travniškega mačjega repa v Jabljah (J-PP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnavanega 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988..... 112

Slika 59: Okviri z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljuljke v Rakičanu (R-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)..... 113

Slika 60: Letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljuljke v Rakičanu (R-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnavanega 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 114

KAZALO PRILOG

- Priloga A Primer uporabljenih vhodnih podatkov za datoteko BATCHG.INP za Ljubljano
- Priloga B Pregled poskusov prof. dr. Mirka Leskoška, ki smo jih uredili v elektronski obliki
- Priloga C Razčlenitev časovne vrste dnevnih meteoroloških podatkov
- Priloga Č Privzete vrednosti parametrov modela LINGRA-N, ki smo jih umerjali, in rezultati umeritve za trajno travinje v Ljubljani (S72) ter za travniški mačji rep v Rakičanu (R-PP).
- Priloga D Rezultati umerjanja za travniški mačji rep v Rakičanu
- Priloga E Razčlenitev časovne vrste dnevnih simulacij potencialnega pridelka (*YIELD*)
- Priloga F Tabela za pretvorbo datuma v julijanski dan

KRATICE IN SIMBOLI

A1B	eden izmed starih IPCC scenarijev izpustov po SRES (angl. Special Report on Emission Scenarios); »srednja možnost«
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
BF	Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani
CGMS	sistem, ki ga Evropska komisija uporablja za spremljanje rasti poljščin (angl. Crop Growth Monitoring System)
CLAI	indeks listne površine, ki ostane po košnji
CO ₂	ogljikov dioksid
CPVO	Center za pedologijo in varstvo okolja na BF
d _w	Willmottov kazalec ujemanja
DG	navadna pasja trava (<i>Dactylis glomerata</i> L.)
DVS	razvojna stopnja
FORTTRAN	visoko-nivojski programski jezik
FRT	delež razporeditve biomase v korenine
FRTB	delež razporeditve biomase v korenine pri $TRANRF = 1$
FSE	Fortranovo simulacijsko okolje
GCM	globalni podnebni model
GRASS	pridelek suhega zelinja (pridelek)
HRVBL	suha masa za košnjo primerne zelinja
IPCC	Medvladni panel za podnebne spremembe (angl. Intergovernmental Panel on Climate Change)
J	Jablje
J-DG	poskus z navadno pasjo travo v Jabljah
J-LP	poskus s trpežno ljuljko v Jabljah
J-PP	poskus s travniškim mačjim repom v Jabljah
JRC	raziskovalni center Joint Research Center, ki deluje v Italiji pod okriljem Evropske komisije
K	kalij
KIS	Kmetijski inštitut Slovenije
LAI	indeks listne površine
LER	stopnja podaljševanja listov
LINGRA	dinamično-mehanistični model za simulacijo rasti in pridelka travne ruše
LINGRA-N	dinamično-mehanistični model za simulacijo rasti in pridelka travne ruše z dodanim modulom za simulacijo bilance dušika
LINTUL	model za simulacijo prestrezanja in izrabe sončnega obsevanja
LP	trpežna ljuljka (<i>Lolium perenne</i> L.)
MNDAT	datumi košnje

N	dušik
NNI	indeks stresa zaradi pomanjkanja dušika
NPK	gnojeno z dušikom, fosforjem in kalijem
NUE	učinkovitost izrabe dušika
P	fosfor
PK	gnojeno s fosforjem in kalijem
PAR	fotosintetsko aktivno sevanje
PARAB	fotosintetsko aktivno sevanje, ki ga rastlina prestreže
PASK	evropska baza podatkov o pridelkih travne ruše in paši, ki jo je leta 2003 pripravil JRC (angl. PASTure Knowledge base)
PP	travniški mačji rep (<i>Phleum pratense</i> L.)
PPS	posebno preizkušanje sort
R	Rakičan
r	Pearsonov koeficient korelacije
r ²	koeficient determinacije
RCP6.0	scenarij srednjih izpustov po novem IPCC poročilu
R-DG	poskus z navadno pasjo travo v Rakičanu
RD _{VO}	globalno sončno obsevanje v vegetacijskem obdobju
R-LP	poskus s trpežno ljuljko v Rakičanu
RMSE	koren povprečne kvadratne napake
R-PP	poskus s travniškim mačjim repom v Rakičanu
RR _p	poletna količina padavin
RR _{VO}	padavine v vegetacijskem obdobju
RUE	učinkovitost izrabe sončnega obsevanja
RUNFR	površinski odtok
S72	travniški poskus v Ljubljani
S9	travniški poskus v Brestanici
SLA	specifična listna površina
SMACT	volumska vsebnost vode v koreninskem območju
SS	suha snov
SURS	Statistični urad Republike Slovenije
TADRW	pridelek suhega zelinja ter skupna suha masa zelinja na polju in odmrlega zelinja
T _{maks_p}	povprečna poletna najvišja temperatura zraka
T _{maks_{VO}}	povprečna najvišja temperatura zraka v vegetacijskem obdobju
TMBAS1	temperatura praga za rast listov
T _{min_p}	povprečna poletna najnižja temperatura zraka
T _{min_{VO}}	povprečna najnižja temperatura zraka v vegetacijskem obdobju
TRANRF	faktor zmanjšanja rasti zaradi suše
TSUM1	temperaturna vsota, ki ustreza eni razvojni stopnji
VPU	preizkušanje vrednosti sort za pridelovanje in uporabo

WLVD	masa odmrlih listov
WLVG	masa zelenih listov
WOFOST	dinamično-mehanistični model rastlinske pridelave
WRT	masa korenin
WUE	učinkovitost izrabe vode
YIELD	pridelek suhega zelinja skupaj s suho snovjo zelinja, ki je primerna za košnjo v danem trenutku (potencialni pridelek)

SLOVARČEK POJMOV

Aktivna temperatura zraka	Razlika med povprečno dnevno temperaturo zraka in 0 °C
Asimilat	Organska snov, ki nastane pri asimilaciji
Avtokorelacijska funkcija	Funkcija korelacij med vrednostmi časovne vrste v odvisnosti od njihovega reda (Golmajer, 2013)
Defoliacija	Košnja ali paša
Efektivna temperatura zraka	Razlika med povprečno dnevno temperaturo zraka in temperaturo praga
Generativni poganjki	Poganjki v generativni fazi razvoja trave (stebelni poganjki s socvetjem na vrhu)
Koeficient variacije	Razmerje med standardnim odklonom in povprečjem
Korelacija	Povezanost med spremenljivkami
Kvartilni razmik	Razlika med prvim in tretjim kvartilom (kvartili razdelijo ranžirno vrsto na štiri enake dele) (Košmelj, 2007)
Meteorološka vodna bilanca	Razlika med padavinami in potencialno evapotranspiracijo (dnevno ali kumulativno v določenem obdobju)
Mineralni dušik	Mineralna oblika dušika, in sicer v amonijski NH_4^+ ali nitratni NO_3^- obliki
Osamelec	Vrednost, ki bistveno odstopa od večine ostalih vrednosti (Košmelj, 2007)
Parcialna avtokorelacijska funkcija	Funkcija parcialnih korelacij med vrednostmi časovne vrste v odvisnosti od njihovega reda (Golmajer, 2013)
Parcialna korelacija	Korelacija med dvema spremenljivkama, pri kateri je iz obeh spremenljivk izločen linearni vpliv vseh preostalih upoštevanih spremenljivk (Golmajer, 2013)
Potencialna evapotranspiracija	Prehajanje vode v obliki vodne pare z zemeljskega površja in skozi reže rastline v ozračje ob zadostni zalogi vode v tleh. Pri Penman-Monteithovi metodi se pri izračunu upošteva naslednje meteorološke spremenljivke: temperaturo zraka, relativno zračno vlago, hitrost vetra in sončno obsevanje.
Premeščanje dušika	V rastlinah se dušik iz starih listov, ki začnejo odmirati, premešča v nove liste in v korenine.

Razčlenitev časovne vrste	Postopek, pri katerem časovno vrsto razdelimo na komponente: trend, sezonsko in naključno
Statistična značilnost	Lastnost rezultata, ki je dobljen s preizkusom, da je verjetnost za dobljeno vrednost testne statistike razmeroma majhna (Golmajer, 2013)
Stopnja značilnosti	Verjetnost za napako prve vrste, ki je označena s p in navadno navedena v višini 0,05; 0,01 ali 0,001 (Golmajer, 2013)
Trajno travinje	Zemljišče s sejano ali naravno travno rušo, ki ni v njivskem kolobarju in kjer vsaj pet let nepretrgoma poteka raba
Travinje	Vegetacija, v kateri prevladujejo trave
Travna ruša	Vrhnja plast tal z vegetacijo, v kateri prevladujejo trave
Variacijski razmik	Razmik med najmanjšo in največjo vrednostjo v nizu podatkov
Varianca	Povprečni kvadrirani odklon od aritmetične sredine (Košmelj, 2007)
Vegetacijsko obdobje	Obdobje od 1. aprila do 30. septembra
Vegetativni poganjki	Poganjki pri travi v vegetativni fazi (praviloma so to samo listni poganjki)
Vodni primanjkljaj	Negativne vrednosti meteorološke vodne bilance
Zelinje	Nadzemni del travne ruše

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Travinje je eden od velikih ekosistemov na svetu. V novejšem času se je dojemanje vrednosti travinja pomembno spremenilo. Z vidika ekosistemskih storitev je pomembno za proizvodnjo krme, varovanje tal in vode, ohranjanje kulturne krajine in raznolikosti narave ter shranjevanje ogljika. Travništvo je pri trajnostnem razvoju kmetijstva postalo prepoznano kot zelo pomembno.

V Sloveniji je v letu 2013 po podatkih Statističnega urada RS (SURS, 2014) površina trajnih travnikov in pašnikov predstavljala kar 59 % kmetijskih zemljišč v uporabi. Poleg tega pridelujemo veliko sejanih travno-deteljnih mešanic na njivah. Obseg površin pod koševinami (trave, travne in travno-deteljne mešanice) se je po letu 2000 podvojil in je v letu 2013 predstavljal 5 % kmetijskih zemljišč v uporabi, kar je 22.394 ha.

Travniške raziskave so pomembne tako z vidika ohranjanja dobre produktivnosti travne ruše kot z vidika drugih ekosistemskih storitev in tehnološkega razvoja. Stabilnost pridelave travniške krme je namreč velikega pomena predvsem za majhna in srednja gospodarstva, ki so značilna za Slovenijo. Uporaba primernih sort, ki so prilagojene na rastne razmere, imajo dober pridelek ustrezne kakovosti in so dovolj odporne proti boleznim in škodljivcem, je ključnega pomena za uspešno pridelavo poljščin, med njimi tudi koševin (Verbič, 2014). Pri tem imajo velik pomen poljski poskusi, katerih podatki so dobra osnova za modeliranje rasti in pridelka v različnih vremenskih in podnebnih razmerah. Pri travni ruši je še posebej očitno, da na produktivnost zelo vpliva vreme.

Pri načrtovanju pridelave krme je treba upoštevati nestabilnost in nepredvidljivost vremena ter posledična precejšnja nihanja pridelka travne ruše. Največje težave predstavljajo sušna obdobja, ki so doslej tudi povzročala največje zmanjšanje pridelkov. Namakanje večinoma ne pride v poštev, predvsem zaradi prevelikih stroškov glede na prihodek. Dobro pa je, da čim bolj poznamo odzive različnih travnih monokultur na sušo in druge vremenske dogodke, kar je ena od strokovnih osnov za pridelovanje in načrtovanje krme v prihodnje, ko pričakujemo segrevanje ozračja.

To lahko najbolj dosežemo s kombinacijo poskusov na travni ruši in modeliranja. Modeliranje pridelka travne ruše v osnovi prispeva k razumevanju zapletenih odnosov med rastlino, tlemi in atmosfero. Spremljanje različnih komponent rasti in odzivov pridelka na vremensko variabilnost omogoča poglobljanje znanja in načrtovanje usmerjenih poljskih poskusov. Pri poskusih je manj negotovosti, ki jo v modele vnašamo z nepopolnimi vhodnimi podatki in s poenostavljeno simulacijo rasti, a je tudi manj možnosti, kakšne razmere lahko preizkusimo. Tu se pokaže prednost modelov, ki lahko simulirajo tako rekoč kakršne koli okoljske razmere v različnih časovnih obdobjih.

Prosto dostopnih je več agrometeoroloških modelov, kot so, na primer, CERES, WOFOST, SWAP, STICS, LINGRA-N. Z modeli za simulacijo rasti travne ruše (ali poljščin) opisujemo odvisnost pridelka od dejavnikov, kot so sončno obsevanje, temperatura zraka, dostopnost vode in hranil. Modeli za simulacijo rasti in pridelka poljščin kljub veliki uporabni vrednosti v Sloveniji večinoma niso raziskani ali pa vsaj niso v operativni rabi. Vzrok za to je navadno dejstvo, da potrebujemo za umerjanje takšnih modelov daljše (vsaj desetletne) nize podatkov iz poljskih poskusov, ki zajemajo vsaj pridelke, če že ne še katere izmed komponent rasti, teh pa ni ali zaradi slabe komunikacije med sorodnimi ustanovami ne vemo, da obstajajo. Z modelom za modeliranje rasti in pridelka travne ruše se tako v Sloveniji še nismo ukvarjali.

Zavedati se moramo, da smo v času hitrega segrevanja ozračja, ko se moramo na marsikaterem področju vprašati, kako naprej. Kmetijski sektor je izpostavljen velikemu podnebnemu tveganju, ki se s časom spreminja, saj se povečuje število sušnih obdobj in hkrati število intenzivnih padavinskih dogodkov. Različne scenarije lahko z modelom preizkusimo, da dobimo okvirno predstavo o tem, kaj se bo ob tako spremenjenih razmerah dogajalo s pridelkom travne ruše. Ustrezno znanje in razumevanje vpliva podnebne spremenljivosti na kmetijsko proizvodnjo je velikega pomena za oblikovanje strategije prilagajanja (Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2012).

1.2 NAMEN RAZISKAVE

Najprej smo želeli na osnovi pregleda fenoloških podatkov, ki zelo dobro odražajo spremembe v okolju, preveriti, kakšno je stanje za travno rušo. Glede na to, da Agencija RS za okolje (ARSO) spremlja fenološke faze različnih trav, smo med njimi izbrali tisto, ki smo jo nameravali uporabiti pri modeliranju. Raziskati smo želeli, kateri podatki so dostopni in kaj lahko z njihovo uporabo povemo o fenološki fazi cvetenja trave. Pri tem smo pričakovali, da bo analiza fenoloških podatkov pokazala morebitne časovne spremembe fenološkega razvoja travne ruše v zadnjih 50 letih, ki kažejo na podnebne spremembe.

V Sloveniji zaenkrat ni v uporabi noben simulacijski model, s katerim bi spremljali in napovedovali komponente rasti ter pridelek travne ruše. Zaradi različnih razmer za rast so lahko modeli precej netočni, zato je še posebej pomembno umerjanje v dejanskih razmerah. Naš namen je bil, da med vrsto agrometeoroloških modelov, občutljivih na podnebno variabilnost, lastnosti tal in gospodarjenje s travno rušo, izberemo najprimernejšega za simuliranje rasti in pridelka travne ruše v naših razmerah in ga umerimo s podatki o pridelku trajnega travinja s poskusov, ki jih je vodil prof. dr. Mirko Leskošek na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani.

Poleg omenjenih, smo pridobili tudi podatke o pridelku travnih monokultur s Kmetijskega inštituta Slovenije (KIS), zato smo razširili raziskavo še na umerjanje izbranega modela LINGRA-N (Wolf, 2012) za simulacije rasti in pridelka izbranih treh travnih monokultur.

Pričakovali smo, da bo preverjanje umerjenega modela pokazalo dovolj dobro ujemanje z meritvami poljskih poskusov. To bi pomenilo, da bo model pojasnil večji del medletne variabilnosti pridelka suhega zelinja na posameznih lokacijah v Sloveniji in bo zato uporaben za nadaljnje modeliranje.

Želeli smo simulirati komponente rasti in pridelek travne ruše za 50-letno obdobje in tako preučiti medletno variabilnost ter odzivnost rasti in produktivnosti travne ruše na različne meteorološke spremenljivke. Pri padavinskih razmerah bi posebno pozornost posvetili obdobjem suše. Modeliranje je strateškega pomena za načrtovanje prilagajanja slovenskega travništva različnim vremenskim razmeram, tako v smislu optimiziranja pridelave krme kot tudi načrtovanja paše.

Pričakovali smo, da bo analiza variabilnosti pridelka v 50-letnem obdobju pokazala pomembne odzive travne ruše v spremenjenih podnebnih razmerah. Nadalje pa je bil naš namen preveriti, kaj bi se s pridelkom travne ruše dogajalo ob višanju temperature zraka. S tem smo želeli predvsem pokazati, kakšne so možnosti uporabe umerjenega modela.

Predvidevamo, da nam bodo rezultati prinesli boljše poznavanje odvisnosti pridelka travne ruše od vremenskih in podnebnih razmer in oceno vpliva podnebnih sprememb nanj. Dobili bomo umerjen model, ki se lahko kasneje uporablja (tudi operativno – na primer na agrometeorološkem oddelku ARSO) za sezonsko spremljanje rasti travne ruše ali celo napovedovanje pridelka in vodne bilance tal. Hkrati obstaja tudi možnost vključevanja rezultatov takih modelov v mezometeorološke modele.

1.3 HIPOTEZE

Raziskovalne hipoteze so naslednje:

- a. Analiza dolgega niza fenoloških podatkov za izbrano vrsto trave bo pokazala značilne časovne spremembe, vezane na trende meteoroloških spremenljivk.
- b. Domnevamo, da bo dinamični model LINGRA-N primerno orodje za simuliranje rasti in pridelka travne ruše v Sloveniji, tako v preteklih podnebnih razmerah kot tudi v prihodnjem obdobju.
- c. Pričakujemo, da bo umerjen model pojasnil večji del medletne variabilnosti pridelka travne ruše v Sloveniji (na izbrani lokaciji) in bo tako primeren za nadaljnje simulacije.
- d. Z uporabo umerjenega modela bomo preverili odziv pridelka travne ruše na različne vremenske razmere. Pri tem pričakujemo pomembno odvisnost pridelka travne ruše od padavinskih in snežnih razmer.
- e. Z vključitvijo različnih scenarijev predvidenih podnebnih sprememb v simulacije z modelom LINGRA-N je mogoče oceniti potencialno variabilnost pridelka travne ruše v prihodnosti. Pričakujemo, da bo simulacija pokazala večjo variabilnost pridelka, kar pomeni, da lahko nastopijo večja nihanja med posameznimi leti.

2 PREGLED OBJAV

2.1 TRAVNA RUŠA

Travna ruša je pretežno zelnata vegetacija na travniku ali pašniku, ki jima z enim izrazom pravimo travinje. Sestavlja jo zelo različno število vrst. Kmetijska stroka običajno deli travniške rastline v tri skupine: trave, metuljnice in zeli. Trajna travna ruša, namenjena za pridelovanje krme, naj bi vsebovala 60 do 70 % trav, 10 do 30 % metuljnic in 10 do 30 % zeli (Dietl, 1982). V poskusih v Sloveniji so na ekstenzivnih travnikih določili 65 rastlinskih vrst, na travnikih z dvokosno rabo od 45 do 50 vrst (Čop, 1998) ter na travnikih s tri- do štirikosno rabo in z zmernim gnojenjem 26 vrst (Kramberger, 1994).

Pol-naravno travinje se je dolgo obravnavalo večinoma kot omejujoči dejavnik pri razvoju učinkovitejših sistemov za vzrejo živine. Danes pa v njem prepoznavamo mnoge koristi za okolje in družbo (Gibon, 2005; Kapun, 2005; Duru in sod., 2009). Travništvo igra po vsem svetu glavno vlogo pri trajnostnem razvoju kmetijstva. V Evropi travna ruša predstavlja pomembno kmetijsko kulturo za pridelovanje krme in vzdrževanje ekosistemov. Vendar v produktivnosti travne ruše v Evropi obstajajo velike regionalne razlike (Smit in sod., 2008).

Danes biotsko pestremu pol-naravnemu travinju pripisujemo večnamensko vlogo v agro-ekosistemi. Poleg pridelave voluminozne krme za domače živali v ospredje vse bolj prihajajo neproizvodne funkcije travinja, ki so predvsem okoljevarstvene in vključujejo varovanje habitatov, tal, virov pitne vode, vezavo ogljika ter ohranjanje biotske pestrosti in genskih virov. Pol-naravno travinje učinkuje kot biološki filter, veže pline in težke kovine, blaži hrup v okolici mest, proizvede velike količine kisika in je vir organskih kislin, estrov in eteričnih olj. Ima izredno zmožnost vezave atmosferskega ogljika, poleti zaradi nižje temperature zraka nad travno rušo deluje mikroklimatsko, njegova višina in zgoščenost pa zmanjšujeta hitrost vetra. Omogoča tudi gnezdenje nekaterim pticam (Lukač in sod., 2013).

Travna ruša zelo ugodno deluje na fizikalne, kemične in biološke lastnosti tal. Pomembna je za ohranjanje tal in vode. Delež organske snovi, ki ostaja v tleh z odmiranjem dela korenin in nadzemnih poganjkov, pomembno povečuje rodovitnost tal in preprečuje erozijo na nagnjenih terenih (Korošec, 1997).

Različne študije (Taubert in sod., 2012) v zadnjih letih predlagajo, da bi lahko bila travna ruša na pol-naravnih travnikih ekološko sprejemljivejši vir goriva kot intenzivno gojene monokulture. Še posebej je bilo opaženo, da velika rastlinska pestrost travinja pozitivno vpliva na različne funkcije ekosistema, na primer na produktivnost. Jing in sod. (2012b) trdijo, da naj bi biogoriva iz kultur, ki niso namenjene prehrani ljudi, zmanjšala tekmovanje med proizvodnjo hrane in proizvodnjo goriva, poleg tega pa naj bi

učinkoviteje zmanjšala izpuste toplogrednih plinov. Kot pravijo, so travna ruša, grmovja in drevesa za ta namen najprimernejša zaradi manjših stroškov vzdrževanja, dolge življenjske dobe, majhnih potreb po dodanih hranilih in visoke produktivnosti.

Kljub temu pa Čop in sod. (2009) navajajo, da obstaja tveganje za obstoj pol-naravnega travinja v Evropi. Tako splošno zmanjševanje travniških površin kot tudi spremembe v načinu gospodarjenja imajo opazno negativne vplive na okolje v Evropi (Gibon, 2005). Boljše razumevanje procesov prilagajanja podnebnim spremembam, kmetijske pridelave, ekologije in uporabe naravnih virov lahko prispeva k razvoju primernejših travniških sistemov tako za proizvodnjo kot tudi za varovanje narave in okolja (Mannetje, 2002). V osrednji Evropi je travinje najpomembnejše v bolj goratih predelih, na primer v Avstriji, Črni Gori, Sloveniji in Švici (povsod presega 50 % kmetijskih površin), v ravninskem svetu pa deleži večinoma dosega le od 20 do 25 %. Predvsem za pašo ovc in koz je travinje pomembno tudi v Sredozemlju (obsega od 30 do 40 % kmetijskih površin). Manjšo veljavo ima v Belorusiji, Moldaviji in Ukrajini (Smit in sod., 2008).

Za Slovenijo je iz podatkov Popisa kmetijskih gospodarstev v letu 2000 (SURS, 2014) mogoče ugotoviti, da skoraj 86 % kmetijskih gospodarstev prideluje krmo na travinju, pri čemer je kar 98,4 % travinja v uporabi družinskih kmetij. Površina trajnih travnikov in pašnikov se v desetih letih ni veliko spremenila: z 285.410 ha leta 2000 na 277.492 ha leta 2010 (brez skupnih travnikov in pašnikov, ki jih je bilo leta 2000 za 22.786 ha in leta 2010 za 8221 ha), kar med kmetijskimi zemljišči v uporabi predstavlja največji del, 58,5 % (SURS, 2014).

Zaradi potreb živinoreje po kakovostni krmi se v Sloveniji obseg sejane travinja v zadnjih letih povečuje (Tehnološka priporočila ..., 2008). Po podatkih Statističnega urada (SURS, 2014) se sicer v letu 2010 glede na leto 2000 površina sejanih trav praktično ni spremenila (7632 ha, prej 7702 ha), površina travno deteljnih in deteljno travnih mešanic pa se je povečala s 3918 ha na 16.675 ha. V sejani travni ruši prevladujejo kakovostne trave in metuljnice, ki so selekcionirane glede na večji pridelek, boljšo hranilno vrednost, trpežnost, odpornost proti boleznim in tudi večjo odpornost na stresne razmere. Sejano travinje veča vsebnost organske snovi v tleh, ki ugodno vpliva na zadrževanje vode v tleh (Tehnološka priporočila ..., 2008).

Na področju pridelka travne ruše je sicer že bilo opravljenih mnogo raziskav, predvsem glede učinkov gnojenja in števila košenj (Knapič, 1988; Žitek, 1991; Weiss, 1997; Čop, 1998; Leskošek, 1998; Čop in sod., 2004, 2009), ne pa, na primer, glede spremenljivk, ki opisujejo rast trav, ali glede možnosti uporabe modelov za simulacije in napovedi pridelka.

2.1.1 Vrste trav

Travnik je življenjsko okolje, za katerega je značilna izredna pestrost rastlinskih vrst (Fenologija v Sloveniji, 2015). V Sloveniji je razširjenih veliko vrst trav. Med visokimi

travami so za pridelovanje krme zelo pomembne visoka pahovka, navadna pasja trava, travniška bilnica, travniški lisičji rep, travniški mačji rep in mnogocvetna ljuljka. Med nizkimi pa so zelo pomembne trave trpežna ljuljka, rdeča bilnica in travniška latovka. Ker smo v naši raziskavi uporabili tudi poskuse s tremi travnimi monokulturami, jih na kratko predstavljamo.

2.1.1.1 Navadna pasja trava (*Dactylis glomerata* L.)

Poglavje povzemamo po virih Verbič (2014) in Fenologija v Sloveniji (2015). Navadna pasja trava je gosto šopasto razrasla trajna vrsta trave (Slika 1 levo). Spada med najpogostejšo vrsto pri nas, saj je razširjena po vsej Sloveniji in uspeva na travnikih, pašnikih, v svetlih gozdovih in na gozdnih robovih. Je zelo trpežna in, ker ima močan šopasti koreninski sistem, dobro odporna na sušo. Poletne suše sicer upočasnijo njeno rast, a ostane zelena in počasi raste naprej. To velja tudi za starejše posevke v tretjem in četrtem letu.

Vegetativni poganjki so stisnjeni drug ob drugem. Stebla v višino poženejo do okoli 50 cm, na dobrih rastiščih lahko tudi višje. Steblo je olistano s sivo zelenimi, do 10 mm širokimi listi. Socvetje je latasto. Pri razvoju je zgodnejša od večine ostalih trav. Bujno se razrašča, po vsaki rabi pa hitro odžene. Največji pridelek večinoma doseže v drugem letu glavne rabe, nato se pridelki počasi manjšajo, a raste tudi še v šestem letu.



Slika 1: Navadna pasja trava (*Dactylis glomerata* L.), trpežna ljuljka (*Lolium perenne* L.) in travniški mačji rep (*Phleum pratense* L.) (Fenologija v Sloveniji, 2015: 69, 71; Robertson, 2015)

Figure 1: Cock's foot (*Dactylis glomerata* L.), perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and timothy grass (*Phleum pratense* L.) (Fenologija v Sloveniji, 2015: 69, 71; Robertson, 2015)

2.1.1.2 Trpežna ljuljka (*Lolium perenne* L.)

Poglavje povzemamo po virih Oven (2003) in Verbič (2014). Trpežna ljuljka je razširjena predvsem v zmernem podnebju. Je nizka, 30 do 60 cm visoka trava, njen koreninski sistem pa je plitev in razvejan. Vegetativni poganjki so pokončni, sicer pa je šopasto razrasla

(Slika 1 na sredini). Listi so široki 2 do 6 mm, z ušesci. Glede na razvoj nekatere tipe uvrščamo med zgodnje, druge pa med pozne.

V ugodnih razmerah hitro raste in daje velike pridelke. Največji pridelek večinoma doseže v prvem letu glavne rabe, nato pa se pridelki manjšajo hitreje, v četrtem letu pogosto že izgine iz travne ruše. Precej dobro prenese z vlago zasičena tla, ne prenaša pa daljših obdobj z ekstremnimi temperaturami zraka. Zelo je občutljiva na sušo in najhitreje prekine rast, predvsem pri starejših posevkih (v drugem ali tretjem letu) se zgodi celo, da zaradi suše propade in jeseni ne ozeleni.

2.1.1.3 Travniški mačji rep (*Phleum pratense* L.)

Poglavje povzemamo po virih Verbič (2014) in Fenologija v Sloveniji (2015). Tudi travniški mačji rep najbolje uspeva v zmernih podnebnih razmerah. Precej dobro prenese zimske razmere z nizkimi temperaturami zraka in snežno odejo, zato uspeva tudi v višje ležečih predelih in severneje. Pogosto raste ob robovih njiv, ustrezajo ji zmerno vlažna rastišča in težka rodovitna tla. Stebla zrastejo tudi do enega metra visoko. Cvetovi so združeni v paklasasta socvetja značilne valjaste oblike in svetlo sivozelene barve (Slika 1 desno). Koreninski sistem je plitev in vlaknast. Pri razvoju je med zadnjimi vrstami trav. Zelo slabo prenaša sušo in visoke temperature zraka, vendar ne propade, kot se hitro zgodi s trpežno ljuljko, temveč preide v fazo mirovanja in se jeseni ponovno bujno razraste. Podobno kot pasja trava je precej trpežen in doseže optimalno rast v drugem letu rabe. Pridelki se z leti počasi manjšajo, raste še v petem letu.

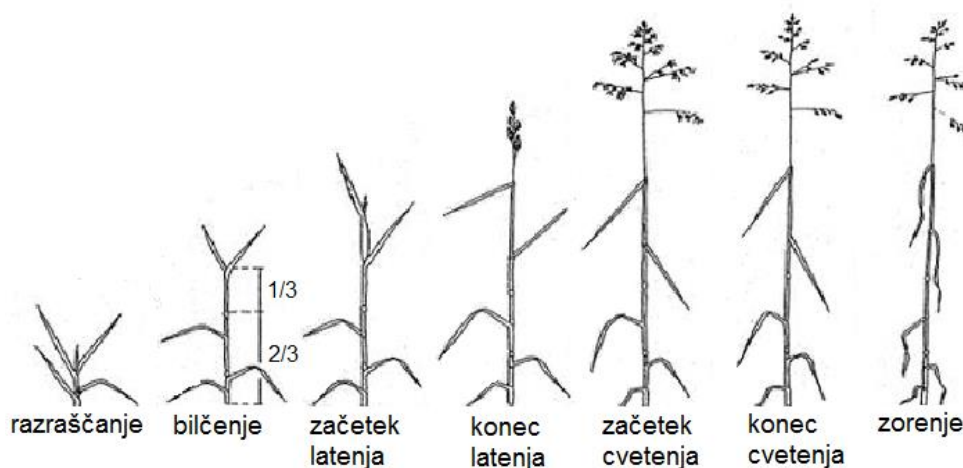
2.2 FENOLOŠKI RAZVOJ TRAVNE RUŠE

Fenologija v preteklem času ni veljala za pomembno vedo. Kljub temu je k sreči obstajalo mnogo družin in posameznikov, ki so za lastno veselje natančno zbirali fenološke podatke. Šele v zadnjih 15 letih sta se vrednost in pomembnost fenoloških podatkov zaradi raziskav podnebnih sprememb bistveno povečali (Richardson in sod., 2013). Mnoge povratne zanke med vegetacijo in podnebnim sistemom z vplivom na sezonskost albeda, strukturo površine, prevodnost rastlinske odeje in tokove vode, energije ter CO₂ so povezane s fenološkim razvojem, zato je njegov učinek na mikroklimo pomemben (Richardson in sod., 2013).

Po Čopu (1992) se sezonski razvoj trav deli na obdobji t. i. generativne in vegetativne rasti. To se odločilno odraža tudi na sezonski rasti zelinja (nadzemnih delov). V generativnem obdobju je travna ruša takrat, ko se v njej razvijajo generativni poganjki, to je spomladi, od pojava dvojnega roba na rastnih vršičkih teh poganjkov pa do prenehanja njihove rasti. Generativni poganjki v tem času dozoriijo ali pa so prej pokošeni ali popaseni. Preostali del sezone izpolnjuje vegetativna rast, ko ruša ostaja nizka, s pretežno listnimi poganjki.

Stopnje razvoja trave (Slika 2) so kalitev in vznik, razraščanje (formiranje novih poganjkov, stebel in korenin), bilčenje (podaljševanje stebela oz. bili), latenje, cvetenje,

zorenje in odmiranje. Razraščanje krmnih trav je intenzivnejše kot pri žitih in poteka vso sezono, od jakosti in hitrosti pa je odvisna predvsem količina pridelka. Bilčenje je pogojeno z nizkimi zimskimi temperaturami zraka in dolžino dneva. Na njegovo jakost pa zelo vplivajo spomladanske temperature zraka in talna vlaga. Trave začnejo latiti proti koncu bilčenja. To je faza razvoja, ko se rast zelinja začne zmanjševati, hkrati pa se začne tudi njegovo pospešeno poslabševanje kakovosti. V cvetenju je krmna vrednost travne ruše že zelo zmanjšana. Podrobneje razvoj travne ruše predstavljajo, na primer, Knapič (1988), Čop (1992, 2011) in Oven (2003).



Slika 2: Razvojne faze trave (Siliranje ..., 2011)

Figure 2: Grass development phases (Siliranje ..., 2011)

V zmernem podnebju, kjer imamo mrzle zime in s tem sezono mirovanja rastlin, mora vegetacija spomladi za ponovno rast doseči določeno temperaturno vsoto nad temperaturo praga, ki se med vrstami rastlin razlikuje (Shen in sod., 2011). Za vse fenološke faze je značilna močna odvisnost od temperature zraka (Schleip in sod., 2009). Shen in sod. (2011) trdijo, da na začetek ozelenitve trav večinoma vplivajo temperature zraka 5 tednov pred tem. Raziskave Schleipa in sod. (2009) pa kažejo, da so spomladanske fenološke faze še posebej občutljive na aprilске temperature zraka.

Izračuni za Slovenijo so pokazali (Črepinšek, 2002), da je začetek cvetenja navadne pasje trave statistično značilno povezan s temperaturo zraka v aprilu in maju. Kot povezavo med temperaturami zraka in fenološkimi fazami uporabljamo dve vsoti: vsota aktivnih temperatur zraka je vsota povprečnih dnevniх температур zraka nad 0 °C, vsota efektivnih temperatur zraka pa je vsota povprečnih dnevniх температур zraka nad izbranim temperaturnim pragom. Pri tem velja, da prestopimo temperaturni prag takrat, ko je povprečna dnevna temperatura zraka vsaj pet zaporednih dni višja od praga (tako prag definira Joint Research Center). Črepinškova (2002) je izračunala, da je povprečna vsota aktivnih temperatur zraka za cvetenje navadne pasje trave okoli 800 °C, v višje ležečih krajih pa dobriх 600 °C. Za temperaturo praga navaja od 5 do 7 °C, v višje ležečih krajih, kot so Rateče, pa 3 °C. Povprečna vsota efektivnih temperatur zraka za posamezne lokacije

(nad omenjenimi pripadajočimi temperaturami praga), potrebnih za nastop cvetenja, je med 250 in 370 °C.

Preglednica 1: Datumi začetka latenja in cvetenja nekaterih vrst trav v osrednji Sloveniji (fenološka postaja Ljubljana, 1997–2014) (Fenologija v Sloveniji, 2015: 71)

Table 1: Dates of panicle initiation and flowering phase of some grass species in central Slovenia (phenological station Ljubljana, 1997–2014) (Fenologija v Sloveniji, 2015: 71)

Vrsta	Latenje			Cvetenje		
	Povprečno	Najzgodneje	Najpozneje	Povprečno	Najzgodneje	Najpozneje
Travniški lisičji rep	24. 4.	9. 4.	11. 5.	3. 5.	15. 4.	18. 6.
Travniška latovka	28. 4.	11. 4.	19. 5.	14. 5.	23. 4.	13. 6.
Navadna pasja trava	28. 4.	12. 4.	5. 5.	10. 5.	22. 4.	26. 5.
Visoka pahovka	7. 5.	17. 4.	21. 5.	23. 5.	25. 4.	13. 6.
Travniški mačji rep	23. 5.	1. 5.	16. 6.	12. 6.	7. 5.	4. 7.

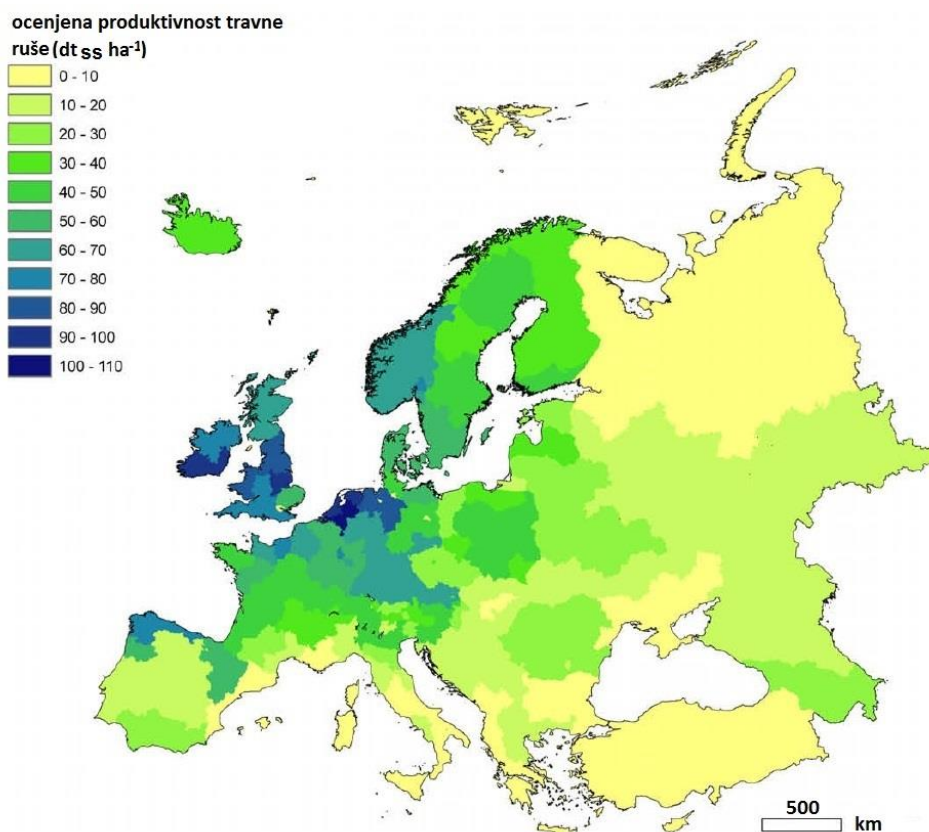
Spremljanje in napovedovanje fenološkega razvoja trav je pomembno tudi s stališča alergij, saj je cvetni prah trav med najbolj alergenimi (Črepinšek, 2002). Poleg tega je fenološki razvoj eden glavnih bioindikatorjev vplivov podnebnih sprememb na ekosisteme (Schleip in sod., 2006). Kot navaja Črepinškova (2002), so na ARSO z letom 1985 spremenili program opazovanja pri travah. Podatki do vključno leta 1984 opisujejo pojav cvetenja, od leta 1985 dalje se je opazovalo latenje trav, po letu 1998 pa oboje. Fenološki fazi se med sabo statistično značilno razlikujeta po času nastopa. V preglednici 1 je zbran pregled povprečnih, najzgodnejših in najpoznejših datumov latenja in cvetenja v obdobju 1997–2014 v Ljubljani za opazovane vrste trav. Kot vidimo, prvi cveti travniški lisičji rep, precej za vsemi preostalimi pa travniški mačji rep.

2.3 PRIDELKI IN GNOJENJE

Pridelki travne ruše se na medletni skali močno razlikujejo, in to celo pri standardnih pridelovalnih razmerah (Schapendonk in sod., 1998; Trnka in sod., 2005). Herrmann in sod. (2005) so na podlagi simulacij modela FOPROQ podali grobo oceno, da je v enem letu od dveh pridelek več kot 8 do 10 % večji oz. manjši od povprečja.

Kot kaže karta (Slika 3), dosegajo največjo produktivnost območja pod vplivom Atlantika, v povprečju letno okoli 10 t suhega zelinja ha⁻¹. Največji zabeleženi pridelki so na Nizozemskem, predvsem zaradi kombinacije ugodnega podnebja in visoko intenzivne kosne in pašne rabe. Poleg ugodnih podnebnih razmer je za tak pridelek odločilna tudi visoka stopnja gnojenja (Smit in sod., 2008). V Srednji Evropi dosegajo nekoliko manjše pridelke suhega zelinja: v Nemčiji, severnem delu Avstrije in v Švici v povprečju letno 6 t ha⁻¹ ali nekoliko več. Na Poljskem, Češkem in Slovaškem pa letno okoli 4 t ha⁻¹.

Najslabša je produktivnost v Sredozemlju. Travna ruša je tu izpostavljena hudemu sušnemu stresu, zato lahko letni pridelek doseže tudi le $1,5 \text{ t ha}^{-1}$. Nekoliko boljši so pridelki na bolj goratih območjih, kot so Pireneji, Sierra Nevada (Španija), Balkanski polotok in severni del Grčije. Drugo območje s slabim pridelkom pa se nahaja na severu Evrope, kjer prevladuje tundra, na primer na Islandiji, severu Skandinavije in v Rusiji. Med naštetimi je stanje zaradi sejane travinja rahlo boljše v Skandinaviji, ruski sistem pa se bolj zanaša na naravno travinje (Smit in sod., 2008).



Slika 3: Prostorska porazdelitev produktivnosti travne ruše v Evropi (Smit in sod., 2008: 214)
Figure 3: Spatial distribution of grassland productivity in Europe (Smit et al., 2008: 214)

Statistično so pridelki suhega zelinja na slovenskih negnojenih travnikih in pašnikih majhni, in sicer od 2 do 4 t ha^{-1} (Korošec in Leskošek, 1998). Vendar pa lahko ob racionalnem gnojenju in redni oskrbi na našem travinju letno pridelamo od 5 do 10 t ha^{-1} , če imamo zelo dobre talne in vremenske dejavnike (Leskošek, 1998). Na dvokosnih nižinskih travnikih lahko dosežemo od $7,5$ do $8,5 \text{ t ha}^{-1}$, na trikosnih nižinskih travnikih od 9 do 10 t ha^{-1} , pri močnejšem gnojenju z dušikom pa okoli 11 t ha^{-1} , na štirikosnih nižinskih travnikih povprečno $11,4 \text{ t ha}^{-1}$ in pri pašno-kosni rabi od 12 do 15 t ha^{-1} (Leskovšek, 1981, cit. po Žitek, 1991).

Po podatkih Statističnega urada (SURS, 2014) je bil pridelek sena (85 % vsebnost sušine) s trajnega travinja v Sloveniji v obdobju 1991–2012 med $2,3$ in $5,8 \text{ t ha}^{-1}$ po šifrantu

Eurostatove zbirke New Cronos. Pri tem je zelo očiten upad pridelka v letih 1992, 1993 in 2003.

Letni pridelek zelinja je odvisen od pogostosti rabe travne ruše, vlažnosti rastišča in načina gnojenja. V splošnem v Sloveniji travinje precej manj gnojimo kot, na primer, na Nizozemskem (Schapendonk in sod., 1998).

V poročilih Leskoška o poskusu S72 (več o poskusu v poglavju 3) v Ljubljani (Leskošek, 199?) je podana ugotovitev, da so različni učinki dušika na pridelek travne ruše večinoma posledica različne preskrbljenosti rastlin s fosforjem in kalijem. Za leto 1991 pa poroča, da je pri povečanju pridelka za do 5 t ha^{-1} zagotovo glavno vlogo odigral dušik. Pri tem dušik bolje deluje pri trikosni rabi kot pri dvokosni. Zavedati pa se moramo, da povečano gnojenje z dušikom ne poveča sorazmerno tudi vsebnosti dušika v senu. Za pretirano se je v tem primeru izkazalo že gnojenje s po 75 kg N ha^{-1} dvakrat letno.

Dostopnost podatkov o pridelku travne ruše je globalno precej slaba. Izjemen primer je več kot 40-letni niz podatkov o travni ruši iz avstrijskega poskusa na trajnem pašniku v Gumpensteinu. Tako dolgi nizi podatkov so za travno rušo precej redki. Mnogo raziskav zaradi pomanjkanja podatkov temelji na krajših nizih, saj ima večina poljskih poskusov v osnovi drugačen namen in zato ne zagotavlja vseh vhodnih podatkov, potrebnih za modeliranje (Žalud in sod., 2006). Pomanjkanje dolgih nizov eksperimentalnih podatkov omejuje rabo modelov za simulacijo rasti in pridelka travne ruše, saj so zanesljivi in zadovoljivo obsežni podatki nujni za njihovo umerjanje in preverjanje (Trnka in sod., 2006).

2.4 KOŠNJA

Za košnjo je pomembna faza latenja. S preходом iz razvojnega stadija latenja v razvojni stadij cvetenja, kar se pri nas na primer pri navadni pasji travi zgodi v mesecu maju, se namreč močno zmanjšata vsebnost hranilnih snovi in prebavljivost organske snovi zelinja, poveča pa se vsebnost surove vlaknine (Kapun, 2005). Ker kakovost travne ruše torej navadno upada z zrelostjo, bi poznavanje povezave med spremembo kakovosti trave in fenološkim razvojem pomenilo velik napredek pri modeliranju optimiziranja pridelave travniške krme (Črepinšek, 2002). Pravočasna košnja večinoma omogoča boljše obraščanje strnišča, saj je navadno v začetku maja v tleh še dovolj vode (Tehnološka priporočila ..., 2008). Pri določanju naslednjih košenj pa ni več tako zelo pomemben fenološki razvoj travne ruše, temveč spremljamo njeno višino in bujnost. Nič nenavadnega ni, da se kakovost mrve druge in poznejših košenj viša. Po vsaki košnji se namreč večina trav in detelj regenerira (Korošec, 1984). Ob vsaki naslednji regeneraciji formirajo trave več vegetativnih – listnatih – poganjkov brez podaljšanih stebel ali celo izključno te; le v prvi košnji prevladujejo generativni poganjki oz. bili. Pri tem je pomembna tudi dolžina dneva, saj večina rastlin v travni ruši preide v generativno fazo razvoja le, če so izpostavljene dovolj dolgi osvetlitvi.

Dvokosne travnike kosimo dvakrat, prvič v juniju, drugič pa v avgustu. Pri izboljšani dvokosni rabi se prva košnja izvede v prvi dekadi junija, druga pa v drugi dekadi avgusta. Takšna raba večinoma velja za zastarelo, v praksi pa velikokrat niti ni prave meje med dvo- ali trikosno rabo, saj je treba upoštevati vremenske razmere. Pri trikosnih travnikih je prva košnja prestavljena v zadnjo dekada maja. To povzroči zmanjšanje pridelka sena za približno 10 dt ha⁻¹, a je zato pridelek bolj kakovosten. Pri štirikratni rabi je treba začeti v prvi polovici maja ter nadaljevati na mesec in pol. Po raziskavi, ki jo je izvedel Žitek (1991), je optimalni čas košnje (velja tako za prvo kot za drugo košnjo) odvisen tudi od gnojenja.

V Sloveniji glede na podatke Statističnega urada (SURS, 2014) pri trajnih travnikih in pašnikih na okoli 200.000 ha prevladuje dva- ali trikratna raba: na približno 115.000 ha imamo dvakratno, na 80.000 ha trikratno. Preostane še 55.000 ha z enkratno rabo in 30.000 ha s štiri- ali večkratno rabo.

Herrmann in sod. (2005) razlagajo, da lahko večjo variabilnost pridelka pri manjšem številu košenj v veliki meri pojasnimo z interakcijo med režimom defoliacije in rastlini dostopno vodo v tleh. Pri tem pa pri travno-deteljnih mešanica pogostost košnje nima statistično značilnega učinka na pridelek suhe mase. Tudi Winkler in Herbst (2004) sta v štiriletnem poskusu ugotovila, da pogostost košnje nima nobenega vpliva na pridelek. Zaradi kompleksnosti travne ruše oz. njene sestave lahko traja več sezon, da se pokažejo učinki spremenjenih razmer. Navajata tudi raziskave, ki govorijo o tem, da se visoka odzivnost travne ruše na povišano koncentracijo CO₂ kaže le pri bogati založenosti s hranili in dobri dostopnosti vode v tleh.

2.5 MODELI ZA SIMULIRANJE RASTI IN PRIDELKA TRAVNE RUŠE

Razvoj in uporaba agrometeoroloških modelov sta zelo koristna pri raziskovanju rasti in razvoja travne ruše (in poljščin), na primer pri načrtovanju poskusov, testiranju hipotez in odpiranju novih vprašanj (Wolf in Van Ittersum, 2009). Ti modeli nam pomagajo razumeti kompleksne interakcije med rastjo, hranilno vrednostjo in okoljskimi komponentami (Bonesmo in Belanger, 2002; Kajfež-Bogataj, 2005; Angulo in sod., 2014). Modeli so torej uporabni za razvoj znanosti in stroke ter za izobraževanje. Lahko so uporabnejši od poljskih poskusov, kadar ti niso izvedljivi ali ko želimo osnovo za postavljanje hipotez. Simulacije lahko izvajamo tudi z arhivskimi podatki in s scenariji za prihodnost (Barrett in Laidlaw, 2005). Za napovedovanje vplivov postopno naraščajočih temperatur zraka in koncentracije CO₂, na primer, poskusi v primerjavi s časovnimi konstantami mnogih ekosistemskih procesov v veliki meri zajemajo prekratko časovno obdobje. Zato vedno obstaja tveganje, da je bil v poskusu opažen le prehodni odziv. Prav tako pa si niti dva poskusa ne moreta biti popolnoma enaka, zaradi česar so primerjave težje in lahko vodijo v zavajajoče rezultate. Poskusi pa so zato izrednega pomena za zmanjševanje negotovosti pri opisovanju in parametrizaciji modelov (Thornley in Cannell, 1997).

Ena od glavnih prednosti modelov je možnost uporabe v različnih vremenskih in talnih razmerah, v različnih okoljih in različnih regijah sveta (Žalud in sod., 2006). Naj omenimo, da so na splošno modeli za rast poljščin v Sloveniji v večji meri neraziskani in zato tudi niso v operativni rabi. Nedavno se je z modelom WOFOST v svoji doktorski disertaciji ukvarjal Ceglar (2011), a zaenkrat ostaja pri rezultatih brez nadaljnje rabe modela. V obširni vrsti dostopnih modelov za simulacijo rasti poljščin ali travne ruše so najbolj znani in uporabljani modeli CERES, WOFOST, LINTUL, EPIC, MACROS, SWAP, STICS in APSIM (Žalud in sod., 2006).

V tujini sta v zadnjem desetletju (ponekod že dveh) razvoj in uporaba modelov za simulacijo rasti travne ruše v okviru spremljanja dejanskega stanja, analiziranja dosedanjih sprememb ter pripravljanja scenarijev za prihodnost postala zelo aktualna. Pridelek travne ruše iz leta v leto močno niha, predvsem zaradi različnih vremenskih razmer (Herrmann in sod., 2005). Pri uporabi za študije interakcij med tlemi in vremenskimi razmerami, gospodarjenjem s travno rušo in njeno rastjo nam lahko olajšajo odločitve glede optimalnega časa košnje (Jego in sod., 2013). Kot pravijo Žalud in sod. (2006) ter Trnka in sod. (2006), sta razvoj in uporaba modelov velikega pomena predvsem za kmete v Evropi, ki se ukvarjajo z govedorejo, saj mora celotni sistem kmetovanja upoštevati tveganje zaradi možnih neugodnih vremenskih razmer. Z leti narašča tudi ozaveščenost o potencialni možnosti uporabe modelov v sistemih za podporo odločanju v govedoreji glede načrtovanja paše in pridelovanja krme. Eden izmed takih primerov je model GrazeGro, ki je na severnem Irskem vključen v sistem GrassCheck, ki omogoča spremljanje rasti in razvoja travne ruše za pretekle tri tedne in prihodnja dva (Barrett in Laidlaw, 2005), in v podoben evropski sistem GrazeMore (Barrett in sod., 2005).

V praksi nam modeli pomagajo bolje razumeti zapletene povezave med vplivi vremena in tal na rast travne ruše. Modeli opisujejo kompleksen sistem, po svoji zgradbi pa so različno zapleteni, s tem pa hkrati tudi različno zahtevni glede vhodnih podatkov. Če povzamemo po Barrett in Laidlaw (2005), ločimo empirične in mehanistične modele (Preglednica 2).

V splošnem so najenostavnejši empirični modeli, ki pogosto temeljijo na regresijskih povezavah med izmerjenimi eksperimentalnimi podatki in izhodnimi podatki modela, pri čemer pa ne upoštevajo fiziologije in tako tudi ne nudijo vpogleda v biološke procese. Zaradi svoje preprostosti ne morejo biti uporabljeni v drugačnih razmerah (podnebnih, talnih idr.). Alternativa empiričnim so mehanistični modeli, ki imajo za osnovo teorijo in znanje o glavnih bioloških principih. Seveda pa lahko tudi mehanistični modeli vsebujejo empirične elemente ali podmodele. Kot taki so primernejši za modeliranje rasti in razvoja travne ruše, saj so robustnejši, natančnejši in bolj prilagodljivi. Najkompleksnejši model ni nujno najprimernejši za simulacijo rasti in razvoja travne ruše, saj lahko potrebuje vhodne podatke, ki niso splošno dostopni. Tudi Schapendonk in sod. (1998) so pri razvoju modela

LINGRA razmišljali, kako natančno naj bodo opisani procesi in povezave med njimi. Začeli so s preprostim pristopom in nato postopno dodajali podrobnejše opise.

Preglednica 2: Izbor in splošen opis modelov, razvitih za napovedovanje rasti travne ruše (Barrett in Laidlaw, 2005: 81)

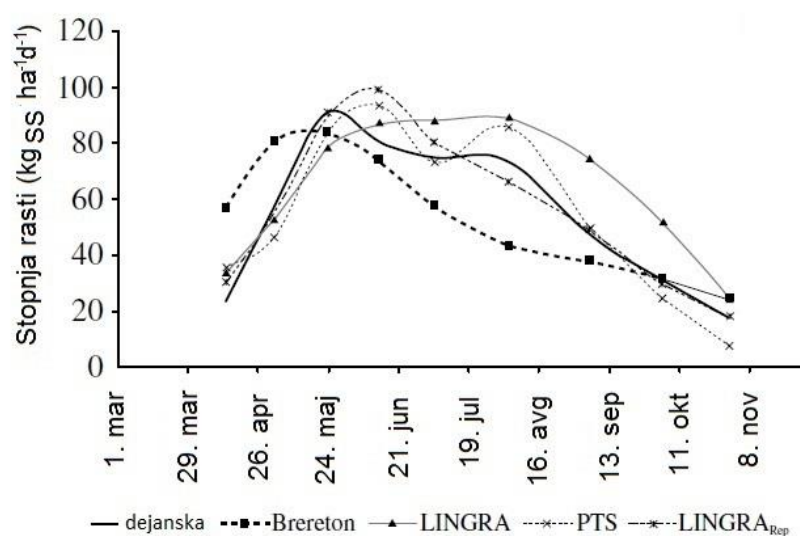
Table 2: A selection and description of recent models developed for grass growth prediction (Barrett and Laidlaw, 2005: 81)

Referenca (ime)	Namen	Tip	Aplikacija
Barrett in sod., 2005 (GrazeGro)	pridelek in kakovost travne ruše	mehanistični	evropski sistem za podporo odločanju GrazeMore in severno-irski GrassCheck
Topp in Doyle, 2004	sistem za podporo upravljanju paše/košnje	mehanistični	napovedovanje pridelka v različnih agroklimalskih conah v Severni Evropi
Han in sod., 2003	pridelek in kakovost travne ruše	empirični	pridelava silaže na irskih trajnih pašnikih
Rook in sod., 2001 , cit. po Barrett in Laidlaw, 2005	pridelek travne ruše	empirični	izboljšano gospodarjenje s travno rušo za pašo v Angliji
Woodward, 2001	pridelek in kakovost travne ruše	mehanistični	izboljšano gospodarjenje s travno rušo na Novi Zelandiji
Brereton in sod., 2001 , cit. po Barrett in Laidlaw, 2005	pridelek travne ruše	empirični	izboljšano gospodarjenje s travno rušo za pašo na Irskem
Rodriguez in sod., 1999 (LINGRA-CC)	podnebne spremembe	mehanistični	ocene vplivov povišane koncentracije CO ₂ v ozračju
Thornley in Cannell, 1997 (Hurley Pasture)	biološko razumevanje	mehanistični	izboljšano razumevanje procesov
Schapendonk in sod., 1998 (LINGRA)	pridelek travne ruše	mehanistični	ocene rabe tal, napovedovanje pridelka in vplivov podnebnih sprememb
Moore in sod., 1997	pridelek travne ruše	mehanistični	avstralski sistem za podporo odločanju GrazePlan
Mohtar in sod., 1996 , cit. po Barrett in Laidlaw, 2005	pridelek travne ruše	mehanistični	ameriški sistem za podporo odločanju GRASIM
Topp in Doyle, 1996	vplivi podnebnih sprememb	mehanistični	pridelek travne ruše na Škotskem
Gustavsson in sod., 1995	pridelek travne ruše	mehanistični	izboljšano gospodarjenje s travno rušo za silažo na Švedskem
Parsons in sod., 1988	biološko razumevanje	mehanistični	razumevanje dinamike travne ruše za pašo
Corrall, 1998 , cit. po Barrett in Laidlaw, 2005	pridelek travne ruše	empirični	napovedovanje pridelka na panevropskih trajnih travnikih

Barrett in sod. (2004) so v svojo analizo vključili različne tipe modelov. Breretonov model (Brereton in sod., 2001, cit. po Barrett in Laidlaw, 2005) je empiričen in sloni na učinkovitosti, s katero je sončna energija pretvorjena v organsko snov, vplivih okolja in gospodarjenja s travno rušo. Model je statičen in torej ne opisuje rasti v času, temveč oceni pridelek na koncu določenega obdobja glede na stanje okoljskih spremenljivk v tem

obdobju. PTS (verzija modela Johnson in Thornley (1985), razvita za poljsko uporabo na severnoirski rastlinski testni postaji - Plant Testing Station: Laidlaw in Gilliland, 2000, cit. po Barrett in sod., 2004) je zelo kompleksen mehanističen model, prav tako mehanističen model LINGRA pa je bil uporabljen v dveh različicah – z dodanim modulom reproduktivne rasti (LINGRA_{Rep}) in brez njega (osnovni model). Vhodni podatki so pri vseh modelih v večji meri podobni. Breretonov model je na eni lokaciji dosegel najboljše ujemanje z izmerjenimi vrednostmi, na drugi pa najslabše.

Značilno za empirične modele je, da se na lokacijah oz. v razmerah, za katere niso bili umerjeni, slabo izkažejo. Enostavni popravki v modelu LINGRA_{Rep} so prinesli veliko izboljšanje v ujemanju modela z dejanskim stanjem. Model PTS z rezultati ni upravičil svoje kompleksnosti. V primerjavi z njim model LINGRA ni pretirano zapleten, saj ne vključuje procesov na biokemični ravni in izredno dolgih postopkov izračunov. Zato je bil model LINGRA ocenjen kot idealen za nadaljnji razvoj in integracijo v sistem EU za podporo odločanju – Grazemore. Predstavljena so (Slika 4) povprečja simulacij stopnje rasti za vse štiri modele ter povprečne dejanske izmerjene vrednosti za obdobje 1990–2001.



Slika 4: Povprečna (1990–2001) dejanska stopnja rasti v sezoni v kraju Crossnacreevy na Irskem in štiri različne modelske simulacije stopnje rasti (Barrett in sod., 2004: 331)

Figure 4: Mean (1990–2001) seasonal actual growth rates in Crossnacreevy, Ireland and predicted growth rates of the four models evaluated (Barrett et al., 2004: 331)

Taubert in sod. (2012) so raziskali 13 obstoječih modelov (Preglednica 3), ki simulirajo rast in pridelek travne ruše. Pri tem so predstavili prednosti in slabosti vsakega modela. Na tej osnovi so pripravili novi model GRASSMIND za simulacijo pridelka travne ruše v kontekstu pridelave biogoriva. Če povzamemo nekaj značilnosti modelov po Taubert in sod. (2012), se kot najzahtevnejši glede vhodnih podatkov kažejo modeli Hurley Pasture (Thornley in Cannell, 1997), PaSim (Riedo in sod., 1997) in GEM (Hunt in sod., 1991).

Preglednica 3: Pregled lastnosti nekaterih modelov za rast in pridelek travne ruše (Taubert in sod., 2012: 86)

Table 3: An overview of the reviewed models by time step, model structure, main variables, management activities and abiotic factors considered, and the resources species compete for (Taubert et al., 2012: 86)

Model	Časovni korak	Izračuni temeljijo na populaciji (P)/individualni rastlini (I)	Glavne spremenljivke	Upoštevani načini gospodarjenja	Vključeni abiotični dejavniki	Viri, za katere tekmujejo rastline v modelu
Schippers in Kropff, 2001	dan	P	nad- in podzemna biomasa, vsebnost dušika	košnja, gnojenje	sončno obsevanje, temperatura zraka, vsebnost dušika v tleh	svetloba, dušik
Hurley Pasture	minuta	P	nad- in podzemna biomasa, vsebnost dušika, površina listov	košnja, gnojenje, paša	sončno obsevanje, temperatura zraka in tal, vsebnost vode v tleh, vsebnost dušika v tleh, hitrost vetra, koncentracija CO ₂ v ozračju, padavine, tlak vodne pare	svetloba, dušik, voda
PaSim	minuta	P	nad- in podzemna biomasa in vsebnost dušika, površina listov	košnja, gnojenje, paša	sončno obsevanje, temperatura zraka in tal, vsebnost vode v tleh, vsebnost dušika v tleh, hitrost vetra, koncentracija CO ₂ v ozračju, padavine, tlak vodne pare, snežna odeja	svetloba, dušik, voda
Coughenour in sod., 1984	2 dneva	P	nad- in podzemna biomasa	/	vsebnost dušika v tleh	svetloba, dušik
Detling in sod., 1979	dan	P	nad- in podzemna biomasa	gnojenje, namakanje	sončno obsevanje, temperatura zraka in tal, vsebnost vode v tleh, padavine, fotoperioda	svetloba
Coffin in Lauenroth, 1990	leto	I	nadzemna biomasa, število posameznih rastlin	/	temperatura zraka, padavine	voda
						se nadaljuje

nadaljevanje Preglednica 3: Pregled lastnosti nekaterih modelov za rast in pridelek travne ruše (Taubert in sod., 2012: 86)

Model	Časovni korak	Izračuni temeljijo na populaciji (P)/individualni rastlini (I)	Glavne spremenljivke	Upoštevani načini gospodarjenja	Vključeni abiotiski dejavniki	Viri, za katere tekmujejo rastline v modelu
Duru in sod., 2009	dan	P	indeks listne površine, nadzemna biomasa	košnja	sončno obsevanje, temperatura zraka, vsebnost vode v tleh, vsebnost dušika in fosforja v tleh, sezonskost	svetloba
LINGRA	dan	P	nad- in podzemna biomasa, število poganjkov, indeks listne površine	košnja, namakanje	sončno obsevanje, temperatura zraka, vsebnost vode v tleh, padavine	svetloba, voda
GEM	dan	P	nad- in podzemna biomasa, vsebnost dušika	/	sončno obsevanje, temperatura zraka in tal, vsebnost vode v tleh, vsebnost dušika v tleh, hitrost vetra, koncentracija CO ₂ v ozračju, padavine, tlak vodne pare	dušik, voda
GraS	dan	P	področje, ki ga pokriva travna ruša (raba tal)	košnja, paša, teptanje	/	prostor

Pri tem je model Hurley Pasture zelo kompleksen, temelji na procesih, kot so dnevni pretoki ogljika, dušika in vode v tleh, povezanih s pod modeli za simulacijo lastnosti tal, rastline in paše. Že samo podmodel za rastlino vsebuje 21 spremenljivk in 60 parametrov, kar za naše namene in umerjanje predstavlja preveč podrobnosti za premajhen predviden končni učinek. Na omenjenem modelu v veliki meri sloni model PaSim, vendar vključuje še bolj razdelane procese. Zaradi kompleksnosti se v obeh modelih predvideva uporaba ene same vrste trave.

Model GEM je zasnovan za raziskave vplivov podnebnih sprememb na dnevno dinamiko ogljika in dušika pri eni vrsti trave. Pri modelu GraS (Siehoff in sod., 2011), ki je precej bolj enostaven, rastline tekmujejo le za prostor, kar je precejšnja omejitev. Pri tem so dodani le parametri rabe tal in indikatorji košnje, paše ali teptanja. Nasprotno pa model Schippers in Kropff (2001) vključuje tudi abiotične dejavnike, kot so sončno obsevanje, temperatura zraka in vsebnost dušika v tleh, še vedno je precej preprost, ne upošteva pa sušnega stresa ob pomanjkanju vode v tleh.

Drug pristop ponuja model, ki so ga ustvarili Duru in sod. (2009). Večinoma se ukvarja z dnevno akumulacijo nadzemne mase ob upoštevanju temperature zraka in staranja, omejujoča faktorja pa sta primanjkljaj vode in dušika. Omogoča modeliranje različnih vrst travne ruše hkrati, ki so v modelu opisane kot združbe z nekaj skupnimi parametri, kar pa lahko marsikdaj že predstavlja preveč kompleksen vhodni podatek. Model, ki so ga razvili Coughenour in sod. (1984), simulira dnevni primarni pridelek trajnega travinja. Pri modeliranju procesov so potencialne vrednosti spremenjene z uporabo redukcijskih faktorjev. Dodatno je omogočena simulacija dinamike poganjkov za posamezne rastline, saj podmodel vključuje različne faze staranja.

Coffin in Lauenroth (1990) sta se s svojim modelom posvetila bolj semiaridnim območjem, pri čemer rastline med seboj v največji meri tekmujejo za vodo. Gre za letno simulacijo dinamike sprememb prostora, ki ga zasedajo rastline. Splošnejši je spet model, ki so ga ustvarili Detling in sod. (1979). Vključuje medsezonske vplive temperature zraka, sončnega obsevanja, vsebnosti vode v tleh in dušika na dinamiko biomase za eno specifično vrsto travne ruše. Za model LINGRA pa menijo, da bi ga dodatno izboljšalo upoštevanje stresa ob pomanjkanju dušika (kar je vključeno v model LINGRA-N) ter tekmovanje za vodo in dušik med individualnimi poganjki različnih vrst.

Modeli lahko simulirajo rast in razvoj z različnim časovnim korakom. Tudi to je pomemben faktor pri izbiri modela. Na letni ravni je simuliranje pridelka travne ruše sicer lahko zanimivo s stališča pregleda in primerjave na večji prostorski enoti, za potrebe naše raziskave pa potrebujemo podrobnejši vpogled v dogajanje med rastjo travno ruše. Na dnevni skali tako lahko datumsko vključimo tudi košnje in gnojenje, na voljo imamo meteorološke podatke, dnevni izpis vrednosti spremenljivk pa že nudi veliko dodano vrednost. Modeli, ki uporabljajo za časovni korak minuto, pa so načeloma prezahtevni v smislu vhodnih podatkov, potrebnih za simulacijo na tej ravni.

Razvitih je bilo precej modelov za simulacijo rasti travne ruše na trajnem travinju, ki temeljijo na procesih v rastlini, a le redki vključujejo simulacijo ponovne rasti po košnjah (Jing in sod., 2012a). Eden takih je model LINGRA. Pri tem pa Jing in sod. (2012a) opozarjajo, da LINGRA ne upošteva premeščanja dušika, ki pri ponovni rasti ni nepomemben. Zato so se v svojih raziskavah raje posvetili modelu CATIMO in mu priredili modul za ponovno rast, ki ga dotlej ni imel. Pri tem so glede nadzemne biomase v času ponovne rasti dosegli nekoliko boljše rezultate kot z modelom LINGRA. Vendar pa sta, na primer, pri njihovem poljskem poskusu tako LINGRA kot CATIMO podcenjevala količino pridelka v letu 2001.

S konstantno vrednostjo dušika so v svojem lastnem modelu rast travne ruše simulirali Merot in sod. (2008). Po njihovem mnenju je tudi to lahko razlog za del napake simulacije, še posebej na začetku sezone pri prehodu iz zime.

Trnka in sod. (2006) trdijo, da za Avstrijo trenutno ni primernega dinamičnega modela za simulacijo pridelka travne ruše, saj na izbranih lokacijah nimajo dovolj dolgih nizov podatkov za umerjanje kompleksnih modelov. Zaradi zelo raznolikih lastnosti tal in načinov gospodarjenja s travno rušo bi vsaka različica zahtevala ločeno umerjanje, poleg tega pa so nekateri preizkušeni modeli slabo simulirali stanje preskrbljenosti z dušikom in vodo. Zato so razvili svoj statistični model GRAM, ki temelji na ustaljenih statističnih povezavah med omejenim nizom dnevni in sezonskih spremenljivk. Rezultati modela so po odstopanjih med ocenjenim in dejanskim pridelkom primerljivimi s tistimi, ki so jih Schapendonk in sod. (1998) dobili z uporabo modela LINGRA, Riedo in sod. (1997) pa z uporabo modela Hurley Pasture (a ne v enakih okoliščinah).

Omenili smo že, da izbira modela pogosto pogojuje dostopnost vhodnih podatkov. Pri tem ni nujno, da z manj zahtevnim izborom vhodnih podatkov dobimo slabše rezultate. Trnka in sod. (2006) navajajo, da je v nekem primeru statistični model GRAM, ki je glede vhodnih podatkov zelo nezahteven, pokazal 90-odstotno ujemanje med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi pridelka, pri dinamičnem modelu Hurley Pasture pa v nekem drugem primeru (s posebej razvitim, natančnejšim podmodelom za dušik) sploh ni bilo statistično značilne povezave z izmerjenimi vrednostmi.

Höglind in sod. (2001) na podlagi svojih raziskav priporočajo, da simuliranje travne ruše začnemo s parametrizacijo osnovnega preprostejšega modela, preden razmišljamo o zahtevnejših alternativah za različne algoritme v modelu. Poleg tega poudarjajo velik pomen simulacije neravnovesja ponor-vir v mehanističnih modelih, kot je LINGRA, saj je to bistveno pri prilagajanju modela na nove rastne razmere ali rastlinske vrste.

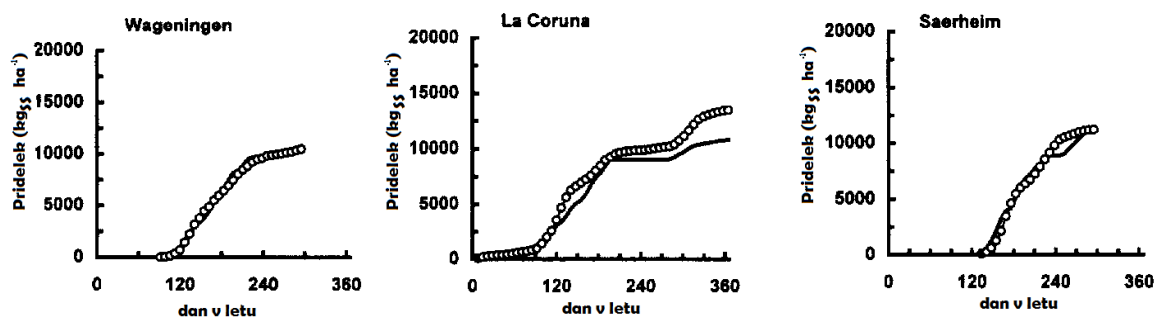
Na podlagi pregleda dostopnih modelov, njihove zahtevnosti glede vhodnih podatkov, priporočil in dosedanjih raziskav smo za naše raziskovalno delo izbrali nizozemski model LINGRA oz. njegovo pozneje izboljšano verzijo LINGRA-N.

2.6 UPORABA MODELA LINGRA

Z modelom LINGRA je bilo v tujini opravljenih precej študij, njegov naslednik LINGRA-N, ki smo ga uporabili v naši raziskavi, pa se šele uveljavlja, saj je bil razvit leta 2012. Že s preprostimi in sorazmerno majhnimi spremembami modulov ali parametrov lahko pri obeh dosežemo veliko boljše ujemanje izmerjenih in modeliranih vrednosti, pri čemer struktura modela sama po sebi omogoča enostavne adaptacije. Zato so na primer Barrett in sod. (2005) uporabili model LINGRA kot osnovo za razvoj modela GrazeGro za Grazemore – evropski sistem za podporo pri upravljanju paše krav molznic.

Prav tako je model LINGRA manj zahteven z vidika vhodnih podatkov (Bonesmo in Belanger, 2002). Nekaj objav govori o oceni zahtevanih parametrov (npr. največja specifična listna površina, optimalna temperatura zraka in temperatura praga, kritični indeks listne površine ...) in območjih umerjanja (Van Oijen in sod., 2005; Agrometeorological modelling ..., 2004; Bonesmo in Belanger, 2002) ter o testiranju in preverjanju modela (Duru in sod., 2009; Trnka in sod., 2006).

Dinamična (spremenljivke so modelirane v nekem časovnem obdobju – ni statično) modela WOFOST (poljščine) in LINGRA (travna ruša) (Barrett in Laidlaw, 2005; Gallego in sod., 2007) predstavljata jedro Sistema za spremljanje rasti poljščin CGMS (angl. Crop Growth Monitoring System), na katerega se Evropska komisija opira na področju kmetijstva in ki Komisiji med drugim zagotavlja objektivno količinsko napoved pridelka na regionalni in nacionalni skali.



Slika 5: Opazovana (°) in z modelom LINGRA simulirana (-) skupna masa zelinja v Wageningnu, La Coruni in Saerheimu v letu 1984 pri poskusih brez namakanja (Schapendonk in sod., 1998: 94)

Figure 5: Observed (°) and with LINGRA-N model predicted (-) total above-ground biomass of non-irrigated treatments in Wageningen, La Coruna and Saerheim in 1984 (Schapendonk et al., 1998: 94)

Pri začetnih ocenah modela LINGRA se je pokazalo, da se modelirane vrednosti dobro ujemajo z izmerjenimi. Na več lokacijah je model dobro simuliral začetek rasti, stopnjo pridelka travne ruše in odklone v pridelku kot odziv na sušna obdobja (Slika 5). Testirali so tudi odziv na spremembo temperature zraka in količine padavin (Schapendonk in sod., 1998).

Kmalu po razvoju osnovnega modela LINGRA so ga Rodriguez in sod. (1999) prilagodili v model LINGRA-CC, namenjen preučevanju podnebnih sprememb. Posvetili so se interakciji med povišano koncentracijo CO₂ v ozračju, podnebjem in spremembami pri dobro vzdrževani in namakani travni ruši. Glavna razlika med modeloma je način računanja nastajanja asimilatov. Poleg tega vrednosti specifične listne površine niso konstantne, drugačen je način izračuna učinkovitosti izrabe sončnega obsevanja, z vključenim vplivom encima rubisco. LINGRA-CC se je izkazala za primerno za opisane simulacije, saj zagotavlja dobro simulacijo sezonske dinamike indeksa listne površine (*LAI*), števila poganjkov in specifične listne površine.

Za modeliranje pridelka travne ruše v Evropi z modelom LINGRA so uporabili rezultate študije PASK (angl. Pasture Knowledge base). Wolf (2006) je analiziral možnosti uporabe podatkov in obnašanja modela v različnih rastnih razmerah. Izmerjeni podatki o pridelkih travne ruše po Evropi so precej skopi in so večinoma reprezentativni za slabše rastne razmere in skromnejšo oskrbo travne ruše, kar je težje primerljivo z rezultati modela, kjer so pričakovane dobre rastne razmere in optimalno gospodarjenje. Model je bil preizkušen za lokacije Wageningen, Bologna in Sevilla, ki imajo med seboj zelo različne podnebne razmere. Na vseh treh lokacijah so rezultati dobri. Pridelek narašča v omenjenem vrstnem redu, kar Wolf (2006) pripisuje dolžini rastne dobe in letni količini prestreženega sončnega obsevanja.

Höglind in sod. (2001) so model LINGRA spremenili iz specifičnega za trpežno ljuljko v prilagojenega travniškemu mačjemu repu. Pri tem so modelu dodali algoritme za dinamiko generativnih poganjkov. Pri analizi občutljivosti za 14 parametrov so ugotovili, da imajo največji vpliv na pridelek vsebnost encima rubisco, največja mogoča količina rezervnih hranil, dolžina obdobja med zaporednimi pojavljanji listov, temperatura zraka, pri kateri je pojavljanje generativnih poganjkov največje, in specifična listna površina. Koeficient slabitve za difuzno sevanje, začetna gostota poganjkov in največja relativna stopnja, pri kateri lahko vegetativni poganjki postanejo generativni, so bili večjega pomena le na nekaterih lokacijah. Večina teh parametrov je na pridelek vplivala posredno, prek vpliva na učinkovitost izrabe sončnega sevanja, prestrezanje sončnega obsevanja pa ni bilo občutljivo na spremembe, razen v primeru koeficienta slabitve difuznega sevanja.

Z novimi obsežnimi podatki so Van Oijen in sod. (2005) model za travniški mačji rep dodatno testirali. Opozarjajo na pomembnost pravilne simulacije ponovne rasti travne ruše po košnjah, pri čemer je dobra osnova model LINGRA, ki začne ponovno mehanistično simulacijo rasti z zamikom dveh tednov. V model so pozneje dodali še upoštevanje zimskih faktorjev stresa, tako popravljen model pa so za preučevanje fotosinteze pri nizkih temperaturah zraka in sončnem obsevanju uporabili Höglind in sod. (2011).

Pozneje so Höglind in sod. (2013) tako prilagojen model LINGRA uporabili za simulacijo rasti travne ruše na Norveškem v sedanjih in spremenjenih podnebnih razmerah. Travniški

mačji rep so uporabili, ker je zelo značilen za krmo v severni Evropi, saj dobro prenaša zimske razmere. Model so umerili s pomočjo Bayesove metode. Pri simulacijah so uporabili optimalno preskrbljenost travne ruše s hranili. Persson in sod. (2014) pa so prav tako na podatkih za Severno Evropo pokazali, da uporaba podatkov poljskih poskusov z različnih lokacij namesto z ene specifične lokacije pri umerjanju modela LINGRA izboljša splošno točnost napovedi pridelka za okoljsko heterogeno regijo. Glede na analizo občutljivosti začetnih pogojev priporočajo vsaj vsakokratno umerjanje začetne gostote poganjkov.

V zadnjem času postaja modeliranje rasti travne ruše zanimivo tudi z vidika proizvodnje biogoriv. De Vries in sod. (2014) so za ta namen model LINGRA nadgradili v model MICROSIM.

2.7 RAZISKAVE VPLIVOV VREMENSKIH RAZMER NA RAST IN PRIDELEK TRAVNE RUŠE

Vreme je pomemben dejavnik pri proizvodnji v kmetijstvu in hkrati eden izmed glavnih virov njene negotovosti (Gallego in sod., 2007; Production ..., 2008). Podnebna variabilnost je eden najbolj omejujočih dejavnikov pri pridelavi krme (Herrmann in sod., 2005). V Evropski uniji se izpostavljenost podnebno in gospodarsko pogojenemu tveganju od države do države precej razlikuje, zato je poznavanje lokalnih razmer bistvenega pomena (Gallego in sod., 2007; Žalud in sod., 2006).

Že posamezni parametri, pomembni za opis rasti travne ruše (npr. *LAI*), so močno vremensko pogojeni. Ob zadostni preskrbljenosti s hranili je tako razvoj travne ruše (do vrednosti $LAI = 4$) v največji meri odvisen od temperature zraka (Lambert in sod., 1999). Mnoge analize preteklih let so pokazale, da je produktivnost travne ruše močno odvisna od kombinacije dostopne vode v tleh, globalnega obsevanja, temperature zraka, dodanega dušika in načina rabe (Trnka in sod., 2006; Barrett in sod., 2005; Riedo in sod., 1997; Čop, 1992). Trnka in sod. (2006) so z modelom GRAM določili, da zgoraj naštetih dejavnikov pojasnijo 78 % variabilnosti pridelka. Pri tem Čop (1992) dodaja, da se travinje zmerne podnebne pasu, ki spadajo med C_3 -rastline, na povečanje sončnega obsevanja v rasti odzivajo pozitivno do točke nasičenja.

Čop (1992) opisuje sezonski potek rasti, sezonske spremembe v odzivnosti trav na okolje, kot so sezonske spremembe metabolizma ogljikovih hidratov, potenciala podaljševanja listov, fotosintetskega potenciala listov in ruše, bilance ogljika ruše in delitve asimilatov. Kot navaja, se mnenja bolj nagibajo k temu, da je neposredni vpliv delitve asimilatov relativno majhen in da je pomembnejši skupni dotok asimilatov. Nasprotno pa Yin in Schapendonk (2004) poudarjata, da je glavnega pomena pri modeliranju rasti travne ruše delitev asimilatov med korenine in zelinje.

Temperatura okolja je pomembna za stopnjo presnove pri rastlinah. Pri temperaturah zraka pod 10 °C se rast močno zmanjša, pri 5 °C pa komaj še ohranja. Do zmanjševanja rasti pride tudi s povečevanjem temperature zraka nad optimalno vrednost (20–25 °C) in z njeno ustavitvijo pri vrednostih od 30 do 35 °C dalje. Temperatura zraka določa tudi dolžino rastne dobe, torej kdaj trave začnejo in končajo z rastjo. Pri Čopovi (1992) obravnava dveh poskusnih let je, na primer, začetek rasti zelinja sovpadal s povprečno tedensko temperaturo zraka 10 °C. Zgodnja spomladanska rast je bila ne glede na kultivar trave tesno povezana s temperaturo zraka (pojasnjuje 83 % skupne variabilnosti) in slabo s sončnim obsevanjem. V poletno-jesenskem času pa je sončno obsevanje v vseh primerih pomembneje vplivalo na potek rasti (82 % skupne variabilnosti) kot temperatura zraka.

Nekatere raziskave opisujejo tudi učinek nizkih temperatur in snega. Pri tem moramo učinek izredno nizkih temperatur zraka kombinirati s snežno odejo, ki predstavlja izolacijo, in postopnim pripravljanjem rastlin na mraz. Zato je končni učinek zelo težko oceniti (Production ..., 2008). Upoštevati je treba, da večina trav pozimi ne raste. Nekatere med njimi pa so zimzelene in po malem rastejo v primeru ugodnih rastnih razmer tudi pozimi; te spomladi tudi prve ozelenijo (npr. trpežna ljuljka) (Korošec, 1984). Na obstojnost travne ruše torej vplivajo tudi mraz pozimi in zgodnje spomladanske pozebe, ki so lahko velika nevarnost za mlade posevke, če na njih ni snežne odeje.

Trnka in sod. (2010) so kot del modela GRAM uporabili algoritem snowMAUS za oceno vpliva zimskih razmer na travno rušo in na začetek rastne sezone. Izkazalo se je, da se lahko začetek sezone zaradi snežne odeje zamakne za več dni, sploh v alpskih predelih. S preučevanjem zimskih razmer se sicer zaenkrat večinoma ukvarjajo v severni Evropi. Raziskav so se lotili Höglind in sod. (2011), ki ugotavljajo, da je težko dovolj natančno simulirati rastlinsko zalogo ogljikovih hidratov prek zime, deloma tudi zaradi nepopolnega znanja o fotosintezi in respiraciji pozimi. Thorsen in sod. (2010) pa so prav tako za Norveško preučevali dinamiko snežne odeje, zmrznjenih tal in površinskega ledu kot dejavnikov pri razvoju travne ruše.

2.7.1 Vpliv suše

Tehnološka priporočila ... (2008) opisujejo vpliv suše na travno rušo: »Za razliko od mnogih drugih kmetijskih rastlin je travna ruša trajnega travinja večletna, prav tako pa sejano travinje sejemo vsakih nekaj let. Posledice hudih suš na eni strani vplivajo na pridelovalno sposobnost travinja tudi v naslednjih letih, hkrati pa se botanična sestava ruše stalno spreminja in prilagaja rastnim razmeram, torej tudi pomanjkanju vode. Rast travne ruše se poleg tega časovno prilagaja obdobjem z dovolj razpoložljive vode. Spomladanski bujni rasti tako sledi poletno mirovanje in ob ugodnih razmerah ponovna rast v jesenskem obdobju.«

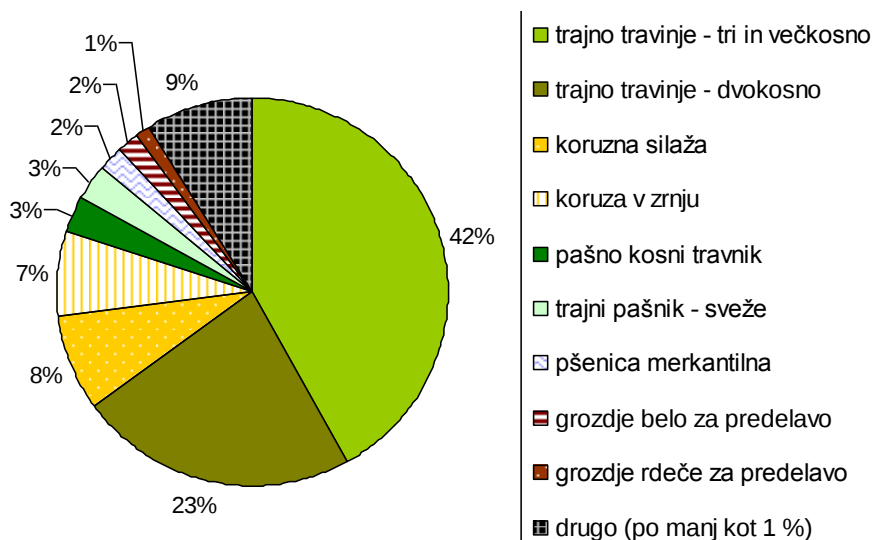
Suša se med drugim kaže kot prednostno premeščanje asimilatov v korenine (Schapendonk in sod., 1998). Pridelek pomembno določata količina padavin v času od aprila do

septembra in količina dostopne vode v tleh (Laidlaw, 2009). Izrazit je njen vpliv na fenološki razvoj, hkrati pa njen učinek ni enak v vseh razvojnih fazah (Production ..., 2008). Pri mnogih travniških vrstah se na primer lahko zaradi težav s sušnim stresom kaže pomembno zaostajanje cvetenja (Donatelli in sod., 1992).

Pri analizi z modelom LINGRA in s podatki študije PASK pri omejeni dostopnosti vode v tleh (pri vrednosti faktorja zmanjšanja rasti zaradi suše $TRANRF = 0,5$ (razlaga v poglavju 3.4.1.1.)) je Wolf (2006) ugotovil, da je tudi v sušnih razmerah (enako kot v optimalnih) pridelek travne ruše močno odvisen od dolžine rastne dobe in prestreženega sončnega obsevanja. Pridelek se je za Wageningen, Bologno in Sevillo zmanjšal na 20, 26 in 40 % optimalnega. Poleg tega je v Wageningnu sušni stres v povezavi s precej slabimi sevalnimi razmerami povzročil najpočasnejšo ponovno rast po košnjah. Na nobeni lokaciji se niso ustvarile rezerve ogljikovih hidratov. Simulacije z modelom FOPROQ (Herrmann in sod., 2005) so poleg tega pokazale, da povečana dostopnost vode v tleh v splošnem vodi v zmanjšanje variabilnosti pridelka travne ruše, ne glede na način pridelave.

Laidlaw (2009) navaja, da se v literaturi kot občutljiv kazalec vpliva pomanjkanja vode v tleh na rast in razvoj travne ruše pogosto pojavlja stopnja podaljševanja listov (angl. Leaf extension rate, *LER*), čeprav tega več njegovih poskusov ni potrdilo. Pri enem od poskusov pa je bila, na primer, poleg zniževanja *LER* ob pomanjkanju vode v tleh upočasnjena tudi rast poganjkov. Na koncu takega obdobja ima lahko zmanjšana gostota poganjkov kljub hitri vzpostavitvi prvotne stopnje *LER* vpliv na rast še vsaj v naslednjem obdobju. Poleg tega so njegovi poskusi pokazali, da suša v zgodnjem poletju večinoma nima dolgoročnega vpliva na pridelek. Po ponovni vzpostavitvi normalnega stanja ni bilo nobenih indikacij, da je imelo omejeno črpanje hranil pomemben vpliv na omejevanje rasti. Čop (2012) pa pojasnjuje, da trave že po svoji naravi najhitreje priraščajo v aprilu in maju, zato suša v tem času najbolj zmanjša letni pridelek zelinja. Med poletno sušo je zmanjšanje letnega pridelka zelinja običajno manjše, bolj prizadeta pa je trpežnost sestojev, saj ti niso izpostavljeni le dolgotrajnejši suši, temveč tudi ekstremno visokim temperaturam zraka.

Sušnik in Pogačar (2010a) sta preučili nekatere kazalce, kot so število stresnih dni, primanjkljaj vode in podobno, z namenom analize suše na travni ruši na šestih lokacijah v Sloveniji (Bilje, Celje, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota, Novo mesto) v obdobju 1973–2009. Rezultati kažejo, da so izbrani kazalci uporabno orodje pri sledenju kmetijske suše in načrtovanju na sušo odpornejše kmetijske pridelave. Analiza je pokazala, da na izbranih lokacijah v obravnavanem obdobju po devetdesetih beležimo daljša obdobja, ko je travna ruša v sušnem stresu, tudi primanjkljaji vode za travno rušo so v tem obdobju največji. Primerjava kazalcev in poročil o suši kaže, da je bila na vseh lokacijah najintenzivnejša in najdaljša suša na travni ruši leta 2003, sledijo leta 2000, 1992 in 1993.



Slika 6: Delež površin po kmetijskih kulturah, ki so doživele škodo po suši leta 2006 (Komisija za odpravo posledic škode v kmetijstvu, 2006, cit. po Sušnik, 2006)

Figure 6: Proportions of drought-affected area in 2006 by crop (Komisija za odpravo posledic škode v kmetijstvu, 2006, op. cit. Sušnik, 2006)

Sušnikova in Pogačarjeva (2010a) sta analizirali škodo v kmetijstvu zaradi suše v letu 2006 (Slika 6) in sešteli deleže površin, ki pripadajo trajnemu travinju (eno-, dvo-, tri- in večkosnemu travniku) in pašniku. Te predstavljajo kar 74 % celotne oškodovane površine. Razloge za večjo ranljivost travinja lahko iščemo na primer v plitvem koreninskem sistemu, pogosto so vzroki tudi nepreudarno gnojenje z dušikom ter vodna oskrba, vezana izključno na dež (Sušnik in Pogačar, 2010a).

Vplivi suše na travno rušo za omenjeno obdobje 1973–2009 so opisani v Agrometeoroloških mesečnih in dekadnih biltenih ARSO (Preglednica 4). Vendar pa, kot navajata Sušnik in Pogačar (2010a), niso vsi zapisi enako natančni, zato se količina informacij iz leta v leto razlikuje, nudi pa referenco, s katero lahko primerjamo izračune.

Sušnikova (2014) opozarja, da se vpliv sušnih obdobj v Sloveniji kaže predvsem na tleh s slabo vodnozadrževalno sposobnostjo in da suša v kmetijstvu predstavlja vedno večji problem. Dodaja, da je na takšnih rastiščih pomemben pravilen izbor poljščin. To velja tudi za koševine. V sušnih obdobjih v pridelku zaradi globokih korenin prevladujejo detelje. Pri tem se moramo zavedati, da se različne vrste travne ruše na sušo različno odzivajo, kot smo videli že iz opisov navadne pasje trave, trpežne ljuljke in travniškega mačjega repa. Zelo slabo na primer prenaša sušo mnogocvetna ljuljka. Kot navaja Čop (2012), se pri mnogocvetni ljuljki poleg zmanjšanja rasti listov v sušnem stresu zelo zmanjša razraščanje. Redki sestoji mnogocvetne ljuljke se potem hitro zaplevelijo in zaradi slabe vitalnosti živih poganjkov ter konkurenčnosti na sušo bolj prilagojenih rastlin (npr. zeli z globokimi koreninami in toploljubnih C_4 -trav) hitro propadejo.

Preglednica 4: Prikaz zapisov opažanj večjih vplivov suše na travinje v Agrometeoroloških biltenih ARSO v obdobju 1973–2009 (Sušnik in Pogačar, 2010a: 303)

Table 4: Records of observed major drought impacts on grass swards in the period 1973–2009, collected in Agrometeorological Bulletins of the Slovenian Environment Agency (Sušnik and Pogačar, 2010a: 303)

Leto	Lokacija	Opis
1973	SV, JZ	Huda suša na JZ v juniju, avgusta tudi na SV.
1976	Splošno	Zaradi vročine in suše imajo travniki porjaveli, požgan izgled; pridelek sena zmanjšan vsaj za 50 %.
1977	Splošno	Ruša zaradi suše in vročine močno prizadeta, po košnji ne more odgnati in rjavi.
1979	Splošno	Po košnji sena travniki povsem porjaveli, tudi kasneje izgleda ruša kot požgana.
1982	JZ	Po košnji ruša porjavela od vročine in suše.
1983	Splošno	Suša onemogoča, da bi po košnji trava odgnala; poletna suša dosegla 50-letni rekord.
1985	JV	Močna suša.
1992	Splošno	Travniki sušo zelo občutijo, na SV skoraj ne obetajo pridelka otave.
1993	Splošno	Pridelek otave zaradi suše prepolovljen.
2000	SV, JV, JZ	Pomanjkanje ruši dostopne talne vode.
2001	Splošno	Veliko škode zaradi vročine, travniki na peščenih tleh rjavijo, na ekstremno poroznih tleh izčrpani.
2003	Splošno	Suša povzročila katastrofalno škodo na travinju – travniki rjavi, suhi, mestoma ogoleli.
2006	JZ	Skromen pridelek zaradi suše.
2007	SV, JZ	Zaloga vode v tleh dosegla najmanjšo vrednost, do globine 30 cm rastline vode niso mogle črpati.
2009	JZ	Celo vegetacijsko obdobje že primanjkuje vode.

Od agronomsko pomembnejših vrst ima med metuljnicami največjo odpornost lucerna, med travami pa navadna pasja trava. Za slednjo lahko negativno lastnost hitrega staranja in zmanjševanja kakovosti nadoknadimo z zgodnjo in pogosto rabo (Tehnološka priporočila ..., 2008). To potrjuje tudi Kapun (2005), ki navaja, da po navedbah mnogih avtorjev in po njihovih lastnih ugotovitvah v nekoliko bolj sušnih razmerah pridelamo z navadno pasjo travo več voluminozne krme kot z drugimi gospodarsko pomembnimi travami. Še celo v ekstremnejših rastnih razmerah daje zadovoljive pridelke voluminozne krme.

Poskus dr. Leskovška v Ljubljani je pokazal, da se je mogoče suši postaviti po robu s tlemi, ki so dobro preskrbljena z rastlinskimi hranili, saj je v primeru siromašne zemlje za enako količino pridelka potrebne več vode (Lekšan, 1995). Hkrati pa se moramo zavedati, da je tudi z ekonomskega vidika tržna vrednost krme v sušnih letih večja kakor v normalnih ali pa mokrih.

2.8 RAZISKAVE VPLIVOV PODNEBNIH SPREMEMB NA RAST IN PRIDELEK TRAVNE RUŠE

Rast travne ruše je določena z interakcijo mnogih okoljskih dejavnikov in načinov gospodarjenja, zato je napovedovanje stopnje rasti še posebej zahtevno. Kljub vsemu pa so glavni omejujoči dejavniki znani: vremenske razmere, predvsem energija sončnega obsevanja in dostopnost vode, v povezavi s temperaturo zraka. Dodatno pa ima velik pomen preskrba rastlin z dušikom (Barrett in sod., 2004).

Poleg analiz preteklih obdobj se vedno bolj uveljavlja napovedovanje pridelka za tekočo sezono ter simuliranje pridelkov po scenarijih podnebnih sprememb, tudi z uporabo vremenskih simulatorjev. Napovedi na začetku sezone so zelo nezanesljive, vendar pa se njihova zanesljivost v nadaljevanju poveča. Pri tem raje govorimo o tednu, desetih dneh, kot pa mesecih (Eitzinger in sod., 2007). Simulacijski modeli so potrebni za razumevanje podnebnih sprememb in njihovega vpliva na vegetacijo, vključno z odzivom kmetijskih rastlin (Rapacz in sod., 2014)

Kajfež-Bogatajeva (2005) navaja, da bodo podnebne spremembe in povečana vsebnost CO₂ v ozračju vplivale na fiziologijo rastlin (fotosintezo, dihanje, transpiracijo, rast in sestavo tkiv), prostorsko razširjenost, fenološki razvoj in prilagoditveno sposobnost. Zelo pomembni bodo premiki po nadmorski višini, saj bodo višje ležeča območja postala temperaturno primerna za rastlinsko pridelavo. Kajfež-Bogatajeva (2005) za Slovenijo predvideva, da pomeni segrevanje za 1 °C pomik prostorskega potenciala za kmetijstvo za okrog 180 metrov navzgor, kjer bodo zemljišča izpostavljena drugim vremenskim stresom. Za popolnejše razumevanje vplivov podnebnih sprememb na kmetijstvo potrebujemo še veliko znanja in tudi primerne metodologije, kot so simulacijski modeli, eksperimentalni podatki ipd. Vsekakor nas čaka na tem področju še mnogo interdisciplinarnega dela.

Z nastopom podnebnih napovedi v obliki večmodelnih sistemov, konstruiranih z zagoni različnih globalnih ali regionalnih podnebnih modelov, so raziskave ocen vplivov podnebnih sprememb pridobile potencial za napovedovanje ne le razsežnosti vpliva, temveč tudi negotovosti, ki spremlja napoved. Za izdelavo lokalnih scenarijev podnebnih sprememb se pogosto uporablja metoda statističnega (empiričnega) zmanjševanja skale (angl. statistical downscaling) (npr. Hanssen-Bauer in sod., 1999). Takšen pristop je za oceno vpliva podnebnih sprememb na travinje uporabil tudi Riedo s sod. (1997). Pri nas se je s projekcijami podnebnih sprememb za Slovenijo z uporabo statističnega zmanjševanja skale ukvarjal Bergant (Bergant, 2003, 2007; Bergant in sod., 2006). Njegovo delo je v kombinaciji z rezultati evropskega projekta dinamičnega zmanjševanja skale ENSEMBLES (Hewitt, 2005) nadaljeval Ceglar (2011) v pripravi svoje doktorske disertacije s področja modeliranja pridelka koruze.

Teoretično je rast trave omejena z nizkimi zimskimi in pomladnimi temperaturami ter primanjkljajem vode poleti (Kajfež-Bogataj, 2005). Simulacije podnebnih sprememb in

njihovega vpliva pa dajejo raznolike rezultate. Po simulacijah Dukes in sod. (2005) segrevanje ne vpliva nujno na produktivnost, ampak le na fenološki razvoj.

Pri testiranju odziva modela LINGRA na simulacijo vpliva sprememb povprečne temperature zraka za 3 °C in količine padavin za 10 % (oboje navzgor in navzdol) so v večini primerov višje temperature zraka imele pozitiven vpliv na pridelek, kar v glavnem pripisujejo spomladanskemu hitrejšemu začetku rasti, ki je prevladal nad negativnim vplivom hitrejšega staranja travne ruše in večjo porabe vode (Schapendonk in sod., 1998).

Höglind in sod. (2013) zaradi pričakovanega povišanja temperatur zraka po podnebnih scenarijih za severno Evropo predvidevajo povečan pridelek. Nasprotno pa so modelske simulacije s prilagojenim modelom LINGRA za obravnavo travniškega mačjega repa na Norveškem pokazale, da lahko dvig povprečne temperature zraka za 3 °C povzroči opazne izgube pridelka. Nekoliko presenetljivo se je pokazalo, da tudi povečanje intenzivnosti sončnega obsevanja vodi v rahlo zmanjšanje pridelka (Höglind in sod., 2001).

Vplivi spremenjenih količin padavin so še manj očitni (Schapendonk in sod., 1998). Dukes in sod. (2005) so s poskusom na trajnem travinju v Kaliforniji ugotovili, da za boljšo rast potrebujejo toplejša leta ter bolj mokro jesen in pomlad. Če se bo torej povečala količina padavin pozimi, to ne bo imelo vpliva na rast. Povečanje padavin pa naj bi vplivalo na razporejanje asimilatov med korenine in zelinje. Olesen in Bindi (2002) navajata, da je pri spremembah padavin pomembno tako to, kakšna bo sprememba količine, kot tudi kakšen bo vzorec variabilnosti. Hkrati pa največjo škodo na pridelku večkrat povzročijo ekstremni vremenski dogodki, kot so vročinski valovi, hude nevihte, suše ipd.

Trnka in sod. (2011) opozarjajo, da je pri ocenjevanju vplivov podnebnih sprememb na pridelek travne ruše nujno upoštevati učinke suše. Pri tem pa ob podaljšanih sušah ne gre le za zmanjšanje listne površine, temveč moramo upoštevati še vplive na naslednjo sezono (npr. spremembe v sestavi travne ruše) ali dodatne stroške, ki nastanejo zaradi obnove travne ruše, ki jo je suša preveč uničila.

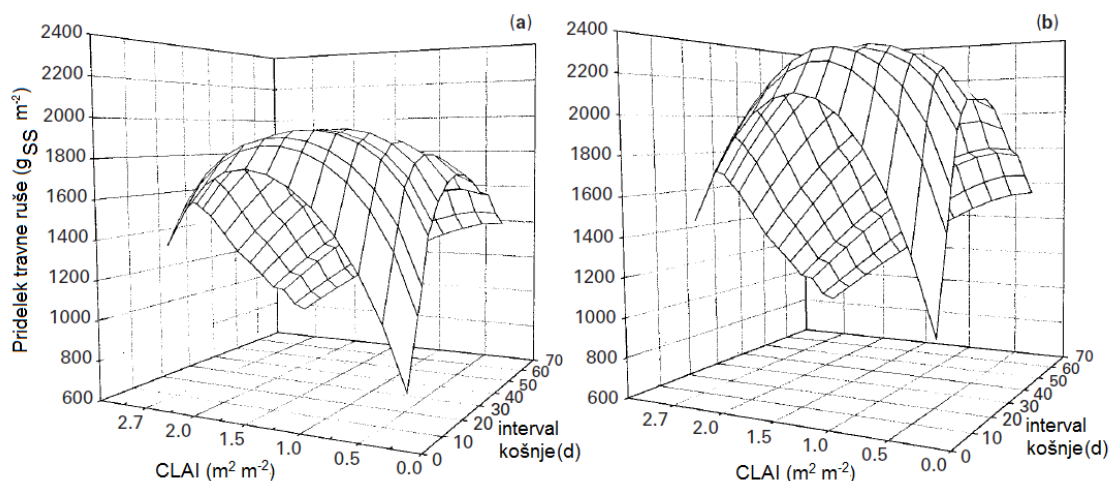
Poleg tega se na podnebne spremembe ne odzivajo vse vrste trav enako, kar vodi v spremembe v sestavi travne ruše (Olesen in Bindi, 2002). Z globalnim segrevanjem ozračja in s tem povezanim vse pogostejšim pojavljanjem daljših sušnih obdobj se pridelovalci čedalje bolj zanimajo za rastline, s katerimi lahko tudi v sušnem obdobju pridelajo nekaj krme (Kapun, 2005).

Riedo in sod. (1997) so pokazali, da se proizvodnja biomase poveča pri večini scenarijev, najbolj ob povišanju temperatur zraka in koncentracije CO₂, zmanjša pa se le v primeru brez dviga koncentracije CO₂ pri tleh s slabo vodnozadrževalno sposobnostjo. Ob približno podvojitvi koncentracije CO₂ predvidevajo učinkovitejšo rabo vode zaradi zmanjšane stomatalne prevodnosti, kar bi pomenilo znižanje evapotranspiracije za 10 do 20 %.

Podobno so se pri simulaciji z modelom LINGRA-CC ob podvojeni koncentraciji CO_2 pridelki povečali v povprečju za 10 %, predvsem zaradi 10 % večjega *LAI*, 10 % več poganjkov spomladi in 6 % manjše specifične listne površine (*SLA*) (Rodriguez in sod., 1999).

Umerjeni model so nato uporabili za preizkušanje različnih načinov gospodarjenja s travno rušo. Največji pridelok se pojavi pri približno enaki kombinaciji frekvence (20 oz. 17 dni) in višine košnje (pri indeksu listne površine po košnji $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), ne glede na koncentracijo CO_2 (Slika 7) (Rodriguez in sod., 1999).

Tudi Jones in sod. (1996) so s poskusi pokazali, da se ob povišani koncentraciji CO_2 pridelok travne ruše poveča. Dodatni zaznani učinek je bil delno zapiranje rež, s čimer se izboljša učinkovitost izrabe vode, kar naj bi povečalo možnosti za preživetje travne ruše, kadar je izpostavljena hudemu, hitro napredujočemu sušnemu stresu. To potrjujejo tudi Graux in sod. (2013) z rezultati modela PaSim. Poleg tega se je zmanjšala *SLA*, izboljšala pa tudi učinkovitost rabe dušika. To bi lahko zmanjšalo potrebe po gnojenju z dušikom brez zmanjševanja pridelka (Jones in sod., 1996), a modelske simulacije temu nasprotujejo, saj pri povišani koncentraciji CO_2 kažejo večje potrebe po dušiku (Graux in sod., 2013).



Slika 7: Z modelom LINGRA-CC simulirani letni pridelok suhega zelinja trpežne ljujke kot funkcija intervala košnje in indeksa listne površine po košnji (*CLAI*) pri trenutni (a) in podvojeni (b) koncentraciji CO_2 v ozračju (Rodriguez in sod., 1999: 366)

Figure 7: Annual herbage dry matter yield simulated with LINGRA-CC model as a function of cutting interval and remaining leaf area index (*CLAI*) for a perennial ryegrass sward grown in (a) low and (b) high concentrations of atmospheric CO_2 (Rodriguez et al., 1999: 366)

Olesen in Bindi (2002) navajata, da se s povišano koncentracijo CO_2 neposredno poveča produktivnost poljščin in travne ruše, poveča se tudi učinkovitost izrabe virov. V južnejših predelih Evrope pa lahko morebitno povečanje primanjkljaja vode v tleh in ekstremnih vremenskih dogodkov kljub temu povzroči manjše pridelke in večjo variabilnost pridelka ter zmanjšanje površin, primernih za gojenje tradicionalnih kultur. Za osrednjo in severno

Evropo navajata, da bo globalno segrevanje podaljšalo dolžino rastne dobe, kar bo omogočalo zgodnejše sajenje spomladi ter zgodnejšo zrelost in žetev ali košnjo.

Na drugi strani pa Richardson in sod. (2013) za nenamakano travno rušo napovedujejo, da bodo zmanjšana količina padavin in povišane temperature zraka privedle do krajše rastne dobe, s tem pa se bo povečal letni albedo zaradi večje odbojnosti odmrle trave.

Pri petletnem poskusu, ki so ga izvedli Dukes in sod. (2005), je imela povečana količina padavin zelo majhen pozitiven vpliv na pridelavo, ker so negativni vplivi odzivov korenin v veliki meri izničili pozitiven vpliv na zelinje. Poleg tega v nobenem letu ni bilo statistično značilnega vpliva povišanja temperature zraka ali koncentracije CO₂ na zelinje, korenine ali skupno pridelavo. Pri tem izpostavljajo, da je lahko to pomemben vpliv stranskega učinka – nižje koncentracije fosforja v rastlini (tudi več avtorjev v Winkler in Herbst, 2004).

Pri raziskavi vplivov bodočega podnebja na pridelek travne ruše na Nizozemskem sta Kroes in Supit (2011) uporabila sklopljena modela SWAP in WOFOST ter rezultate globalnega podnebnega modela GCM (angl. Global Circulation Model) iz poročila AR4 (angl. 4th Assessment Report) Medvladnega panela za podnebne spremembe (IPCC). V praktično vseh primerih simulacij je povišanje temperature zraka prineslo povečanje pridelka. Z dodanim simuliranim dvigom koncentracije CO₂ sta se v vseh primerih povečali tako potencialna kot tudi dejanska količina pridelka. Pri tem ima večji doprinos dvig koncentracije CO₂ kot temperaturni dvig. Vendar pa ne smemo pozabiti, da se pri tem načeloma ne ohranja kakovost pridelka. Za doseganje optimalnih pridelkov z enako hranilno vrednostjo je potrebnega več gnojenja. Pri povečanem pridelku pa se pričakuje tudi večje vplive suš. V primeru scenarija z zmanjšano količino padavin se rahlo zmanjša tudi pričakovani pridelek. Povišana koncentracija CO₂ in temperatura zraka vodita do večjih pridelkov, dokler voda ne postane omejujoč faktor.

Z modelom PaSim in petimi GCM so simulacijo razvoja in pridelka travne ruše pripravili Graux in sod. (2013). Največji vpliv na odzive travne ruše na podnebne spremembe so imeli tip tal, gospodarjenje s travno rušo in koncentracija CO₂ v ozračju. Večinoma se je pridelek povečeval, z izjemo nekaterih primerov, kjer je učinek suše izničil pozitivne učinke dviga CO₂. Spremembe so se pokazale predvsem v nestabilnem pridelku poleti in možnostih za večji pridelek spomladi in jeseni, kar bi v kmetijsko prakso vneslo precej sprememb. Poslabšala naj bi se predvsem kakovost krme.

Z modelom GRAM so za Avstrijo in Češko simulacije pridelka v različnih podnebnih razmerah pokazale, da se z zmanjšanjem količine padavin zmanjša tudi pridelek, kar je bolj opazno pri tleh z dobro vodnozadrževalno sposobnostjo. Na drugi strani pa tudi občutno povečanje količine padavin (do 150 %) ni vodilo v opazno povečanje pridelka, kar pojasnjujejo z dejstvom, da bi lahko bila sedanja količina padavin blizu optimalne (Trnka in sod., 2011). Tudi Graux in sod. (2013) z modelom PaSim ugotavljajo, da v nasprotju s

pričakovani tla z dobro vodnozadrževalno sposobnostjo ne bodo zmanjšala tveganja za negativne učinke podnebnih sprememb na pridelovalne sisteme v travništvu. Sušnikova (2014) za sušo na kmetijskih tleh v Sloveniji prav tako navaja, da bo do največjih sprememb prišlo pri tleh z dobro vodnozadrževalno sposobnostjo.

Thornley in Cannell (1997) sta z modelom Hurley Pasture raziskovala razlike med prehodnimi in ravnovesnimi odzivi na podnebne spremembe. Povišanje temperature zraka je učinkovalo na skoraj vse procese v modelu, najbolj kot pospešeno staranje listov in s tem zmanjšanje dolžine listov ter kot povečanje respiracije tal. S tem se je zmanjšal *LAI*, ki neposredno vpliva na pridelek. Edina neposredna vpliva povišane koncentracije CO_2 v modelu sta bila povečanje stopnje fotosinteze in zmanjšanje stomatalne prevodnosti. Povečana stopnja fotosinteze povzroči povečanje *LAI*. Učinki so različni, če gre za skokovito ali postopno spremembo, saj so v veliki meri odvisni od procesov v tleh, ti pa potrebujejo desetletja, da dosežejo ravnovesno stanje. Spremembe temperature zraka in padavin imajo tu večji vpliv kot spremembe koncentracije CO_2 .

Thorsen in Höglind (2010) sta modelirala vplive različnih podnebnih scenarijev na utrjevanje travinja in na tveganje zaradi pozeb za Norveško. Pri tem sta zaključila, da tudi ob povečanju povprečne temperature zraka za $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ še ni opaznega povečanega tveganja. Höglind in sod. (2013) pa pričakujejo tveganja zaradi pozebe pozimi na nekaterih območjih vzhodno od Baltskega morja, spomladanska pozeba naj bi bila nevarna predvsem na zahodu. Višje temperature zraka namreč ne bodo nujno pomenile boljšega prezimovanja travne ruše, saj je hkrati pričakovano zmanjšanje snežne odeje. Podnebne spremembe (zvišanje jesenskih temperatur zraka) lahko poslabšajo pogoje za utrjevanje jeseni, kar zmanjša sposobnost rastlin za prenašanje različnih zimskih stresov (nizke temperature zraka, snežna odeja, površinski led). Rapacz in sod. (2014) opozarjajo na kompleksne interakcije med različnimi okoljskimi dejavniki, ki imajo pogosto nasprotujoče si učinke na prezimovanje travne ruše, zato je vpliv podnebnih sprememb na tem področju še povsem odprto vprašanje. Kot razlog navajajo tudi dejstvo, da ni na voljo nobenega modela, ki bi simuliral vpliv vseh večjih zimskih stresnih dejavnikov na prezimovanje travne ruše.

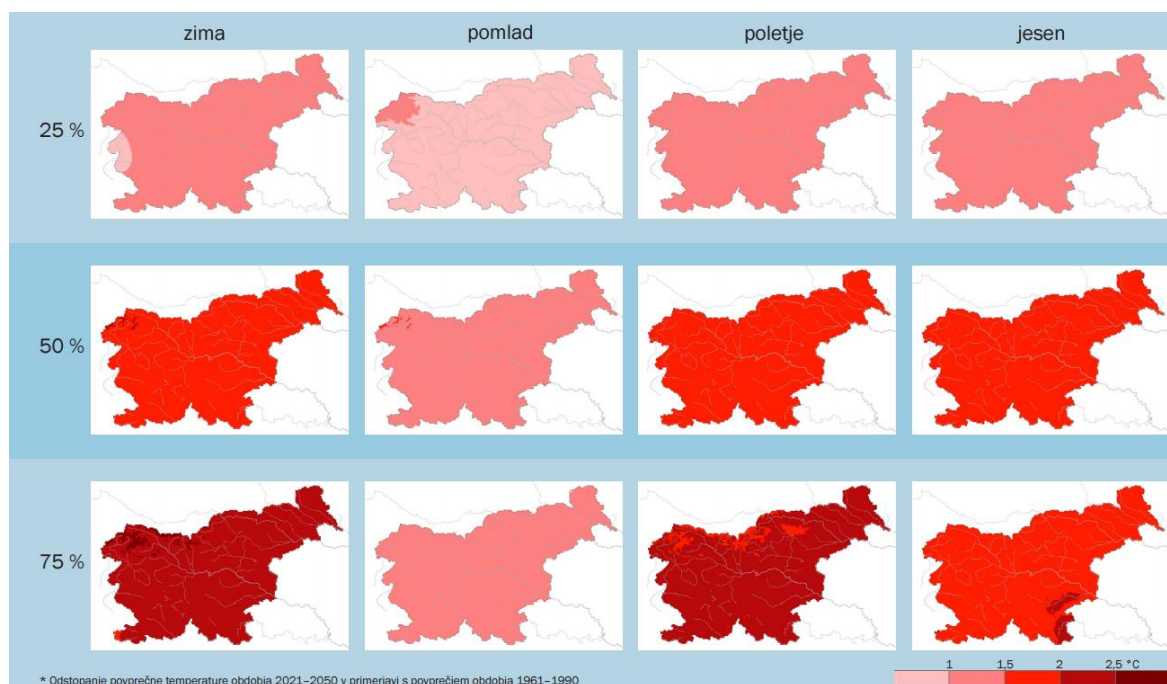
2.9 PRIČAKOVANE SPREMEMBE TEMPERATUR ZRAKA IN PADAVIN V SLOVENIJI

Kmetijstvo ter preostale človekove dejavnosti so močno odvisne od podnebnih razmer na Zemlji, ki pa se spreminjajo. Današnja globalna temperatura zraka je v povprečju vsaj za $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ višja kot v predindustrijski dobi. Tako velikega dviga globalne temperature zraka ni mogoče pojasniti le z naravnimi vzroki; človek je z izpusti toplogrednih plinov bistveno vplival na sestavo ozračja (Ceglar, 2011). Natančen pregled opaženih podnebnih sprememb na globalni ravni je pripravil Bergant (2003).

Če se bodo uresničili scenariji, ki predvidevajo ob dvigu temperature zraka v poletnem času tudi zmanjšanje padavin, gre pričakovati, da se bosta število sušnih dni kot tudi obseg območij s pomanjkanjem vode v Sloveniji povečala (Kajfež-Bogataj, 2005).

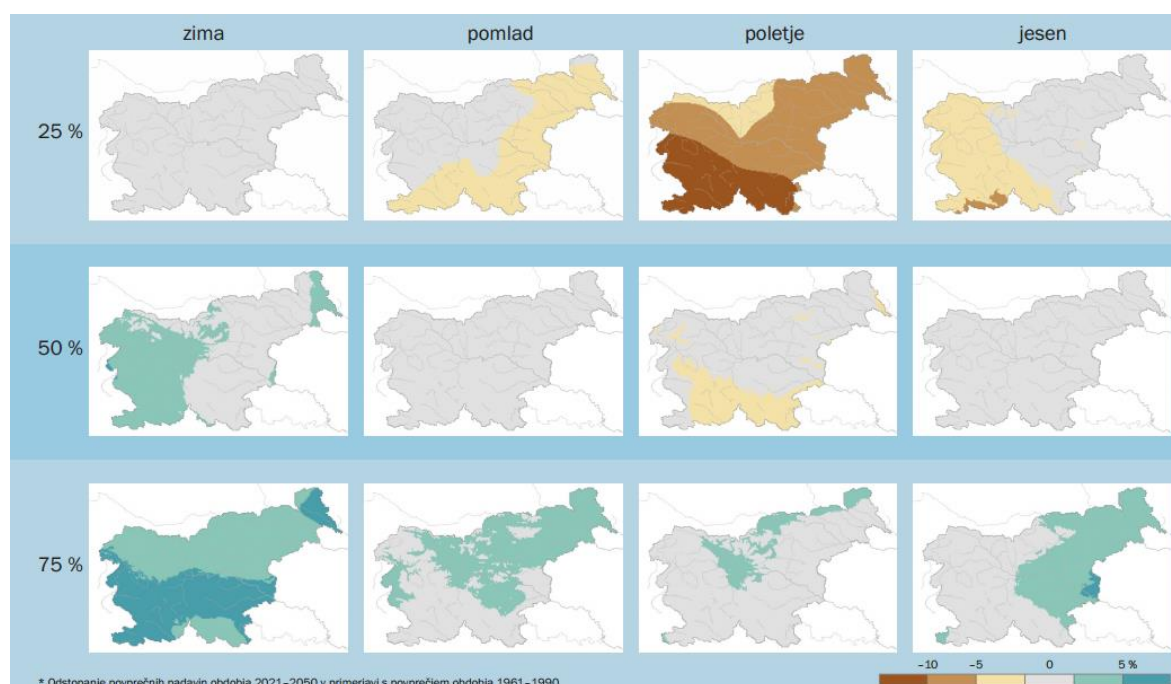
Na Agenciji RS za okolje so v letu 2014 predstavili rezultate modelskih ocen bodočih sprememb za scenarij A1B, ki predstavlja srednjo pot med najbolj črnogledimi in najbolj optimističnimi scenariji gospodarsko-ekonomskih in družbenih sprememb v prihodnosti. Glede na potek izpustov toplogrednih plinov je ta scenarij najbolj podoben novemu IPCC-jevemu scenariju RCP6.0 (Prihodnje ..., 2014). Predstavili so spremembe temperature zraka (Slika 8) in padavin (Slika 9) z odmiki 30-letnega obdobja 2021–2050 od referenčnega obdobja 1961–1990. Za vsak letni čas je predstavljena srednja vrednost (50. percentil), poleg tega pa še spodnja (25. percentil) in zgornja (75. percentil) meja pričakovanih sprememb.

Kot lahko jasno vidimo (Slika 8), se bo Slovenija še naprej segrevala: najmanj spomladi – za 1,5 °C do sredine stoletja, v drugih letnih časih pa najverjetneje do 2 °C. Za Brnik, na primer, se srednje vrednosti napovedi gibljejo od 1,2 °C spomladi, prek 1,8 °C poleti in jeseni do 1,9 °C pozimi. Spodnja meja napovedi je med 1 in 1,2 °C, zgornja meja pa med 1,5 in 2,4 °C (Prihodnje ..., 2014).



Slika 8: Odstopanje povprečne temperature zraka v obdobju 2021–2050 v primerjavi s povprečjem obdobja 1961–1990 po scenariju A1B (Prihodnje ..., 2014)

Figure 8: Deviation of average air temperature in the period 2021–2050 compared to average air temperature in 1961–1990 according to A1B scenario (Prihodnje ..., 2014)



Slika 9: Odstopanje povprečnih padavin v obdobju 2021–2050 v primerjavi s povprečjem obdobja 1961–1990 po scenariju A1B (Prihodnje ..., 2014)

Figure 9: Deviation of average precipitation in the period 2021–2050 compared to average precipitation in 1961–1990 according to A1B scenario (Prihodnje ..., 2014)

Za padavine pa scenariji kažejo precej večjo negotovost (Prihodnje ..., 2014). Od spodnje do zgornje meje napovedi se predvsem spomladi in jeseni na večjem območju Slovenije spremeni predznak spremembe, zato ne moremo z veliko gotovostjo trditi, ali se bo količina padavin povečala ali zmanjšala. Če vzamemo za primer Brnik: najverjetnejša je napoved, da se bo količina padavin v vseh letnih časih povečala, in sicer za 2,5 do 5,0 %. Pozimi se lahko malenkost zmanjša ali poveča za skoraj 10 %, spomladi in jeseni se lahko zmanjša za 3,5 % ali poveča za 6 oziroma 4 %, poleti pa se količina padavin lahko zmanjša za 10 % ali poveča za 6 %. Pri vsem tem pa se dodatno spreminja še intenziteta padavin.

2.10 PODNEBNE SPREMEMBE IN FENOLOŠKI RAZVOJ

Fenološki razvoj rastlin je eden izmed najbolj občutljivih in lahko opazovanih naravnih pokazateljev podnebnih sprememb (Badeck in sod., 2004; Richardson in sod., 2013).

Analiza več kot 125.000 nizov opazovanih fenoloških podatkov 542 rastlinskih in 19 živalski vrst v 21 evropskih državah je za obdobje 1971–2000 pokazala, da se pri 78 % podatkov kaže prehitevanje v razvoju (od tega pri 30 % statistično značilno) in le pri 3 % statistično značilno zaostajanje. Pri tem se kaže povezava s temperaturami zraka predhodnih mesecev. Večina faz je korelirana s povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka meseca nastopa faze in dveh predhodnih mesecev (Menzel in sod., 2006). Pospešen fenološki razvoj je v izjemnih primerih lahko dobrodošel, vendar njegovi negativni učinki

prevladajo. Omenimo naj le škode zaradi zadnjih pomladnih slan takrat, ko se je vegetacija zaradi milih zim predčasno razvila (Kajfež-Bogataj, 2005).

Črepinškova (2002) navaja, da je v obdobju 1955–1984 za cvetenje navadne pasje trave statistično značilen negativen trend na opazovalnih postajah Celje in Maribor, medtem ko v Ljubljani, Murski Soboti, Novem mestu (pri vseh treh negativen) in v Ratečah (pozitiven) trend ni statistično značilen. To pomeni, da v večini navadna pasja trava v povprečju cveti vsako leto zgodneje.

Kot pojasnjuje Kajfež-Bogatajeva (2005), pa prilagoditve na podnebne razmere niso povezane le z odločitvami in ukrepi posameznega kmeta, temveč tudi s kmetijsko politiko, tržnimi mehanizmi ter razvojnimi in tehnološkimi raziskavami. Pri tem niso vsi prilagoditveni ukrepi ekonomsko enakovredni. Sprememba datuma setve na zgodnejši termin je povezana s tveganjem zaradi poznih spomladanskih slan, namakanje pa je verjetno predrago. Zato je priporočljivo razmišljati o novih kmetijskih kulturah in o spremenjeni gnojilni praksi.

2.11 ANALIZA OBČUTLJIVOSTI IN UMERJANJE MODELA

Dinamični modeli računajo dnevno rast s simuliranjem pridelave suhe snovi od nekega začetka, kot je kalitev ali dan košnje, ki se konča z oceno pridelka. Pri tem je osnova za izračune neto asimilacija CO₂ v rastlinah. Pomembna simulirana spremenljivka je *LAI*, ki pri povečanju prispeva k povečanju prestrezanja sončnega obsevanja, ta pa k večji asimilaciji CO₂ (Dorigo, 2003).

Sedanji modeli pogosto niso dovolj natančni, če jih uporabljamo za lokacije, kjer niso bili razviti. Pred uporabo rastlinskega modela za posamezno regijo je treba preveriti njegovo obnašanje pri regijsko značilnih kultivarjih z določenim nizom fenoloških podatkov in podatkov o pridelku ter umeriti specifične parametre modela. Pred preverjanjem modela je torej nujno umerjanje (Merot in sod., 2008). Ker model LINGRA (enako LINGRA-N) delno temelji na splošnih fizioloških principih, ga je mogoče uporabljati v različnih okoljih, vendar je pri tem potrebno umerjanje (Shapendonk in sod., 1998). Za ta namen potrebujemo podatke za vsaj 10 let, da zajamemo tako povprečno raven pridelka kot tudi njegovo medletno variabilnost (Wolf, 2006).

Za osnovno umerjanje modela LINGRA so Bouman in sod. (1996) na podlagi analize občutljivosti izbrali le indeks listne površine po košnji, temperaturo tal, pri kateri se začne fotosinteza, temperaturo tal, pri kateri rastlina doseže optimalno fotosintezo, ter največjo vrednost učinkovitosti izrabe sončnega obsevanja. Za umerjanje so uporabili optimizacijski postopek FSEOPT, ki išče globalni minimum funkcije z uteženimi neodvisnimi spremenljivkami. Po umeritvi se je povprečna absolutna napaka za podatke iz severnega dela Evrope zmanjšala za 70 %, za podatke iz južnega dela pa za 58 %.

Wolf (2006) je v analizo občutljivosti osnovnega modela LINGRA na dveh lokacijah vključil začetno število poganjkov in zalogo asimilatov, dostopno za ponovno rast po košnji. Za obe lokaciji se je pokazalo, da večje začetno število poganjkov pomeni tudi večji pridelek. Enako velja za Wageningen za večjo zalogo asimilatov, v Bologni pa se pridelek ob večji zalogi asimilatov ni povečal niti ob hkrati večjem začetnem številu poganjkov. Razlog je verjetno ta, da je začetna rast spomladi močno omejena s ponorom (razlaga principov modela sledi v poglavju 3.4.1) in se ne more povečati niti z dodatnimi zalogami.

Pri prilagojenem modelu LINGRA za travniški mačji rep je analiza občutljivosti pokazala majhno število parametrov s pomembnim vplivom na pridelek (Höglind in sod., 2001).

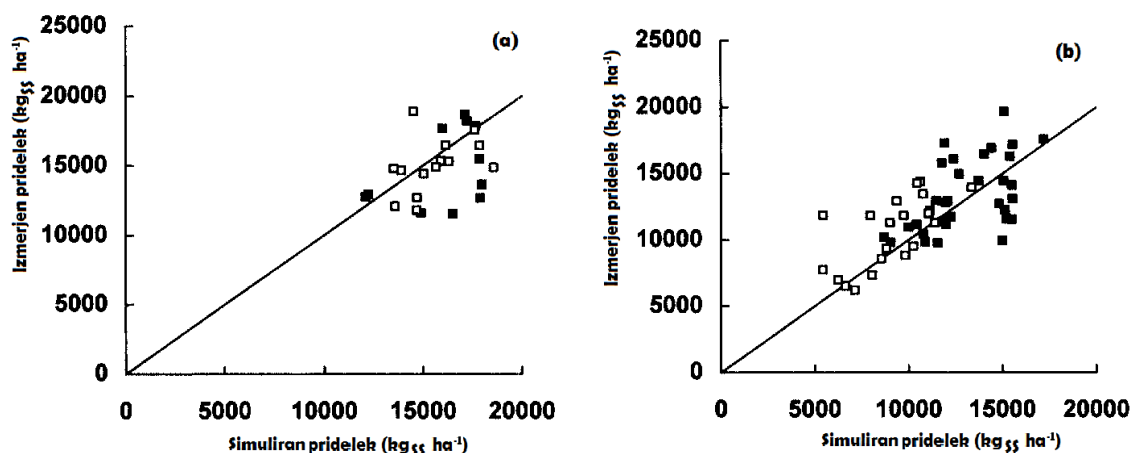
Merot in sod. (2008) ter Shibu in sod. (2010) opozarjajo, da pri modelih za simulacijo razvoja in rasti poljščin še ni bilo opravljenih mnogo raziskav glede ocenjevanja parametrov. Pogosto gre preprosto za poskušanje, pri katerem testiramo različne vrednosti parametrov, dokler simulacije dovolj dobro ne ustrezajo podatkom. V večini primerov je bilo umerjanje parametrov modela opravljeno z zmanjševanjem korena povprečne kvadratne napake (*RMSE*) (Schapendonk in sod., 1998; Bonesmo in Belanger, 2002; Van Oijen in sod., 2005; Angulo in sod., 2013). Pri tem so na primer Van Oijen in sod. (2005) za optimizacijo parametrov uporabili simulacijo Monte Carlo z Metropolis-Hastingsovim algoritmom. V predhodni analizi so namreč ugotovili, da je ta način boljši od optimizacije največjega gradienta in naključnega iskanja ter enako učinkovit kot genetski algoritmi. Za Metropolisov algoritem so potrebovali območja negotovosti za vse vključene parametre. Za večino so bila območja že predpripravljena, za preostale so uporabili območja od 50 do 150 % definirane vrednosti. Za primerno testiranje različnih kombinacij parametrov in s tem dobro umeritev so uporabili 50.000 ponovitev. Angulo in sod. (2013) pa so nastavili umeritveni algoritem tako, da je v območju od 55 do 145 % definirane vrednosti iskal najboljše vrednosti treh parametrov (učinkovitost izrabe sončnega obsevanja, specifična listna površina in toleranca na sušo) z največ osmimi ponovitvami. Njihovi predhodni testi so namreč pokazali, da večje število ponovitev kvečjemu nepomembno izboljša vrednosti parametrov.

Zadnja leta postaja aktualna Bayesova metoda, predvsem za umerjanje zahtevnejših modelov z velikim številom vplivnih parametrov (Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2012). Metoda oceni interval zaupanja za vrednosti vplivnih parametrov na osnovi predhodnega znanja (meritve, strokovne ocene), ki ga predstavimo v obliki apriorne porazdelitve. Z meritvami izbrane modelske količine nato z omenjeno metodo zmanjšamo negotovost ocene parametrov, kar prikažemo v obliki posteriorne porazdelitve. Interval zaupanja pridobimo iz porazdelitve na podlagi vzorčenja. Pri tem je nevplivni parameter tisti, ki ga lahko prosto spreminjamo znotraj njegovih mej (določenih za analizo občutljivosti) in to ne bo pomembno vplivalo na modelski rezultat (Thorsen in Höglind, 2010).

Za preverjanje modela lahko uporabimo različne statistične metode, ki so v stalni uporabi – *RMSE*, normalizirano napako (Schapendonk in sod., 1998), kazalec ujemanja po Willmottu

(1982), koeficient neenakosti po Theilu in sod. (1970, cit. po Trnka in sod., 2006) in podobne (Trnka in sod., 2006; Duru in sod., 2009).

Pri prvem preverjanju modela LINGRA so uporabili podatke eno- do petletnih evropskih poskusov iz obdobja 1982–1986, pri čemer so bili pridelki suhega zelinja travne ruše izmerjeni v prvem letu rabe. Normalizirana napaka med opazovanimi in simuliranimi vrednostmi suhe snovi je bila za potencialno pridelavo od 13 do 15 %, za pridelavo, omejeno z dostopnostjo vode, pa 17 do 21 % za skupaj 35 lokacij po celotni Evropi (Schapendonk in sod., 1998). Kot se je pokazalo, je model precenjeval pridelke pri simulaciji z namakanjem in podcenjeval pri simulaciji brez namakanja (Slika 10). V splošnem je bilo ocenjeno, da je model LINGRA dovolj natančen za simulacijo rasti in pridelka travne ruše s standardnimi pogoji gospodarjenja po celotni Evropi (Schapendonk in sod., 1998).



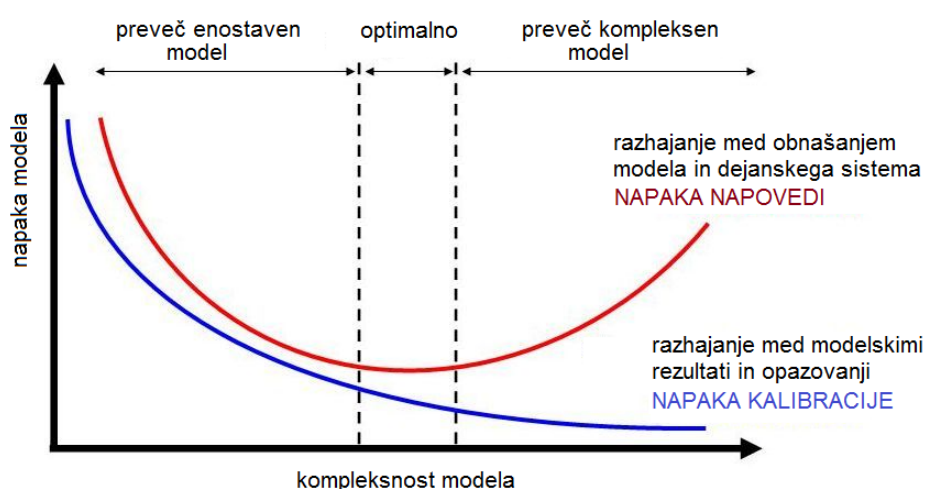
Slika 10: Izmerjeni pridelek suhega zelinja trpežne ljujke v primerjavi s simuliranim z modelom LINGRA v namakanih (a) in nenamakanih razmerah (b). Prazni simboli označujejo podatke iz južne Evrope, polni pa iz severne Evrope, poskusi so potekali od 1 do 5 let v obdobju 1982–1986 (Schapendonk in sod., 1998: 93).

Figure 10: Measured herbage dry matter yield of perennial ryegrass for irrigated (a) and non-irrigated (b) conditions plotted against the simulated results. Open symbols represent data from Southern Europe and closed symbols represent data from Northern Europe. Experiments ran for 1 to 5 years in the period 1982–1986 (Schapendonk et al., 1998: 93).

2.12 NEGOTOVOSTI, KI SE POJAVLJAJO PRI MODELIRANJU

Pri modeliranju se je treba ves čas zavedati, da je model le poenostavljena slika realnosti. Veliko doprinesemo h kakovosti rezultatov s tem, da poskusimo oceniti njihovo negotovost. Ta izhaja iz različnih virov: svojo napako imajo vhodni meteorološki podatki, model je le v neki meri reprezentacija biofizikalnega sistema, modelska struktura ni popolna, modelski parametri pa so določeni na osnovi umerjanja, ki je občutljivo na izbiro umeritvenega obdobja. Kadar vključimo izračune vplivov podnebnih sprememb, se moramo zavedati še negotovosti podnebnih scenarijev. Vse negotovosti pri modeliranju in novi pristopi pri izračunih so natančno opisani v Ceglar (2011).

Najbolj osnoven pristop je preverjanje modela, kjer njegovo kakovost preverimo na nizu neodvisnih meritev, ki niso bile vključene v umerjanje. Vrednosti parametrov v modelu so lahko ocenjene na osnovi različnih poskusov, pregleda literature ali strokovnega mnenja. Natančnost najbolj omejuje pomanjkanje podatkov. Pri tem je pomembno tudi, kako kompleksen model smo izbrali glede na to, koliko vhodnih podatkov imamo na voljo in kakšne. Večinoma imamo na izbiro različne modele, od najosnovnejših do zelo kompleksnih. Stremimo k najbolj uravnoteženem izboru med dostopnostjo podatkov in kompleksnostjo modela (Slika 11): model ne sme biti tako enostaven, da bi bile simulacije preslabe (levi del grafa), hkrati pa ne sme biti preveč kompleksen, saj to lahko vodi v predefiniranost in slabo ekstrapolacijo (desni del grafa).



Slika 11: Shematični prikaz pomembnosti izbire primerne modela glede na dostopne podatke (Characterization ..., 2015)

Figure 11: Scheme of the importance of the choice of the appropriate model according to data availability (Characterization ..., 2015)

(Schleip in sod., 2009). Na podlagi tega smo iz analize korelacije s povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in vsot aktivnih temperatur zraka do nastopa cvetenja izločili tri fenološke postaje: Mokronog, Podlipje in Zibiko. Postajo Novi Lazi smo obdržali v analizi, čeprav višinska razlika (73 m) presega mejno vrednost, ker smo želeli vsaj okvirno informacijo o stanju na skrajnem jugovzhodu države. Dodatno smo izločili tudi postajo Vače, saj edina meteorološka postaja, ki je dovolj blizu, ni delovala v celotnem obravnavanem obdobju.

Preglednica 5: Izbrane fenološke postaje za analizo cvetenja navadne pasje trave (*Dactylis glomerata* L.), ki so delovale v obdobjih 1968–1983 in 1998–2013 in nimajo več kot treh manjkajočih podatkov. Dodane so najbližje meteorološke postaje in razdalje med postajama. Oranžno: postaje, ki jih lahko zaradi neprimernosti meteorološke postaje uporabimo le za analizo fenoloških podatkov.

Table 5: Phenological stations used for the analysis of cock's foot (*Dactylis glomerata* L.) flowering that were operating in the periods 1968–1983 and 1998–2013 and have less than three missing values. Added are the nearest meteorological stations and the distances between them. Orange: stations that can only be used for the analysis of phenological data due to inappropriate meteorological stations.

Fenološka postaja	Nadmorska višina (m)	Najbližja meteorološka postaja	Nadmorska višina (m)	Razdalja med postajama (km)
Bukovžlak	266	Celje	241	1,9
Vače	523	Klenik pri Vačah	523	0,1
Novi Lazi	540	Kočevje	467	9,5
Ljubljana–Bežigrad	299	Ljubljana–Bežigrad	299	0,1
Mokronog	251	Malkovec	395	4,6
Novo mesto	220	Novo mesto	218	0,5
Podlipje	810	Polički vrh	309	41,0
Postojna	533	Postojna	530	0,2
Rateče	864	Rateče	863	0,1
Slovenske Konjice	332	Slovenske Konjice	332	1,2
Starše	237	Starše	237	0,4
Zibika	235	Celje	241	27,7

Na Agenciji RS za okolje (ARSO, 2014) smo pridobili podatke za meteorološke postaje, ki so navedene v preglednici 5 (črno). Ti obsegajo povprečne mesečne temperature zraka od januarja do maja ter vsote aktivnih temperatur zraka (t. j. pozitivnih temperatur zraka od 1. januarja) do dneva nastopa cvetenja po letih za izbrani obdobji.

3.2 TRAVNIŠKI POSKUSI – VHODNI PODATKI ZA UMERJANJE IN UPORABO MODELA LINGRA-N

LINGRA potrebuje začetne vrednosti parametrov, ki so definirani v zunanji datoteki. LINGRA-N je glede vhodnih podatkov zahtevnejša, saj poleg meteoroloških podatkov potrebuje še štiri zunanje datoteke: BATCHG.inp, MANAGG.dat, CROPGi.dat, SOILGi.dat. Hkrati pa je način dela z modelom zato enostavnejši. Pri obeh modelih so

ločene še datoteke z imeni 'IME-LETO'.dat z dnevnimi meteorološkimi podatki za vsako leto simulacije. Če za kateri dan podatka ni, se izvede linearna interpolacija (razen za padavine).

V datoteki BATCHG.inp so zbrane specifikacije za vsako novo simulacijo z določeno kombinacijo trava-tla-vreme-obdobje. Tu določimo preučevano obdobje, dan vznika, število dni v rastni sezoni, lahko pa tudi parametre za analizo občutljivosti na padavine, tlak vodne pare, hitrost vetra, sončno obsevanje in temperaturo zraka. Določimo koncentracijo CO₂ in to, katere druge vhodne datoteke naj model prebere. Izberemo tudi, ali bo simulacija potencialna ali želimo upoštevati le sušni stres ali sušni stres in stres ob pomanjkljivi preskrbljenosti rastline z dušikom. Lahko nastavimo namakanje in možnost, da se stanje vode v tleh prenese v naslednje leto. Primer pripravljenih vhodnih podatkov za datoteko je predstavljen v prilogi A.

CROPGi.dat vsebuje podatke o rastlini. Osnovne nastavitve so privzete iz modela LINGRA, dodatne glede na nove rutine v modelu LINGRA-N pa iz modelov WOFOST (Updated system ..., 2003) in LINTUL3 (Shibu in sod., 2010). SOILGi.dat so datoteke za različne vrste tal, predvsem glede na teksturo. Za simulacije z omejeno dostopnostjo vode v tleh je glavnega pomena največja kapaciteta tal za zadrževanje vode, ki je enaka največji globini korenin (omejeni bodisi z lastnostmi tal bodisi z lastnostmi rastline), pomnoženi z razliko med vsebnostjo vode v tleh pri poljski kapaciteti in točki venenja. V datoteki MANAGG.dat pa pripravimo podatke o gnojenju in košnji, lahko tudi o namakanju.

3.2.1 Meritve pridelka suhega zelinja travne ruše

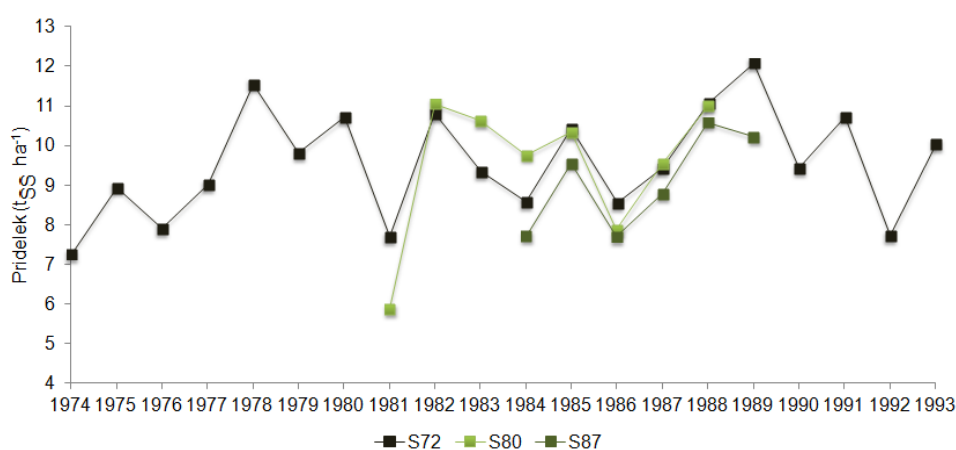
Za umerjanje modela LINGRA-N za Slovenijo potrebujemo čim daljši niz kakovostnih podatkov o pridelku travne ruše na več lokacijah. To je osnova, seveda pa bi bilo bolje, če bi imeli tudi podatke o posameznih parametrih rasti in razvoja travne ruše. V okviru naše raziskave smo pregledali dve večji zbirki podatkov o pridelku travne ruše: eno na Biotehniški fakulteti na Univerzi v Ljubljani (BF) in drugo na Kmetijskem inštitutu Slovenije (KIS).

3.2.1.1 Poskusa S72 in S9

Na BF smo preučili neobjavljen arhiv prof. dr. Mirka Leskoška (Leskošek, 199?), ki je s sodelavci od leta 1955 naprej z zbiranjem podatkov o rasti travne ruše v Sloveniji opravil veliko delo. V zadnjih letih svojega življenja je podatke pripravljajal za monografijo, ki pa mu je žal ni uspelo dokončati. Večinoma je raziskoval vplive gnojenja na pridelek travne ruše v različnih razmerah, vendar pa so njegovi podatki izrednega pomena tudi za modeliranje, saj nekateri poskusi zajemajo tudi 10- ali celo 20-letne nize podatkov o pridelku travne ruše na različnih lokacijah po Sloveniji. Večinoma gre za dvokosne travnike. V prilogi B je pripravljen pregled podatkov iz 30 poskusov, ki smo jih zbrali in uredili, da so dostopni v elektronski obliki.

Del podatkov je sicer ohranjen v diplomskih nalogah njegovih študentov. Tako so, na primer, objavljeni podatki o letnih pridelkih v 20-letnem gnojilnem poskusu, ki je od leta 1974 do leta 1993 potekal na poskusnem polju BF za različne sisteme rabe in različne variante gnojenja (Weiss, 1997). Natančnejše podatke (pridelek po posameznih košnjah) imamo za leta, ki so bila izbrana kot vremensko neugodna, saj je bil pridelek suhega zelinja precej znižan: 1974, 1976, 1981, 1984; in za leto 1987 kot rodovitno leto (Lekšan, 1995). Podatki za leto 1986 so še bolj razčlenjeni, zbrane imamo tedenske vrednosti suhe mase pridelka travne ruše in opisano njeno tedensko sestavo (Žitek, 1991; Knapič, 1988).

Wolf (2006) priporoča za umerjanje modela LINGRA(-N) vsaj 10-letni niz podatkov, hkrati pa potrebujemo za vsako lokacijo dobre meteorološke in pedološke podatke. Zato smo najprej izločili vse poskuse, ki niso trajali 10 let, nato pa glede na dostopnost meteoroloških podatkov za nadaljnjo obravnavo obdržali 11 poskusov. Glavne omejitve, zaradi katerih smo morali uporabo nekaterih poskusov opustiti, so bile prevelika oddaljenost od najbližje meteorološke postaje, preveč manjkajočih podatkov, različna obdobja izvajanja poskusa in delovanja meteorološke postaje. Natančno določanje lokacije, kjer so se poskusi izvajali, je bilo zahtevno, saj koordinate niso bile zabeležene (zapisano je le ime kraja, v katerem je poskus potekal). Nekaterih lokacij se sodelavci prof. dr. Leskoška še spominjajo. S sodelavci s Centra za pedologijo in varstvo okolja na BF (CPVO) smo se odločili, da je samo za dve lokaciji negotovost vhodnih pedoloških podatkov dovolj majhna, da ju lahko uporabimo v modelu, ne da bi s tem vnašali veliko možnost popačenih rezultatov. Za tri poskuse bi lahko naknadno pridobili pedološke podatke z izkopom profilov na dejanskih lokacijah, a se to po umerjanju modela na preostalih lokacijah ni izkazalo za smiselno. Iz vseh poskusov na isti lokaciji smo uporabili gnojilne variante z optimalnim pridelkom (kjer je bilo gnojenje najbolj učinkovito), saj model predvideva dobre razmere za rast travne ruše in njeno dobro oskrbo (Wolf, 2006).

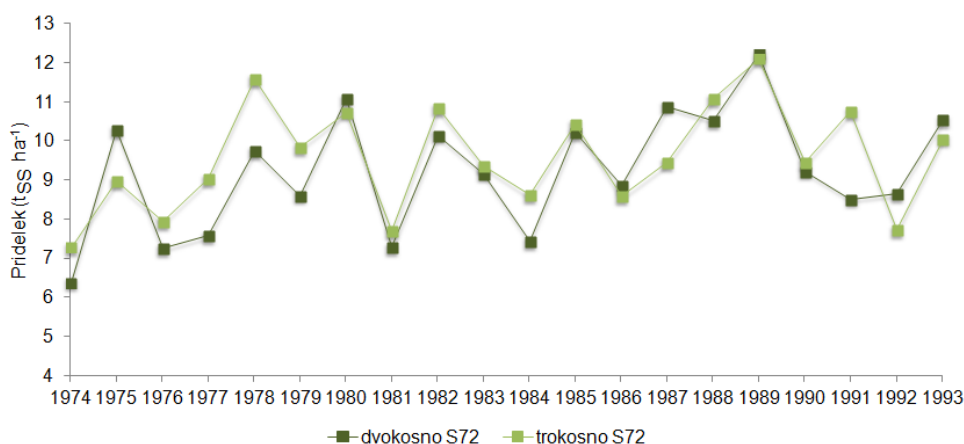


Slika 13: Povprečni letni pridelki suhega zelinja trajnega travinja na poskusih S72, S80 in S87, gnojenih za optimalni pridelek na poskusnem polju na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani

Figure 13: Average annual herbage dry matter yield of permanent grassland from the experiments S72, S80 and S87 conducted with fertilization for optimal yield on the experimental field at Biotechnical Faculty of the University of Ljubljana

V Ljubljani, na poskusnem polju BF, je potekalo več poskusov (Slika 13), pri čemer se letni pridelki suhega zelinja med seboj niso močno razlikovali. Za obravnavo smo izbrali poskus S72, ki je potekal 20 let, od leta 1974 do leta 1993. Potekal je na trajnem travniku v predalpskem svetu, na nadmorski višini okoli 300 m. Kljub sorazmerno veliki količini padavin je rastišče precej sušno, kar se odraža tudi v rastlinski združbi, ki jo najdemo na negnojenem travniku, to je združba *Bromo-Plantaginetum mediae* (Žitek, 1991). Poskus je potekal v obsegu 64 parcelic po 14 m² v 16 različnih gnojilnih variantah, od katerih je imela vsaka štiri ponovitve (Weiss, 1997).

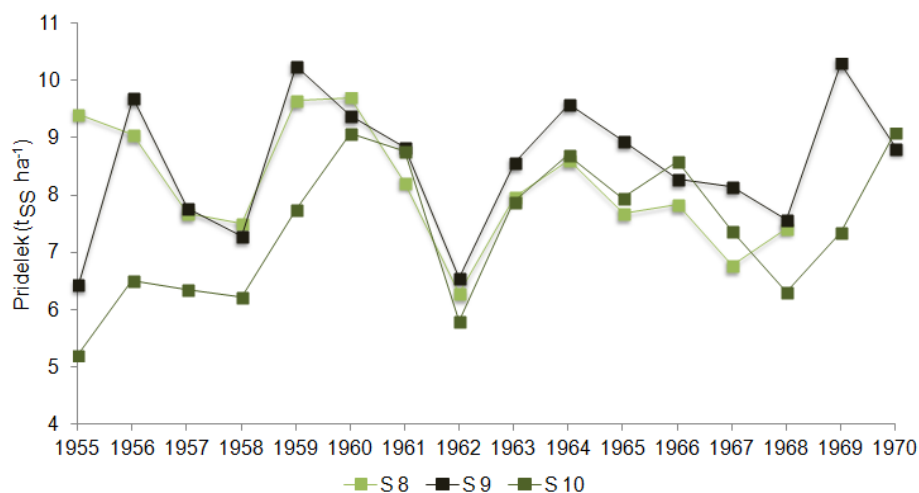
Pri večini podatkov v arhivu so bili iz izmerjenih vrednosti na parcelicah že izračunani povprečni pridelki suhega zelinja po košnjah za vsako gnojilno varianto. Pridelki rastejo (razen na negnojenem) iz petletja v petletje (Leskošek, 1997). Nekoliko se razlikujejo medletna nihanja pridelka pri dvo- in trikosni rabi. Pridelka je malenkost več pri trikosni (Slika 14), ki smo jo uporabili za naše nadaljnje delo.



Slika 14: Primerjava povprečnih letnih pridelkov suhega zelinja trajnega travinja pri dvo- in trikosnem sistemu na poskusu S72 v Ljubljani

Figure 14: Comparison of average annual herbage dry matter yield of permanent grassland using two-cut (dvokosno S72) and three-cut (trokosno S72) system, from the experiment S72 conducted in Ljubljana

Drugi poskus, ki smo ga uporabili, je poskus S9 v Rožnem pri Brestanici, kjer so preučevali vpliv gnojenja na pridelek zelinja pri dvokosni rabi. Gre za pretežno suho travniško rastišče z združbo *Bromo-Plantaginetum mediae*. Zelo natančen opis poskusa najdemo v Leskoškovi doktorski disertaciji (Leskošek, 1965). Zelo podoben potek pridelka suhega zelinja trajnega travinja kot S9 imata še poskusa S8 v Brestanici in S10 v Artu (Slika 15). Krajevno med seboj niso zelo oddaljeni, natančne lastnosti tal pa poznamo le za S9, zato smo uporabili te rezultate. Poskus S8 ima po opisu Leskoška (1965) drugačna tla, pa tudi travnik naj bi bil svež, preostala dva pa suha, a kot se je izkazalo, to kljub vsemu ni imelo pomembnega vpliva na pridelek.



Slika 15: Povprečni letni pridelki suhega zelinja trajnega travinja na poskusih S8, S9 in S10 v okolici Brestanice, gnojenih za optimalni pridelok

Figure 15: Average annual herbage dry matter yield of permanent grassland from experiments S8, S9 and S10 conducted near Brestanica with fertilization for optimal yield

3.2.1.2 Poskusi v Jabljah (J-DG, J-LP, J-PP) in Rakičanu (R-DG, R-LP, R-PP)

Meritve pridelka suhega zelinja travne ruše na nekaj lokacijah od leta 1998 (oz. ponekod že od leta 1983) opravlja KIS. Tudi v tem primeru gre za preučevanje različnih postopkov gnojenja in košenj, poleg tega pa je velika prednost poskusov v tem, da so ločeni pridelki suhega zelinja različnih vrst trav: navadne pasje trave (*Dactylis glomerata* L.), trpežne ljuljke (*Lolium perenne* L.), travniškega mačjega repa (*Phleum pratense* L.) in drugih, kar je zelo pomembno za modeliranje.



Slika 16: Poskusno polje v Jabljah (Verbič, 2014)

Figure 16: Experimental field in Jablje (Verbič, 2014)

Zaradi podobnih težav kot pri Leskoškovih podatkih smo se na podlagi dostopnosti meteoroloških in pedoloških podatkov odločili, da uporabimo le poskusa v Jabljah (Slika 16) in Rakičanu (Slika 17) (Preglednica 6).



Slika 17: Poskusno polje v Rakičanu (Verbič, 2014)
Figure 17: Experimental field in Rakičan (Verbič, 2014)

Preglednica 6: Pregled uporabljenih poskusov, obdobj, v katerih so potekali, njihovih lokacij, najbližjih meteoroloških postaj in izvajalcev (J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep, BF-Biotehniška fakulteta, KIS-Kmetijski inštitut Slovenije)

Table 6: An overview of used experiments, periods in which they were conducted, their locations, the nearest meteorological stations and contractors (J-Jablje, R-Rakičan, DG-cock's foot, LP-perennial ryegrass, PP-timothy grass, BF-Biotechnical Faculty of the University of Ljubljana, KIS-Agricultural institute of Slovenia)

Oznaka	Obdobje	Lokacija	Meteorološka postaja	Izvajalec poskusa
S72	1974–1993	Ljubljana BF	Ljubljana	BF
S9	1955–1970	Rožno pri Brestanici	Malkovec	BF
J-DG, J-LP, J-PP	1998–2013	Jablje	Brnik	KIS
R-DG, R-LP, R-PP	1998–2013	Rakičan	Murska Sobota	KIS

Ker gre tudi tu za meritve na več parcelah za vsako vrsto trave, smo iz osnovnih vrednosti določili najmanjše, povprečne in največje letne vrednosti pridelka suhega zelinja. Izbrali smo zgoraj omenjene vrste trave. Navadno pasjo travo (DG), ker naj bi bila odpornejša na sušo (Kapun, 2005), trpežno ljuljko (LP) in travniški mačji rep (PP) pa, ker sta se v tujini pogosto uporabljala za umerjanje modela LINGRA.

Poskuse so izvajali v obdobju 1998–2013, a ne v vseh letih (Preglednica 7). V Jabljah sta pri J-DG manjkajoči leti 2005 in 2006, pri J-LP manjkajo podatki za leta 2000, 2005 in 2008, pri J-PP pa za 1998 in 2005. V Rakičanu so nizi še nekoliko slabši kot v Jabljah: pri R-DG manjkajo meritve v letih 1998, 1999, 2002–2005 in 2011, pri R-LP v letih 1998, 2000, 2005, 2011 in 2013 ter pri R-PP v letih 1998, 1999, 2002, 2004, 2005 in 2011.

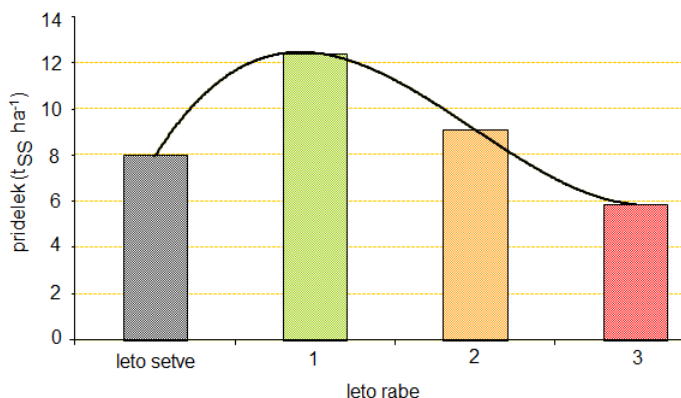
Preglednica 7: Pregled let, v katerih so potekali poskusi v Jabljah in Rakičanu za izbrane vrste trav (DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep). Oranžno: leta, ki smo jih izločili zaradi prevelikih odstopanj, povezanih večinoma s starostjo travne ruše.

Table 7: An overview of years in which experiments in Jablje and Rakičan were conducted for the chosen grass species (DG-cock's foot, LP-perennial ryegrass, PP-timothy grass). Orange: the years that were omitted due to high deviations, mostly in connection to the age of the grass sward.

Leto	Jablje (J)			Rakičan (R)		
	DG	LP	PP	DG	LP	PP
1998	✓	✓				
1999	✓	✓	✓		✓	
2000	✓		✓	✓		✓
2001	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2002	✓	✓	✓		✓	
2003	✓	✓	✓		✓	✓
2004	✓	✓	✓		✓	
2005						
2006		✓	✓	✓	✓	✓
2007	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2008	✓		✓	✓	✓	✓
2009	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2010	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2011	✓	✓	✓			
2012	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2013	✓	✓	✓	✓		✓

Po mnenju Verbiča (2014), je pridelek suhega zelinja sejanega travinja navadno nekoliko manjši v prvem letu po spomladanski setvi, ko rastline še niso dovolj razvite. Večinoma je prva košnja po setvi čistilna, ker je zapleveljena, in tako njen pridelek ni upoštevan pri celoletnem pridelku. V naslednjih letih je velikost pridelka odvisna tudi od vrste trave: trpežna ljuljka doseže največji pridelek v prvem letu glavne rabe, navadna pasja trava in travniški mačji rep pa v drugem. Pri trpežni ljuljki kasneje pridelki padajo hitreje in v četrtem letu običajno izgine iz travne ruše. Travniški mačji rep raste še v petem letu, navadna pasja trava pa še v šestem, pridelki upadajo počasneje. Za sortne poskuse v Jabljah v obdobju 1992–2006 so prikazani pridelki vseh vrst trav in metuljnic skupaj po

različnih letih rabe (Slika 18). Opisano zakonitost pa lahko porušijo ekstremne vremenske razmere, na primer močna kmetijska suša.



Slika 18: Povprečni letni pridelki suhega zelinja vseh vrst trav in metuljnic skupaj po letih rabe za sortne poskuse v Jabljah v obdobju 1992–2006 (Verbič, 2014)

Figure 18: Average annual herbage dry matter yield of all grass and legume species together by leys of various age for experiments in Jablje in the period 1992–2006 (Verbič, 2014)

Idealno bi torej bilo, da bi posamezne vrste trave sejali vsako leto in bi tako imeli v posameznih letih podatke o pridelkih različno starih posevkov. Šele takrat bi lahko z večjo gotovostjo ugotavljali vpliv vremenskih razmer na pridelek travne ruše. Pri tem se spet kaže kompleksnost procesa rasti travne ruše in raznovrstnost težav, s katerimi se soočamo pri simuliranju pridelka (Barrett in sod., 2005).

Na osnovi opisanih zakonitosti smo za J-DG izločili leti 2004 in 2007, za J-LP 2001 in 2004 ter za J-PP 2001. V Rakičanu smo za vse tri vrste trav izločili leto 2008, za R-LP še leto 2002 in za R-DG leto 2006 (Preglednica 7, oranžno). Glede na pričakovanja v danih vremenskih razmerah in primerjave s preostalimi meritvami, so pridelki travne ruše v teh letih preveč odstopali in bi lahko slabo vplivali na umerjanje modela. Po mnenju Verbiča (2014) je bila, na primer, navadna pasja trava leta 2004 v petem letu rasti, zato je bil pridelek suhega zelinja zelo majhen. Nasprotno je bilo leta 2007, ko je bila v drugem letu in je bil zato pridelek nadpovprečen. Podobno je bilo s trpežno ljuljko in travniškim mačjim repom, pri katerih je bilo leto 2001 prvo leto z izredno velikim pridelkom, za trpežno ljuljko pa 2004 četrto leto s slabim pridelkom. Leta 2009 se je, na primer, pri J-DG povsem nepričakovano zgodilo, da ni bilo velikih razlik med pridelkom enoletnega in štiriletnega posevka. Tako smo v vseh letih za izmerjene pridelke za različno stare posevke izračunali povprečja (poleg povprečij po parcelah), da bi v čim večji meri zmanjšali vpliv starosti ruše. Poskusa R-DG za umerjanje nismo uporabili zaradi premajhnega števila let, ki nam je po tej analizi ostal.

Podatke o letnih pridelkih zelinja smo dobili z izračuni povprečij, najmanjših in največjih vrednosti za sorte, ki so bile v posameznih letih vključene v poskusa Preizkušanje vrednosti sort za pridelovanje in uporabo in Posebno preizkušanje sort za opisno sortno

listo. Vključenih je bilo povprečno pet sort navadne pasje trave (od dve do osem), devet sort trpežne ljuljke (od pet do štirinajst) in šest sort travniškega mačjega repa (od štiri do devet). Poskusi so bili zasnovani v naključnem bloku v štirih ponovitvah z osnovno parcelo velikosti 6 m².

3.2.2 Gospodarjenje s travno rušo

Ker model LINGRA-N ne vsebuje modula za simulacijo fenološkega razvoja travne ruše, nismo potrebovali datumov nastopa fenoloških faz, temveč le podatke o datumih košenj, ki so predstavljali povprečno vrednost za umerjanje datumov košenj (*MNDAT*). Potrebovali smo še podatke o datumih in stopnji gnojenja z dušikom. Bolezni, škodljivci in pleveli v modelu niso upoštevani ob predpostavki, da je njihov vpliv precej manjši od vpliva abiotičnih okoljskih dejavnikov (Höglind in sod., 2001). Računskega modula za namakanje nismo uporabili, ker tudi travna ruša pri obravnavanih poskusih ni bila namakana, poleg tega pa to ni praksa v slovenskem prostoru.

Pri nizozemskem poskusu (Schapendonk in sod., 1998) je bila stopnja gnojenja travne ruše za naše razmere izredno visoka: 600 kg N ha⁻¹, 70 kg P₂O₅ ha⁻¹ in 280 kg K₂O ha⁻¹ vsako leto. Varianta poskusa S72, ki smo jo uporabili, je bila letno gnojena s 180 kg N ha⁻¹, 120 kg P₂O₅ ha⁻¹ in 165 kg K₂O ha⁻¹. Pri poskusu S9 je bilo letno gnojenje s 40 kg N ha⁻¹, 60 oz. 90 kg P₂O₅ ha⁻¹ in 80 oz. 120 kg K₂O ha⁻¹. Stopnja gnojenja z dušikom je bila v Jabljah povprečno 156 kg N ha⁻¹, v Rakičanu pa 168 kg N ha⁻¹ letno. Podatke o gospodarjenju s travno rušo, kot so datumi in stopnje gnojenja z dušikom ter datumi košnje (Preglednica 8), smo uporabili za pripravo vhodnih datotek MANAGG.dat.

Preglednica 8: Povprečni datumi košenj pred umerjanjem ter stopnja gnojenja z dušikom za vse obravnavane poskuse (S72-poskus v Ljubljani, S9-poskus v Brestanici, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep)

Table 8: Average mowing days used at the beginning of the calibration and nitrogen fertilization rates for all study experiments (S72-experiment in Ljubljana, S9-experiment in Brestanica, J-Jablje, R-Rakičan, DG-cock's foot, LP-perennial ryegrass, PP-timothy grass)

Poskus	Povprečni dan košnje	Stopnja gnojenja z dušikom
	1.-2.-3.-4. košnja (julijanski dan)	1.-2.-3. gnojenje (kg N ha ⁻¹)
S72	145-206-267	60-60-60
S9	162-221	40
J-DG	136-187-242-287	60-50-46
J-LP	135-176-237-280	60-50-46
J-PP	141-191-245-294	60-50-46
R-LP	135-174-225	60-54-54
R-PP	134-178-243	60-54-54

Pri poskusih s KIS-a smo morali nekaj izmerjenih podatkov za uporabo v modelu posplošiti. V Jabljah smo za vse tri poskuse za celotno obdobje uporabili povprečne datume za štiri košnje, čeprav je število košenj izjemoma segalo od dva do pet. V Rakičanu so bile košnje v povprečju tri, saj so zaradi manjše količine padavin razmere za rast precej slabše kot v Jabljah. Pogosto se, na primer, zgodi, da po prvi ali drugi košnji travna ruša tako slabo raste, da poleti opravijo samo čistilno košnjo, torej pridelkov zaradi neizenačenosti, zapleveljenosti in majhnosti sploh ne tehtajo. V poletnih mesecih trave pogosto popolnoma prekinejo rast, ki se ponovno začne šele z dežjem v drugi polovici avgusta, torej lahko spet kosijo jeseni (Verbič, 2014). Za LP in PP smo izračunali povprečno količino dodanega dušika, saj so bila med posameznimi leti manjša odstopanja. Za prvo gnojenje smo vedno določili 91. dan (1. april), kar je splošni datum začetka vegetacijskega obdobja. Datuma drugega in tretjega gnojenja smo nastavili na prvi dan po prvi in drugi košnji.

Preostali parametri, ki se nanašajo na gospodarjenje s travno rušo, so zbrani v preglednici 9. Meje za umerjanje smo določili na osnovi literature.

Preglednica 9: Parametri iz datoteke MANAGG.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali.

Table 9: Parameters from MANAGG.dat file for LINGRA-N model with default values and calibration range with its source. Orange italic: the parameters that were not calibrated.

Ime	Opis in enota	Privzeta vrednost v modelu	Meji za umerjanje	Viri*
NRFTAB	sprejem dušika glede na količino dodanega dušikovega gnojila (kg kg^{-1})	0,7	0,5–0,9	
NMINS	dostopni mineralni dušik ob začetku vegetacijskega obdobja (kg N ha^{-1})	150	150–450	Kaluder, 2013
<i>RTMINS</i>	<i>delež mineralnega dušika v tleh, ki na dan postane dostopen (d^{-1})</i>	<i>0,025</i>	<i>0,017–0,033</i>	
CLAI	indeks listne površine, ki ostane po košnji (ha ha^{-1})	0,8	0,1–0,8	Rodriguez in sod., 1999; Höglind in sod., 2001; Van Oijen in sod., 2005; Merot in sod., 2008; Jago in sod., 2013
<i>IMOPT</i>	<i>določa režim košnje: 1-košnja pri $\text{WLVG} > \text{CWGHT}^\#$, 2-košnja na datum, če je $\text{LAI} > \text{CLAI}$</i>	<i>2</i>		

* Kjer vir ni naveden, se parameter v takšnem smislu v literaturi ne pojavlja, zato smo za umerjanje uporabili 30-odstotni interval okoli privzete vrednosti.

[#] Ko suha masa zelinja na polju (WLVG) preseže vrednost $\text{CWGHT} = 1500 \text{ kg}_{\text{ss}} \text{ ha}^{-1}$.

Z $IMOPT = 2$ smo določili, da model LINGRA-N upošteva datume košenj, obstaja namreč tudi druga možnost, pri kateri se košnja simulira, ko je modelirana suha masa zelinja dovolj velika. Pri analizi občutljivosti se je pokazalo, da deleža mineralnega dušika v tleh, ki na dan postane dostopen ($RTMINS$), zaradi njegovega majhnega vpliva na simulacije ni treba umeriti.

3.2.3 Ekofiziološki parametri travne ruše

Spomladi so za začetek rasti odločilne vremenske razmere: če zelo posplošimo, začne ruša rasti, ko se tla pod njo (v globini 10 cm) segrejejo na okoli 5 °C. Najustreznejša temperatura zraka za rast in razvoj travnih vrst (ob zadostnih količinah vlage) pa se giblje okoli 25 °C (Korošec, 1997). Vpliv takšnih in podobnih lastnosti, ki so povzete v posameznih parametrih, smo glede na povprečne letne pridelke suhega zelinja s poskusov in glede na lastnosti modela preverili z analizo občutljivosti. Predstavljeni (Preglednica 10) so parametri rastle, ki nastopajo v modelu LINGRA-N v datoteki CROPG1.dat. Več o analizi in umerjanju v poglavju 3.5.

Preglednica 10: Parametri iz datoteke CROPG1.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali.

Table 10: Parameters from CROPG1.dat file for LINGRA-N model with default values and calibration range with its source. Orange italic: the parameters that were not calibrated.

Ime	Opis in enota	Privzeta vrednost v modelu	Meji za umerjanje	Viri*
<i>fenologija</i>				
<i>IDSL</i>	<i>določa, ali je razvoj pred cvetenjem odvisen le od temperature (=0) ali tudi od dolžine dneva (=1)</i>	<i>0</i>		
TSUM1	temperaturna vsota, ki ustreza eni razvojni stopnji (°C d)	600	420–700	
TMBAS1	temperatura praga za rast listov (°C)	3	1–5	
<i>začetno stanje</i>				
<i>DVSI</i>	<i>začetna vrednost razvojne stopnje</i>	<i>0</i>		
TDWI	začetna celotna biomasa ($\text{kg}_{\text{SS}} \text{ha}^{-1}$)	300	200–400	
TILLI	začetno število poganjkov (m^{-2})	7000	3000–10000	Wolf, 2006
WREI	začetna masa zaloga ($\text{kg}_{\text{SS}} \text{ha}^{-1}$)	200	100–300	Wolf, 2006
RDI	začetna globina korenin (cm)	40	30–80	Höglind in sod., 2001; Van Oijen in sod., 2005; Pintar in Maver, 2009; Blombäck in Eckersten, 1997

se nadaljuje

nadaljevanje Preglednica 10: Parametri iz datoteke CROPG1.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali.

Ime	Opis in enota	Privzeta vrednost v modelu	Meji za umerjanje	Viri*
<i>zelena površina</i>				
SLA	specifična listna površina (ha kg ⁻¹)	0,0025	0,001–0,005	Bonesmo in Belanger, 2002; Milla in sod., 2008; Barrett in sod., 2005; Schapendonk in sod., 1998; Höglind in sod, 2001; Van Oijen in sod., 2005; Blombäck in Eckersten, 1997
LAICR	kritični indeks listne površine za samozasenčenje (m ² m ⁻²)	4	4–5	Höglind in sod, 2001; Van Oijen in sod., 2005
TBASE	<i>spodnji prag temperature zraka za povečevanje indeksa listne površine (°C)</i>	<i>0</i>		
<i>asimilacija</i>				
KDIF	koeficient slabitve za difuzno sevanje	0,6	0,5–0,8	Bonesmo in Belanger, 2002; Höglind in sod., 2001; Van Oijen in sod., 2005; Blombäck in Eckersten, 1997
FRTB	delež suhe snovi, ki se razporedi v korenine brez vpliva sušnega stresa (kg kg ⁻¹)	0,165	0,15–0,21	Heide in sod., 1985, cit. po Höglind in sod., 2001; Jing in sod., 2012a
<i>stopnje odmiranja</i>				
RDRL	najvišja relativna stopnja odmiranja listov zaradi sušnega stresa (d ⁻¹)	0,05	0,035–0,065	
RDRSHM	<i>najvišja relativna stopnja odmiranja listov zaradi samozasenčenja (d⁻¹)</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02–0,04</i>	
DVSDLT	<i>razvojna stopnja, nad katero se lahko začne odmiranje listov</i>	<i>1</i>		
<i>raba vode</i>				
CFET	<i>korekcijski faktor za transpiracijo (za travo ni popravka)</i>	<i>1</i>		
DEPNR	<i>oznaka skupine, v katero uvrščamo travo glede na črpanje vode iz tal</i>	<i>3,5</i>		
<i>korenine</i>				
RRI	<i>največja dnevna rast korenin (cm d⁻¹)</i>	<i>1,2</i>	<i>0,8–1,6</i>	

se nadaljuje

nadaljevanje Preglednica 10: Parametri iz datoteke CROPG1.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali.

Ime	Opis in enota	Privzeta vrednost v modelu	Meji za umerjanje	Viri*
RDMCR	največja globina korenin (cm)	40	30–80	Höglind in sod., 2001; Van Oijen in sod., 2005; Pintar in Maver, 2009; Blombäck in Eckersten, 1997
<i>raba dušika</i>				
RDRNS	<i>najvišja relativna stopnja odmiranja listov zaradi pomanjkanja dušika</i>	<i>0,05</i>	<i>0,035–0,065</i>	
FRNX	optimalna koncentracija dušika kot delež najvišje	1	0,7–1	
LRNR	najvišja koncentracija dušika v koreninah kot delež najvišje koncentracije dušika v zelinju	0,5	0,35–0,65	
NLUE	<i>koeficient zmanjšanja učinkovitosti izrabe sončnega obsevanja (RUE) zaradi pomanjkanja dušika</i>	<i>1,1</i>	<i>1,05–1,45</i>	
NSLA	<i>koeficient vpliva pomanjkanja dušika na zmanjšanje SLA</i>	<i>0,5</i>	<i>0,35–0,65</i>	
RNFLV	preostali del dušika v listih ($\text{kg N kg}^{-1}_{\text{ss}}$)	0,01	0,007–0,013	
RNFRT	<i>preostali del dušika v koreninah</i> ($\text{kg N kg}^{-1}_{\text{ss}}$)	<i>0,005</i>	<i>0,0035–0,0065</i>	
NMXLV	najvišja koncentracija dušika v listih ($\text{kg N kg}^{-1}_{\text{ss}}$)	0,035	0,012–0,048	Yin in Schapendonk, 2004; Bonesmo in Belanger, 2002

* Kjer vir ni naveden, se parameter v takšnem smislu v literaturi ne pojavlja, zato smo za umerjanje uporabili 30-odstotni interval okoli privzete vrednosti.

Oranžno ležeče so označeni tisti parametri, ki jih na podlagi navodil o modelu, analize občutljivosti ali ker ni bilo smiselno, nismo umerjali, temveč smo uporabili privzete vrednosti. Kjer vir ni naveden, se parameter v takšnem smislu v literaturi ne pojavlja (skupaj 11 parametrov), zato smo za umerjanje uporabili 30-odstotni interval okoli privzete vrednosti.

Sledijo še spremenljivke, ki so odvisne od osnovnejših spremenljivk v modelu (Preglednica 11). Pri teh podamo tabelarične vrednosti spremenljivk (na primer učinkovitosti izrabe sončnega obsevanja) pri izbranih vrednostih osnovne spremenljivke (na primer razvojne stopnje), model pa z linearno interpolacijo določi vmesne vrednosti.

Preglednica 11: Tabelarični parametri iz datoteke CROPG1.dat modela LINGRA-N s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali (*RUE*-učinkovitost izrabe sončnega obsevanja).

Table 11: Table parameters from CROPG1.dat file for LINGRA-N model with default values and calibration range with its source. Orange italic: the parameters that were not calibrated (*RUE*-radiation use efficiency).

Ime	Opis in enota	Privzeta vrednost v modelu		Meji za umerjanje	Viri*
DTSMTB	dnevno povečanje temperature vsote kot funkcija povprečne dnevne temperature zraka (°C; °C)	-10	0	0–5	
		3	0		
		33	30		
		45	30		
RUETB	učinkovitost izrabe sončnega obsevanja za proizvodnjo biomase kot funkcija razvojne stopnje (<i>DVS</i>) (-; $g_{SS} MJ^{-1}_{PAR}$)	0	3	2,6–3,4	Bonesmo in Belanger, 2002; Barrett in sod., 2005; Schapendonk in sod., 1998; Jing in sod., 2012a
		3	3	2,6–3,4	
		5	1		
		6	1		
TMPFTB	faktor zmanjšanja <i>RUE</i> kot funkcija temperature tal (°C; -)	-10	0	1,5–5 8–10	Bouman in sod., 1996
		3	0		
		8	1		
		25	1		
		30	0		
TMNFTB	faktor zmanjšanja <i>RUE</i> kot funkcija nizkih najnižjih temperatur zraka (°C; -)	40	0	-3–0	
		-15	0		
		-3	0		
		0	1		
RDDTB	faktor zmanjšanja <i>RUE</i> kot funkcija dnevnega sončnega obsevanja ($MJ m^{-2} d^{-1}$; -)	30	1	8–12	
		0	1		
		10	1		
		40	0,33		
COTB	<i>faktor povečanja RUE kot funkcija koncentracije CO₂ v ozračju (ppm; -)</i>	42	0,33		
		40	0		
		360	1		
		720	1,25		
FRTRB	<i>korekcijski faktor prerazporeditve SS v korenine kot funkcija TRANRF</i>	1000	1,35		
		-1	1,6		
		0	1,6		
		1	1		
RDRLTB	<i>relativna stopnja odmiranja listov kot funkcija povprečne dnevne temperature zraka (°C; d⁻¹)</i>	1,2	1		
		-10	0		
		10	0,01		
		15	0,02		
		30	0,05		
		50	0,09		

* Kjer vir ni naveden, se parameter v takšnem smislu v literaturi ne pojavlja, zato smo za umerjanje uporabili 30-odstotni interval okoli privzete vrednosti.

3.2.4 Pedološki vhodni podatki

LINGRA-N omogoča, da pri večletnih simulacijah ohranjamo količino vode v tleh zadnjega dne kot novo začetno vrednost. Tako samo prvo leto začnemo s poljsko kapaciteto, nadaljnja pa so odvisna od dejanskih razmer. Zaradi neraziskanega vpliva snežne odeje te opcije nismo uporabili. Začetno stanje vode v tleh smo nastavili na poljsko kapaciteto, kar je v večini primerov, kadar se simulacije začnejo pozimi ali spomladi, dovolj dober približek (Schapendonk in sod., 1998; Lazzarotto in sod., 2009; Jegu in sod., 2013).

Od vseh podatkov, potrebnih za pripravo datoteke SOILG1.dat (Preglednica 12), smo umerjali povprečni delež padavin, ki se izgubi s površinskim odtokom (*RUNFR*), in začetno temperatura tal (*SOITMI*), t. j. temperaturo tal, pri kateri se začne rast travne ruše. Preostali parametri so vezani na lastnosti tal in jih ne umerjamo. Z analizo občutljivosti smo preizkusili tudi njihov vpliv na modelske simulacije.

Preglednica 12: Parametri iz datoteke SOILG1.dat modela LINGRA-N za Jablje s privzetimi vrednostmi v modelu in območjem za umerjanje z viri, iz katerih izhaja. Oranžno ležeče: parametri, ki jih nismo umerjali. Table 12: Parameters from SOILG1.dat file for LINGRA-N model for Jablje with default values and calibration range with its source. Orange italic: the parameters that were not calibrated.

Ime	Opis in enota	Vrednost	Meji za umerjanje	Viri*
<i>SMDRY</i>	<i>vsebnost vode v izsušenih tleh ($pF=6.0$) ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)</i>	<i>0,07</i>		<i>Wolf, 2012</i>
<i>SMW</i>	<i>vsebnost vode v tleh pri točki venenja ($pF=4.2$) ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)</i>	<i>0,14</i>		
<i>SMFC</i>	<i>vsebnost vode v tleh pri poljski kapaciteti ($pF=2.3$) ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)</i>	<i>0,36</i>		
<i>SMO</i>	<i>vsebnost vode v tleh pri zasičenju ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)</i>	<i>0,5</i>		
<i>CRAIRC</i>	<i>kritična vsebnost zraka v tleh ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)</i>	<i>0,05</i>		<i>Wolf, 2012</i>
<i>SMI</i>	<i>začetna vsebnost vode v koreninskem območju ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)</i>	<i>0,36</i>		
RUNFR	povprečni delež padavin, ki se izgubi s površinskim odtokom	0	0–0,2	Updated system ..., 2003
<i>CFEV</i>	<i>korekcijski faktor časovnega zamika evaporacije iz tal (med 1 in 4)</i>	<i>2</i>		<i>Wolf, 2012</i>
<i>KSUB</i>	<i>najvišja stopnja perkolacije v globlje plasti tal (cm d^{-1})</i>	<i>30</i>	<i>20–50</i>	
SOITMI	začetna vrednost temperature tal ($^{\circ}\text{C}$)	5	3,5–6,5	Žitek, 1991

* Kjer vir ni naveden, se parameter v takšnem smislu v literaturi ne pojavlja, zato smo za umerjanje uporabili 30-odstotni interval okoli privzete vrednosti.

Tla poskusa S9 so po opisu Leskoška (1965) obrečna, slabo razvita, ilovnato peščena karbonatna tla. Tip tal pri poskusu S72 je psevdoglej na skeletni podlagi, prevladujoča tekstura je meljasta ilovica. Tla so srednje globoka in rjava. Meljasta ilovica prevladuje

tudi v Jabljah, kjer je tip tal psevdoglej-glej, globok in zmeren. V Rakičanu pa so tla nastala v postglacialnem obdobju na ilovnatem pesku iz mešanice karbonatnih in silikatnih kamenin Mure in Ledave in spadajo med izprana rjava tla (Tajnšek, 2003).

Osnovne podatke o lastnostih tal (opis profila, teksturo in vsebnost organske snovi) za poskusa S9 in S72 smo pridobili s Centra za pedologijo in varstvo okolja na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani (CPVO, 2014). Po njihovem priporočilu smo iz teksture in vsebnosti organske snovi določili vsebnost vode pri poljski kapaciteti, točki venenja in pri nasičenju z uporabo modela SPAW (verzija 6.02.75; Saxton in Rawls, 2006). Tla poskusov v Jabljah in Rakičanu je natančno opisal Tajnšek (2003), vključno z določitvijo vsebnosti vode v tleh pri poljski kapaciteti in pri točki venenja (Preglednica 13). Model SPAW lahko uporabimo tudi za določanje najvišje stopnje perkolacije v globlje plasti tal. Pri analizi občutljivosti se je sicer izkazalo, da ta na rezultate nima velikega vpliva. Vsi pedološki podatki so pripravljeni za zgornjo plast tal do največje globine korenin, ki je med parametri za umerjanje, z zgornjo mejo 80 cm.

Preglednica 13: Podatki o vsebnosti vode v tleh pri poljski kapaciteti, točki venenja in pri nasičenju za Ljubljano (S72), Brestanico (S9), Jablje in Rakičan

Table 13: Soil moisture at field capacity, wilting point and saturation for Ljubljana (S72), Brestanica (S9), Jablje and Rakičan

Poskus	Vsebnost vode v tleh pri poljski kapaciteti (cm ³ cm ⁻³)	Vsebnost vode v tleh pri točki venenja (cm ³ cm ⁻³)	Vsebnost vode v tleh pri nasičenju (cm ³ cm ⁻³)
S9	0,26	0,10	0,50
S72	0,29	0,13	0,49
Jablje	0,36	0,14	0,50
Rakičan	0,22	0,09	0,43

3.2.5 Meteorološki vhodni podatki

Pri napovedovanju pridelka za travno rušo je natančnost močno odvisna od kakovosti meteoroloških podatkov (Barrett in sod., 2005).

Meteorološke podatke smo pridobili z Agencije RS za okolje (ARSO, 2014). Za uporabo v modelu LINGRA-N morajo biti datoteke z dnevnimi meteorološkimi podatki (Preglednica 14) pripravljene v točno določenem formatu, ločene po letih in za vsako postajo. Pri tem so največji problem predstavljali nepopolni nizi podatkov in redkost meteorološke mreže. Predvsem zato, ker podatki o pridelku travne ruše ponekod segajo v leto 1955 in potrebujemo neprekinjene meteorološke podatke za izbrane lokacije od takrat do sedaj ali pa za analizo 50-letnega obdobja vsaj od 1964 do 2013. V vsem tem času pa se je meteorološka mreža precej spreminjala. Tako smo izbrali najprimernejše meteorološke postaje, ki čim bolj ustrezajo glede na lokacijo in časovno obdobje (Preglednica 15).

Preglednica 14: Dnevni meteorološki podatki, ki jih potrebujemo za simulacije z modelom LINGRA-N

Table 14: Daily meteorological data used for LINGRA-N model simulations

Spremenljivka	Enota
Številka postaje	-
Leto	-
Julijanski dan	-
Sončno obsevanje	$\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Najnižja temperatura zraka	$^{\circ}\text{C}$
Najvišja temperatura zraka	$^{\circ}\text{C}$
Tlak vodne pare ob 7h	kPa
Povprečna hitrost vetra na višini 2 m	m s^{-1}
Padavine	mm d^{-1}

Preglednica 15: Obravnavanim poskusom najbližje meteorološke postaje in obdobje, za katerega smo potrebovali podatke, ter zaradi manjkajočih podatkov potrebni kombinaciji z drugo postajo (S9-poskus v Brestanici, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep)

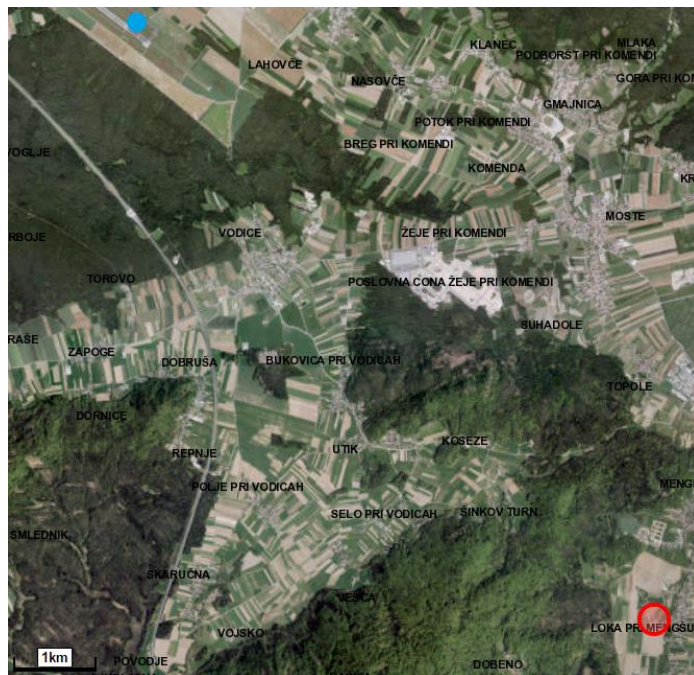
Table 15: The meteorological stations nearest to study experiments, periods for which the data were needed, and combination with other station in case of missing values (S9-experiment in Brestanica, J-Jablje, R-Rakičan, DG-cock's foot, LP-perennial ryegrass, PP-timothy grass)

Meteorološka postaja	Pripadajoči poskus	Obdobje	Kombinacija z drugo postajo
Malkovec	S9	1958–2013 (manjka 1978–1985)	Celje
Ljubljana	S72	1955–2013	/
Brnik	J-DG, J-LP, J-PP	1964–2013	Ljubljana
Murska Sobota	R-DG, R-LP, R-PP	1964–2013	/

Če manjka podatek le za katerega od dni v letu, izvede interpolacijo model, razen v primeru manjkajočega podatka o količini padavin. Pri meteorološki postaji Malkovec smo morali zaradi manjkajočih podatkov v letih 1962 in 1963 uporabiti izračun sončnega obsevanja iz najvišje in najnižje temperature zraka, leta 1961 pa smo za en mesec preračunali temperature zraka z najbližje meteorološke postaje Celje. Za obdobje po letu 2000 na meteorološki postaji Letališče Jože Pučnik Ljubljana (Brnik) ni bilo mogoče izračunati tlaka vodne pare ob 7h, zato so bili preračunani podatki s postaje Ljubljana Bežigrad (Ljubljana). Vpliv vodne pare je v modelu v primerjavi z drugimi meteorološkimi spremenljivkami majhen.

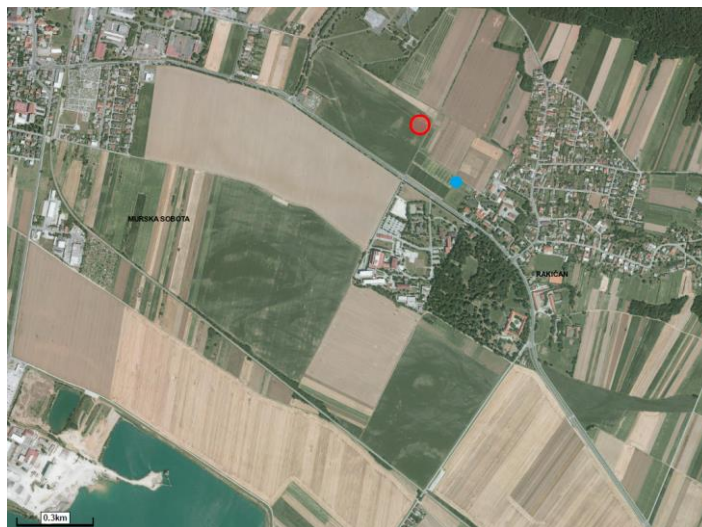
Meteorološka postaja Malkovec leži na Dolenjskem na nadmorski višini 400 m. Ker je na slemenu griča, so podatki bolj reprezentativni za slemena okoliških gričev kot pa za razmere v dolinah (Nadbath, 2001). To zagotovo vnaša negotovost v naše modelske rezultate. Ker se nadaljnje modeliranje po neuspešnem umerjanju ni izkazalo za smiselno, podrobnosti glede podnebnih razmer tu ne bomo navajali.

Ljubljana in Jablje spadata v območje zmernega celinskega podnebja osrednje Slovenije. Za poskus S72 je najbližja meteorološka postaja Ljubljana, za Jablje pa Brnik (Slika 19). Ker pa Brnik za Jablje ni vedno reprezentativen, se moramo zavedati, da tudi tu vnašamo v modelske rezultate negotovost. Predvsem to lahko velja za poletje, ko se vodna bilanca zelo spreminja glede na lokalne konvekcijske padavine, ki ne dosežejo nujno obeh lokacij.



Slika 19: Prikaz lokacij poskusov v Jabljah (rdeči krog) in meteorološke postaje Letališče JP Brnik (modri krog) (Atlas okolja, 2014)

Figure 19: Comparison of locations of the experiments in Jablje (red circle) and meteorological station Airport JP Brnik (blue circle) (Atlas okolja, 2014)



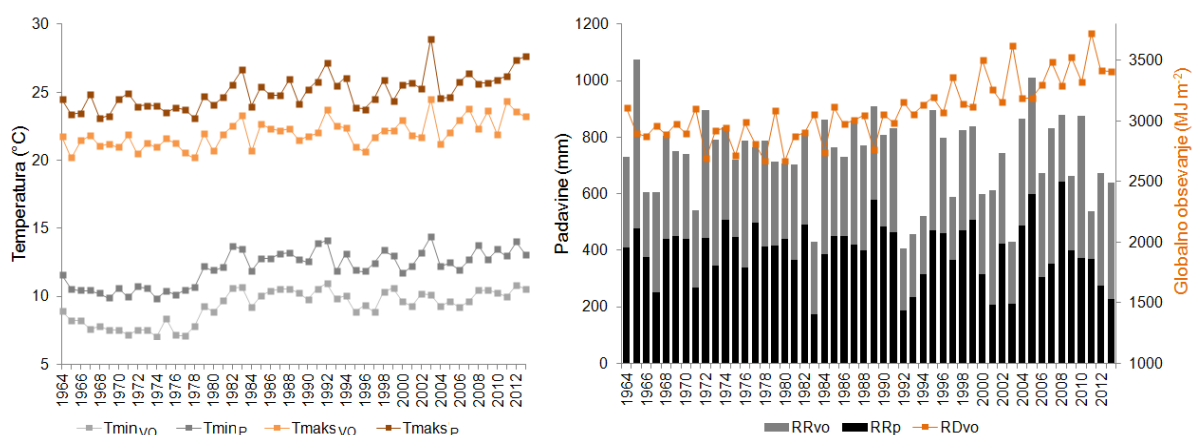
Slika 20: Prikaz lokacij poskusov v Rakičanu (rdeči krog) in meteorološke postaje Murska Sobota (modri krog) (Atlas okolja, 2014)

Figure 20: Comparison of locations of the experiments in Rakičan (red circle) and meteorological station Murska Sobota (blue circle) (Atlas okolja, 2014)

Poskusna polja v Rakičanu se nahajajo v istem kraju kot meteorološka postaja Murska Sobota – Rakičan (Murska Sobota), zato so meteorološki podatki v tem primeru najbolj reprezentativni (Slika 20). Murska Sobota spada v območje zmerne celinskega podnebja vzhodne Slovenije. Tu je količina padavin glede na celotno Slovenijo najmanjša, od tega jih največ pade v poletnih ploah in nevihtah, medtem ko so zime bolj suhe (Podnebne ..., 2006).

Natančneje predstavljamo temperature in padavinske razmere na Brniku in v Murski Soboti, saj smo ti dve postaji pozneje uporabili za 50-letne (1964–2013) modelske simulacije. Zanimale so nas predvsem nekatere izmed meteoroloških spremenljivk, ki nastopajo kot vhodni podatki za model: najnižje in najvišje temperature zraka, globalno sončno obsevanje in padavine. Obravnavali smo časovne vrste (analiza časovnih vrst je opisana v poglavju 3.6) dnevnih vrednosti v obravnavanem obdobju, iz katerih najlažje ugotovimo trende in spremembe variabilnosti. Za del analize smo obdobje razdelili na dva dela, saj smo v drugi polovici že pričakovali izražene vplive podnebnih sprememb. Poleg tega smo pri simulacijah prihodnjih vplivov podnebnih sprememb (poglavji 3.6 in 4.3.5) za osnovo uporabili prvo polovico obravnavanega obdobja.

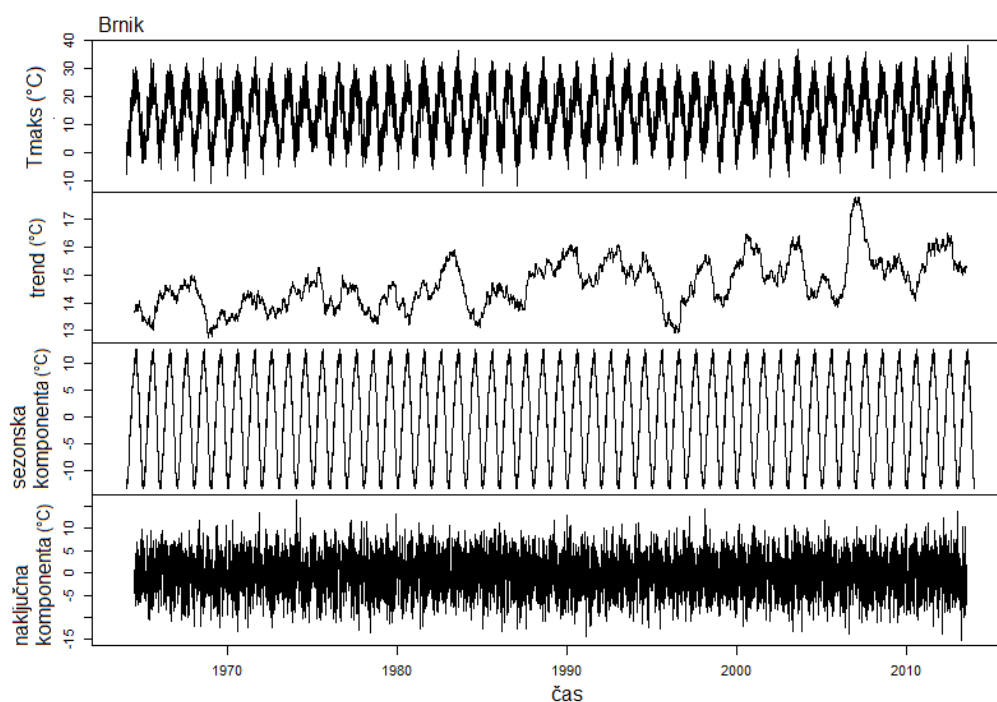
Kot smo opisali v Pogačar in Kajfež-Bogataj (2015), so bili na Brniku najnižje in najvišje temperature zraka (Slika 21 levo) in globalno sončno obsevanje (Slika 21 desno) nižji ob začetku obravnavanega 50-letnega obdobja.



Slika 21: Levo: povprečne najnižje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($Tmin_{vo}$), povprečne poletne najnižje dnevne temperature zraka ($Tmin_p$), povprečne najvišje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($Tmaks_{vo}$) in povprečne poletne najvišje dnevne temperature zraka ($Tmaks_p$) na Brniku v obdobju 1964–2013. Desno: padavine v vegetacijskem obdobju ($RRvo$), poletne padavine (RRp) in vsote globalnega obsevanja v vegetacijskem obdobju ($RDvo$) na Brniku v obdobju 1964–2013.

Figure 21: Left: Average minimum daily air temperatures for the vegetation period ($Tmin_{vo}$), average summer minimum daily air temperatures ($Tmin_p$), average maximum daily air temperatures for the vegetation period ($Tmaks_{vo}$) and average summer maximum daily air temperatures ($Tmaks_p$) in Brnik in the period 1964–2013. Right: Precipitation during the vegetation period ($RRvo$), summer precipitation (RRp), and global radiation sums for the vegetation period ($RDvo$) in Brnik in the period 1964–2013.

Za celotno obdobje 1964–2013 je bilo povprečje povprečnih najnižjih dnevni temperatur zraka v vegetacijskem obdobju (od 1. aprila do 30. septembra) ($Tmin_{VO}$) 9,3 °C, povprečje povprečnih poletnih (od 1. junija do 31. avgusta) najnižjih dnevni temperatur zraka ($Tmin_P$) 12,1 °C, povprečje povprečnih najvišjih dnevni temperatur zraka v vegetacijskem obdobju ($Tmaks_{VO}$) 22 °C in povprečje povprečnih poletnih najvišjih dnevni temperatur zraka ($Tmaks_P$) 25 °C. V drugi polovici obravnavanega obdobja je bila $Tmaks_P$ samo v sedmih letih nižja od povprečja, izjemno visoke vrednosti pa je dosegla v letih 2003, 2013, 2012, 1992 in 1983. Očitno je, da se $Tmaks_P$ v obdobju v povprečju viša. Analiza časovne vrste je na letni ravni pokazala statistično značilen ($p = 0,01$) trend 0,06 °C leto⁻¹. Za vegetacijsko obdobje je trend $Tmaks_{VO}$ nekoliko manjši, 0,04 °C leto⁻¹ ($p = 0,01$). Podobno je za $Tmin_{VO}$ in $Tmin_P$ trend 0,06 °C leto⁻¹ ($p = 0,001$). Pri analizi časovnih vrst dnevni podatkov 50-letnega obdobja se je izkazalo, da se variabilnost ne spreminja. Rezultati so si med seboj podobni, zato so prikazani grafi za $Tmaks$ (Slika 22), preostali so v prilogi C. Globalno obsevanje narašča še opazneje. Izredno velike vrednosti so bile dosežene po letu 2000, in sicer v letih 2011, 2003, 2009, 2000, 2007, 2012 in 2013.



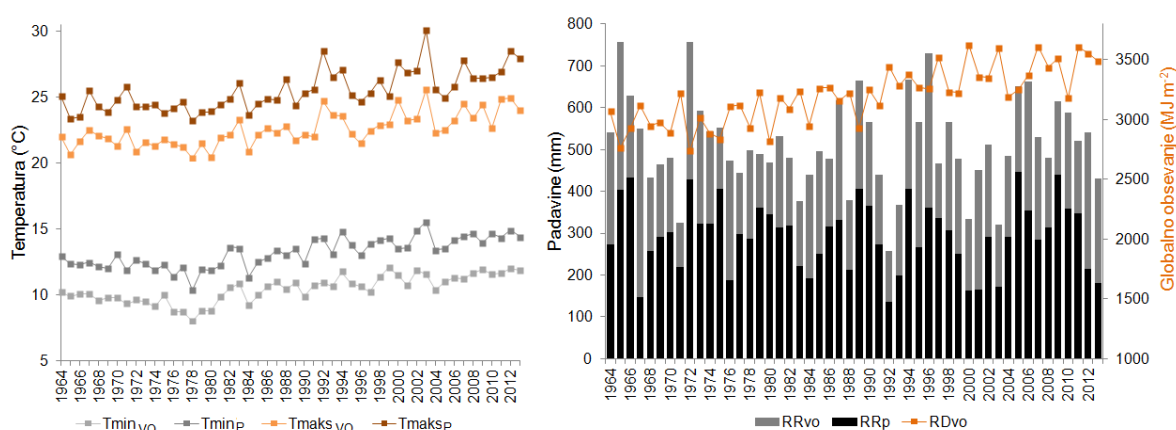
Slika 22: Razčlenitev časovne vrste najvišjih dnevni temperatur zraka ($Tmaks$) na Brniku v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento

Figure 22: Decomposition of the time series of daily maximum air temperatures ($Tmaks$) in Brnik in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)

Povprečje količine padavin v vegetacijskem obdobju (RR_{VO}) za 50-letno obdobje je bilo na Brniku 734 mm, od tega jih je v povprečju 396 mm padlo poleti (RR_P) (Slika 21 desno). Statistično značilnega trenda zmanjševanja količine padavin ni. RR_{VO} je bila manjša od 500 mm v letih 1992, 2003, 1983 in 1993, RR_P pa je bila manjša od 250 mm v letih 1983,

1992, 2001, 2003, 2013 in 1993. Analiza časovne vrste dnevnih podatkov ni pokazala spremenjene variabilnosti v času obravnavanega obdobja.

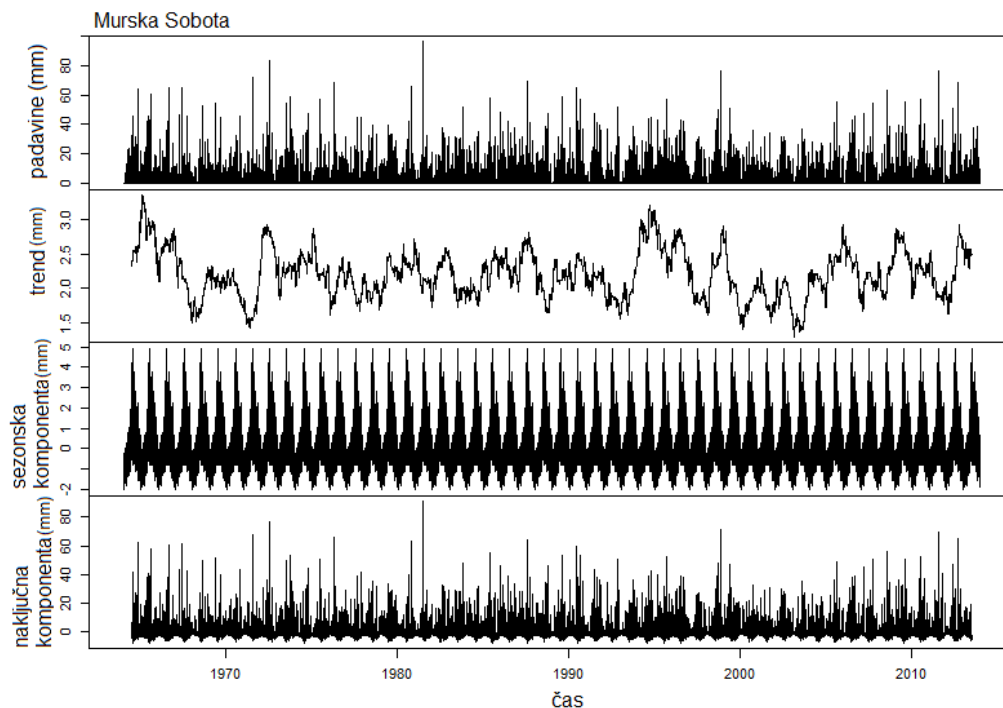
V Murski Soboti so predvsem povprečne najnižje temperature zraka precej višje kot na Brniku. Za celotno obdobje 1964–2013 je bilo tu povprečje $T_{min_{VO}}$ 10,4 °C, povprečje T_{min_P} pa 13,2 °C. Povprečne najvišje temperature zraka so 0,5 °C višje kot na Brniku: $T_{maks_{VO}}$ 22,5 °C in T_{maks_P} 25,5 °C (Slika 23 levo). Tudi v Murski Soboti so zadnja leta toplejša. $T_{maks_{VO}}$ je bila nad 24 °C v letih 2003, 2012, 2011, 2000, 1992, 2007 in 2009. V letu 2003 je T_{maks_P} celo presegla 30 °C, v letih 1992 in 2012 pa 28 °C. Analiza časovne vrste je na letni ravni pokazala statistično značilen ($p = 0,001$) trend v velikosti 0,07 °C leto⁻¹ za $T_{maks_{VO}}$, 0,06 °C leto⁻¹ za T_{maks_P} in T_{min_P} ter 0,05 °C leto⁻¹ za $T_{min_{VO}}$. Pri analizi časovnih vrst dnevnih podatkov 50-letnega obdobja (priloga C) se je tudi tu izkazalo, da se variabilnost ne spreminja. V Murski Soboti je bilo najvišje globalno obsevanje (Slika 23 desno) zabeleženo v petih letih po letu 1999: 2000, 2007, 2011, 2003 in 2012.



Slika 23: Levo: povprečne najnižje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($T_{min_{VO}}$), povprečne poletne najnižje dnevne temperature zraka (T_{min_P}), povprečne najvišje dnevne temperature zraka za vegetacijsko obdobje ($T_{maks_{VO}}$) in povprečne poletne najvišje dnevne temperature zraka (T_{maks_P}) v Murski Soboti v obdobju 1964–2013. Desno: padavine v vegetacijskem obdobju (RR_{vo}), poletne padavine (RR_p) in vsote globalnega obsevanja v vegetacijskem obdobju (RD_{vo}) v Murski Soboti v obdobju 1964–2013.

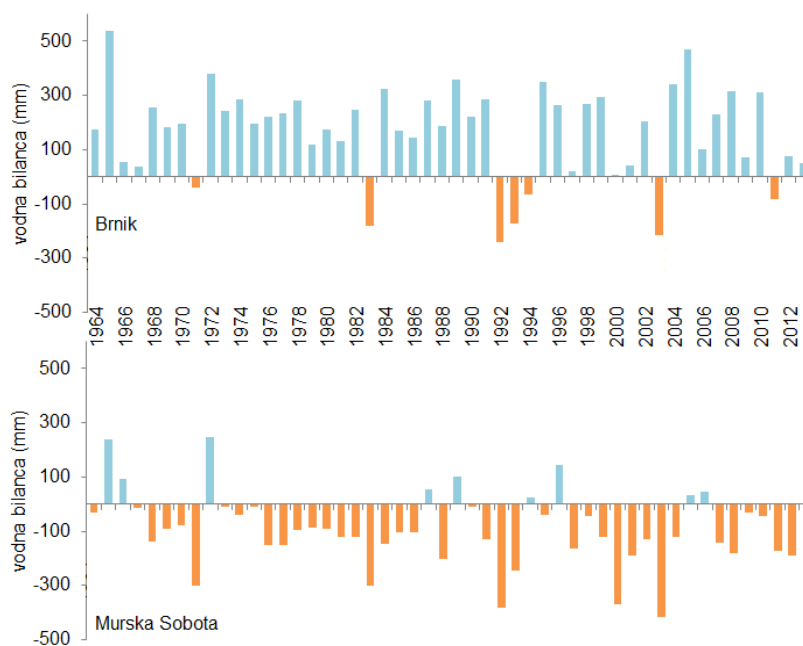
Figure 23: Left: Average minimum daily air temperatures for the vegetation period ($T_{min_{VO}}$), average summer minimum daily air temperatures (T_{min_P}), average maximum daily air temperatures for the vegetation period ($T_{maks_{VO}}$) and average summer maximum daily air temperatures (T_{maks_P}) in Murska Sobota in the period 1964–2013. Right: Precipitation during the vegetation period (RR_{vo}), summer precipitation (RR_p), and global radiation sums for the vegetation period (RD_{vo}) in Murska Sobota in the period 1964–2013.

Padavin je v Murski Soboti občutno manj kot na Brniku. Povprečje RR_{vo} za 50-letno obdobje je bilo v Murski Soboti 641 mm, povprečje RR_p pa 227 mm (Slika 23 desno). Statistično značilnega trenda zmanjševanja količine padavin ni, prav tako analiza časovne vrste dnevnih podatkov ni pokazala spremenjene variabilnosti (Slika 24). RR_{vo} je bila manjša od 400 mm v letih 1992, 2003, 1971, 2000, 1993, 1983 in 1988, RR_p pa je bila v letih 1992 in 1967 celo manjša od 150 mm.



Slika 24: Razčlenitev časovne vrste dnevnih padavin (*padavine*) v Murski Soboti v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento

Figure 24: Decomposition of the time series of daily precipitation (*padavine*) in Murska Sobota in the entire period 1964–2013 into trend, season (*sezonska komponenta*) and random component (*naključna komponenta*)



Slika 25: Meteorološka vodna bilanca v vegetacijskem obdobju po letih v obdobju 1964–2013 na Brniku (zgoraj) in v Murski Soboti (spodaj)

Figure 25: Meteorological water balance in the vegetation period by year in the period 1964–2013 in Brnik (upper) and Murska Sobota (lower)

Meteorološka vodna bilanca (razlika med padavinami in potencialno evapotranspiracijo) nam pove nekaj več o razmerah za rast kot sama količina padavin, saj so v izračun vključene vse osnovne meteorološke spremenljivke, s čimer upoštevamo, koliko vode tla in rastlina izgubljajo. V obravnavanem obdobju je bila bilanca v vegetacijskem obdobju na Brniku večinoma pozitivna, primanjkljaj je nastopil le v letih 1971, 1983, 1992, 1993, 1994, 2003 in 2011. Povsem obrnjena je slika v Murski Soboti – tu se primanjkljaj vode v vegetacijskem obdobju kaže tako rekoč v celotnem obdobju, z izjemo let 1965, 1966, 1987, 1989, 1994, 1996, 2005 in 2006 (Slika 25).

3.3 ANALIZA FENOLOŠKIH PODATKOV

Kot smo opisali v poglavju 3.1, smo za analizo izbrali 16-letni obdobji 1968–1983 in 1998–2013 za fazo cvetenja navadne pasje trave. Niza smo primerjali na dvanajstih fenoloških postajah. Pri tem smo najprej preverili, ali so porazdelitve normalne, nato pa medsebojno primerjali povprečna datuma nastopa cvetenja. Zanimalo nas je, kako se je spremenila variabilnost, zato smo primerjali tudi standardne odklone.

Preverili smo korelacije dneva nastopa fenološke faze s povprečnimi temperaturami zraka v enem mesecu, dveh ali treh pred nastopom te fenološke faze (od januarja do maja). Uporabili smo Pearsonov koeficient korelacije (r) (Košmelj, 2007), enak postopek je uporabila Črepinškova (2002). Za vsako leto smo za vse lokacije izračunali tudi vsote aktivnih temperatur (pozitivnih povprečnih dnevni temperatur zraka od 1. januarja) do dneva nastopa cvetenja in obdobji med seboj primerjali.

Gre le za hiter pregled, kako se je stanje v zadnjih letih spremenilo glede na že natančno obravnavano preteklo obdobje (npr. Črepinšek, 2002). Za natančnejši vpogled v trende bi bilo treba opraviti obsežnejšo analizo, a to presega namen naše raziskave.

3.4 MODEL LINGRA-N

Poglavje delno povzemamo po virih Pogačar in Kajfež-Bogataj, 2011, 2015 ter Pogačar in sod. (2015). Dinamično-mehanistični model LINGRA (Bouman in sod., 1996; Schapendonk in sod., 1998; Wolf, 2006) zagotavlja dobro osnovo za modeliranje rasti in razvoja travne ruše v zmernih podnebnih pasovih. Temelji na osnovnih morfoloških procesih in prestrezanju sončnega obsevanja (Schapendonk in sod., 1998). Osnovni model LINGRA smo predstavili v članku LINGRA: Model za simulacijo rasti in pridelka travne ruše (Pogačar in Kajfež-Bogataj, 2011). Pri našem delu smo uporabili izboljšan model LINGRA-N (Wolf, 2012), ki sloni na modelu LINGRA, zato v nadaljevanju opozarjamo tudi na izboljšave modela.

Model LINGRA je bil razvit na raziskovalnem inštitutu ALTErra Univerze Wageningen na Nizozemskem. Skupaj z modelom WOFOST (Updated system ..., 2003) za simulacijo rasti poljščin (Ceglar, 2011) in v kombinaciji z Geografskim informacijskim sistemom

(GIS) je bil izbran za CGMS za raziskovalni center Evropske komisije JRC (angl. Joint Research Center) v Italiji. Ime modela izvira iz besedne zveze LINTUL GRAssland, saj je bil razvit na osnovi modela LINTUL (Light INTERception UtILisation simulator, zadnja verzija LINTUL3 (Shibu in sod., 2010)). Namenjen je predvsem (regionalnemu) napovedovanju pridelka in kvantitativnim ocenam rabe tal ter raziskavam vplivov podnebnih sprememb na pridelek travne ruše. Primeren je za različne geografske širine, saj temelji na procesih v rastlini. V osnovi je bil prilagojen modeliranju rasti in razvoja trpežne ljujke v državah članicah Evropske unije na ravni potencialne in z vodo omejene pridelave (Agrometeorological modelling ..., 2004), a so ga uporabljali tudi za študije vplivov podnebnih sprememb na rast travne ruše (Rodriguez in sod., 1999). Implementiran je v okolju FSE (angl. Fortran Simulation Environment).

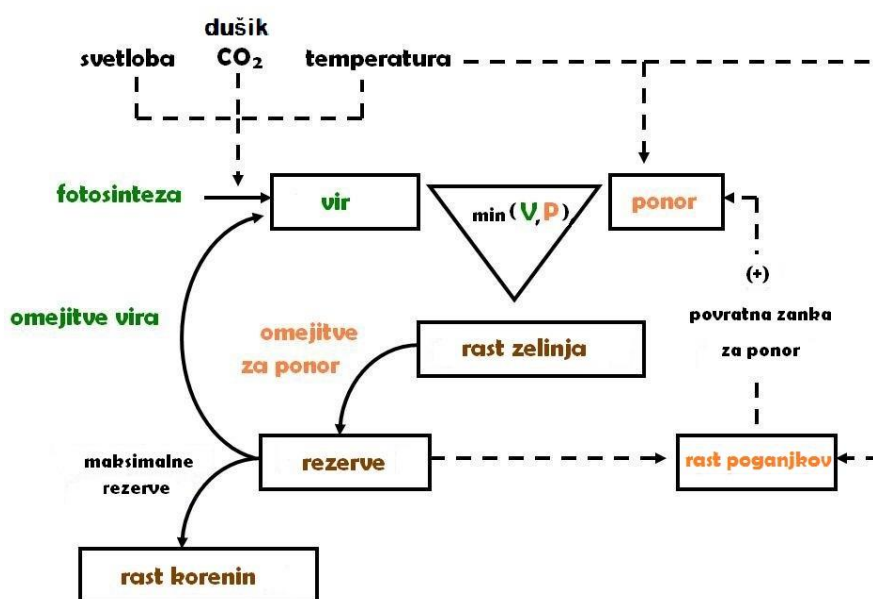
Model LINGRA-N je primeren za simulacijo rasti in pridelka različnih vrst trave, ki rastejo v različnih podnebnih razmerah na različnih tleh pri različnih načinih gospodarjenja. Iz okolja FSE je bila pretvorjen v FORTRAN, predvsem zato, ker nova struktura omogoča izvajanje simulacij za različne kombinacije vremena, tal in lastnosti travne ruše. To pa je bistvenega pomena za študije rabe tal na regionalni ravni (Wolf, 2012).

WFOST, LINTUL, LINGRA in LINGRA-N sledijo hierarhični razliki med potencialno in omejeno pridelavo in si delijo podobne podmodele za rast poljščin s prestrezanjem sončnega obsevanja in asimilacijo CO₂ kot gonilnima procesoma ter fenološkim razvojem kot procesom, ki kontrolira rast. Rast pridelka simulirajo na osnovi procesov, ki se dogajajo v rastlini, in upoštevajo, kako na te procese vplivajo okoljske razmere. Pri tem je število procesov omejeno na glavne spremenljivke in le manjši del teh procesov je dinamično simuliran. S statičnim pristopom pa so obravnavane spremenljivke, ki imajo relativno majhen vpliv na rast ali pa jih slabše poznamo. Nekateri opisi procesov v modelu izvirajo iz rezultatov poskusov, drugi pa so bili privzeti iz literature. Enako velja za spremenljivke in parametre.

Glede na LINTUL so inovativni vidiki modela LINGRA ločeni algoritmi za procese, vezane na vir, in procese, vezane na ponor, ter mehanistični, čeprav poenostavljen, pristop k simulaciji morfološkega razvoja trave, ki opisuje naravno zaporedje dogodkov, vključno z defoliacijo zaradi košnje ali paše. LINGRA je poenostavljena predvsem glede pristopa do vodne bilance in sprejema hranil iz tal, medtem ko LINGRA-N uporablja za vodno bilanco podmodele iz modela WFOST. LINGRA je posebej primerna za določanje kombiniranega vpliva sprememb CO₂, temperature zraka, padavin in sončnega obsevanja na razvoj in rast poljščin ter porabo vode, saj vse pomembne procese simulira ločeno, a upošteva njihovo medsebojno interakcijo (Pogačar in Kajfež-Bogataj, 2009a, 2009b). LINGRA-N ponuja dodatno možnost simuliranja rasti in razvoja travne ruše v razmerah z omejeno dostopnostjo dušika, kar je dobrodošlo glede na pomemben vpliv dušika. Ima pa tudi omejitve, še vedno, na primer, ne upoštevamo vpliva bolezni, škodljivcev in plevela.

3.4.1 Opis izračunov, ki jih uporablja LINGRA-N

Poglavje povzemamo po virih Agrometeorological modelling ..., 2004; Bouman in sod., 1996, Schapendonk in sod., 1998 in Wolf, 2012. V modelu sta ponor in vir simulirana semi-neodvisno, kar pomeni, da je vsak dan stopnja rasti rastline določena glede na bolj omejujoč dejavnik (ponor (P) ali vir (V), Slika 26). Vir je odvisen predvsem od sončnega obsevanja, ponor pa od temperature zraka. Preostale spremenljivke stanja so določene na osnovi stopnje rasti na posamezen dan in niso neodvisno povezane s ponorom ali virom. Simulacija rasti se v modelu začne, ko 10-dnevno drseče povprečje dnevne temperature zraka (tako je v modelu določena temperatura tal) preseže temperaturo praga (*TMBAS1*).



Slika 26: Shematični prikaz najpomembnejših povezav v modelu LINGRA-N (Wolf, 2006)

Figure 26: A scheme of the most important connections in the LINGRA-N model (Wolf, 2006)

Naravni razvojni krog travne ruše nima značilnosti poljščin, saj ga redna košnja prekine. Zato model LINGRA-N ne simulira razvojne stopnje rastline kot fenološke faze, a za posnemanje simulacije razvoja rastline za primerjave med lokacijami in sezonami (ter za kompatibilnost z modelom WOFOST) kljub vsemu uporablja razvojno stopnjo (*DVS*). Ta je določena kot temperaturna vsota povprečnih dnevni temperatur zraka nad 0 °C od začetka leta, deljena s parametrom *TSUM1* (°C), ki v povprečju predstavlja temperaturno vsoto, ki je potrebna, da nastopi cvetenje (okoli 600 °C):

$$DVS_i = \frac{\sum_{d_i} T_{d_i}}{TSUM1}, T_{d_i} > 0^{\circ}C. \quad \dots (1)$$

Pri tem *i* označuje julijanski dan izračuna (pretvorba v prilogi F), *T_d* (°C) pa povprečno dnevno temperaturo zraka. Pri travi ne upoštevamo vpliva dolžine dneva na temperaturno vsoto.

3.4.1.1 Vodna bilanca

Kot smo že omenili, so nekateri pod modeli v modelu LINGRA-N prevzeti iz modela WOFOST, kar v največji meri velja prav za izračune komponent vodne bilance. Proces, ki vplivajo na stanje vode v koreninskem območju, so: perkolacija, površinski odtok, infiltracija, transpiracija rastlin in izhlapevanje iz tal. Infiltracija ni obravnavana v fizikalnem smislu, saj bi za to potrebovali precej manjši časovni korak. Namesto tega je vnaprej določen delež dežja, ki se ob padavinah dnevno ne infiltrira. Pri tem in pri nadaljnjih enačbah je pomembno razumeti, da model ni namenjen podrobnemu dnevnemu sledenju gibanja vode v tleh, temveč potrebujemo le dovolj dobro oceno rastlini dostopne vode v tleh.

Po Driessenu (1986, cit. po Updated system ..., 2003) izračunamo volumsko vsebnost vode v koreninskem območju ($SMACT$, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) kot

$$SMACT = \frac{IN_{up} + (IN_{low} - TR_a)}{RD} \Delta t, \quad \dots (2)$$

pri čemer je neto tok vode skozi zgornjo mejo koreninskega območja (IN_{up} , cm d^{-1}) določen po enačbi

$$IN_{up} = P + I_e - E_s - SR, \quad \dots (3)$$

skozi spodnjo mejo koreninskega območja (IN_{low} , cm d^{-1}) pa po enačbi

$$IN_{low} = -PERC. \quad \dots (4)$$

Pri tem je TR_a (cm d^{-1}) izračunana dejanska transpiracija rastline, RD (cm) izračunana dejanska globina korenin in Δt uporabljen časovni korak (v primeru modela LINGRA-N je to en dan). P (cm d^{-1}) so izmerjene padavine, I_e (cm d^{-1}) označuje efektivno namakanje (nismo uporabili, saj namakanje travne ruše v Sloveniji ni stalna praksa), E_s (cm d^{-1}) izračunano izhlapevanje iz tal, SR (cm d^{-1}) izračunan površinski odtok in $PERC$ (cm d^{-1}) izračunano perkolacijo.

Dostopna voda v koreninskem območju je rastlini na voljo za črpanje. Voda takoj pod koreninskim območjem pa lahko postane dostopna z nadaljnjo rastjo korenin. Pri trajnem travnju je rast korenin v globino zelo majhna, zato večinoma lahko izenačimo dejansko in največjo globino korenin. Ker smo modelirali večinoma sejane travne monokulture, smo omenjeni globini umerili. Tako smo vsako leto (tudi če travna ruša ni bila na novo posajena) na začetku vrnili stanje korenin na 30 do 40 cm in dopustili možnost rasti v času sezone do globine med 40 in 80 cm (odvisno od tal).

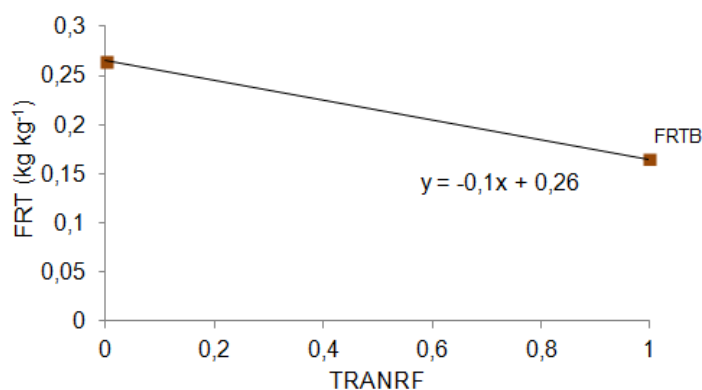
Za modeliranje transpiracije rastlinske odeje in izhlapevanja iz tal je uporabljena Penmanova metoda (1956, 1948, cit. po Updated system ..., 2003), ki je bila prilagojena glede na Choisnel in sod. (1992, cit. po Updated system ..., 2003) in je v omenjenem

priročniku natančno opisana. Faktor zmanjšanja rasti travne ruše zaradi suše je definiran kot

$$TRANRF = TR_a / TR_p = \frac{SMACT - SMW}{SMCR - SMW}, \quad \dots (5)$$

kjer sta TR_a in $SMACT$ izračunana kot v enačbi (2), TR_p (cm d^{-1}) je potencialna transpiracija rastline, SMW ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) vhodna volumska vsebnost vode v tleh pri točki venenja in vhodna $SMCR$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) kritična volumska vsebnost vode v tleh. Slednja je definirana kot mejna volumska vsebnost vode v tleh za rastlini lahko dostopno vodo.

Ko so reže ob pomanjkanju vode za preprečevanje izsušitve zaprte, se zmanjša dotok CO_2 iz ozračja, kar povzroči, da se absorbirano sončno obsevanje porabi manj učinkovito. V modelu je ta proces formuliran tako, da je razmerje $TRANRF$ mera za zmanjšanje stomatalne prevodnosti in s tem za zmanjšanje stopnje fotosinteze in učinkovitosti izrabe sončnega obsevanja (Bouman in sod., 1996). Zmanjšana $TRANRF$ vpliva tudi neposredno na stopnjo rasti in odmiranja listov ter na delež biomase, ki se razporedi v korenine (FRT ; Slika 27). Pri tem je, na primer, parameter $FRTB$, ki predstavlja delež suhe snovi, ki se razporedi v korenine pri $TRANRF = 1$, med parametri, ki smo jih umerjali.



Slika 27: Primer vpliva sušnega stresa, izraženega s faktorjem zmanjšanja rasti zaradi suše ($TRANRF$), na delež biomase, ki se razporedi v korenine (FRT) (prirejeno po Agrometeorological modelling ..., 2004: 35)

Figure 27: The influence of transpiration reduction factor ($TRANRF$) on dry matter allocation to roots (FRT) (based on Agrometeorological modelling ..., 2004: 35)

Yin in Schapendonk (2004) poudarjata, da je glavnega pomena pri modeliranju rasti travne ruše delitev asimilatov med korenine in zelinje. Pri tem sta poskušala pripraviti dve enostavni enačbi za delitev nove biomase in dušika, ki bi bili neposredno uporabni za modele, ki simulirajo rast rastlin. Evalvacija je bila opravljena s podatki o delitvi asimilatov, pridobljenimi iz literature. Primerjave so pokazale, da so izračuni primerni tudi za spremenljive okoljske razmere, kar potrjujeta še z navedbami drugih avtorjev. Gre za učinkovit pristop, ki dobro upošteva interakcije med več okoljskimi faktorji, zato je uporabljen tudi v modelu LINGRA-N.

3.4.1.2 Učinkovitost izrabe sončnega obsevanja

Tvorba novih listov sloni na količini ogljikovih hidratov, shranjenih v listnih zasnovah, ta pa povzroča izmenjavanje obdobja, ko asimilatov primanjkuje, in obdobja, ko se presežek asimilatov pri velikem LAI shranjuje. Močan vpliv na opisani proces imajo okoljske razmere in kmetijska praksa. Poraba asimilatov (ponor) je v modelu povezana z rastjo listov, poganjanjem listov in razraščanjem poganjkov (Schapendonk in sod., 1998), zaloga asimilatov (vir) pa je določena s fotosintezo. Ta je odvisna od količine fotosintetsko aktivnega sevanja (PAR , $MJ\ m^{-2}d^{-1}$), ki ga travna ruša prestreže. To opiše spremenljivka $PARAB$ ($MJ\ m^{-2}d^{-1}$), ki je določena kot

$$PARAB = PAR(1 - e^{-K_{DIF} \cdot LAI}), \quad \dots (6)$$

pri čemer je K_{DIF} koeficient slabitve za difuzno sevanje, določen vnaprej z umerjanjem, in LAI ($m^2\ m^{-2}$) indeks listne površine.

Privzeta največja vrednost učinkovitosti izrabe sončnega obsevanja ($RUETB$) je v osnovnem modelu $3\ g_{SS}\ MJ^{-1}_{PAR}$ (Bouman in sod., 1996) in je med parametri, ki smo jih umerjali. Dejanska učinkovitost pretvorbe absorbiranega sončnega obsevanja v asimilacijo ogljikovih hidratov (RUE) pa je odvisna od intenzitete obsevanja, temperature tal in dostopnosti vode in dušika, njihov vpliv se med seboj množi. RUE je relativno visoka pri majhnih intenzitetah obsevanja in se zmanjšuje pri večjih, saj fotosinteza sledi krivulji nasičenja (prelomno točko lahko umerimo). Poenostavljeno so učinki temperature tal na fotosintezo opisani kot linearna funkcija povprečne temperature tal. Fotosinteza se začne pri pragu npr. $3\ ^\circ C$, nato RUE linearno narašča do optimalne temperature tal (pri kateri je temperaturni faktor enak 1). Seveda je tudi pri tem pomembno umerjanje. Pri modelu LINGRA-N je dodatno upoštevan vpliv najnižje temperature zraka: faktor vpliva na RUE narašča linearno od 0 pri $-3\ ^\circ C$ (priporočeno umerjanje) do 1 pri $0\ ^\circ C$. Dodan je tudi vpliv povišane koncentracije CO_2 , ko faktor narašča nad 1, linearno do 1,25 pri podvojeni koncentraciji. Zaradi dodane simulacije bilance dušika je pomemben tudi dejavnik vpliva dušika ($NLUE$) pri neoptimalni preskrbi rastline z dušikom.

3.4.1.3 Modeliranje rasti

V nasprotju s poljščinami je za travno rušo značilna pogosta defoliacija (košnja ali paša). Stopnja tvorbe novih listov po košnji je ključnega pomena za celotno produktivnost, pri čemer je najbolj pomembno prestreženo sončno obsevanje v tej fazi. Potrebe po ogljikovih hidratih so v prvih dneh po defoliaciji v splošnem večje kot fotosintetski donos, zato rastlina črpa rezervna hranila iz zalog v poganjkih in razrastišču. Na začetku rast listov ni omejena z zalogo asimilatov, temveč s temperaturo zraka. Schapendonk in sod. (1998) so eksperimentalno določili logaritemsko povezavo med spremenljivkama. V modelu je po košnji rast listne površine ($GLAISI$, $ha\ ha^{-1}d^{-1}$) opisana kot produkt števila poganjkov, povprečne širine novih listov in stopnje rasti listov. Število poganjkov je določeno s

posebno rutino (poglavje 3.4.1.5), povprečna širina novih listov je parameter modela, rast listov pa je opisana kot funkcija temperature zraka ($^{\circ}\text{C}$), ko ta presega temperaturo praga za rast listov ($TMBAS1$, $^{\circ}\text{C}$).

S ponorom omejen prirast celotne biomase ($GTWSI$, $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) je izračunan kot

$$GTWSI = \frac{GLAISI}{SLA \cdot (1 - FRT)}, \quad \dots (7)$$

kjer je SLA specifična listna površina in $(1 - FRT)$ delež razporeditve biomase v zelinje (FRT predstavlja delež razporeditve biomase v korenine). Med sezono se SLA sicer lahko spreminja od $0,003 \text{ ha kg}^{-1}$ v zgodnji pomladi do $0,0018 \text{ ha kg}^{-1}$ poleti in jeseni, a ta nihanja v modelu niso upoštevana, uporabljena je povprečna (umerjena) vrednost $0,0025 \text{ ha kg}^{-1}$. Razmerje delitve med zelinje in korenine je neodvisno od tega, ali je rast omejena z virom ali ponorom.

Schapendonk in sod. (1998) navajajo, da bi bila bolj realistična perspektiva, ki bi morda do neke mere izboljšala rezultate, odvisnost SLA od interakcije med virom in ponorom, ki bi tudi pojasnila pogosto opaženo povečano debelino listov pri relativnem presežku asimilatov. Tudi delitev rasti korenine – zelinje je v modelu simulirana le kot funkcija dostopnosti vode (Slika 27), a bi jo bilo dobro povezati še z zalogo asimilatov. LINGRA-N glede na model LINGRA dodatno zajema vpliv dušika na SLA , zmanjšanje pri nepopolni oskrbi opredelimo z vhodnim parametrom $NSLA$.

Dnevna tvorba asimilatov v odvisnosti od vira ($GTWSO_1$, $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) je torej odvisna od fotosinteze in modelirana v odvisnosti od $PARAB$, RUE in vseh omenjenih omejitvenih faktorjev (temperatura zraka, sončno obsevanje, CO_2 , voda, dušik). Skupna stopnja rasti, pogojena z virom ($GTWSO_2$, $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), je enaka vsoti $GTWSO_1$ in dostopni količini prej shranjenih ogljikovih hidratov kot rezerv (WRE , $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1}$).

Dejanska rast trave je določena z ravnovesjem med porabo asimilatov (ponor) in zalogo asimilatov (vir). Če je $GTWSO_2$ večji, je stopnja rasti (GTW , $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) enaka $GTWSI$, presežek asimilatov pa se shrani kot rezerva. V nasprotnem primeru je GTW enak $GTWSO_2$:

$$GTW = \begin{cases} GTWSI; GTWSO_2 > GTWSI \\ GTWSO_2; GTWSO_2 \leq GTWSI \end{cases}, \quad \dots (8)$$

pri čemer je $GTWSI$ kot v enačbi (7).

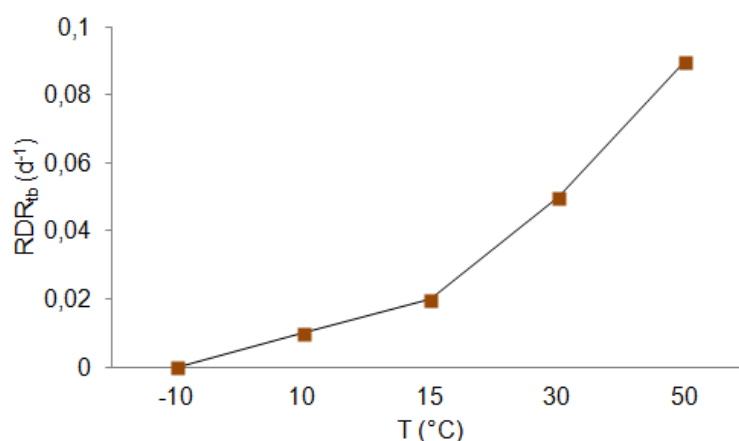
Kadar imamo pogoje omejene z virom, razvoj listov ni več temperaturno odvisen, temveč je prirast mase listov (GLV , $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) določen iz celotne rasti GTW , ki jo pomnožimo z deležem za zelinje ($1 - FRT$), da določimo maso zelenih listov ($WLVG$, $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1}$). Z

množenjem s faktorjem FRT pa dobimo maso korenin (WRT , $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ha}^{-1}$). Dnevni prirast LAI ($GLAI$, d^{-1}) dobimo kot $GLAI = GLV \cdot SLA$, kjer je SLA kot v enačbi (7).

3.4.1.4 Odmiranje listov

Dejanska rast listov je določena s količino dostopnih asimilatov in z dnevnim zmanjšanjem listne mase (DLV , $\text{kg}_{\text{SS}} \text{ha}^{-1} \text{d}^{-1}$). Slednja je izračunana iz relativne stopnje odmiranja listov (RDR , d^{-1}), ki je določena kot vsota relativnih stopenj odmiranja zaradi pomanjkanja dušika (RDR_n , d^{-1}) in zaradi staranja v odvisnosti od povprečne dnevne temperature zraka (RDR_{tb} , d^{-1} ; Slika 28), samozasenčenja (RDR_{sh} , d^{-1} ; Slika 29) ali suše (RDR_{dr} , d^{-1} ; Slika 30). Pri vplivih staranja je upoštevan največji:

$$RDR = RDR_n + \max(RDR_{tb}, RDR_{sh}, RDR_{dr}) \quad \dots (9)$$

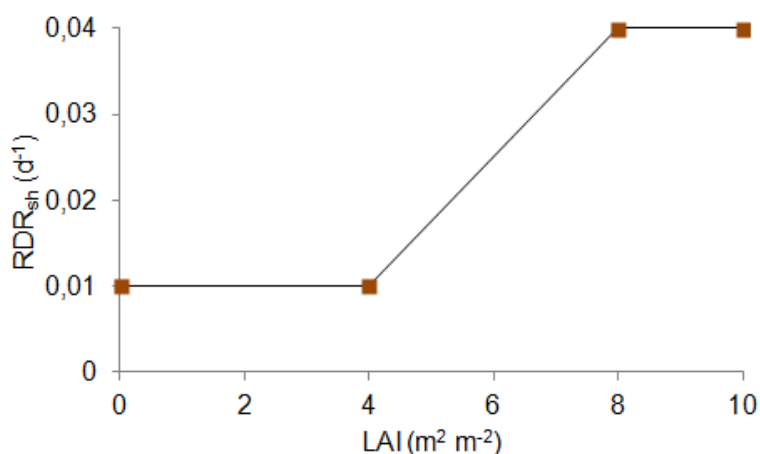


Slika 28: Relativna stopnja odmiranja listov zaradi staranja (RDR_{tb}) kot funkcija povprečne dnevne temperature zraka (T) (prirejeno po Bouman in sod., 1996)

Figure 28: Relative death rate of leaves due to senescence (RDR_{tb}) dependent on average daily air temperature (T) (based on Bouman et al., 1996)

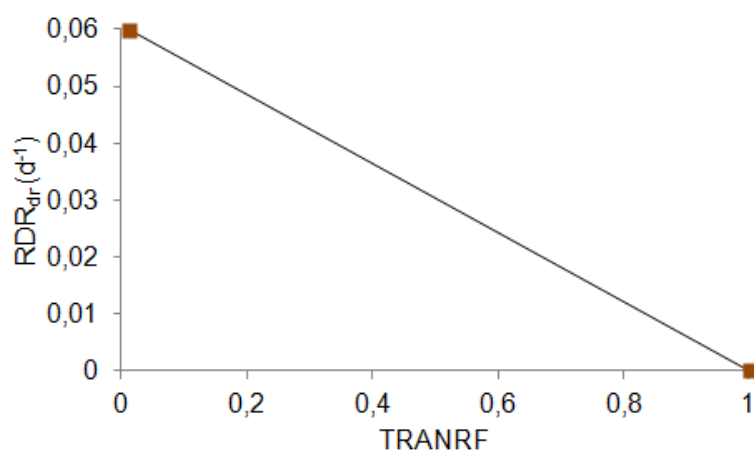
Relativna stopnja odmiranja zaradi samozasenčenja je funkcija LAI (Slika 29), z naraščajočim LAI postanejo nižje plasti rastline zasenčene. Majhna intenziteta sončnega obsevanja sproži premeščanje dušika iz zasenčenih listov v korenine, zato se zelo hitro postarajo.

Tudi pomanjkanje vode povzroča hitrejše staranje, verjetno zaradi hormonskih reakcij. V modelu je odvisno od $TRANRF$ (Slika 30). Odmiranje zaradi pomanjkanja dušika določimo kot produkt predhodno določene konstante RDR_{ns} in $(1-NNI)$. NNI je indeks stresa zaradi pomanjkanja dušika, opisan v nadaljevanju (poglavje 3.4.1.6).



Slika 29: Relativna stopnja odmiranja listov zaradi samozasenčenja (RDR_{sh}) kot funkcija indeksa listne površine (LAI) (prirejeno po Bouman in sod., 1996).

Figure 29: Relative death rate of leaves due to shading (RDR_{sh}) dependent on leaf area index (LAI) (based on Bouman et al., 1996)



Slika 30: Relativna stopnja odmiranja listov zaradi sušnega stresa (RDR_{dr}) kot funkcija faktorja zmanjšanja rasti zaradi suše ($TRANRF$) (prirejeno po Bouman in sod., 1996).

Figure 30: Relative death rate of leaves due to drought stress (RDR_{dr}) dependent on transpiration reduction factor ($TRANRF$) (based on Bouman et al., 1996)

Na enak način kot stopnja odmiranja listov se določa tudi zmanjševanje LAI ($DLAI$, d^{-1}), le da je navzdol omejeno s spodnjo mejo $CLAI$ (med 0,2 in 0,8 $ha\ ha^{-1}$), kar dovoljuje ponovno rast po, na primer, zelo sušnem obdobju. Sprememba v listni površini ($RLAI$, d^{-1}) je enaka razliki med $GLAI$ in $DLAI$. Sledi izračun mase odmrlih listov ($WLVD$, $kg_{SS}\ ha^{-1}$).

3.4.1.5 Poganjki

Odmiranje poganjkov je prav tako kot staranje listov funkcija LAI . Ko se LAI povečuje, se delež brstov, iz katerih so nastali novi poganjki, zaradi samozasenčenja zmanjšuje, saj se pri tem precej zmanjša razmerje med rdečim in infrardečim obsevanjem, ki doseže nižje dele lista. Število poganjkov na kvadratni meter je veliko v zgodnji pomladi, nato se poleti

močno zmanjša in jeseni malenkost poveča. Celoten proces je občutljiv na sončno obsevanje, temperaturo zraka in stresne pogoje (pomanjkanje vode, dušika).

Povečanje števila poganjkov ($DTIL$; $m^{-2} d^{-1}$) je povezano s tvorbo novih listov $LEAFN$ (d^{-1}) in s številom poganjkov ($TILLER$; m^{-2}), pomnoženim z razliko med relativno stopnjo razraščanja (RTR) in odmiranja poganjkov (TDR):

$$DTIL = LEAFN \cdot TILLER \cdot (RTR - TDR). \quad \dots (10)$$

Pri tem je $LEAFN$ odvisen od temperature tal. RTR je določen iz deleža brstov, iz katerih so nastali novi poganjki. Ta delež je v povprečju 0,69; takoj po košnji pa se zmanjša na 0,335. RTR je tako v prvem tednu po defoliaciji drugačen kot pozneje, v obeh primerih pa je odvisen od LAI z linearnim vplivom temperature tal, enakim kot pri RUE . Na odmiranje poganjkov vpliva poleg LAI še razvojna stopnja (DVS), pri čemer se učinka ne seštevata, temveč je upoštevana večja izmed izračunanih vrednosti TDR .

3.4.1.6 Bilanca dušika

LINGRA-N glede na predhodni model LINGRA dodatno simulira vpliv zaloge dušika (N) na rast travne ruše.

V vhodno datoteko MANAGG.dat vpišemo gnojenje z dušikom po datumih ($FERTAB$; $kg N ha^{-1} d^{-1}$). Vrednosti, pomnožene s faktorjem učinkovitosti sprejema dušika ($NRFTAB$; $kg kg^{-1}$), predstavljajo efektivno aplikacijo dušika ($FERTNS$; $kg N ha^{-1} d^{-1}$). Med parametri, ki smo jih umerjali, sta bili poleg $NRFTAB$ tudi največja dovoljena vsebnost dušika v listih ($NMXMLV$; $kg N kg_{ss}^{-1}$) in največja vsebnost dušika v koreninah kot delež $NMXMLV$ ($LRNR$). Celotni sprejem dušika v rastlino ($NUPTR$; $kg N ha^{-1} d^{-1}$) je izračunan kot:

$$NUPTR = \frac{\min(NDEMTO, NMINT \cdot NLIMIT)}{\Delta t}, \quad \dots (11)$$

kjer je $NDEMTO$ ($kg N ha^{-1}$) celotna zahteva rastline po dušiku, $NMINT$ ($kg N ha^{-1}$) skupna količina mineralnega dušika, neposredno dostopnega iz tal in gnojila, $NLIMIT$ faktor, ki omejuje sprejem dušika, tako da postane 0, ko se transpiracija ustavi, in Δt uporabljen časovni korak (v primeru modela LINGRA-N je to en dan). $NUPTR$ se nato razdeli na stopnjo sprejema v liste (RNU_{LV} ; $kg N ha^{-1} d^{-1}$) in korenine (RNU_{RT} ; $kg N ha^{-1} d^{-1}$).

Sprememba celotnega neposredno dostopnega mineralnega dušika v tleh ($RNMINT$, $kg N ha^{-1}$) je enaka

$$RNMINT = FERTNS - NUPTR - RNMINS, \quad \dots (12)$$

kjer je $FERTNS$ efektivna aplikacija dušika, $NUPTR$ kot v enačbi (11) in $RNMINS$ ($kg N ha^{-1} d^{-1}$) mineralizacija dušika v tleh (ima negativno vrednost), izračunana kot $RNMINS = NMINS \cdot RTMINS$. Tu je $NMINS$ ($kg N ha^{-1}$) začetna količina potencialno

dostopnega organskega N v tleh in $RTMINS$ (d^{-1}) delež organskega dušika v tleh, ki na dan postane dostopen rastlini.

Spremembi količine dušika v listih ali koreninah (RN_{LV} oz. RN_{RT}) določimo kot razliko med stopnjo sprejema dušika RNU_{LV} oz. RNU_{RT} ter izgubo dušika zaradi staranja. To določamo kot produkt preostalih koncentracij dušika v listih ali koreninah in pripadajočih stopenj odmiranja. Pri listih se upošteva še izguba dušika ob košnji.

Indeks preskrbljenosti z dušikom NNI predstavlja stres (glede na optimalno preskrbljenost) zaradi pomanjkanja dušika v rastlini:

$$NNI = \frac{NFGMR - NRMR}{NOPTMR - NRMR}, \quad \dots (13)$$

kjer je $NFGMR$ ($kg\ N\ kg^{-1}_{ss}$) dejanska koncentracija dušika v zelinju, $NRMR$ ($kg\ N\ kg^{-1}_{ss}$) preostala koncentracija dušika v listih in $NOPTMR$ ($kg\ N\ kg^{-1}_{ss}$) optimalna koncentracija dušika v listih. V neoptimalnih razmerah pada vrednost NNI od 1 proti 0, kar vpliva na stopnjo rasti travne ruše, odmiranje listov, specifično listno površino in s tem na razraščanje listov ter na stopnjo tvorbe poganjkov.

3.4.1.7 Pridelek

Za izračun pridelka suhega zelinja ($GRASS$, $kg_{ss}\ ha^{-1}$) moramo najprej določiti suho maso za košnjo primernega zelinja $HRVBL$ ($kg_{ss}\ ha^{-1}$). Ta je enaka masi zelinja na polju ($WLVG$ kot pri razlagi pri enačbi (8)), od katere odštejemo maso zelinja, ki po košnji ostane na polju (pri košnji mora LAI ostati pri predhodno določeni vrednosti $CLAI$):

$$HRVBL = WLVG - \frac{CLAI}{SLA}, \quad \dots (14)$$

kjer je $CLAI$ ($m^2\ m^{-2}$) indeks listne površine po košnji in SLA kot v enačbi (7). $GRASS$ se pri vsaki košnji poveča za vrednost $HRVBL$ na dan košnje. Potencialni pridelek ($YIELD$, $kg_{ss}\ ha^{-1}$) je skupna suha masa pokošenega in za košnjo primernega zelinja ter ga določimo kot

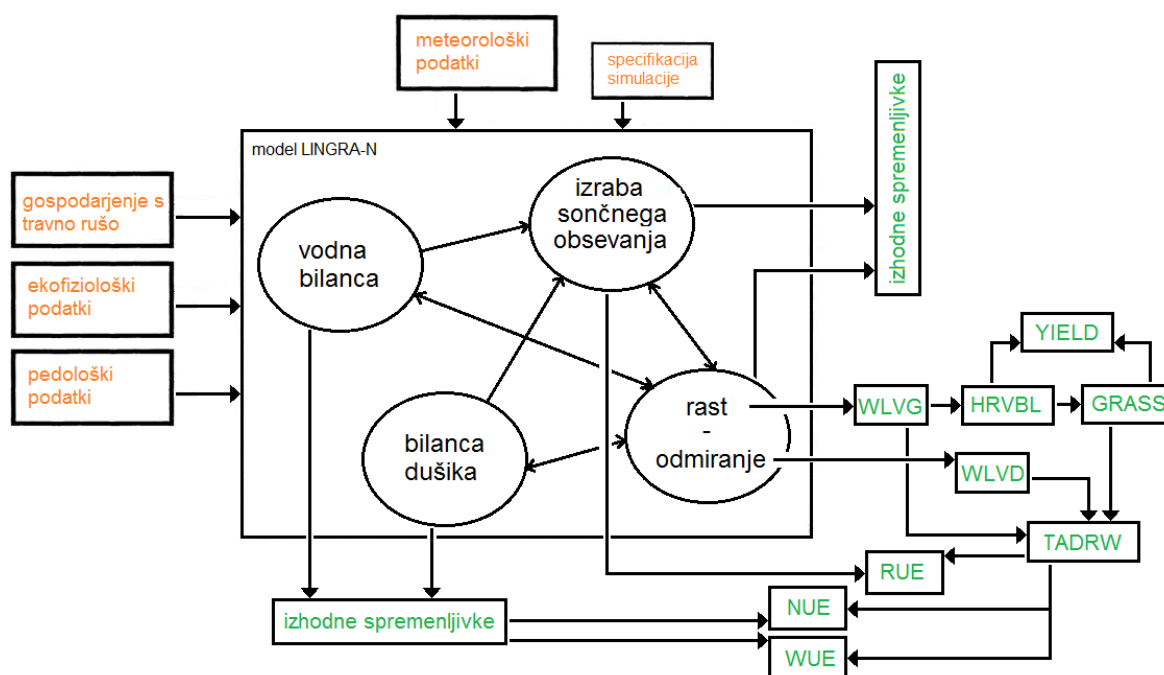
$$YIELD = GRASS + HRVBL. \quad \dots (15)$$

Za določanje učinkovitosti rastline potrebujemo še spremenljivko $TADRW$ ($kg_{ss}\ ha^{-1}$). Izračunana je kot

$$TADRW = GRASS + WLVG + WLVD \quad \dots (16)$$

in predstavlja pridelek suhega zelinja skupaj s suho maso zelinja na polju in odmrlega zelinja. Pri tem je $WLVG$ kot v razlagi pri enačbi (8) in $WLVD$ masa odmrlega zelinja ($kg_{ss}\ ha^{-1}$).

Letna učinkovitost izrabe sončnega obsevanja RUE ($g_{SS} MJ^{-1}_{PAR}$) je določena kot razmerje med $TADRW$ in celotnim prestreženim sončnim obsevanjem. Podobno je letna učinkovitost izrabe vode WUE ($g_{SS} kg^{-1}_{vode}$) določena kot razmerje med $TADRW$ in celotno količino porabljene vode za evapotranspiracijo, letna učinkovitost izrabe dušika NUE ($g_{SS} kg^{-1}_N$) pa kot razmerje med $TADRW$ in dušikom, privzetim v zeleni, odmrli in pokošeni nadzemni biomasi. Povezave so prikazane na poenostavljeni shemi (Slika 31).



Slika 31: Poenostavljena shema delovanja modela LINGRA-N: vhodni podatki (oranžno), glavni deli simulacij (črno), izhodni podatki in nekaj povezav med njimi (zeleno). Razlaga kratic: poglavje 3.4.1.7 in Preglednica 16.

Figure 31: A simplified scheme of LINGRA-N model: input data (orange), main parts of simulations (black), output data with some connections (green). Abbreviations explanation: chapter 3.4.1.7 and Table 16.

3.4.2 Izhodni podatki

Vsak zagon modela da dvoje vrst rezultatov. Datoteka 'RUNNAME'PTS.out vsebuje dnevni izpis (sami lahko določimo, za vsakih koliko dni se rezultati izpisujejo) izhodnih spremenljivk za vsako simulirano leto (Preglednica 16).

Druga datoteka 'RUNNAME'.sta vsebuje letne vsote ali povprečja (odvisno od lastnosti spremenljivke) za večino dnevnih spremenljivk (izjeme so v preglednici označene sivo) ter povprečja, standardne odklone in koeficiente variacije za celotno obdobje. Dodatno so izračunane še letne vrednosti učinkovitosti izrabe dušika (NUE , $g_{SS} kg^{-1}_N$), sončnega obsevanja (RUE , $g_{SS} MJ^{-1}_{PAR}$) in vode (WUE , $g_{SS} kg^{-1}_{vode}$), ki na dnevni skali nimajo pomena.

Preglednica 16: Letne in dnevne izhodne spremenljivke modela LINGRA-N

Table 16: Output variables of LINGRA-N for each simulated year and day

Spremenljivka	Enota	Opis
vodna bilanca		
DRAIN	mm	kumulativno pronicanje v podtalje
ESOIL	mm	kumulativna evaporacija iz tal
IRR	mm	kumulativna količina namakalne vode
RAIN	mm	kumulativna količina padavin
RUNOF	mm	kumulativni površinski odtok
SMACT	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	volumska vsebnost vode v koreninskem območju
WAVT	mm	količina dostopne vode v koreninskem območju
WTOT	mm	količina vode v koreninskem območju
TRANS	mm	kumulativna transpiracija rastline
bilanca dušika v rastlini		
NLIV	kg N ha^{-1}	količina dušika v zelenih listih
NLOSS	kg N ha^{-1}	skupna izguba dušika iz odmrlih delov rastlin in pokošene trave
NMIN	kg N ha^{-1}	količina organskega dušika, potencialno dostopnega iz tal z mineralizacijo
NMINT	kg N ha^{-1}	skupna količina mineralnega dušika, neposredno dostopnega iz tal in gnojila
NNI	/	indeks preskrbljenosti z dušikom (med 0 in 1)
NUPT	kg N ha^{-1}	skupni sprejem dušika iz tal v rastlino
rastlina		
DVS	/	razvojna stopnja
LAI	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	indeks listne površine
PAR	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	dnevna količina fotosintetsko aktivnega sevanja
PARAB	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	dnevna količina fotosintetsko aktivnega sevanja, ki ga rastlinska odeja prestreže
TILLER	m^{-2}	število poganjkov
TRANRF	/	faktor zmanjšanja rasti zaradi suše (med 0 in 1)
TSUML	$^{\circ}\text{C}$	termalni čas
WLVD	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ha}^{-1}$	suha masa odmrlih listov
WLVG	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ha}^{-1}$	suha masa zelinja na polju
WRE	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ha}^{-1}$	suha masa založnih organov
WRT	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ha}^{-1}$	suha masa korenin
TADRW	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ha}^{-1}$	pridelek suhega zelinja ter skupna suha masa zelinja na polju in odmrlega zelinja
GRASS	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ha}^{-1}$	pridelek suhega zelinja (pridelek vseh košenj)
YIELD	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ha}^{-1}$	pridelek suhega zelinja in ostanek pridelka po zadnji košnji

3.5 UMERJANJE IN PREVERJANJE MODELA

Naš glavni cilj je bil raziskati sposobnost modela LINGRA-N, da zajame medletno variabilnost pridelka travne ruše na različnih lokacijah v Sloveniji z različnimi podnebnimi značilnostmi in lastnostmi tal. Na začetku smo izvedli enostavno analizo občutljivosti (brez vpliva interakcije med parametri) in okvirno določili vplivne parametre (vsi so zbrani v preglednici 17). Preostale smo izločili iz umerjanja ter jim določili privzete vrednosti iz osnovnega modela LINGRA-N (rezultati – poglavje 4.2.1). Nize podatkov o pridelku travne ruše smo razdelili na dva dela: liha leta smo uporabili za umerjanje in soda leta za preverjanje. Umeritveni postopek je za posamezen primer skupaj obsegal 12 korakov.

Preglednica 17: Koraki (1.–4.) postopnega umerjanja parametrov modela. Kratice so razložene v preglednicah 9–12.

Table 17: Steps (1–4) of model calibration procedure. Names are explained in tables 9–12.

1.	2.	3.	4.
SOITMI	RUNFR	SLA	TDWI
NMINS	NRFTAB	LAICR	KDIF
MNDAT	CLAI	RDMCR	RDRL
DTSMTB	TSUM1	RDI	WREI
RUETB	TMNFTB	LRNR	FRNX
TMPFTB	RDDTB	RNFLV	NMXLV
TILLI	FRTB		
	TMBAS1		

Preglednica 18: Nadaljnji koraki (5.–12.) postopnega umerjanja parametrov modela, zadnja dva koraka sta specifična za J-DG. Kratice so razložene v preglednicah 9–12.

Table 18: Further steps (5–12) of model calibration procedure, the last two steps are specific for J-DG. Names are explained in tables 9–12.

5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
SOITMI	NMINS	MNDAT	DTSMTB	RUETB	TMPFTB	SOITMI	TMBAS1
RUNFR	NRFTAB	CLAI	TSUM1	TMNFTB	TILLI	RUNFR	LAICR
SLA	LAICR	RDMCR	LRNR	RNFLV	RDDTB	NMINS	WREI
TDWI	WREI	RDI	KDIF	RDRL	NMXLV	NRFTAB	FRTB
TMBAS1	FRTB			FRNX		CLAI	TSUM1
						RUETB	TMNFTB
						TILLI	TMPFTB
							RDDTB

Pri umerjanju smo uporabili metodo zmanjševanja korena povprečne kvadratne napake (angl. minimization of *RMSE*, npr. Jegu in sod., 2013) simuliranih vrednosti pridelka suhega zelinja travne ruše glede na izmerjene. Pripravili smo programski vmesnik v Pythonu (skriptni programski splošno-namenski jezik, s katerim lahko opravimo zahtevne obdelave podatkov), ki je poganjal model in iskal kombinacijo parametrov z najmanjšo *RMSE*: najprej v štirih skupinah parametrov (Preglednica 17), ki jih je simultano spreminjal (okoli 40.000 ponovitev za vsako skupino), nato v šestih skupinah (parametre

smo spreminjali z manjšim korakom; Preglednica 18, 5.–10. korak) in nazadnje še v dveh skupinah (Preglednica 18, 11. in 12. korak) glede na prejšnje rezultate. Prvih 10 korakov je splošnih in so v vseh primerih enaki. Zadnja dva se glede na rezultate prvih 10 za vsak primer nekoliko razlikujeta.

Za ocenjevanje kakovosti modelskih simulacij se pogosto uporablja Pearsonov koeficient korelacije (r) in njegov kvadrat, koeficient determinacije (r^2). Tako omenjena dva kot tudi testi statistične značilnosti v splošnem so pogosto neprimerni ali zavajajoči, ko jih uporabimo za primerjavo modelskih napovedi in izmerjenih vrednosti. Primernejšo in vsebinsko polnejšo informacijo nam nudijo mere razlike (Willmott, 1982). Zato smo se odločili, da za preverjanje modela uporabimo $RMSE$ (npr. Willmott, 1982; Jegu in sod., 2013):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}, \quad RMSE_{\%} = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100, \quad \dots (17)$$

kjer je n število meritev, O_i izmerjena vrednost, $\bar{O}$ povprečje izmerjenih vrednosti in P_i simulirana vrednost. Rezultati so odlični, če je $RMSE_{\%} \leq 10 \%$, dobri, če je $10 \% \leq RMSE_{\%} < 20 \%$, zadovoljivi, če je $20 \% \leq RMSE_{\%} < 30 \%$ in slabi, če je $RMSE_{\%} > 30 \%$ (Jamieson in sod., 1991, cit. po Jegu in sod., 2013). Willmott (1982) nadalje svetuje, da določimo sistematični ($RMSE_{\%s}$) in nesistematični ($RMSE_{\%u}$) del kvadratnega korena napake:

$$RMSE_{\%s} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{P}_i - O_i)^2} / RMSE, \quad \dots (18)$$

$$RMSE_{\%u} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2} / RMSE. \quad \dots (19)$$

Pri tem je $\hat{P}_i$ izračunan po enačbi premice $\hat{P}_i = a + bO_i$, določene z regresijo po metodi najmanjših kvadratov (a je presečišče in b je naklon).

Za oceno kakovosti modela smo razliko med simuliranimi in izmerjenimi vrednostmi suhe snovi pridelka travne ruše izračunali z Willmottovim kazalcem ujemanja d_w (Willmott, 1982):

$$d_w = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2}, \quad \dots (20)$$

kjer so n , P_i in O_i definirani enako kot v enačbi 17. P_i' in O_i' pa izračunamo kot $P_i - \bar{O}$ in $O_i - \bar{O}$. Kazalec ujemanja je opisna statistika, ki jo lahko uporabljamo v večini primerov in je posebej namenjena medsebojni primerjavi modelov (Willmott, 1982). Razpon kazalca je od 0 do 1, kjer 1 pomeni popolno ujemanje.

3.6 SIMULACIJE RASTI IN PRIDELKA TRAVNE RUŠE

Umerjeni model LINGRA-N smo najprej uporabili za simulacijo pridelka in analizo rasti v 50-letnem obdobju 1964–2013. Na ta način smo določili odvisnost pridelka od različnih vremenskih razmer, pri čemer je pomembno tudi, v katerem obdobju razvoja take razmere nastopijo. Uporabili smo kombinacije lokacij in travnih monokultur, ki so se pri umerjanju dobro obnesle in smo model nanje lahko dovolj dobro umerili.

Na podlagi skandinavskih raziskav (Thorsen in Höglind, 2010; Höglind in sod., 2013; Rapacz in sod., 2014) smo se odločili, da opustimo analizo vpliva snega in zimskih razmer na rast travne ruše v Sloveniji. Interakcije med različnimi okoljskimi dejavniki so preveč kompleksne in imajo precej večji pomen pri višjih geografskih širinah. Na primer, povečale so se pogostost, stopnja in dolžina ekstremnih zimskih otoplitev, ki vodijo do taljenja snega, kar prinese tveganje anoksije, ujetosti v led in zmrzovanja (Rapacz in sod., 2014). Po naših predhodnih izračunih v Sloveniji neposrednih povezav med količino snega ali trajanjem snežne odeje in pridelkom travne ruše nismo zaznali. Ker model ne vključuje modula za sneg, je dovolj dober približek, da začnemo rastno dobo z vsebnostjo vode v tleh pri poljski kapaciteti.

Poleg pridelka suhega zelinja travne ruše (*GRASS*) in potencialnega pridelka (*YIELD*) v povezavi z vhodnimi meteorološkimi spremenljivkami smo na letni skali opazovali redukcijski faktor zmanjšanja rasti zaradi suše (*TRANRF*) ter učinkovitost izrabe sončnega obsevanja (*RUE*) in dušika (*NUE*). Za pregled stanja preskrbljenosti z vodo smo si ogledali dnevne vrednosti *YIELD* in volumnske vsebnosti vode v koreninskem območju (*SMACT*) v suhem in povprečnem letu (to je po pridelku zelinja blizu dolgoletnega povprečja). Na enak način smo primerjali maso odmrlih listov (*WLVD*) in maso korenin (*WRT*). Nadalje smo v teh letih primerjali dnevno naraščanje količine kumulativnega fotosintetsko aktivnega sevanja (*PAR*) in prestrežene količine le-tega (*PARAB*), tudi v povezavi s spreminjanjem indeksa listne površine (*LAI*).

Pri analizi meteoroloških in modeliranih spremenljivk smo si pomagali z osnovnimi statistikami (Košmelj, 2007) in z analizo časovnih vrst. Časovna vrsta je časovno urejeno zaporedje številčnih podatkov, ki izražajo vrednost neke spremenljivke. Podatki se navadno izmerijo v enakih časovnih intervalih, npr. vsak mesec, vsako četrtoletje, vsako leto (Golmajer, 2013). Z analizo časovnih vrst dobimo boljši pregled, kaj se v danem časovnem obdobju s spremenljivko dogaja. Tako lažje razložimo nihanja, pokažejo se tudi osamelci. To so vrednosti, ki v časovni vrsti še posebej izstopajo, za vsakega pa želimo pojasniti,

zakaj se je pojavil. Pri tem si pomagamo z drugimi spremenljivkami in ozadjem, če ga poznamo. Če povzamemo po Golmajer (2013), lahko z razčlenitvijo časovno vrsto razdelimo na komponente, ki so prav tako časovne vrste: trend, sezonska in naključna komponenta. Pristop je zelo koristen, če v nihanjih prevladujeta trend in sezona. Trend lahko nekoliko poenostavljeno definiramo kot dolgoročno gibanje povprečja časovne vrste oz. smer razvoja časovne vrste. Sezonska komponenta vključuje naravne vplive, kot je, na primer, spreminjanje letnih časov. Njena perioda je eno leto. Iz leta v leto se lahko počasi spreminja, njeni vplivi pa se znotraj enega leta približno izničijo. Naključna komponenta je sestavljena iz nihanj, ki ne spadajo niti v trend niti v sezonsko komponento, in je pomembna pri oceni veljavnosti modela. Uporabili smo funkcijo *decompose* v programskem okolju R. Ta v privzeti različici razčleni časovno vrsto na komponente na podlagi simetričnih drsečih sredin. Pri aditivni sezonski komponenti se z drsečimi sredinami ocenjena povprečja odštejejo od osnovne časovne vrste. Na razlikah je izračunana ocena sezonske komponente kot povprečje vseh vrednosti pri istem indeksu periode. Te vrednosti so na koncu še prilagojene, da se seštejejo v nič. Slučajno komponento dobimo kot razliko med osnovno časovno vrsto ter vsoto trenda in sezonske komponente.

V zadnjem delu smo z dvigom temperature zraka za 1, 2 in 3 °C predstavili primer simulacije vpliva podnebnih sprememb na variabilnost in količino pridelka travne ruše. Pri tem smo upoštevali tudi spremenjeno koncentracijo CO₂, uporabili smo začetno vrednost 360 ppm (pri +1 °C), srednjo 540 ppm (pri +2 °C) in podvojeno 720 ppm (pri +3 °C). Za primerjavo smo simulacije naredili še ob nespremenjeni koncentraciji CO₂ (360 ppm) (pri +1, +2 in +3 °C). Tudi Schleip in sod. (2009) so se pri svoji raziskavi osredotočili na temperaturne spremembe brez drugih podnebnih sprememb, saj so biološki učinki temperature na večino rastlinskih vrst precej boljše razumljeni. Poleg tega so trenutno napovedi sprememb padavin tako negotove, da nam modeliranje takih scenarijev ne bi prineslo dodane vrednosti, saj bi bila stopnja negotovosti prevelika. Ne le, da so spremembe količine padavin negotove, pri čemer za pomlad in jesen težko napovemo ali se bo količina povečala ali zmanjšala, spreminja se tudi intenziteta padavin, tega pa v model ne moremo vključiti. Predvsem gre za spremembe poleti, ko je vodna bilanca izrednega pomena za rast travne ruše. Velik delež poletnih padavin se namreč pojavlja v obliki ploh in neviht, ki so lokalnega značaja. Naša izbira ustreza tudi zadnjim scenarijem podnebnih sprememb, ki so jih pripravili na ARSO (poglavje 2.9). Upoštevati moramo še dejstvo, da se ob pomanjkanju padavin v izrednih razmerah še vedno lahko zatečemo k namakanju, na spremenjeno stanje zaradi višjih temperatur zraka pa nimamo nobenega vpliva.

4 REZULTATI Z DISKUSIJO

Na začetku predstavljamo kratko analizo fenoloških podatkov kot prikaz že opaženih sprememb v okolju, ki so posledica podnebnih sprememb. Sledijo rezultati osrednjega dela raziskave, umerjanja modela LINGRA-N z uporabo podatkov različnih poskusov na trajnem travinju in travnih monokulturah. V nadaljevanju so predstavljeni modelski rezultati uporabe umerjenega modela LINGRA-N za štiri primere: navadno pasjo travo, trpežno ljuljko in travniški mačji rep v Jabljah ter za trpežno ljuljko v Rakičanu. Pri tem so obravnavane modelske spremenljivke predstavljene na letni, nekatere pa nadalje na dnevni ravni za povprečno leto 2005 in sušno leto 2003. Poglavje zaključujemo s primerom uporabe umerjenega modela LINGRA-N za simulacijo vpliva povišanih temperatur zraka na pridelek travne ruše. Rezultati so bili v manjši meri predstavljeni v Pogačar in sod. (2015) ter Pogačar in Kajfež-Bogataj (2015).

Pri rezultatih umerjanja in pri modelskih rezultatih velikokrat omenjamo pridelek suhega zelinja obravnavane travne ruše (trajnega travinja ali travne monokulture), ki je v modelu LINGRA-N označen kot *GRASS*. Povsod smo poenoteno uporabili krajši izraz pridelek. Pogosto omenjamo še potencialni pridelek (*YIELD*), ki je večji od pridelka, saj poleg dejansko pokošene trave obsega še preostanek pridelka po zadnji košnji.

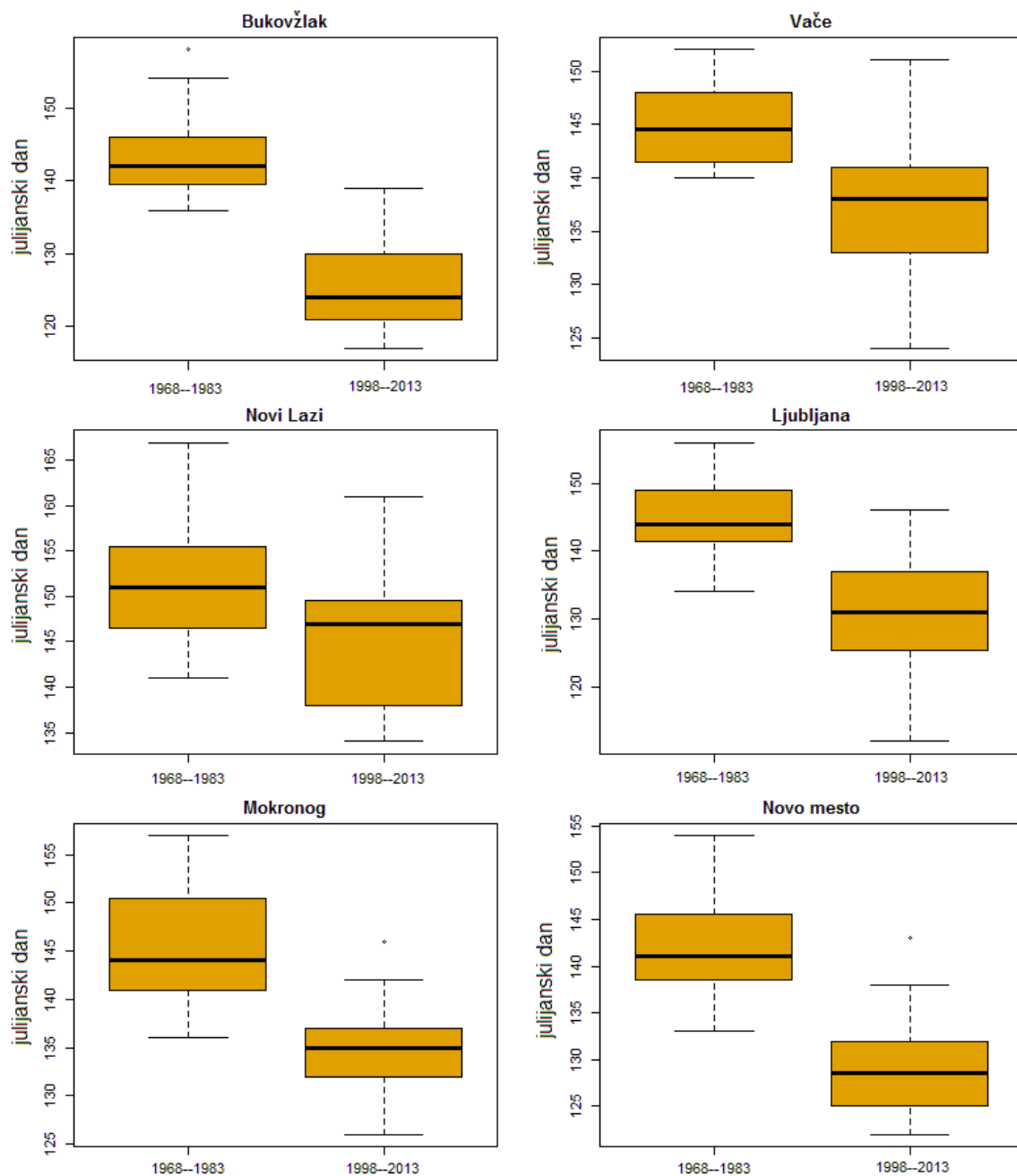
4.1 REZULTATI ANALIZE FENOLOŠKIH PODATKOV

4.1.1 Primerjava začetka cvetenja v dveh obdobjih

Obravnavna fenološke faze začetka cvetenja navadne pasje trave na 12 fenoloških postajah po Sloveniji je že v osnovni primerjavi obeh obdobj (1968–1983 in 1998–2013) pokazala izredno velike razlike (Slika 32, Slika 33). V prvem obdobju samo v Ratečah porazdelitev ne ustreza normalni, v drugem obdobju pa to velja za Novo mesto, Postojno in Starše.

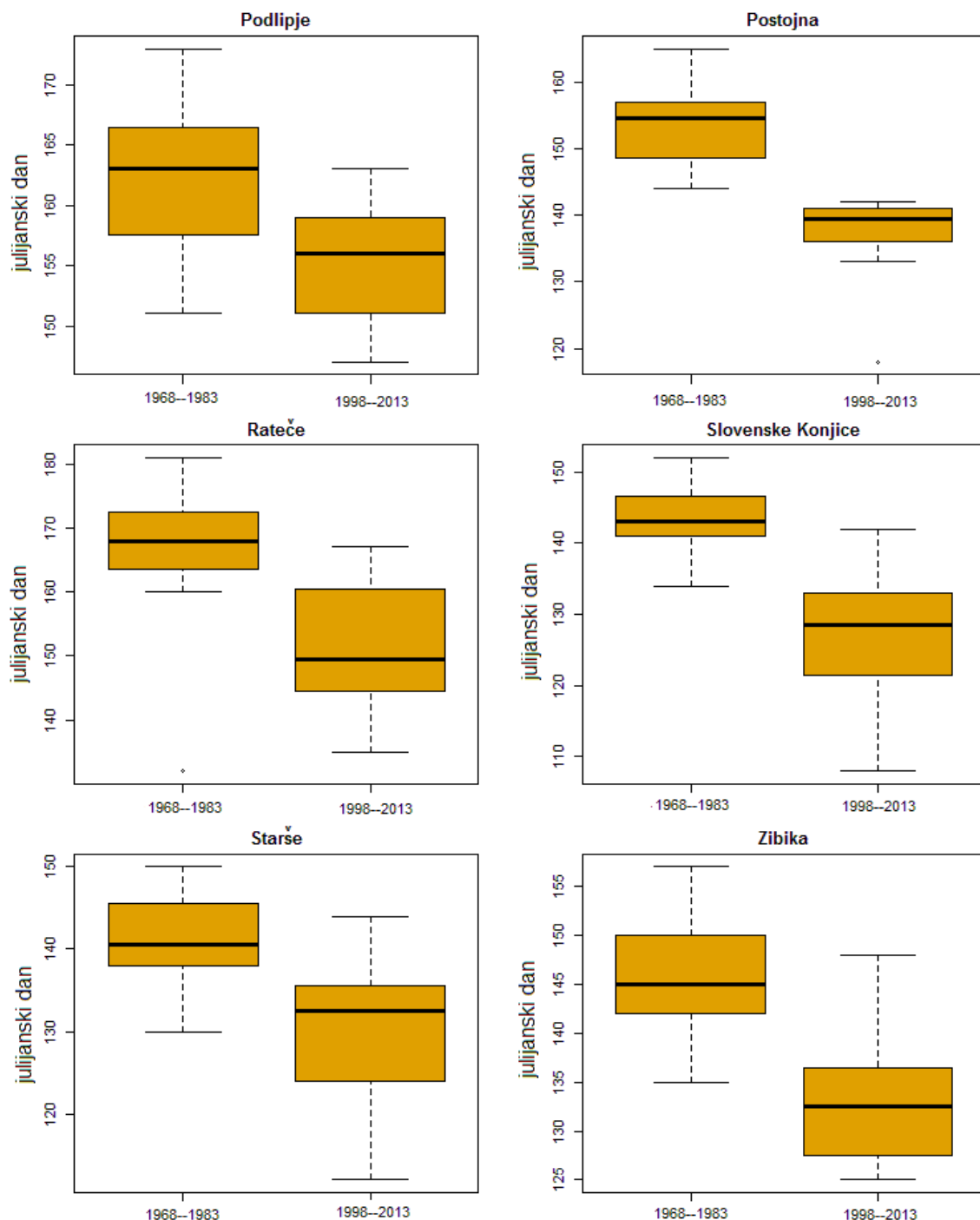
Analiza varianc je pokazala, da sta varianci za obe obdobji enaki na vseh lokacijah razen v Vačah, Slovenskih Konjicah in Staršah, za katere lahko tudi pri okvirih z ročaji vidimo, da se je variabilnost v drugem obdobju močno povečala.

Predstavljamo povprečne dneve nastopa cvetenja in standarne odklone (Preglednica 19). Na vseh fenoloških postajah se povprečji prvega in drugega obdobja med seboj statistično značilno razlikujeta pri stopnji tveganja 0,01.



Slika 32: Okviri z ročaji za začetek cvetenja navadne pasje trave v dveh obdobjih (1968–1983 in 1998–2013) za 6 fenoloških postaj: Bukovžlak, Vače, Novi Lazi, Ljubljana, Mokronog, Novo mesto

Figure 32: Boxplots of the beginning of flowering of cock's foot for two periods (1968–1983 and 1998–2013) for 6 phenological stations in Slovenia: Bukovžlak, Vače, Novi Lazi, Ljubljana, Mokronog, Novo mesto



Slika 33: Okviri z ročaji za začetek cvetenja navadne pasje trave v dveh obdobjih (1968–1983 in 1998–2013) za 6 fenoloških postaj: Podlipje, Postojna, Rateče, Slovenske Konjice, Starše, Zibika

Figure 33: Boxplots of the beginning of flowering of cock's foot for two periods (1968–1983 and 1998–2013) for 6 phenological stations in Slovenia: Podlipje, Postojna, Rateče, Slovenske Konjice, Starše, Zibika

Črepinškova (2002) je za obdobje 1955–1984 izračunala trende za dan nastopa cvetenja navadne pasje trave, statistično značilen negativni trend je bil le v Mariboru. Naše ugotovitve pa kažejo, da nastopi cvetenje v drugem obdobju na vseh obravnavanih

lokacijah za 7 do 18 dni zgodneje kot v prvem obdobju (Preglednica 19). Največja je razlika v Bukovžlaku, Postojni, Ratečah in Slovenskih Konjicah. V prvem obdobju je navadna pasja trava zacvetela v povprečju med 21. in 26. majem, na hladnejših lokacijah pa nekoliko kasneje: v Novih Lazih in Postojni v začetku junija, v Podlipju 11. junija in v Ratečah 15. junija. V drugem obdobju pa je na večini lokacij v povprečju zacvetela med 5. in 16. majem, v Novih Lazih 24. maja, v Podlipju in Ratečah pa ob koncu maja oz. na začetku junija. Fenološke spremembe dobro kažejo spremembe našega podnebja, zato smo ob tako velikih premikih med obdobjema z zamikom 30 let lahko zaskrbljeni.

Preglednica 19: Povprečni dan nastopa cvetenja navadne pasje trave ($\bar{d}$) in pripadajoč standardni odklon (σ) v prvem (1968–1983) in drugem obdobju (1998–2013) ter razlika med povprečjema za 12 obravnavanih fenoloških postaj

Table 19: Average day of the beginning of flowering of cock's foot ($\bar{d}$) and its standard deviation (σ) in the first (1968–1983) and second (1998–2013) period, and the difference between the averages for 12 studied phenological stations

Fenološka postaja	$\bar{d}_{1968-1983}$	$\sigma_{1968-1983}$ (dni)	$\bar{d}_{1998-2013}$	$\sigma_{1998-2013}$ (dni)	Dni zgodneje
Bukovžlak	24. 5.	6	5. 5.	7	18
Vače	25. 5.	4	16. 5.	8	8
Novi Lazi	1. 6.	7	24. 5.	8	7
Ljubljana–Bežigrad	25. 5.	6	10. 5.	9	14
Mokronog	26. 5.	6	14. 5.	5	11
Novo mesto	22. 5.	6	9. 5.	6	12
Podlipje	11. 6.	6	3. 6.	5	7
Postojna	3. 6.	6	16. 5.	6	16
Rateče	15. 6.	11	31. 5.	10	15
Slovenske Konjice	23. 5.	5	6. 5.	9	16
Starše	21. 5.	5	9. 5.	9	11
Zibika	26. 5.	6	12. 5.	6	13

4.1.2 Povezave nastopa cvetenja in temperaturnih razmer

Preverili smo, kako so datumi nastopa cvetenja povezani s povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka predhodnih mesecev. V preglednici 20 smo prikazali koeficiente korelacije, ki so statistično značilni pri stopnji značilnosti 0,05.

V prvem obdobju je nastop cvetenja skoraj na vseh postajah močno povezan s povprečnimi aprilskimi (6 postaj) in majskimi (5 postaj) temperaturami zraka, z dvomesečnima povprečjema marec–april (4 postaje) in april–maj (vseh 8 postaj) ter s trimesečnima povprečjema februar–marec–april (3 postaje, manjša korelacija) in marec–april–maj (6 postaj). Največ postaj ima največjo korelacijo s trimesečnim povprečjem temperatur zraka od marca do maja. Ti koeficienti korelacije so veliki, med 0,68 in 0,82.

Preglednica 20: Korelacije dneva nastopa cvetenja s povprečnimi temperaturami zraka za en mesec, dva ali tri od januarja do maja za 8 fenoloških postaj (v oklepaju sta navedeni pripadajoči meteorološki postaji, preostale so istoimenske) za vsako obdobje posebej. Izpisani so le koeficienti korelacije, ki so statistično značilni pri stopnji značilnosti 0,05 (za vsako postajo je v vsakem obdobju oranžno obarvan največji).

Table 20: Correlations of day of flowering with average air temperatures for one, two or three months from January to May for 8 phenological stations (in brackets are corresponding meteorological stations where the names are not the same) for each period. Only statistically significant coefficients of correlation ($p = 0.05$) are given (the highest value for each station in each period is coloured).

Obdobje	Fenološka postaja	jan	feb	mar	apr	maj	jan-feb	feb-mar	mar-apr	apr-maj	jan-feb-mar	feb-mar-apr	mar-apr-maj
Prvo (1968– 1983)	Bukovžlak (Celje)					-0,82				-0,76			-0,64
	Novi Lazi (Kočevje)			-0,67					-0,62	-0,62		-0,58	-0,69
	Ljubljana			-0,66	-0,63				-0,57	-0,78		-0,52	-0,79
	Novo mesto			-0,66	-0,69				-0,59	-0,81			-0,82
	Postojna			-0,53	-0,72					-0,76			-0,57
	Rateče				-0,74					-0,59			
	Slo. Konjice			-0,58					-0,64	-0,57		-0,56	-0,68
	Starše			-0,52						-0,54			
Drugo (1998– 2013)	Bukovžlak (Celje)				-0,55								
	Novi Lazi (Kočevje)			-0,53					-0,53			-0,52	
	Ljubljana						-0,56				-0,56	-0,57	
	Novo mesto												
	Postojna		-0,50				-0,56	-0,50			-0,54	-0,59	
	Rateče							-0,52				-0,55	
	Slo. Konjice			-0,60					-0,61		-0,58	-0,54	-0,60
	Starše						-0,57		-0,57		-0,52	-0,65	-0,50

Drugačna pa je slika v drugem obdobju. Iz preglednice nazorno vidimo, da je statistično značilnih korelacij veliko manj kot v prvem obdobju. Poleg tega so razen v Staršah vsi koeficienti korelacije občutno manjši, največji za vsako postajo se gibljejo med 0,53 in 0,65. Nastop cvetenja na fenološki postaji Novo mesto v drugem obdobju ni statistično značilno povezan z nobenim obravnavanim povprečjem, na postaji Bukovžlak pa le s povprečno aprilsko temperaturo zraka. V drugem obdobju je tako največ značilnih korelacij z dvomesečnima povprečjema februar–marec in marec–april ter s trimesečnima povprečjema januar–februar–marec in februar–marec–april. Slednje povezave so tudi najtesnejše. V primerjavi s prvim obdobjem so največje korelacije v drugem obdobju s povprečnimi temperaturami zraka en mesec zgodnejše, kar je povezano z zgodnejšim nastopom cvetenja v drugem obdobju.

4.1.3 Vsote aktivnih temperatur zraka

Preverili smo, kolikšne povprečne vsote aktivnih temperatur zraka sovpadajo z začetkom cvetenja navadne pasje trave. V prvem obdobju so bile na vseh lokacijah povprečne vsote aktivnih temperatur večje kot v drugem, standardni odklon pa se je v drugem obdobju po pričakovanjih povečal (Preglednica 21).

Preglednica 21: Povprečna vsota aktivnih temperatur zraka ($\overline{T_{sum}}$) in pripadajoč standardni odklon (σ) v prvem (1968–1983) in drugem obdobju (1998–2013) za 8 fenoloških postaj (v oklepaju sta navedeni pripadajoči meteorološki postaji, preostale so istoimenske)

Table 21: Average active air temperature sum ($\overline{T_{sum}}$) and its standard deviation (σ) in the first (1968–1983) and second (1998–2013) period for 8 phenological stations (in brackets are corresponding meteorological stations where the names are not the same)

Fenološka postaja	$\overline{T_{sum1968-1983}}(^{\circ}\text{C})$	$\sigma_{1968-1983}(^{\circ}\text{C})$	$\overline{T_{sum1998-2013}}(^{\circ}\text{C})$	$\sigma_{1998-2013}(^{\circ}\text{C})$
Bukovžlak (Celje)	832,9	88,4	710,7	117,1
Novi Lazi (Kočevje)	875,6	68,3	832,4	98,1
Ljubljana	920,8	71,0	874,6	122,8
Novo mesto	846,7	75,1	828,2	126,4
Postojna	848,2	89,5	777,3	92,0
Rateče	758,8	29,4	698,1	111,1
Slovenske Konjice	883,6	88,0	777,1	94,5
Starše	856,9	116,2	814,7	114,4

Največja povprečna potrebna vsota za cvetenje je bila v prvem obdobju v Ljubljani (920,8 °C), najmanjša povprečna pa v Ratečah (758,8 °C), kjer je bil tudi standardni odklon izredno majhen (29,4 °C). Zelo velik je bil standardni odklon v Staršah (116,2 °C), primerljiv s tistimi v drugem obdobju. Ti so se gibal med 92,0 °C v Postojni in 126,4 °C v Novem mestu. V drugem obdobju je najmanjšo povprečno vsoto za cvetenje prav tako kot v prvem potrebovala navadna pasja trava v Ratečah, a še za 60,7 °C manjšo, največjo pa

spet v Ljubljani, 874,6 °C. Podobne rezultate (največja vsota v Ljubljani in najmanjša v Ratečah) je za večino rastlin dobila Črepinškova (2002), ki navaja, da je prostorska variabilnost manjša, če seštevamo najnižje dnevne temperature zraka namesto povprečnih.

Za prvo obdobje so v vseh letih vsote aktivnih temperatur do cvetenja v intervalu med 650 in 1100 °C, v drugem obdobju pa se interval poveča na 510 do 1110 °C. Povečana variabilnost je jasen znanilec podnebnih sprememb.

Glede na segrevanje ozračja, ki smo ga pri analizi najnižjih in najvišjih temperatur zraka opisali v poglavju 3.2.5, smo pričakovali, da bo v drugem obdobju navadna pasja trava cvetela prej, saj bo prej dosegla določeno vsoto aktivnih temperatur zraka. Izkazalo pa se je, da res cveti prej, a da v povprečju tudi potrebuje manjšo vsoto aktivnih temperatur. Tu se kaže pomen določanja temperatur praga, kadar želimo na ta način spremljati fenološki razvoj. Temperatura praga je namreč tista, pri kateri naj bi temperaturne vsote do določene fenološke faze ostale enake. Pri tem je pomembno tudi, od katerega datuma temperaturno vsoto računamo (to ni nujno 1. januar).

4.2 REZULTATI UMERJANJA MODELA LINGRA-N

4.2.1 Vplivnejši parametri

Pri modelu LINGRA-N smo z analizo občutljivosti izločili 11 najmanj vplivnih parametrov, ki ob spreminjanju v razponu 30 % privzete vrednosti nimajo vpliva na končne rezultate simulacij (Preglednica 22, levo). V modelu je tudi 10 parametrov, pri katerih vrednost pomeni izbiro ene izmed možnih različic simulacije ali pa jih po navodilih avtorja ne spreminjamo (Preglednica 22, desno). Preostalih 26 parametrov in datume košenj smo umerjali ločeno za vsak travniški poskus.

Preglednica 22: Levo: privzete vrednosti parametrov modela LINGRA-N, katerih vpliv je majhen in jih nismo umerjali. Desno: privzete vrednosti parametrov, katerim vrednosti določimo po navodilih avtorja modela. Kratice so opisane v poglavju 3.5 (Preglednica 9–Preglednica 12).

Table 22: Left: Default parameter values in LINGRA-N model that have little impact and were not calibrated. Right: Default parameter values that are defined according to author's instructions. Abbreviations are explained in chapter 3.5 (Table 9-Table 12).

Parameter in enota	Privzeta vrednost	Parameter in enota	Privzeta vrednost
RTMINS (d ⁻¹)	0,025	IMOPT	2
RDRSHM (d ⁻¹)	0,03	IDSL	0
RRI (cm d ⁻¹)	1,2	DVSI	0
RDRNS (-)	0,05	TBASE	0
NLUE (-)	1,1	DVSDLT	1
NSLA (-)	0,5	CFET	1
RNFRT (kg N kg ⁻¹ _{ss})	0,005	DEPNR	3,5
COTB (ppm; -)	glej preglednico 11	SMDRY (cm ³ cm ⁻³)	0,07
FRTRB (-; -)	glej preglednico 11	CRAICR (cm ³ cm ⁻³)	0,05
RDRLTB (°C; d ⁻¹)	glej preglednico 11	CFEV	2
KSUB (cm d ⁻¹)	30 (Jablje)/40 (Rakičan)		

V precej preprostejšem modelu LINGRA so Bouman in sod. (1996) z analizo občutljivosti za umerjanje izbrali le štiri parametre: najnižjo temperaturo zraka, ki omogoča fotosintezo (*TMPFTB1* in 2), temperaturo zraka, pri kateri je učinek fotosinteze največji (*TMPFTB3*), indeks listne površine po košnji (*CLAI*) in največjo učinkovitost izrabe sončnega obsevanja (*RUETB*).

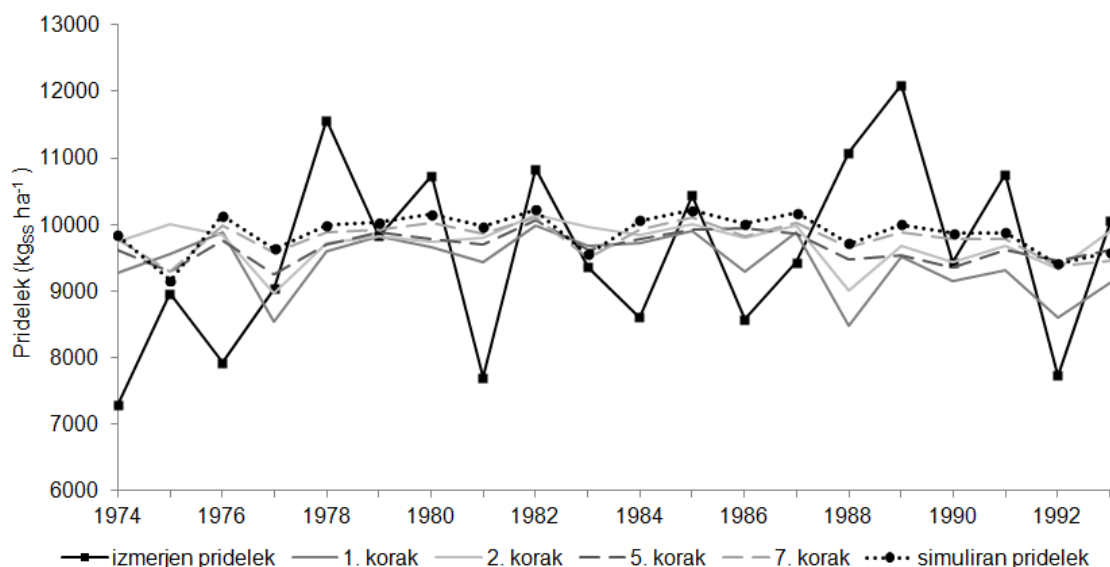
Pri naši raziskavi so se, na primer, pri poskusu S72 na trajnem travinju v Ljubljani za najvplivnejše poleg *CLAI* in *RUETB* izkazali začetno število poganjkov (*TILLI*), suha masa zaloga (*WREI*), temperatura praga za rast listov (*TMBAS1*), dostopen mineralni dušik ob začetku vegetacijskega obdobja (*NMINS*) in temperaturna vsota, ki ustreza eni razvojni stopnji (*TSUM1*). V Jabljah in Rakičanu je bilo najpomembnejših parametrov še nekaj več, v veliki večini so bili za različne poskuse to isti parametri. Poleg *CLAI*, *RUETB*, *TILLI*, *TMBAS1* in *NMINS* so to še: začetna temperatura tal (*SOITMI*), delež sprejema dušika glede na količino dodanega dušikovega gnojila (*NRFTAB*), datumi košnje (*MNDAT*), delež biomase, ki se razporedi v korenine brez vpliva sušnega stresa (*FRTB*), ter parametri vpliva temperature zraka na fotosintezo (*TMPFTB*, *TMNFTB*).

4.2.2 Poskusa S72 in S9

Umerjanje modela se je pri poskusih s trajnim travinjem izkazalo za precej neuspešno. Model je v osnovi namenjen modeliranju rasti in pridelka travne monokulture (Wolf, 2006, 2012), kar se je pokazalo tudi pri naših poskusih S72 in S9. Trajno travinje ima zaradi vrstne raznolikosti veliko sposobnost prilagajanja zunanjim vplivom, obenem pa občasno reagira tudi nepredvidljivo, predvsem ko gre za botanično sestavo, ki se z leti lahko spreminja (Verbič, 2014).

Pri umerjanju s podatki poskusa S72 smo lahko zadovoljivo dosegli le pridelovalni potencial travnika, medtem ko je simulacija medletne variabilnosti izredno slaba (Slika 34). Pri tem je 8 parametrov ostalo na privzetih vrednostih, 19 pa jih ima pripisane nove vrednosti (vrednosti vseh parametrov so zbrane v prilogi Č). Modela v taki obliki ne moremo uporabiti za simuliranje pridelka zelinja. Na ta način bi ga lahko uporabili le za splošne simulacije dolgoletne ravni pridelka travne ruše na več lokacijah po Sloveniji ali delu Evrope.

Pri poskusu S9 je Leskošek (1965) po petih letih izvajanja zapisal, da so razmere za rast trav slabe. Negnojena ruša je bila pravi pusti travnik brez kakovostnih trav. Že po petih letih gnojenja so mesto slabih trav zavzele metuljnice in deloma dobre trave, ki pa na tem rastišču niso našle ugodnih pogojev za uspevanje. Tako so bile nosilke velikih pridelkov skoraj samo metuljnice. To je poleg že omenjenih razlogov pri S72 še dodatno vplivalo na izredno slabo umerjanje modela s podatki poskusa S9. Za nadaljnjo uporabo te umeritve ne moremo uporabiti, zato rezultatov tu ne navajamo.



Slika 34: Letni pridelek suhega zelinja poskusa S72 na travniku v Ljubljani: izmerjene vrednosti pridelka, rezultat simulacije 1., 2., 5. in 7. koraka pri umerjanju modela in simulacija pridelka (GRASS) z umerjenim modelom

Figure 34: Annual herbage dry matter yield of multi-species grassland in the experiment S72 in Ljubljana: observed yield (izmerjen pridelek), 1st, 2nd, 5th and 7th step (korak) yield results of the calibration procedure, and model predicted yield (GRASS) at the end of calibration (simuliran pridelek)

4.2.3 Poskusi v Jabljah (J) in Rakičanu (R)

Uspešnejše je bilo umerjanje modela LINRA-N s podatki poskusov na travnih monokulturah: navadni pasji travi (DG), trpežni ljuljki (LP) in travniškem mačjem repu (PP). Ob zaključeni umeritvi za J-DG smo nove vrednosti pripisali 17 parametrom, 9 jih je ostalo nespremenjenih. Za J-LP je novih parametrov 22, za J-PP 18 in za R-LP 20 (Preglednica 23). Umerjeni so tudi datumi košnje. Vrednosti za R-PP, kjer je bila umeritev manj uspešna, navajamo v prilogi Č.

Vseh parametrov ne bomo komentirali, ker to presega obseg naše raziskave. Iz preglednice 23 lahko razberemo, da površinski odtok (*RUNFR*) upoštevamo v Jabljah za DG (8 %) in LP (4 %). Za začetek rasti smo potrebovali višje temperature tal, kot so bile privzete za razmere na Nizozemskem (5 °C). DG je potrebovala nekoliko manj (6 °C), LP in PP pa 8 do 9 °C. Kot smo že omenili, je Črepinškova (2002) za navadno pasjo travo za obdobje 1955–1984 izračunala temperaturni prag pri 5 do 7 °C. Ne gre za povsem ista parametra, sta pa primerljiva, kakor tudi rezultati. Temperaturno vsoto, ki ustreza eni razvojni stopnji (*TSUM1*), lahko primerjamo z našimi izračuni iz fenoloških podatkov za navadno pasjo travo, kjer je za Ljubljano povprečna vsota aktivnih temperatur zraka 875 °C. Umerjena vrednost v modelu je precej nižja, 750 °C. Za izredno pomemben parameter se je pokazal dostopni mineralni dušik ob začetku vegetacijskega obdobja (*NMINS*), ki mora biti za doseganje izmerjenih pridelkov precej visok, med 350 in 450 kg N ha⁻¹. Take vrednosti v Sloveniji niso realne, optimalna količina nitratnega dušika v tleh naj bi bila med 80 in 100 kg ha⁻¹.

Preglednica 23: Privzete vrednosti parametrov modela LINGRA-N, ki smo jih umerili za obdobje 1998–2013 (z manjkajočimi leti), in rezultati umeritve za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep (J-PP) v Jabljah ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP). Kratice so opisane v poglavju 3.5 (Preglednica 9–Preglednica 12).

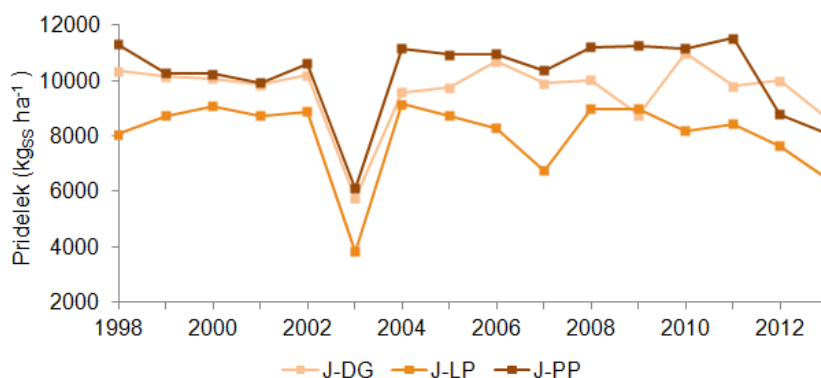
Table 23: Default parameter values in LINGRA-N model that were calibrated for the period 1998–2013 (with missing years), and results of the calibration for cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass (J-PP) in Jablje, and for perennial ryegrass in Rakičan (R-LP). Abbreviations are explained in chapter 3.5 (Table 9–Table 12).

Parameter in enota	Privzeta vrednost	Umerjena za J-DG	Umerjena za J-LP	Umerjena za J-PP	Umerjena za R-LP
RUNFR (-)	0	0,08	0,04	0	0
SOITMI (°C)	5	6	8	9	9
NRFTAB (kg kg⁻¹)	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9
NMINS (kg N ha⁻¹)	150	400	350	400	450
CLAI (ha ha⁻¹)	0,8	0,8	0,3	0,2	0,3
MNDAT (julijanski dan)	-	132; 182; 242; 290	141; 173; 228; 280	135; 187; 245; 294	125; 164; 225
TSUM1 (°C)	600	750	500	750	700
DTSMTB (°C)	3	5	2	2	5
TDWI (kg ha⁻¹)	300	200	300	200	300
SLA (ha kg⁻¹)	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0015
LAICR (-)	4	4,5	4,75	4	5
KDIF (-)	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
RUETB (g_{SS} MJ⁻¹_{PAR})	3	2,6	2,6	2,6	3,4
TMPFTB (°C)	3	5	1	1	1
TMNFTB (°C)	-1	-3	-3	-3	-1
RDDTB (°C)	10	9	9	10	11
FRTB (kg kg⁻¹)	0,165	0,2	0,2	0,135	0,165
RDRL (d⁻¹)	0,05	0,065	0,035	0,035	0,035
TILLI (m⁻²)	7000	7000	6000	6000	6000
WREI (kg ha⁻¹)	200	200	400	300	400
TMBAS1 (°C)	3	4	5	7	7
RDI (cm)	40	30	30	30	40
RDMCR (cm)	40	40	50	40	80
FRNX (-)	1	0,8	1	0,7	1
LRNR (-)	0,5	0,55	0,35	0,5	0,35
RNFLV (kg N kg⁻¹_{SS})	0,01	0,01	0,013	0,01	0,007
NMXLV (kg N kg⁻¹_{SS})	0,035	0,035	0,038	0,035	0,038

Nekateri parametri imajo po umeritvi enako vrednost na isti lokaciji (v Jabljah). To so specifična listna površina ($SLA = 0,0025 \text{ ha kg}^{-1}$), največja učinkovitost izrabe sončnega obsevanja ($RUETB = 2,6 \text{ g}_{SS} \text{ MJ}^{-1}_{PAR}$), faktor zmanjšanja RUE kot funkcija nizkih najnižjih temperatur zraka ($TMNFTB = -3 \text{ °C}$) in začetna globina korenin ($RDI = 30 \text{ cm}$).

Med seboj lahko primerjamo simulirane pridelke po umeritvi za vse tri vrste trav v Jabljah (Slika 35). Pri tem so meteorološki podatki in podatki o tleh in gospodarjenju s travno rušo

enaki. Razlikujejo se le parametri rastline, razen naštetih v prejšnjem odstavku. Medletna variabilnost zaradi vpliva vremena je podobna, v splošnem pa največje pridelke daje PP, nekoliko manjše DG in najmanjše LP. Razna odstopanja težko pojasnimo oziroma jih moramo pripisati tudi negotovosti naših simulacij. Za leto 2009 je, na primer, simulacija pridelka enaka za DG in LP, izmerjena pridelka pa se v tem letu razlikujeta za 3000 kg_{ss} ha⁻¹.



Slika 35: Z umerjenim modelom izračunani letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep (J-PP) v Jabljah za obdobje umerjanja 1998–2013

Figure 35: Model predicted annual herbage dry matter yield (*GRASS*) after the calibration for cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass (J-PP) in Jablje for the calibration period 1998–2013



Slika 36: Z umerjenim modelom izračunani letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) za trpežno ljuljko v Jabljah (J-LP) in Rakičanu (R-LP) za obdobje umeritve 1998–2013

Figure 36: Model predicted annual herbage dry matter yield (*GRASS*) after the calibration for perennial ryegrass in Jablje (J-LP) and Rakičan (R-LP) for the calibration period 1998–2013

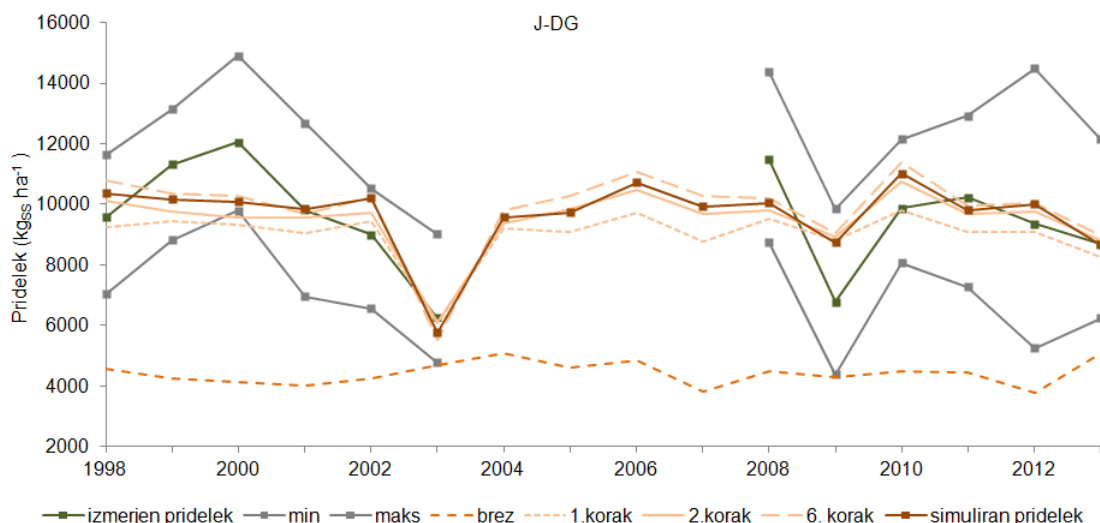
Po drugi strani lahko primerjamo umeritev modela za LP na dveh lokacijah, Jablje in Rakičan (Slika 36). Pri tem bi pričakovali, da bomo razlike v večji meri pripisali različnim tlom in vremenskim razmeram, a se rezultati tudi sicer razlikujejo. Enaki niso, na primer, niti umerjeni *TSUM1*, *SLA*, *RUETB* ali temperatura praga za rast listov (*TMBAS1*). Razlik ni med drugim pri *CLAI*, ki nam pove, kakšna listna površina ostane po košnji, tako rekoč enaka sta indeks listne površine, pri katerem se začne samozasenčenje (*LAICR*), in koeficient slabitve za difuzno sevanje (*KDIF*). Enaki (in različni kot pri DG in PP) so tudi

parametri, ki se nanašajo na obnašanje dušika: optimalna koncentracija dušika kot delež najvišje (*FRNX*), najvišja koncentracija dušika v koreninah kot delež najvišje koncentracije dušika v listih (*LRNR*) in najvišja koncentracija dušika v listih (*NMXLV*).

Primerjava simuliranih pridelkov kaže podobnost v letih 2001, 2003, 2007 in 2013, pridelki v preostalih letih pa si niso blizu niti po velikosti niti po variabilnosti. Vendar so v tem primeru izredno velike tudi razlike pri izmerjenih pridelkih v letih 1999 in 2009, približno pa se ujemajo v letih 2003, 2006, 2007, 2010 in 2012. V preostalih letih pridelki niso bili izmerjeni na obeh lokacijah.

Za J-DG umerjeni model lepo sledi dinamiki izmerjenih pridelkov (Slika 37). Prikazanih je tudi nekaj vmesnih korakov v postopku umerjanja ter simulacija pridelka z neumerjenim modelom, ki je kot tak povsem neuporaben. Po umeritvi pa je simulirani pridelek v celotnem obdobju trdno znotraj okvira najmanjših in največjih izmerjenih vrednosti.

Simulacija je odlična za leto 2003, ko je ekstremna suša občutno znižala velikost pridelka. Prav tako je zelo dobra za leta 2001, 2011, 2012 in 2013. Pri preostalih letih pa se moramo zavedati, da lahko velike razlike nastanejo tudi zaradi staranja travne ruše. Tega v modelu ne upoštevamo, temveč simuliramo rast vsako leto znova, kot da je travna ruša na novo posejana.

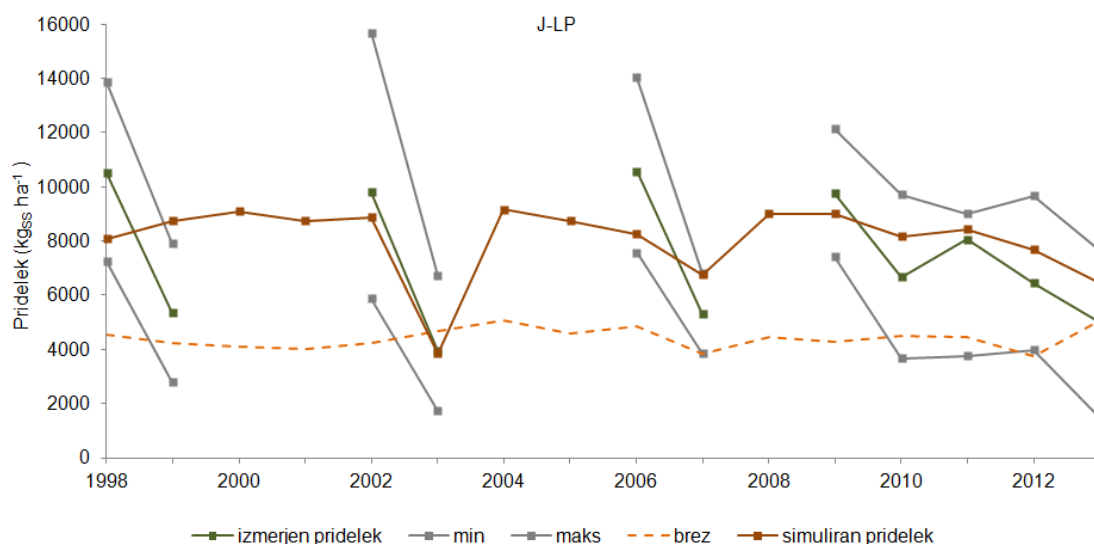


Slika 37: Letni pridelek suhega zelinja navadne pasje trave v Jabljah (J-DG): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka pred umerjanjem modela (brez), rezultat simulacije 1., 2. in 6. koraka pri umerjanju modela in simulacija pridelka (GRASS) z umerjenim modelom (simuliran pridelek)

Figure 37: Annual herbage dry matter yield of cock's foot in Jablje (J-DG): average (izmerjen pridelek), minimum (min) and maximum (maks) values of observed yield, the default output of the model without calibration (brez), 1st, 2nd, and 6th step (korak) yield results of the calibration procedure, and model predicted yield (GRASS) at the end of calibration (simuliran pridelek)

V letu 2000 je bila, na primer, ruša v drugem letu, zato je izmerjeni pridelek precej višji od simuliranega. Podobno velja za leto 2008. Prav nasprotno pa je bila leta 2009 ruša v četrtem letu rasti, ko se rast že močno upočasni in jo začnejo preraščati pleveli. Izmerjeni pridelek je zato občutno manjši od simuliranega.

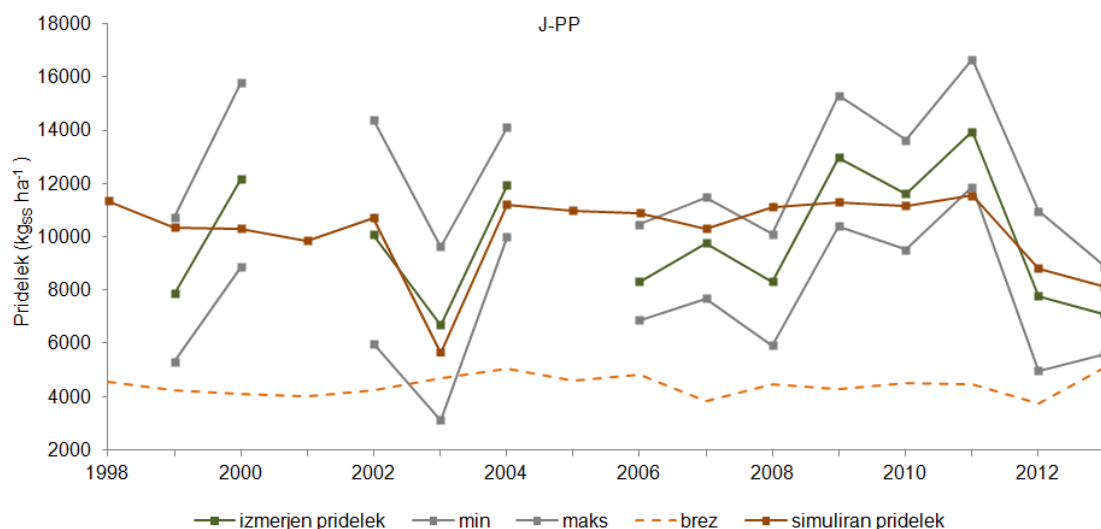
Pri rezultatih za J-LP (Slika 38) so simulirani pridelki zelo blizu izmerjenim v letih 2002, 2003, 2009 in 2011. V splošnem je ujemanje nekoliko slabše kot pri J-DG, vendar simulirani pridelek preseže največji izmerjen pridelek le za malenkost v letu 1999. Tudi tu je razlog lahko podoben kot za J-DG: travna ruša je bila to leto v tretjem letu, kar za trpežno ljuljko ni več optimalno, zaradi zapleveljenosti pa so opravili le dve košnji. V letih 2007 in 2010 sta izmerjena pridelka majhna (simulirani pridelek zato precej odstopa). Izvajalci poskusa menijo, da bi lahko bil razlog v tem, da se pri trpežni ljuljki včasih zgodi, da že po drugem prezimovanju začne slabše rasti in postane zelo občutljiva na višje poletne temperature zraka in pomanjkanje vode v tleh (Verbič, 2014).



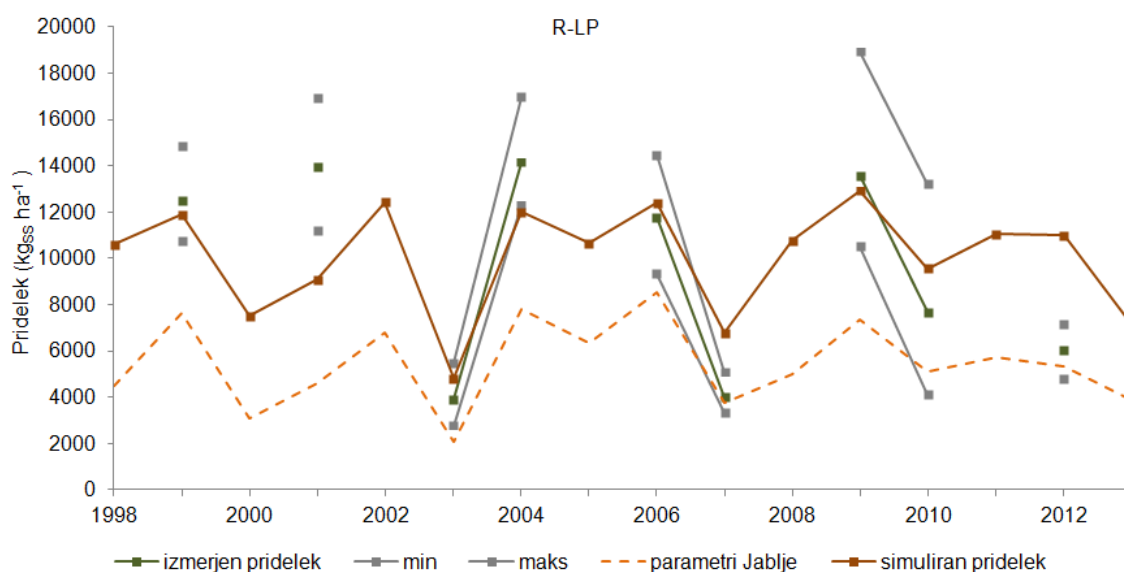
Slika 38: Letni pridelek suhega zelnja trpežne ljuljke v Jabljah (J-LP): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka pred umerjanjem modela (brez) in simulacija pridelka (GRASS) z umerjenim modelom (simuliran pridelek)

Figure 38: Annual herbage dry matter yield of perennial ryegrass in Jablje (J-LP): average (izmerjen pridelek), minimum (min) and maximum (maks) values of observed yield, the default output of the model without calibration (brez) and model predicted yield (GRASS) at the end of calibration (simuliran pridelek)

Tudi simulacija pridelka travniškega mačjega repa v Jabljah (J-PP) je večino obdobja znotraj okvira najmanjših in največjih izmerjenih vrednosti (Slika 39). Odlično se potek ujema v letih 2002–2004, 2007 in 2010, dobro tudi v 2012 in 2013. Slabši so rezultati za leta 1999, 2006, 2008, 2011.



Slika 39: Letni pridelek suhega zelinja travniškega mačjega repa v Jabljah (J-PP): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka pred umerjanjem modela (brez) in simulacija pridelka (GRASS) z umerjenim modelom (simuliran pridelek)
Figure 39: Annual herbage dry matter yield of timothy grass in Jablje (J-PP): average (izmerjen pridelek), minimum (min) and maximum (maks) values of observed yield, the default output of the model without calibration (brez) and model predicted yield (GRASS) at the end of calibration (simuliran pridelek)



Slika 40: Letni pridelek suhega zelinja trpežne ljujke v Rakičanu (R-LP): povprečne (izmerjen pridelek), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, modelska simulacija pridelka s parametri, umerjenimi za J-LP (parametri Jablje) in simulacija pridelka (GRASS) z umerjenim modelom (simuliran pridelek)
Figure 40: Annual herbage dry matter yield of perennial ryegrass in Rakičan (R-LP): average (izmerjen pridelek), minimum (min) and maximum (maks) values of observed yield, the default output of the model with parameters calibrated for perennial ryegrass in Jablje (parametri Jablje) and model predicted herbage yield (GRASS) at the end of calibration (simuliran pridelek)

Simulacije pridelka trpežne ljuljke v Rakičanu (R-LP) smo za primerjavo opravili tudi z umerjenimi parametri za J-LP, nato pa smo parametre umerili za Rakičan (Slika 40). Angulo in sod. (2013) navajajo, da se simulacije pridelka različnih poljščin izboljšajo, če parametre rastlin umerimo ločeno za posamezno regijo. Kot je videti za R-LP, imata krivulji pridelka, simuliranega z umerjenim modelom, in pridelka, simuliranega z uporabljenimi parametri iz Jabelj, zelo podoben potek, vendar pa sta razmaknjeni za 3000 do 6000 kg_{SS} ha⁻¹. Razlika v umerjenih parametrih torej povzroči predvsem premik krivulje, ne pa spremembe oblike. Ujemanje z izmerjenimi pridelki je najboljše v letih 1999, 2003, 2006 in 2009.

Enako smo naredili tudi za travniški mačji rep (R-PP). Zaradi slabšega ujemanja simulacij z izmerjenimi vrednostmi je graf predstavljen v prilogi D. Rezultati so drugačni kot pri R-LP, saj sta krivulji celotno obdobje na isti potencialni višini pridelka, v nekaterih letih se tudi ujemata, precej večja pa so nihanja pri uporabljenih parametrih iz Jabelj. Ujemanje višine je lahko posledica tega, da je pri R-PP izmerjeni pridelek precej manjši kot pri J-PP, pri LP pa je prav nasprotno.

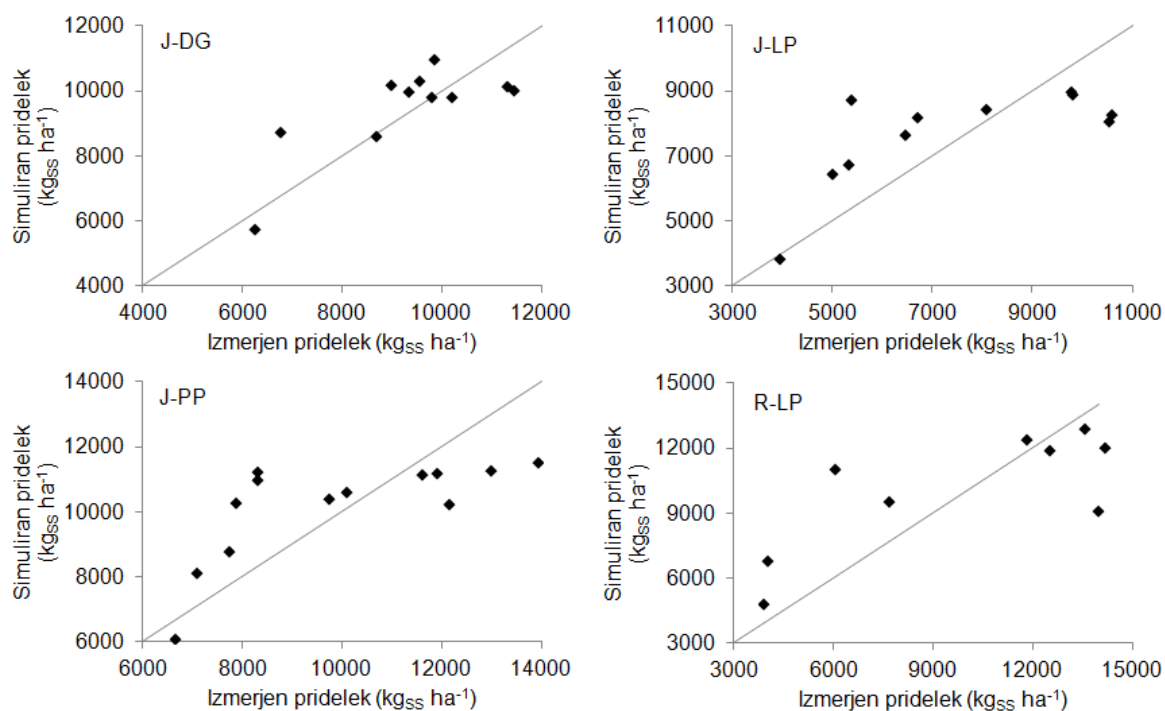
Primerjava povprečij izmerjenih in simuliranih pridelkov je pokazala, da model v vseh primerih razen pri R-PP nekoliko precenjuje pridelek (Preglednica 24). Nasprotno pa je model LINGRA v raziskavi Schapendonka in sod. (1998) podcenjeval pridelek na večini izmed 35 lokacij po Evropi. Vendar pa razlike med povprečji v našem primeru niso velike: največja je 364 kg_{SS} ha⁻¹ pri J-PP in najmanjša 23 kg_{SS} ha⁻¹ pri J-DG. Po drugi strani pa so v vseh primerih standardni odkloni simuliranih pridelkov v obravnavanem obdobju manjši od standardnih odklonov izmerjenih pridelkov, kar je splošna težava pri modelskih simulacijah. Najbolj problematična sta izredno majhna standardna odklona simulacij za S72 (289 kg_{SS} ha⁻¹) in R-PP (803 kg_{SS} ha⁻¹), zaradi katerih modelski izračuni ne posnemajo dobro medletne variabilnosti izmerjenih pridelkov.

Preglednica 24: Število meritev (n), povprečni letni izmerjeni pridelek ($\bar{O}$) in standardni odklon (σ_O) ter povprečni letni simulirani pridelek ($\bar{P}$) in standardni odklon (σ_P) pri obravnavanih poskusih (S72-poskus v Ljubljani, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep)

Table 24: Number of measurements (n), the average annual observed herbage yield ($\bar{O}$) and its standard deviation (σ_O), the average annual predicted herbage yield ($\bar{P}$) and its standard deviation (σ_P) for all study experiments (S72-experiment in Ljubljana, J-Jablje, R-Rakičan, DG-cock's foot, LP-perennial ryegrass, PP-timothy grass)

Poskus	n	$\bar{O}$ (kg _{SS} ha ⁻¹)	σ_O (kg _{SS} ha ⁻¹)	$\bar{P}$ (kg _{SS} ha ⁻¹)	σ_P (kg _{SS} ha ⁻¹)
S72	20	9569	1368	9877	289
J-DG	12	9525	1742	9548	1359
J-LP	11	7398	2439	7649	1512
J-PP	13	9880	2417	10244	1453
R-LP	9	9735	4313	10044	2370
R-PP	9	6744	2294	6597	803

Dodatno lahko izmerjene in simulirane pridelke med seboj primerjamo na razsevnih diagramih (Slika 41). Nazorno vidimo, da je ujemanje najboljše pri J-DG, pri preostalih pa je variabilnost precej velika. Vendar pa to odstopanje ni idealno merilo za kakovost modela, zato smo se v nadaljevanju posvetili izračunu drugih statističnih mer.



Slika 41: Razsevni diagrami (simulirani letni pridelok proti povprečnemu letnemu izmerjenemu) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep (J-PP) v Jabljah ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za obravnavana leta v obdobju 1998–2013

Figure 41: Scatterplots of the annual model predicted versus average annual observed herbage yield for cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass (J-PP) in Jablje, and perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) for the study years in the period 1998–2013

V analizi kakovosti modela (Preglednica 25) se je izkazalo, da so rezultati različnih statističnih mer včasih med seboj nasprotujoči, kar še posebej potrjuje nujnost uporabe več metod. Glede na $RMSE_{\%}$ so rezultati umerjanja modela LINGRA-N za J-DG, S72 in J-PP dobri ($10\% < RMSE_{\%} \leq 20\%$), za druge tri obravnavane poskuse pa zadovoljivi ($20\% < RMSE_{\%} \leq 30\%$). Če upoštevamo le $RMSE$ za soda leta ($RMSE_{\%soda}$), saj smo model umerjali na liha leta, se še vedno najboljše izkažeta J-DG in J-PP, sledita pa jima S72 in J-LP; za vse štiri so rezultati dobri, za R-LP zadovoljivi in za R-PP slabi. Za primerjavo, pri umerjanju modela LINGRA za travniški mačji rep v Skandinaviji je bil $RMSE_{\%}$ 43 % (Van Oijen in sod., 2005).

V vseh primerih razen J-DG je sistematični del napake večji od nesistematičnega, kar pomeni, da bi s prilagoditvami modela lahko dosegli boljše rezultate. Predvsem pri S72 in R-PP, kjer je sistematični del zelo velik (83 in 70 %), se kaže, da model ni dobro umerjen.

Preglednica 25: Koren povprečne kvadratne napake ($RMSE$), njegova relativna vrednost ($RMSE_{\%}$), njegov sistematični ($RMSE_{\%s}$) in nesistematični ($RMSE_{\%u}$) del, relativna vrednost za soda leta ($RMSE_{\%soda}$) ter kazalec ujemanja (d_w) za oceno kakovosti modela LINGRA-N pri obravnavanih poskusih (S72-poskus v Ljubljani, J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep)

Table 25: The root mean square error ($RMSE$), its relative value ($RMSE_{\%}$) and its systematic ($RMSE_{\%s}$) and unsystematic ($RMSE_{\%u}$) part, its relative value for even years ($RMSE_{\%soda}$), and the index of agreement (d_w) for performance evaluation of LINGRA-N model for the study experiments (S72-experiment in Ljubljana, J-Jablje, R-Rakičan, DG-cock's foot, LP-perennial ryegrass, PP-timothy grass)

Poskus	$RMSE$ ($kg_{SS} ha^{-1}$)	$RMSE_{\%}$ (%)	$RMSE_{\%s}$ (%)	$RMSE_{\%u}$ (%)	$RMSE_{\%soda}$ (%)	d_w
S72	1329	14	83	17	20	0,37
J-DG	1134	12	45	55	12	0,84
J-LP	1709	23	56	44	20	0,78
J-PP	1698	17	54	46	17	0,8
R-LP	2715	28	55	45	29	0,83
R-PP	1957	29	70	30	40	0,9

Pri dobrem modelu se namreč sistematični del $RMSE$ približa 0 (Willmott, 1982). Tudi kazalec ujemanja je za S72 izjemno majhen ($d_w = 0,37$), kar jasno kaže, da kljub dobremu $RMSE$ model ni dovolj dobro umerjen, da bi ga lahko v Ljubljani uporabili za simuliranje pridelka trajnega travinja. Po drugi strani je kazalec ujemanja zelo velik za R-PP ($d_w = 0,9$), kjer pa je $RMSE$ slab in njegov sistematični del zelo velik, kar prav tako ne obeta primernih rezultatov modeliranja.

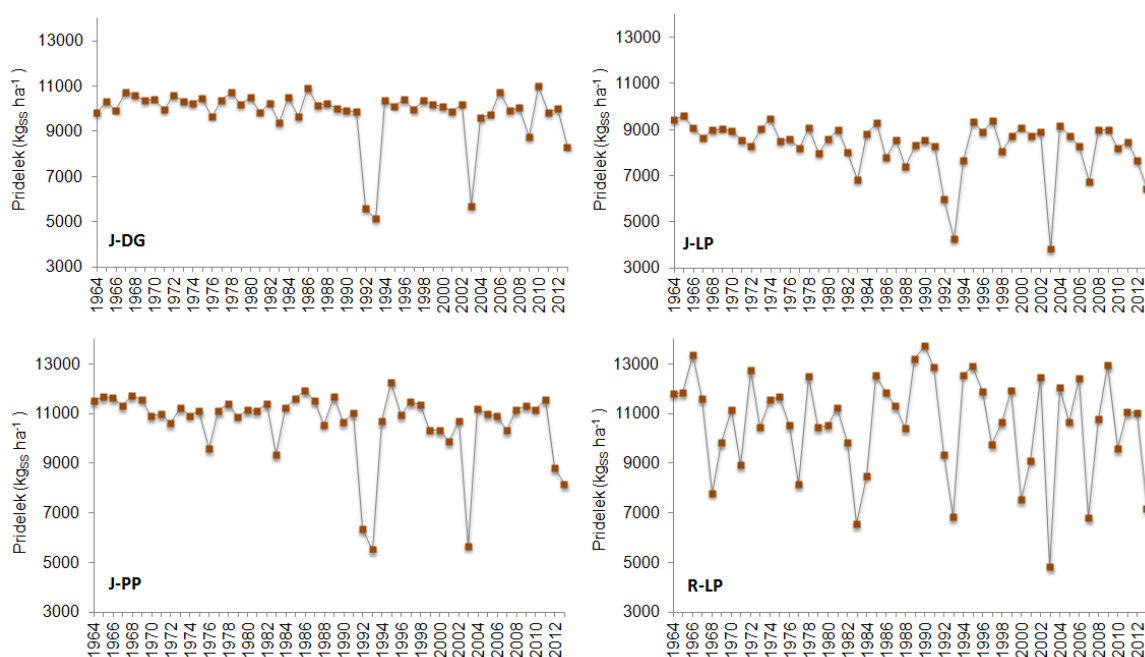
Za nadaljnje delo smo tako uporabili le preostale štiri poskuse (J-DG, J-LP, J-PP in R-LP), kjer je $RMSE$ vsaj zadovoljiv, v večini pa dober, njegov sistematični del pa je za vse štiri pod 57 %. Najnižji je kazalec ujemanja za J-LP ($d_w = 0,78$), najvišji pa za J-DG ($d_w = 0,84$). Pri oceni kakovosti modela so Persson in sod. (2014) izpostavili tudi razlike pri umerjanju za posamezna leta s travno rušo različne starosti. V njihovem primeru so bili v prvem letu rezultati umerjanja veliko slabši ($RMSE_{\%} = 31\%$, $d_w = 0,36$) kot v drugem letu ($RMSE_{\%} = 22\%$, $d_w = 0,98$).

Glede na vse težave z vhodnimi podatki in zelo raznolike rezultate pri umerjanju, se moramo strinjati z Barrettom in sod. (2005), ki pravijo, da je napovedovanje stopnje rasti travne ruše še posebej zahtevno, ker je določeno z interakcijo mnogih okoljskih dejavnikov pa tudi načinov gospodarjenja s travno rušo. Morda je presenetljivo, da so najboljši rezultati umerjanja za navadno pasjo travo, čeprav je bil model razvit na trpežni ljuljki. Simulacije za trpežno ljuljko so boljše v Rakičanu, v splošnem pa v Sloveniji zanje razmere niso tako ugodne kot na Nizozemskem, kjer je padavin več, poletne temperature zraka pa so nekoliko nižje.

4.3 MODELSKI REZULTATI

4.3.1 Priderek v obravnavanem 50-letnem obdobju

Priderek (*GRASS*), potencialni priderok (*YIELD*) in komponente rasti smo simulirali za obdobje 1964–2013. Za vse štiri primere, pri katerih je bilo umerjanje vsaj razmeroma uspešno, je prikazan potek pridelkov po letih (Slika 42).



Slika 42: Letni priderok suhega zelinja (*GRASS*) za vse štiri primere za celotno obdobje 1964–2013. Zgoraj levo navadna pasja trava v Jabljah (J-DG), zgoraj desno trpežna ljujka v Jabljah (J-LP), spodaj levo travniški mačji rep v Jabljah (J-PP), spodaj desno trpežna ljujka v Rakičanu (R-LP)

Figure 42: Annual herbage dry matter yield (*GRASS*) for all study cases for the entire period 1964–2013. Upper left: cock's foot in Jablje (J-DG), upper right: perennial ryegrass in Jablje (J-LP), lower left: timothy grass in Jablje (J-PP), lower right: perennial ryegrass in Rakičan (R-LP)

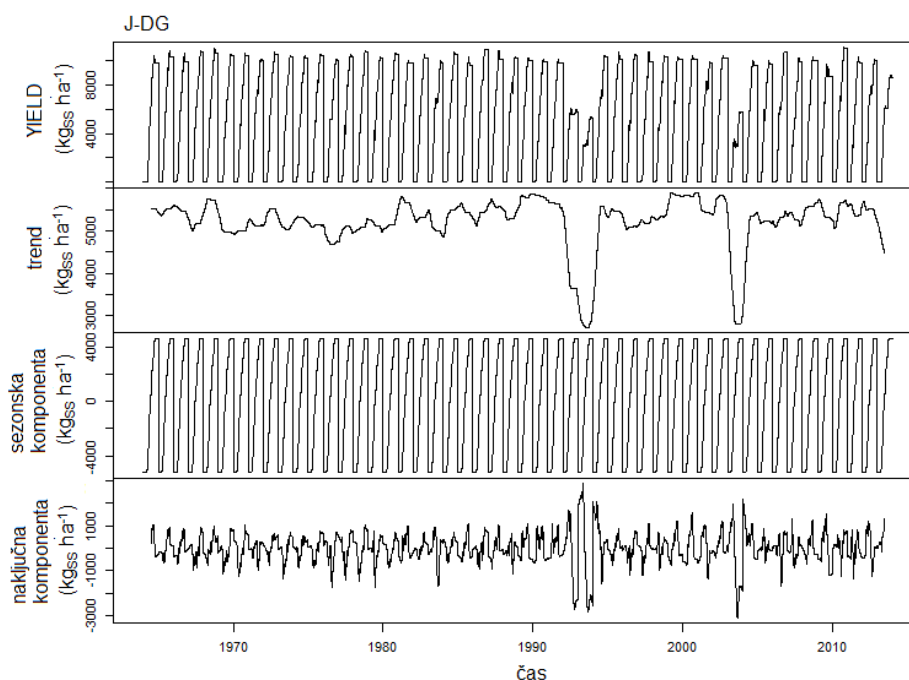
Predvsem v Rakičanu (R-LP) je priderok zelo variabilen. Tudi pri povprečnem izmerjenem letnem pridelku suhega zelinja je koeficient variacije 44 %. Nihanja so zelo velika v obe smeri, predvsem v primerjavi z rezultati v Jabljah (J-DG, J-LP, J-PP), kjer posebej odstopa nekaj let z zelo zmanjšanim pridelkom. Tu so koeficienti variacije povprečnih izmerjenih letnih pridelkov suhega zelinja 18 % za J-DG, 33 % za J-LP in 24 % za J-PP. Rezultate v Rakičanu lahko delno pripišemo tlem s slabšo vodnozadrževalno sposobnostjo, kjer vsakoletni vremenski vplivi pridejo močnejše do izraza, in nekoliko bolj suhemu podnebju, do neke mere pa se moramo zavedati tudi negotovosti rezultatov, saj je bilo umerjanje za ta primer slabše.

Za primerjavo, izmerjeni letni pridelki suhega zelinja v Avstriji se gibljejo znotraj intervala ± 10 –20 %, a so lahko v nekaterih letih (kot je bilo, na primer, leto 2003) ta odstopanja mnogo večja (Schaumberger in sod., 2007). Za obdobje 1995–2004 je bil povprečni

koeficient variacije pri izmerjenih poskusnih pridelkih suhega zelinja v Franciji okoli 16 % (Smit in sod., 2008).

Pri analizi časovnih vrst letnih rezultatov simulacij potencialnega pridelka se je pokazal statistično značilen ($p = 0,05$) negativni trend za primera J-LP ($-24 \text{ kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$) in J-PP ($-29 \text{ kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$). V preostalih dveh primerih se potencialni pridelek v 50-letnem obdobju ne zmanjšuje statistično značilno. Avtokorelacijska in parcialna avtokorelacijska funkcija sta za vse primere pokazali povezavo na vsakih 10 let. Ta, kot kaže, izvira iz dejstva, da je bil pridelek nekoliko ali zelo zmanjšan v letih 1983, 1993, 2003 in 2013.

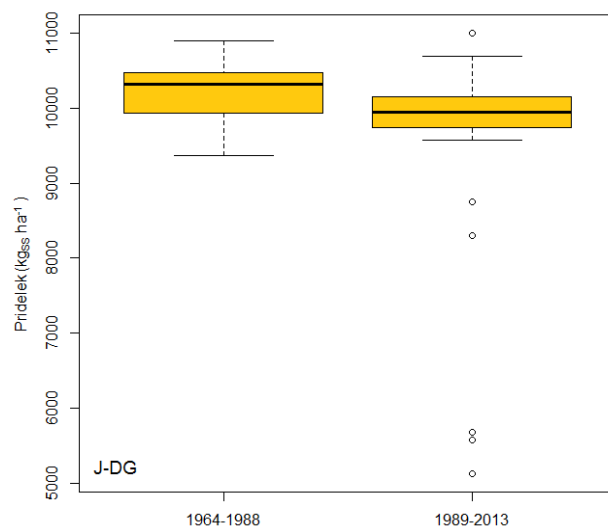
Razčlenitev časovnih vrst dnevnih simulacij potencialnega pridelka na trend, sezonsko in naključno komponento ne kaže spremembe variabilnosti (Slika 43; za preostale tri primere so grafi podobni in so v prilogi E). Avtokorelacijska in parcialna avtokorelacijska funkcija naključne komponente sta pokazali, da pri vseh primerih v Jabljah na potencialni pridelek v danem dnevu vpliva stanje pridelka v devetih preteklih dneh, v Rakičanu pa v dvanajstih preteklih dneh.



Slika 43: Razčlenitev časovne vrste dnevnih simulacij potencialnega pridelka suhega zelinja (*YIELD*) navadne pasje trave v Jabljah v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento
Figure 43: Decomposition of the time series of daily simulations of potential herbage dry matter yield (*YIELD*) of cock's foot in Jablje in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)

Kljub temu, da se skupna variabilnost ni spremenila, pa se v drugi polovici obravnavanega obdobja (t.j. po letu 1990) začnejo pri vseh treh monokulturah v Jabljah pojavljati osamelci, kar bi lahko nakazovalo negativne učinke podnebnih sprememb. V prvi polovici

obravnawanega obdobja namreč osamelcev ni, v drugem pa jih je pri J-DG šest (Slika 44), pri J-LP dva in pri J-PP pet.



Slika 44: Okvira z ročaji za letni pridelok suhega zelinja (*GRASS*) navadne pasje trave v Jabljah (J-DG) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnawanega 50-letnega obdobja

Figure 44: Boxplots of annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of cock's foot in Jablje (J-DG) for the first and the second half of the 50-year period

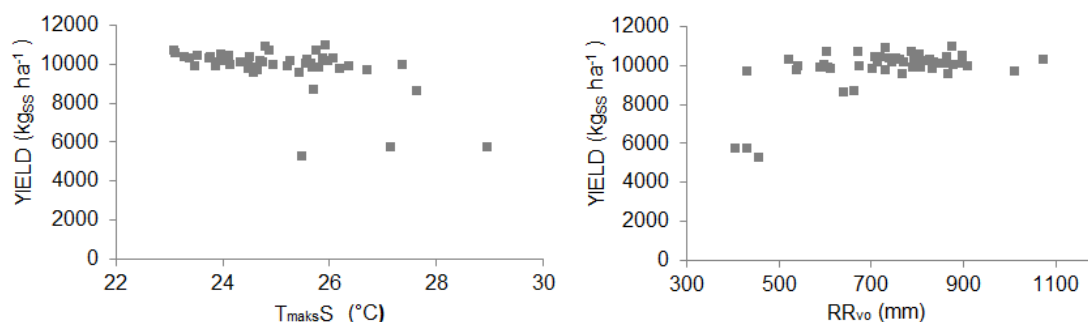
V Jabljah je bil pri vseh treh preučevanih vrstah pridelok najmanjši (pod 70 % povprečne vrednosti) v letih 1992, 1993 in 2003. Pri R-LP so bili najmanjši pridelki v letih 1983, 1993, 2003, 2007 in 2013. V Jabljah je bil pridelok zmanjšan (pod 90 % povprečne vrednosti) pri vseh treh vrstah v letu 2013, za J-DG v 2009, za J-LP v 1983 in 2007 ter za J-PP v 1976, 1983 in 2012.

4.3.2 Vpliv suše na pridelok

Leta, v katerih je bil v Jabljah pridelok najmanjši (1992, 1993 in 2003) so hkrati tudi leta z najmanj padavinami tako v vegetacijskem obdobju (april–september) kot tudi poleti (junij–avgust). Poleti leta 1992 je padlo le 47 % padavin glede na povprečje 1964–2013, leta 1993 59 % in leta 2003 53 %. Za vegetacijsko obdobje so bili odstotki nekoliko višji, leta 1992 55 %, leta 1993 62 % in leta 2003 59 %. V vseh treh letih je bil pridelok glede na povprečje 1964–2013 manjši za vsaj 30 % povprečne vrednosti oz. za 2,5 do 5,5 t_{ss} ha⁻¹leto⁻¹. Za rast travne ruše je pomembna tudi razporeditev padavin v vegetacijskem obdobju, poleg tega pa imajo izreden vpliv visoke temperature zraka. V letih 1992 in 2003 so bile v povprečju za poletje in za vegetacijsko obdobje zabeležene ekstremno visoke najvišje in najnižje dnevne temperature zraka. Energija globalnega sončnega obsevanja pa je bila izjemna v vegetacijskem obdobju 2003. Meteorološka vodna bilanca (poglavje 3.2.5, Slika 25) je najnižjo vrednost dosegla v letih – od najnižje vrednosti naprej – 1992, 2003, 1983 in 1993.

V Rakičanu je bil leta 1992 pridelek glede na 50-letno povprečje manjši le za 12 %, čeprav je bilo v tem letu v vegetacijskem obdobju le 50 % padavin glede na povprečje, poleti pa celo le 46 %. Leta 1993 je bilo stanje nasprotno: pridelek je bil manjši od povprečja za 36 %, padavin pa je bilo v vegetacijskem obdobju 72 %, poleti pa 67 % glede na povprečje. Podobno je bilo leta 2003, ko je bil pridelek 55 % manjši od povprečja, padlo pa je v vegetacijskem obdobju 62 % in poleti 58 % povprečnih padavin. Od najnižje dosežene vrednosti vodne bilance naprej si sledijo leta 2003, 1992, 2000 (leto 1993 je na sedmem mestu), saj so bile v letih 2003 in 1992 tudi povprečne poletne oz. vegetacijske najvišje in najnižje dnevne temperature zraka precej višje kot v 1993.

Preverili smo, ali lahko v splošnem določimo odvisnost potencialnega pridelka od posameznih meteoroloških spremenljivk. Namesto *GRASS* smo tu obravnavali *YIELD*, da smo izločili morebiten neposreden vpliv datumov košnje na rezultat. Izkazalo se je, da pri nobenem primeru ni statistično značilnih odvisnosti potencialnega pridelka niti od posameznih meteoroloških spremenljivk niti od njihove kombinacije. Ponovno se je le pokazala povezava med izredno majhnim pridelkom ter visokimi temperaturami zraka (najvišjimi in najnižjimi), majhno količino padavin (Slika 45) in zelo negativno vodno bilanco.



Slika 45: Razsejna diagrama, ki prikazujeta letni potencialni pridelek (*YIELD*) v odvisnosti od poletnega povprečja najvišje dnevne temperature zraka (T_{maksS} ; levo) in v odvisnosti od količine padavin v vegetacijskem obdobju (RR_{vo} ; desno) za navadno pasjo travo v Jabljah za celotno obdobje 1964–2013

Figure 45: Scatterplots of the annual potential yield (*YIELD*) versus the summer average of maximum daily air temperature (T_{maksS} ; left) and *YIELD* versus the vegetation period sum of precipitation (RR_{vo} ; right) for cock's foot in Jablje for the entire period 1964–2013

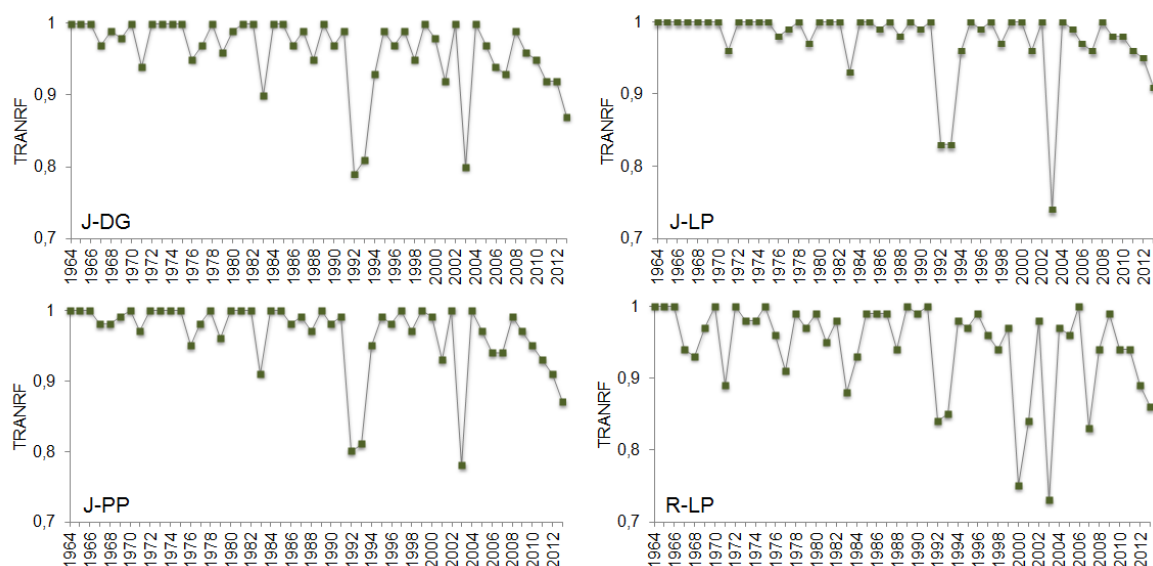
Tudi 20-letni poskus na trajnem travinju v Ljubljani je pokazal le zelo majhno pozitivno povezavo med letnimi padavinami in pridelkom suhega zelinja (Lekšan, 1995). Po drugi strani pa Smit in sod. (2008) trdijo, da je pridelek travne ruše v Evropi močno povezan z letnimi padavinami, manj pa z letno temperaturno vsoto ali dolžino rastne dobe. Laidlaw (2009) je izpostavil, da pridelek pomembno določa količina padavin v času od aprila do septembra.

Glede na vrednosti meteoroloških spremenljivk v letih z najmanjšim pridelkom lahko brez pomislekov pripišemo zmanjšanje pridelka predvsem vplivu suše. Tudi Smit in sod. (2008) navajajo, da pridelke travne ruše posebej prizadene suša. Analiza kazalcev kmetijske suše

za travno rušo na šestih lokacijah po Sloveniji za obdobje 1973–2009 (Sušnik in Pogačar, 2010a) potrjuje, da so bila najbolj sušna leta 1992, 1993 in 2003. Prav tako je iz zapisov, ki sta jih Sušnikova in Pogačarjeva (2010a) zbrali iz Agrometeoroloških biltenov ARSO (poglavje 2.7.1, Preglednica 4), razvidno, da je bil, na primer, pridelek otave zaradi suše v letu 1993 prepolovljen in da je leta 2003 suša povzročila katastrofalno škodo na travinju.

Na Irskem so podobno ocenili, da se na intenzivno gojenih travnikih v najsušnejših regijah zaradi omejene dostopnosti vode v tleh pridelek lahko zmanjša za 1,4 do 4,0 t ha⁻¹leto⁻¹ (Brereton in Keane, 1982, cit. po Laidlaw, 2009).

Leta z najmanjšim *GRASS* so hkrati tudi leta z najmanjšim *TRANRF* (faktor zmanjšanja rasti zaradi suše; Slika 46). Ker je *TRANRF* v modelu mera sušnosti, so to torej leta, ki so tudi po simulacijah najbolj sušna.



Slika 46: Faktor zmanjšanja rasti zaradi suše (*TRANRF*) za vse štiri primere za celotno obdobje 1964–2013. Zgoraj levo navadna pasja trava v Jabljah (J-DG), zgoraj desno trpežna ljuljka v Jabljah (J-LP), spodaj levo travniški mačji rep v Jabljah (J-PP), spodaj desno trpežna ljuljka v Rakičanu (R-LP)

Figure 46: Reduction factor for crop growth due to drought (*TRANRF*) for all study cases for the entire period 1964–2013. Upper left: cock's foot in Jablje (J-DG), upper right: perennial ryegrass in Jablje (J-LP), lower left: timothy grass in Jablje (J-PP), lower right: perennial ryegrass in Rakičan (R-LP)

Za časovne vrste dnevni vrednosti *TRANRF* se je zaradi same narave tega faktorja izkazalo, da niso stacionarne, zato lahko le iz oblike naključne komponente razčlenjene časovne vrste sklepamo, da se variabilnost v drugi polovici obdobja povečuje.

Leta, ko je *TRANRF* < 0,9, smo primerjali z leti z zmanjšanim pridelkom (Preglednica 26). Pri tem se je poleg obravnavanih treh (1992, 1993 in 2003) pokazalo še leto 2013. Leta z najmanjšim pridelkom se v Rakičanu kljub veliki variabilnosti precej dobro ujemajo s tistimi z zmanjšanim pridelkom v Jabljah.

Preglednica 26: Z oranžno so označena leta, ko je pridelek zmanjšan (pod 90 % povprečne vrednosti)*: polno, ko je hkrati znižan tudi modelski faktor zmanjšanja rasti zaradi suše ($TRANRF < 0,9$), in mrežasto, ko ni (J-Jablje, R-Rakičan, DG-navadna pasja trava, LP-trpežna ljuljka, PP-travniški mačji rep).

Table 26: Orange: years with herbage dry matter yield under 90 % of average value*: solid - also reduced reduction factor for crop growth due to drought ($TRANRF < 0.9$), grid - $TRANRF > 0.9$ (J-Jablje, R-Rakičan, DG-cock's foot, LP-perennial ryegrass, PP-timothy grass).

Primer	1983	1988	1992	1993	2003	2007	2009	2012	2013
J-DG									
J-LP									
J-PP									
R-LP*									

*za R-LP so označena leta, ko je pridelek najmanjši (pod 70 % povprečne vrednosti)

for R-LP herbage dry matter yield under 70 % of average value

Rezultati se dobro ujemajo tudi z analizo Sušnikove (2014): za R-LP se prvih 13 let z zmanjšanim pridelkom, izračunanim z modelom LINGRA-N, uvršča med njenih 15 najbolj sušnih let po kazalcu $DISS_k$ za travo na tleh z dobro vodnozadrževalno sposobnostjo od 1. dekad aprila do 2. dekad septembra v obdobju 1961–2013 v Murski Soboti.

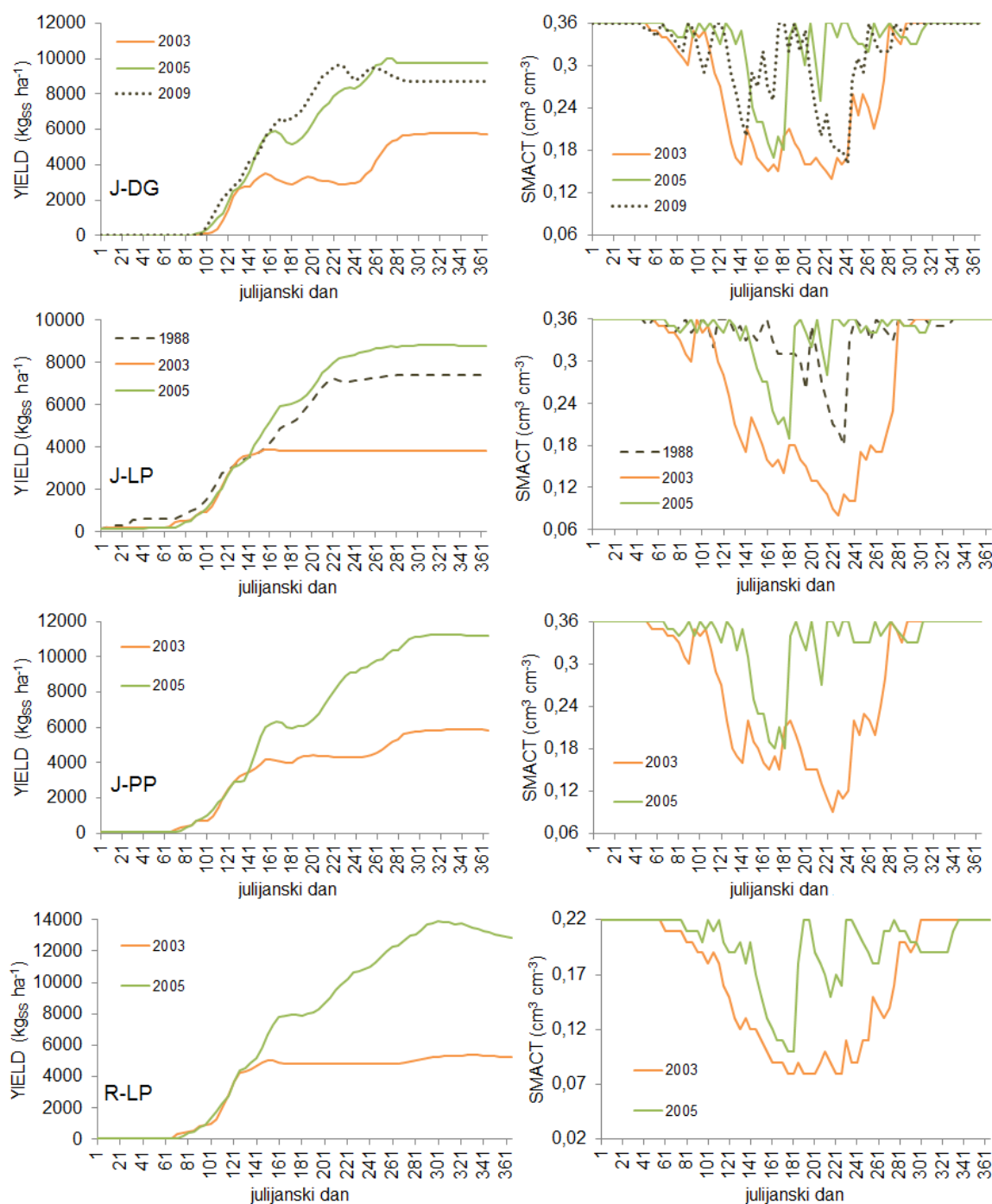
Nekoliko milejša sušna vegetacijska obdobja so tista, ko je $0,9 < TRANRF < 0,95$. Za J-DG so to 1971, 1983, 1994, 2001, 2006, 2007, 2011 in 2012, za J-LP le leti 1983 in 2013, za J-PP 1976, 1983, 1994, 2001, 2006, 2007, 2010, 2011, 2012 in 2013. Z izjemo let 1976, 2007 in 2010 so to leta, ko je bila na Brniku meteorološka vodna bilanca negativna ali komaj pozitivna (poglavje 3.2.5, Slika 25). Tudi Sušnikova (2014) je po več virih povzela, da je primanjkljaj vode od aprila do konca septembra v zadnjih petdesetih letih povzročil kmetijsko sušo v Sloveniji šestnajstkrat, in sicer leta 1952, 1967, 1971, 1973, 1977, 1983, 1992, 1993, 1994, 2000, 2001, 2003, 2006, 2007, 2012 in 2013. Glede na te rezultate le zmanjšanih pridelkov za J-DG v letu 2009 in J-LP v letu 1988 ne moremo pripisati neposrednemu vplivu suše.

Zmanjšan pridelek J-DG v letu 2009 bi morda lahko pripisali moči, ki je pestila severovzhodno in osrednjo Slovenijo, saj navadna pasja trava izmed obravnavanih vrst najslabše prenaša preveliko namočenost. Od 15. junija do 15. julija 2009 je na tem območju padlo več kot 50 % več padavin kot v dolgoletnem povprečju za 1971–2000, v Ljubljani je bilo od aprila do julija mesečno od 15 do 20 deževnih dni (Sušnik in Pogačar, 2010b).

4.3.3 Analiza letnega poteka potencialnega pridelka in komponent rasti v povezavi z vplivnimi spremenljivkami v izbranih letih

Za omenjeni leti 1988 in 2009 je smiselno najprej preveriti modelske rezultate za letni potek potencialnega pridelka ($YIELD$) in volumnske vsebnosti vode v koreninskem območju ($SMACT$). Za primerjavo smo izbrali leto 2003 z zelo sušnim vegetacijskim obdobjem in

leto 2005, v katerem je pridelek v vseh štirih primerih blizu povprečnega za celotno obdobje (Slika 47).



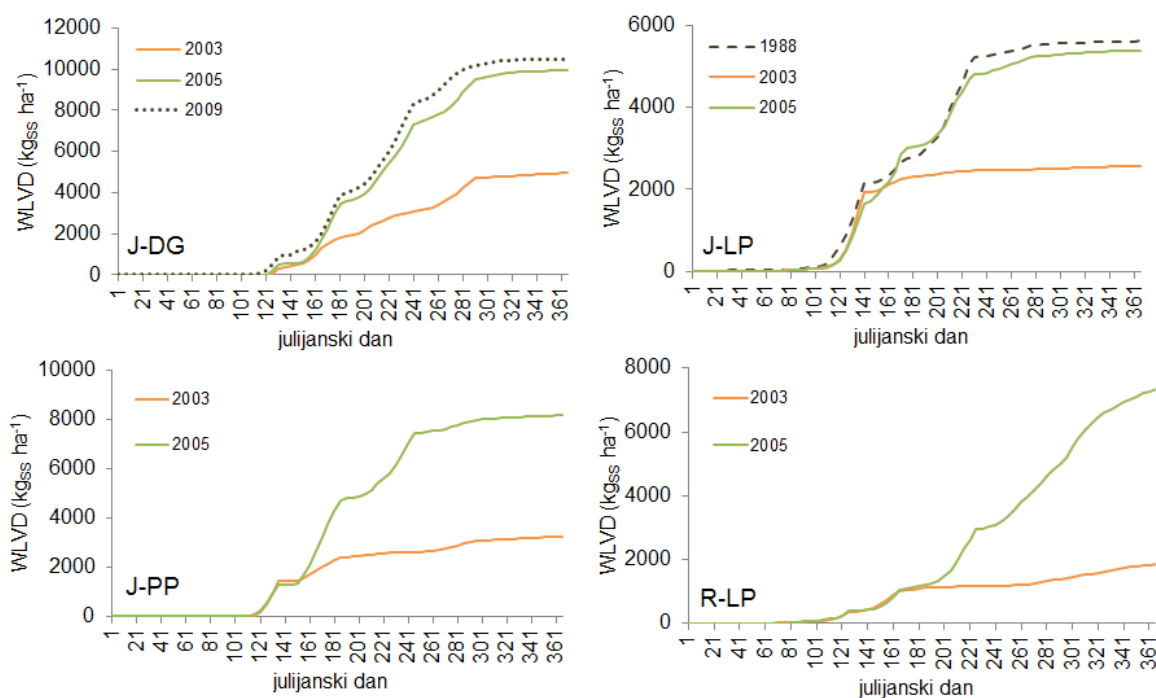
Slika 47: Potencialni pridelek (*YIELD*, levo) in volumska vsebnost vode v koreninskem območju (*SMACT*, desno) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljujko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljujko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988)

Figure 47: Potential yield (*YIELD*, left) and soil moisture content in the rooted zone (*SMACT*, right) of cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass in Jablje (J-PP), and perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) in the dry year of 2003 and the average year of 2005 (J-DG also in 2009, J-LP in 1988)

Za leto 2003 ni dvoma, da je v času poletja vladala suša. Količina vode v tleh je že okoli 20. maja (140. dan) padla proti točki venenja in je ostala na zelo nizki ravni vse do konca avgusta. S koncem maja se je tako ustavilo tudi naraščanje potencialnega pridelka travne ruše. Pokazale so se lastnosti posameznih vrst trave, kot smo jih opisali v poglavjih 2.1.1.1–2.1.1.3.

Navadna pasja trava sušo najboljše prenaša, zato se je poleti potencialni pridelek občasno nekoliko povečal. Trpežna ljuljka sušo najslabše prenaša in včasih celo propade. To se je zgodilo v letu 2003, ko se jeseni potencialni pridelek ni več povečal. Travniški mačji rep v sušnem obdobju miruje in si je nekoliko opomogel v drugi polovici septembra, ko se je izboljšalo stanje *SMACT*.

V povprečnem letu 2005 je *YIELD* pretežno enakomerno naraščal vso vegetacijsko sezono, vmesne kratkotrajne prekinitve ali počasnejše naraščanje so vidno povezani s padcem količine vode v tleh. Če *SMACT* pade na nizke vrednosti blizu točke venenja, *YIELD* ne narašča, če pa se *SMACT* le nekoliko zmanjša, *YIELD* narašča počasneje. Tudi Laidlaw (2009) potrjuje, da količina dostopne vode v tleh močno vpliva na pridelek travne ruše.



Slika 48: Masa odmrlih listov (WLVD) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988)

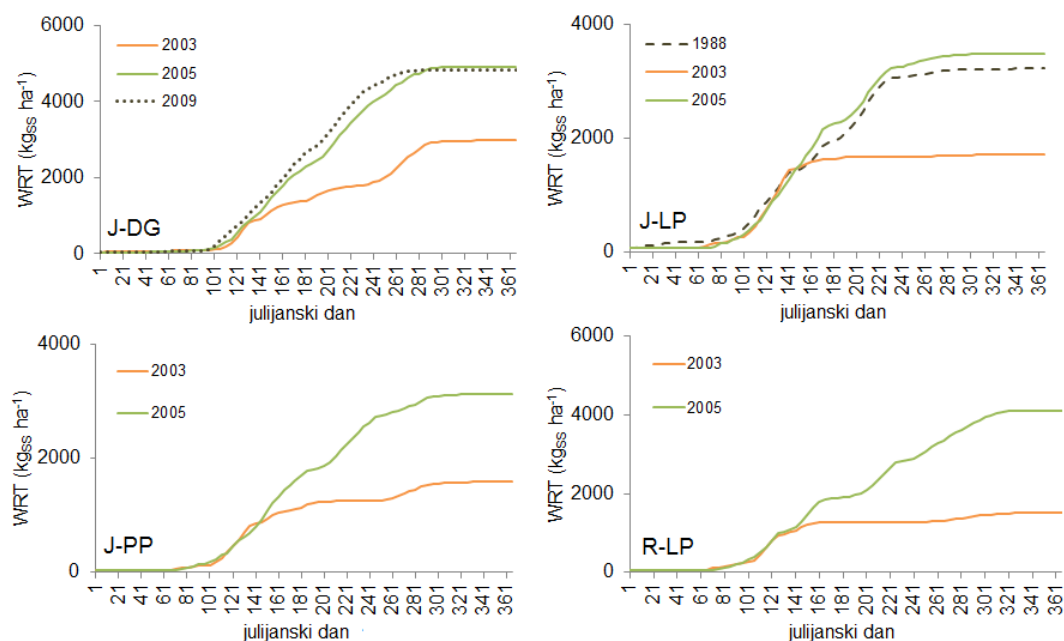
Figure 48: Mass of dead leaves (WLVD) of cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass in Jablje (J-PP), and perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) in the dry year of 2003 and the average year of 2005 (J-DG also in 2009, J-LP in 1988)

Pri J-DG je bila v letu 2009 preskrbljenost z vodo do avgusta skoraj ves čas zelo dobra in, kot kaže, je zato potencialni pridelek naraščal hitreje kot v letu 2005. Zmotno smo torej

pričakovali, da bi se navadna pasja trava v modelu negativno odzvala na prenamočenost. Potencialni pridelek je bil na koncu sezone manjši, ker *YIELD* od začetka avgusta dalje zaradi izrazitega zmanjšanja *SMACT* ni več naraščal. V letu 2009 so se namreč v kmetijstvu soočali tako z močo kot tudi s sušo (Sušnik in Pogačar, 2010b). Manjši pridelek J-LP v letu 1988 je bil, kot kaže, posledica primanjkljaja vode v tleh, ki je bil nekoliko daljši in večji kot v povprečnem letu 2005, a vseeno ni videti izjemno izrazit.

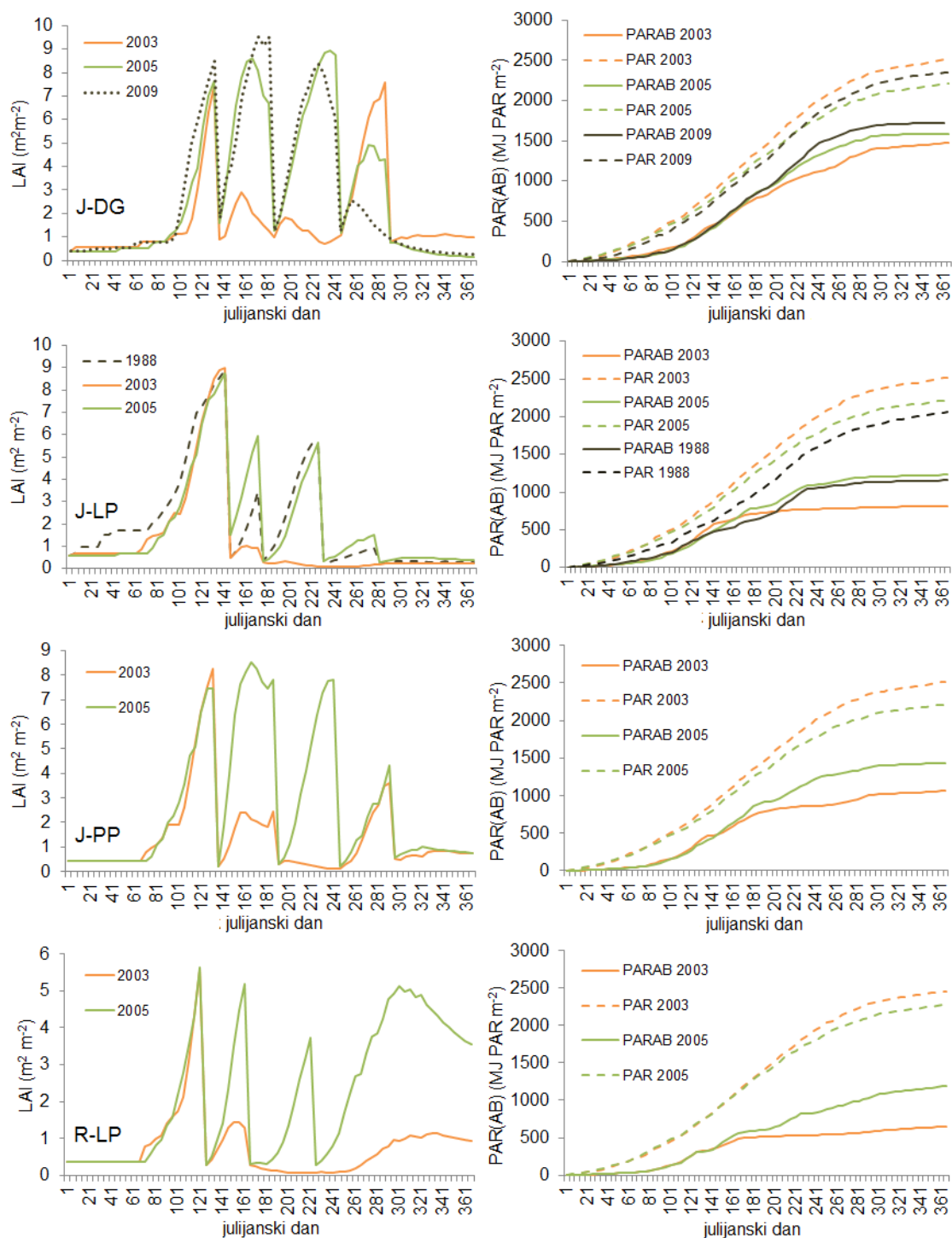
V podobni obliki, kot se povečuje *YIELD*, se povečujeta tudi masa odmrlih listov (*WLVD*, Slika 48) in masa korenin (*WRT*, Slika 49). Pri tem je *WLVD* predvsem pri J-DG postopno naraščal tudi v sušnem delu leta 2003, ko je travna ruša še vedno počasi rastla in odmirala, ter dosegel 50 % *WLVD* povprečnega leta 2005. Podobno je pri J-LP dosegel 48 %, čeprav se je po začetku suše masa odmrlega zelinja komaj opazno povečevala, ker ruša po košnji praktično ni več pognala. Enak je bil potek pri R-LP, kjer je masa odmrlega zelinja dosegla le 25 % *WLVD* povprečnega leta 2005. Pri J-PP je bilo odmiranje zelinja enakomernejše, podobno kot pri J-DG, le v manjši meri.

Prav tako se v sušnem obdobju ne morejo v polni meri razrasti korenine, pa čeprav se ob pomanjkanju vode tja prerazporedi več asimilatov (Slika 49). V povprečnem letu 2005 je simulirana masa korenin pri J-DG po enakomernem naraščanju v sezoni dosegla skoraj 5000 kg_{SS} ha⁻¹, enako tudi v letu 2009, ko je bil pridelek nekoliko manjši.



Slika 49: Masa korenin (*WRT*) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988)

Figure 49: Roots mass (*WRT*) of cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass in Jablje (J-PP), and perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) in the dry year of 2003 and the average year of 2005 (J-DG also in 2009, J-LP in 1988)



Slika 50: Indeks listne površine (LAI, levo) ter kumulativno fotosintetsko aktivno sevanje (PAR) in kumulativno prestreženo fotosintetsko aktivno sevanje (PARAB) (desno) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za suho leto 2003 in povprečno leto 2005 (za J-DG še leto 2009, za J-LP 1988)

Figure 50: Leaf area index (LAI, left), and the cumulative amount of photosynthetically active radiation (PAR) and the cumulative amount of PAR as intercepted by the crop canopy (PARAB) (right) of cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass in Jablje (J-PP), and perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) in the dry year of 2003 and the average year of 2005 (J-DG also in 2009, J-LP in 1988)

V letu 2003 je *WRT* tudi med sušnim obdobjem naraščal precej enakomerno, a precej počasneje; ob koncu sezone je tako dosegel 62 % vrednosti *WRT* v letu 2005. V preostalih treh primerih je bila že v letu 2005 masa korenin precej manjša, med približno 3000 in 4000 kg_{SS} ha⁻¹, v letu 2003 pa se je po začetku suše komaj opazno povečevala in ostala pod 2000 kg_{SS} ha⁻¹.

Kumulativno prestreženo fotosintetsko aktivno sevanje (*PARAB*) je neposredno povezano z indeksom listne površine (*LAI*), pri tem pa je očiten zelo velik vpliv suše. *LAI* je prek konstante *SLA* povezan z maso zelenih listov (*WLVG*), potek *WLVG* je torej enak kot potek *LAI*.

V letu 2005 se je *LAI* (Slika 50, levo) močno zmanjšal le ob košnjah, v Jabljah se po tretji košnji ni veliko povečal. Drugačen je bil potek po tretji košnji v Rakičanu, kjer so košnje samo tri, poleg tega so tu največje vrednosti *LAI* dosegle skoraj 6 m²m⁻², v Jabljah pa do okoli 9 m²m⁻². Podobno je bilo pri J-DG v letu 2009, graf *LAI* jasno potrjuje našo prejšnjo ugotovitev, da je bil kočni pridelek zmanjšan zaradi primanjkljaja vode v avgustu, ko se je *LAI* zmanjševal že pred tretjo košnjo, po njej pa se ni več dosti povečal. Pred avgustom je bil *LAI* toliko večji kot v letu 2005, da je bil kumulativni *PARAB* (Slika 50, desno) ob koncu vegetacijskega obdobja 2009 celo večji kot ob koncu vegetacijskega obdobja 2005. Glede na *PAR* je bil prestrežen delež v obeh letih skoraj enak: 72 in 73 %.

V letu 1988 je bil pridelek pri J-LP zmanjšan, ker je predvsem primanjkljaj *SMACT* povzročil manjše naraščanje *LAI* po prvi in tretji košnji. V letu 2003 je *LAI* izredno lepo pokazal, kaj se zaradi suše dogaja s travno rušo. Trpežna ljuljka si po prvi košnji zaradi suše ni več opomogla, navadna pasja trava in travniški mačji rep pa sta se jeseni močno razrasla, največji *LAI* je bil pri prvi precej večji kot v letu 2005, pri drugi pa enak.

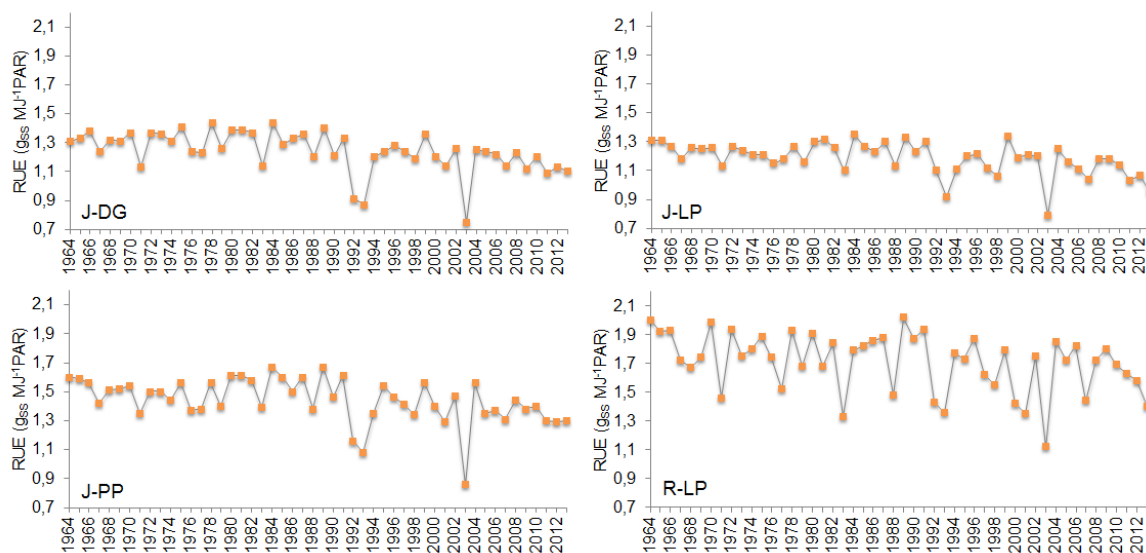
4.3.4 Učinkovitost izrabe sončnega obsevanja in dušika

Kot smo komentirali pri grafih *YIELD* (Slika 47), je bila v letu 2003 najmanjša izguba pridelka pri J-DG. Grafa *PAR* in *PARAB* kažeta, da je bil pri J-DG prestrežen precej večji del *PAR* (59 %) kot pri preostalih primerih (32 % pri J-LP, 42 % pri J-PP in 27 % pri R-LP). Tudi Wolf (2006) navaja, da je posledica večjega *PARAB* večji *YIELD*, hkrati pa tudi večji *WLVD*, saj večja pridelava biomase v povprečju pomeni večji *LAI*, to pa privede do večjega odmiranja zelinja zaradi samozasenčenja.

V Jabljah je bil kumulativni *PARAB* v povprečnem letu 2005 1200–1600 MJ_{PAR} m⁻²leto⁻¹, v Rakičanu 1200 MJ_{PAR} m⁻²leto⁻¹. V suhem letu 2003 je bil *PARAB* v Jabljah 800–1500 MJ_{PAR} m⁻²leto⁻¹ in v Rakičanu le 650 MJ_{PAR} m⁻²leto⁻¹. Wolf (2006) je pri 5-letnem modeliranju rasti in pridelka trpežne ljuljke z modelom LINGRA pri optimalni preskrbljenosti z vodo in hranili pokazal, da *YIELD* narašča od Wageningna (Nizozemska) prek Bologne (Italija) do Seville (Španija). Po njegovih opažanjih gre to pripisati razlikam v dolžini rastne dobe in v višini kumulativnega *PARAB*. Slednji za omenjene lokacije

narašča od 1200–1600 MJ_{PAR} m⁻²leto⁻¹ (Wageningen) prek 1700–2000 MJ_{PAR} m⁻²leto⁻¹ (Bologna) do 2700–2800 MJ_{PAR} m⁻²leto⁻¹ (Sevilla).

Poteka *RUE* (Slika 51) in *TRANRF* sta bila v 50-letnem obdobju zelo podobna, največja povezava se je pokazala v omenjenih sušnih letih. Ob majhnih vrednostih *TRANRF* so ostajale v Jabljah vrednosti *RUE* pod 1,1 g_{SS} MJ⁻¹_{PAR}, ob dobri preskrbljenosti z vodo (*TRANRF* = 1) pa so dosegale vrednosti med 1,3 in 1,7 g_{SS} MJ⁻¹_{PAR}. V Rakičanu je bila učinkovitost boljša: ob majhnih vrednostih *TRANRF* je bil *RUE* pod 1,5 g_{SS} MJ⁻¹_{PAR} in pri dobri preskrbljenosti z vodo nad 1,9 g_{SS} MJ⁻¹_{PAR}. Tudi Bonesmo in Belanger (2002) navajata, da ima sušni stres velik vpliv na učinkovitost izrabe sončnega obsevanja (*RUE*). Zmanjšanje *RUE* zaradi suše pa je odvisno od njene intenzitete in trajanja ter časa, v katerem nastopi (Handbook ..., 2005).



Slika 51: Učinkovitost izrabe sončnega obsevanja (*RUE*) za vse štiri primere za celotno obdobje 1964–2013. Zgoraj levo navadna pasja trava v Jabljah (J-DG), zgoraj desno trpežna ljujka v Jabljah (J-LP), spodaj levo travniški mačji rep v Jabljah (J-PP), spodaj desno trpežna ljujka v Rakičanu (R-LP).

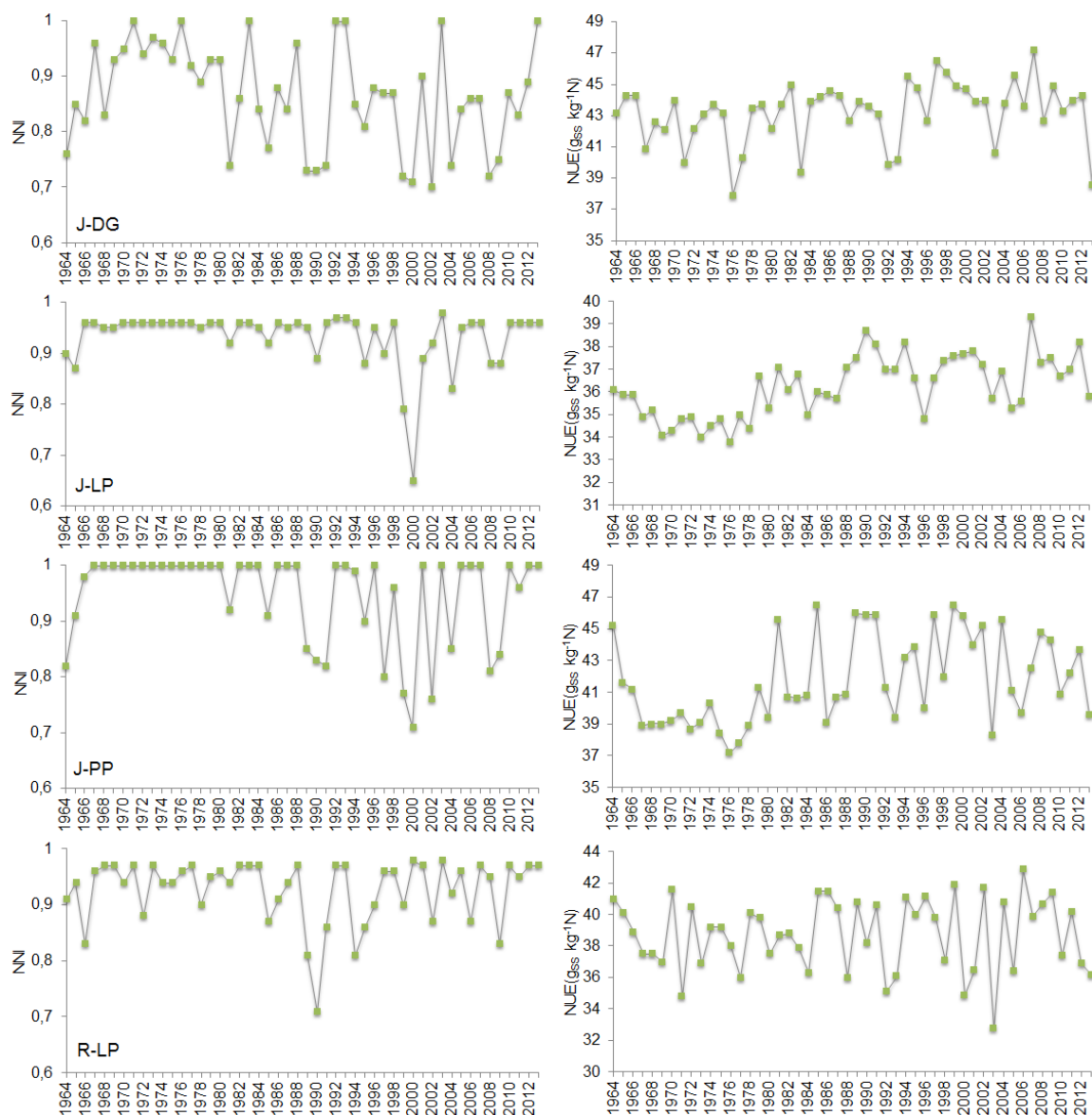
Figure 51: Radiation use efficiency (*RUE*) for all study cases for the entire period 1964–2013. Upper left: cock's foot in Jablje (J-DG), upper right: perennial ryegrass in Jablje (J-LP), lower left: timothy grass in Jablje (J-PP), lower right: perennial ryegrass in Rakičan (R-LP).

Indeks preskrbljenosti z dušikom *NNI* in učinkovitost izrabe dušika *NUE* (Slika 52) nista neposredno povezana z obravnavanimi meteorološkimi spremenljivkami ali preostalimi obravnavanimi modelskimi izhodnimi spremenljivkami.

Previdni moramo biti predvsem pri interpretaciji *NNI*, da ne bi povezovali dobre preskrbljenosti z dušikom (*NNI* = 1) z velikim pridelkom. Pri modeliranju se je, na primer, za J-DG izkazalo, da je *NNI* dosegel vrednost 1 v letih 1971, 1976, 1983, 1992, 1993, 2003 in 2013, ki so bila v večini izredno sušna, pridelek pa je bil precej zmanjšan. Nasprotno pa so bile v teh letih vrednosti *NUE* najmanjše. V sušnem letu, ko je biomase precej manj, namreč potrebujemo za dobro preskrbljenost travne ruše manjši sprejem dušika.

Zanimivo je, da je v Jabljah *NNI* pri J-DG precej bolj spremenljiv, pri J-LP in J-PP pa je v začetni tretjini obravnavanega 50-letnega obdobja preskrbljenost skoraj ves čas optimalna.

Glede na to, da je modul za dušik novost v modelu LINGRA-N, zaenkrat ni objavljenih rezultatov drugih raziskav, s katerimi bi naše rezultate lahko primerjali.

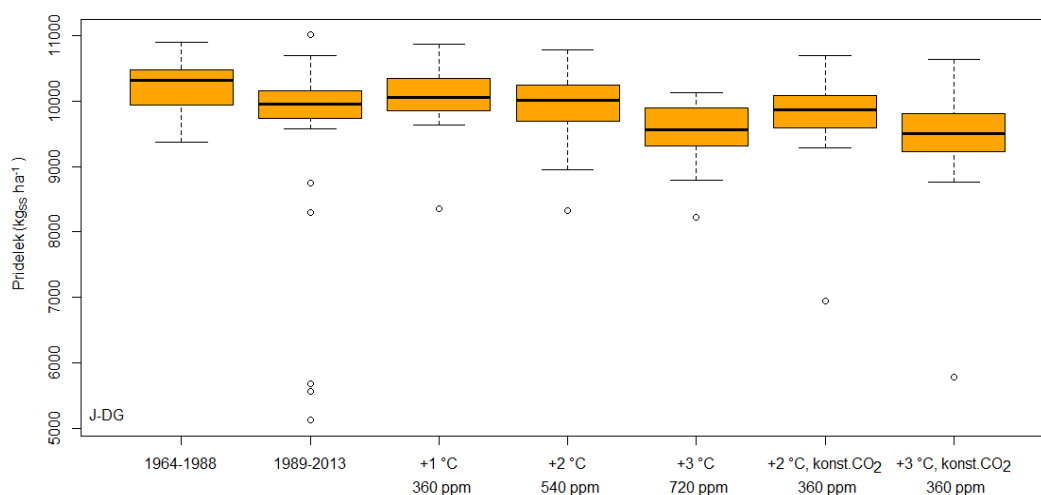


Slika 52: Indeks preskrbljenosti z dušikom (*NNI*, levo) in učinkovitost izrabe dušika (*NUE*, desno) za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljuljko (J-LP) in travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP) za celotno obdobje 1964–2013

Figure 52: Nitrogen nutrition index (*NNI*, left) and nitrogen use efficiency (*NUE*, right) for cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass in Jablje (J-PP), and perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) for the entire period 1964–2013

4.3.5 Primer uporabe modela LINGRA-N za simulacijo vpliva povišanih temperatur zraka

Model nam omogoča raziskovanje vplivov spremenjenih podnebnih razmer na komponente rasti in pridelek. Kot smo opisali v poglavju 3.6, smo se odločili, da za primer uporabe prikažemo vpliv povišane temperature zraka in koncentracije CO₂. Najnižje in najvišje temperature zraka smo povišali glede na obdobje 1964–1988. Že pri tem se moramo zavedati, da v model vnašamo dodatno negotovost, ob uporabi kompleksnih podnebnih scenarijev pa se negotovost modelskega napovedovanja rasti in pridelka travne ruše močno poveča. Angulo in sod. (2013) poročajo, na primer, da rezultati kažejo nekoliko povečano variabilnost pridelka zaradi podnebnih sprememb, a hkrati opozarjajo, da so negotovosti še večje pri izbiri scenarijev, predvsem če upoštevamo vplive koncentracije CO₂ in razvoja tehnologije. Vpliv povišane temperature zraka in koncentracije CO₂ ima na različnih lokacijah po Evropi različne učinke (Schapendonk in sod., 1998; Thornley in Cannell, 1997).

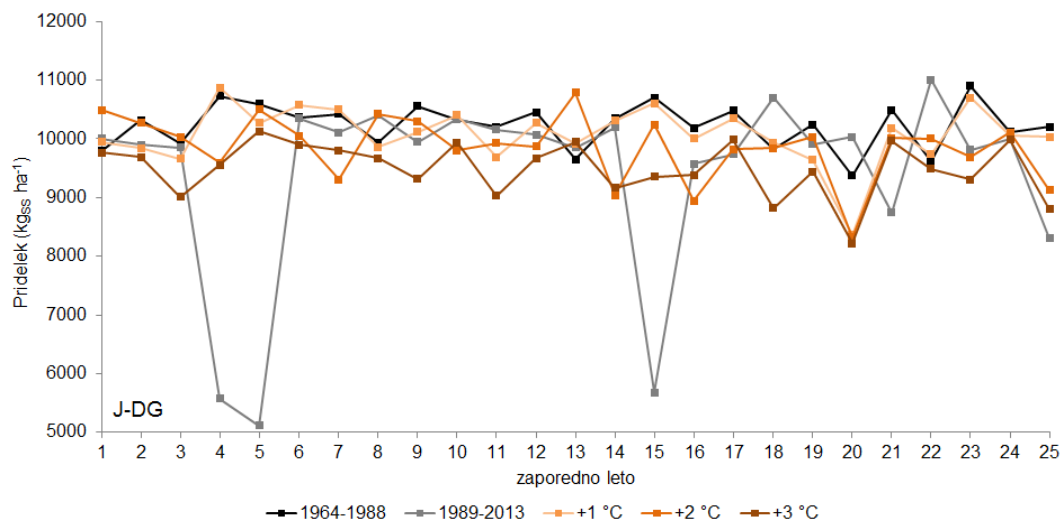


Slika 53: Okviri z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) navadne pasje trave v Jabljah (J-DG) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)

Figure 53: Boxplots of annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of cock's foot in Jablje (J-DG) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) and 3 °C (CO₂ 720 ppm) against 1964–1988, and raised air temperatures with unchanged CO₂ concentration (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)

Pri naših rezultatih se najbolj zanašamo na primer J-DG (Slika 53, Slika 54), ki se je pri umerjanju modela najbolj obnesel. Mediana pridelka se pri povišanju temperature zraka postopno zmanjšuje, najbolj opazno pri varianti +3 °C, tako pri višji koncentraciji CO₂ (720 ppm) kot tudi pri nespremenjeni (360 ppm). Rezultati za obdobje 1989–2013 so po mediani in poteku najbolj primerljivi z varianto +2 °C (koncentracija CO₂ 540 ppm ali 360

ppm), a z več osamelci, ki jih očitno lahko pričakujemo, čeprav jih takšne simulacije ne morejo prikazati v polni meri. Pri nespremenjeni koncentraciji CO₂ in višjih temperaturah zraka sta osamelca precej bolj izrazita.

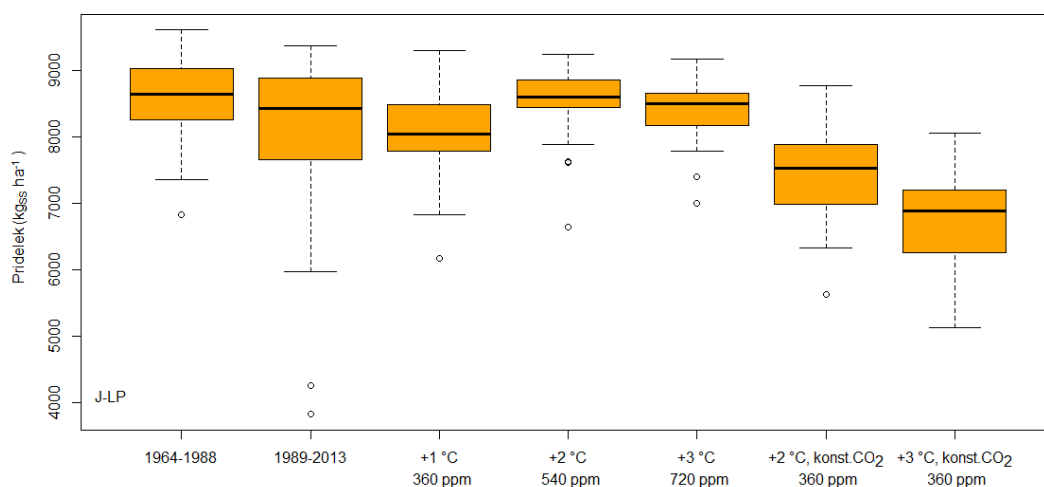


Slika 54: Letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) navadne pasje trave v Jabljah (J-DG) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988

Figure 54: Annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of cock's foot in Jablje (J-DG) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, and minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) and 3 °C (CO₂ 720 ppm) against 1964–1988

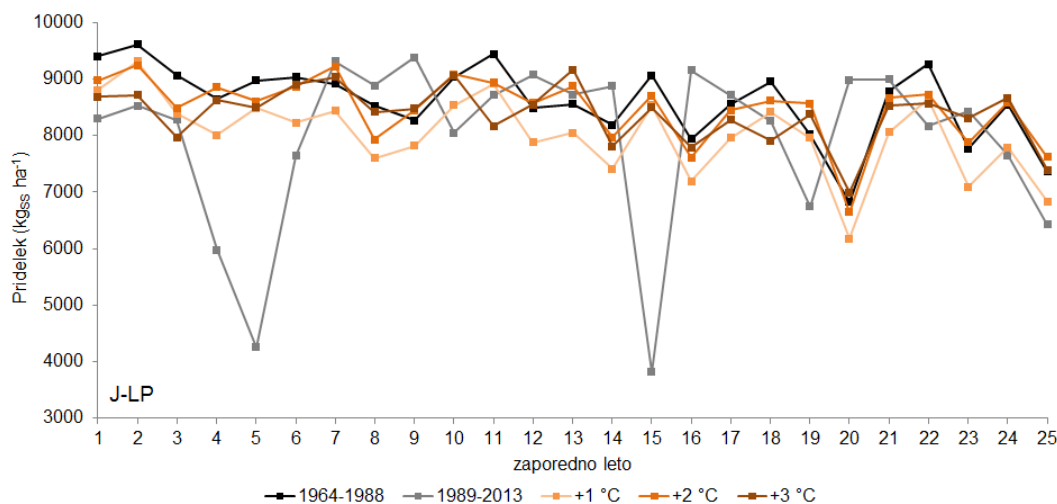
Nekoliko drugačni so rezultati pri J-LP (Slika 55, Slika 56). Glede na mediano se pridelek bolj zmanjša pri varianti +1 °C, kot pri +2 °C (koncentracija CO₂ 540 ppm) in +3 °C (koncentracija CO₂ 720 ppm). Pri tem ohrani variabilnost, podobno referenčni, pri drugih dveh variantah pa sta kvartilni in variacijski razmik manjša, a se pri obeh pojavita dva osamelca.

Lahko da imajo najprej višje temperature zraka negativni vpliv hitrejšega staranja in večje porabe vode, nato pa prevlada pozitiven učinek spomladanskega hitrejšega začetka rasti – podobno navajajo Schapendonk in sod. (1998). Tudi pri J-LP je mediana pridelka v 1989–2013 najbližje varianti +2 °C, variabilnost pa je mnogo večja. Pri J-LP je pozitiven vpliv višje koncentracije CO₂ bolj viden. Če ta ostane nespremenjena, se mediana pridelka premakne k precej manjšim vrednostim, kvartilni in variacijski razmik pa se povečata.



Slika 55: Okviri z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljujke v Jabljah (J-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)

Figure 55: Boxplots of annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of perennial ryegrass in Jablje (J-LP) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) and 3 °C (CO₂ 720 ppm) against 1964–1988, and raised air temperatures with unchanged CO₂ concentration (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)

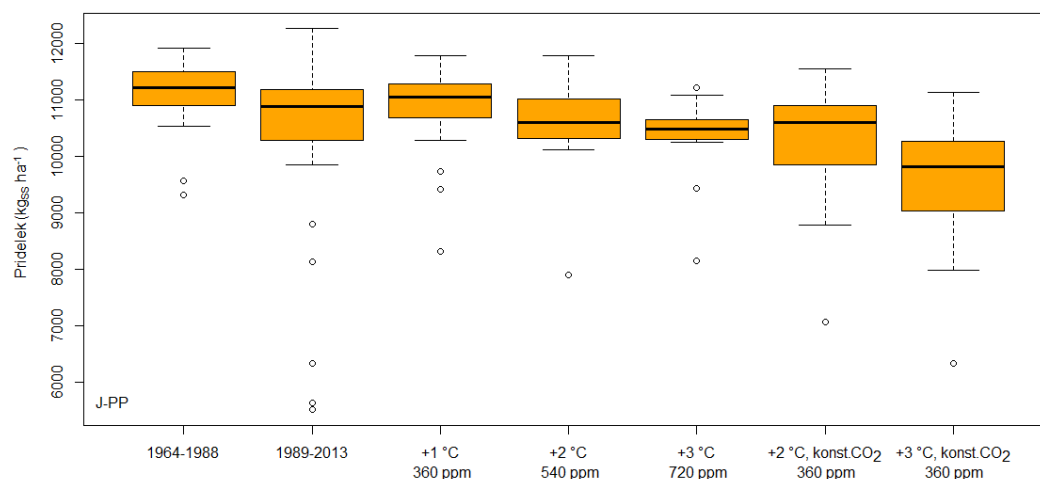


Slika 56: Letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljujke v Jabljah (J-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnavanega 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988

Figure 56: Annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of perennial ryegrass in Jablje (J-LP) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, and minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) and 3 °C (CO₂ 720 ppm) against 1964–1988

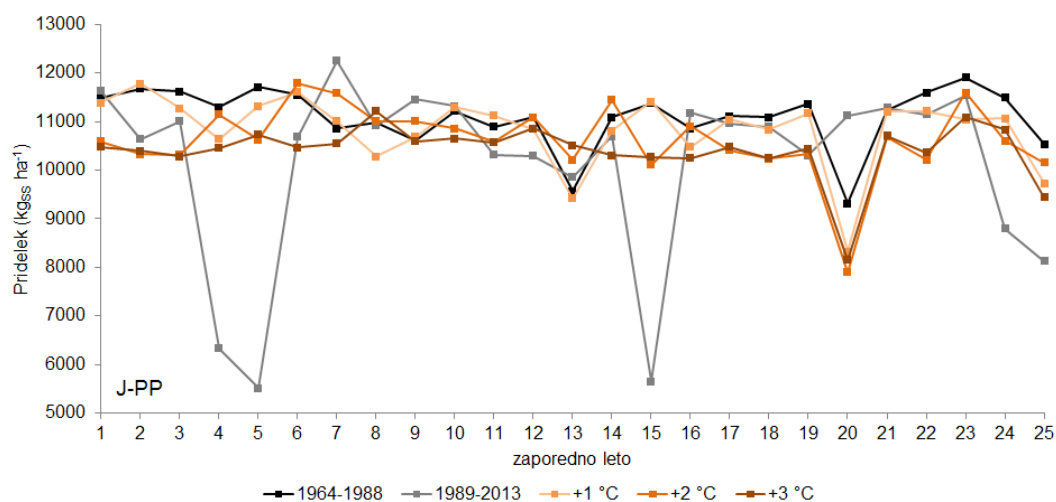
Rezultati za J-PP (Slika 57, Slika 58) so podobni rezultatom za J-DG, z višanjem temperature zraka se mediana pridelka zmanjšuje. Pri nespremenjeni koncentraciji CO₂ so

simulacije podobne kot pri J-LP: zelo opazen je premik k manjšim vrednostim pridelka ter povečana variabilnost.



Slika 57: Okviri z ročaji za letni pridelok suhega zelinja (*GRASS*) travniškega mačjega repa v Jabljah (J-PP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)

Figure 57: Boxplots of annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of timothy grass in Jablje (J-PP) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) and 3 °C (CO₂ 720 ppm) against 1964–1988, and raised air temperatures with unchanged CO₂ concentration (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)



Slika 58: Letni pridelok suhega zelinja (*GRASS*) travniškega mačjega repa v Jabljah (J-PP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnavanega 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988

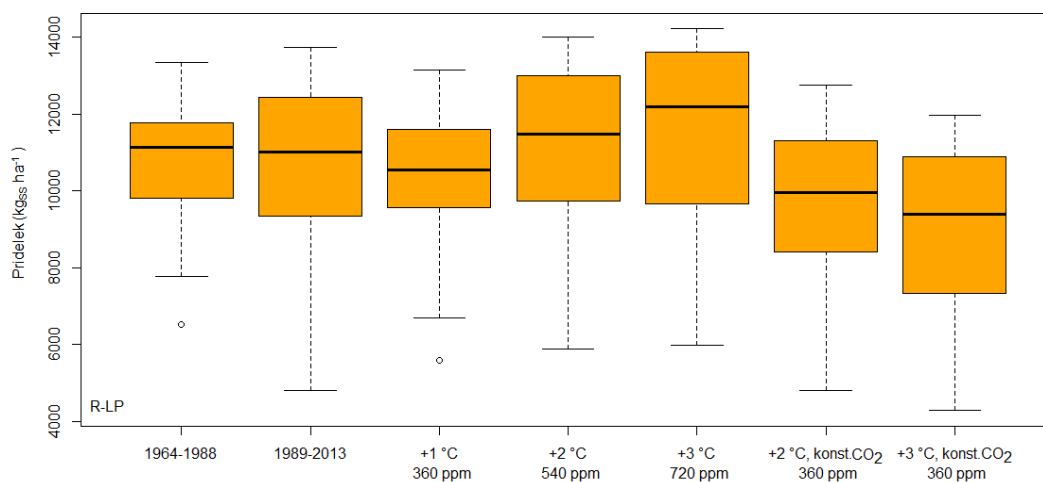
Figure 58: Annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of timothy grass in Jablje (J-PP) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, and minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) and 3 °C (CO₂ 720 ppm) against 1964–1988

V vseh treh primerih v Jabljah so se pri zvišanju temperature zraka pri simulacijah pridelka začeli pojavljati osamelci (eden do trije).

Podobno so modelske simulacije s prilagojenim modelom LINGRA za obravnavo travniškega mačjega repa na Norveškem pokazale, da lahko dvig povprečne temperature zraka za 3 °C povzroči opazne izgube pridelka (Höglind in sod., 2001).

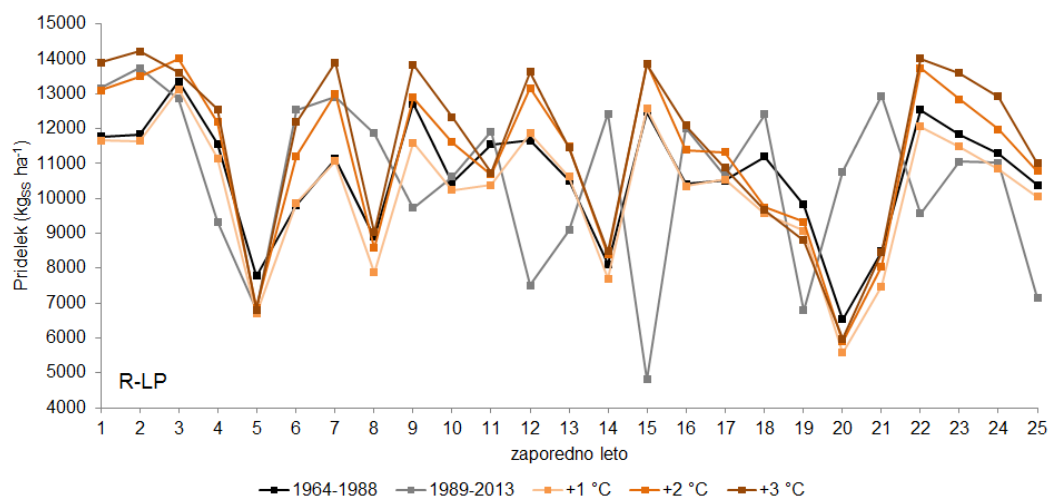
Na linijskih diagramih (višji temperatura zraka in koncentracija CO₂) lahko vidimo (Slika 54, Slika 56, Slika 58, Slika 60), da se je le pri J-DG v 13. letu v nizu zgodilo, da je pridelek pri vseh treh variantah povišanja temperature zraka večji kot v referenčnem obdobju 1964–1988. Za v osnovi sušno leto, kot je bilo, na primer, leto 1983 (20. leto v nizu), se je po pričakovanjih pokazalo, da povišanje temperatur zraka pomeni precej manjši pridelek.

Za R-LP (Slika 59, Slika 60) so rezultati zaradi slabše umerjenega modela manj zanesljivi. Poleg tega je variabilnost za vse variante izredno velika, saj je bila velika že v referenčnem obdobju. Mediana pridelkov se v tem primeru najprej nekoliko zmanjša, nato pa se ob višjih temperaturah zraka v kombinaciji z višjo koncentracijo CO₂ povečuje. Tudi v tem primeru se kaže izrazito pozitiven učinek višje koncentracije CO₂ na pridelek, saj se ob nespremenjeni koncentraciji mediana pridelka ob višjih temperaturah zraka premakne k veliko manjšemu pridelku.



Slika 59: Okviri z ročaji za letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljujke v Rakičanu (R-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici 50-letnega obdobja, pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO₂) za 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) in 3 °C (CO₂ 720 ppm) glede na 1964–1988 ter pri povišanih temperaturah zraka in nespremenjeni koncentraciji CO₂ (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)

Figure 59: Boxplots of annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO₂ 360 ppm), 2 (CO₂ 540 ppm) and 3 °C (CO₂ 720 ppm) against 1964–1988, and raised air temperatures with unchanged CO₂ concentration (+2 °C, konst. CO₂; +3 °C, konst. CO₂)



Slika 60: Letni pridelek suhega zelinja (*GRASS*) trpežne ljuljke v Rakičanu (R-LP) v prvi (1964–1988) in drugi (1989–2013) polovici obravnavanega 50-letnega obdobja ter pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka (povišana je tudi koncentracija CO_2) za 1 (CO_2 360 ppm), 2 (CO_2 540 ppm) in 3 °C (CO_2 720 ppm) glede na 1964–1988

Figure 60: Annual herbage dry matter yield (*GRASS*) of perennial ryegrass in Rakičan (R-LP) for the first (1964–1988) and the second (1989–2013) half of the 50-year period, and minimum and maximum air temperatures raised by 1 (CO_2 360 ppm), 2 (CO_2 540 ppm) and 3 °C (CO_2 720 ppm) against 1964–1988

Rezultati kažejo očiten pozitiven vpliv višje koncentracije CO_2 na pridelek. Pri tem se moramo zavedati, da lahko z večjo gotovostjo pričakujemo nadaljnje segrevanje ozračja, ki se že dogaja, kot pa naraščanje koncentracije CO_2 v taki meri. To pa nakazuje slabše prihodnje razmere za rast travne ruše.

Pri modeliranju Schapendonka in sod. (1998) se je pri višjih temperaturah zraka (+3 °C) pridelek povečal za 4 do 15 %, ko voda ni bila omejujoč dejavnik, ob zmanjšanju količine padavin pa le še za 1 do 7 %. Kot smo že omenili, Trnka in sod. (2011) opozarjajo, da je pri ocenjevanju vplivov podnebnih sprememb na pridelek travne ruše nujno upoštevati učinke suše. Zaskrbljujoče je predvsem novo pojavljanje osamelcev (trije v 25-letnem obdobju predstavljajo že 12 %), ki so z izjemo enega pri J-PP vsi velika odstopanja v negativnem smislu.

4.4 ZAKLJUČKI

Pri analizi fenoloških podatkov bi želeli obravnavati daljše neprekinjeno obdobje, a je zaradi vmesne menjave načina opazovanja na ARSO to nemogoče. Kljub temu se je v obdobju 1998–2013 glede na 1968–1983 pokazal velik statistično značilen premik začetka cvetenja navadne pasje trave na zgodnejše datume. Pri tem moramo upoštevati, da opazovalci v vmesnem obdobju niso opazovali cvetenja in zato lahko nekaj odstopanja pri drugem obdobju pripišemo novemu ponovnemu začetku opazovanj. V omenjenih obdobjih so se spremenile tudi korelacije med dnevom nastopa cvetenja in povprečnimi temperaturami zraka v enem, dveh ali treh mesecih pred začetkom cvetenja.

Za model LINGRA-N lahko rečemo, da je umerjanje v nekaterih primerih travnih monokultur dobro uspelo, za vsak primer je bil določen set umerjenih parametrov. Najboljši so rezultati za navadno pasjo travo v Jabljah (J-DG) ($RMSE\% = 12\%$, kazalec ujemanja $d_w = 0,84$), po umeritvi je simulirani pridelek v celotnem obdobju trdno znotraj okvira najmanjših in največjih izmerjenih vrednosti. Simulacija je odlična za sušno leto 2003 in zelo dobra za leta 2001, 2011, 2012 in 2013.

Pri rezultatih umerjanja za trpežno ljuljko v Jabljah (J-LP) so simulirani pridelki zelo blizu izmerjenim v letih 2002, 2003, 2009 in 2011. V splošnem je ujemanje nekoliko slabše kot pri J-DG. Za travniški mačji rep v Jabljah (J-PP) pa se potek odlično ujema v letih 2002–2004, 2007 in 2010, dobro tudi v 2012 in 2013. Slabši so rezultati za leta 1999, 2006, 2008, 2011. V Rakičanu je za trpežno ljuljko (R-LP) ujemanje z izmerjenimi pridelki najboljše v letih 1999, 2003, 2006 in 2009. Rezultati umerjanja za travniški mačji rep v Rakičanu so bili nekoliko slabši, zato jih nismo uporabili za nadaljnje simulacije.

Rezultati umerjanja za trpežno ljuljko na dveh lokacijah so enaki za naslednje parametre: indeks listne površine, pri katerem se začne samozasenčenje, indeks listne površine, ki ostane po košnji, koeficient slabitve za difuzno sevanje ter za parametre, ki se nanašajo na obnašanje dušika: optimalna koncentracija dušika kot delež najvišje, najvišja koncentracija dušika v koreninah kot delež najvišje koncentracije dušika v listih in najvišja koncentracija dušika v listih. To pomeni, da ti parametri v našem primeru niso lokacijsko značilni, temveč so vezani na lastnosti trpežne ljuljke. Po drugi strani pa se je pri umerjanju za tri različne travne monokulture v Jabljah izkazalo, da so rezultati enaki za specifično listno površino, največjo učinkovitost izrabe sončnega obsevanja, faktor zmanjšanja učinkovitosti izrabe sončnega obsevanja v odvisnosti od nizkih najnižjih temperatur zraka in začetno globino korenin. Ti so v našem primeru lokacijsko značilni in niso odvisni od vrste trave.

Za trajno travinje umerjanje pri nobenem od obravnavanih poskusov (S72 v Ljubljani in S9 v Brestanici) ni bilo uspešno in zato modela nismo mogli uporabiti za nadaljnje simulacije.

Modelske simulacije za 50-letno obdobje (1964–2013) imajo velik pomen. Z njimi smo dobili vpogled v nekatere interakcije med meteorološkimi spremenljivkami in spremenljivkami, ki opisujejo rast travne ruše. Simulacije pokažejo dinamiko različnih spremenljivk in njihov vpliv na pridelek suhega zelinja. Najjasneje se je pokazal vpliv suše. Stopnja kompleksnosti modela je primerna predvsem za simulacijo pridelka suhega zelinja in ne za razumevanje vseh procesov v rastlini.

Pri analizi časovnih vrst letnih rezultatov simulacij potencialnega pridelka se je pokazal statistično značilen ($p = 0,05$) negativni trend za primera J-LP ($-24 \text{ kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$) in J-PP ($-29 \text{ kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$). Statistično se sprememba variabilnosti ni pokazala v nobenem primeru, vendar pa so se v Jabljah v drugi polovici obravnavanega obdobja pri simuliranem pridelku suhega zelinja (GRASS) začeli pojavljati osamelci, ki jih v prvi polovici ni bilo. GRASS je bil v Jabljah najmanjši v letih 1992, 1993 in 2003, v Rakičanu

pa v letih 1983, 1993, 2003, 2007 in 2013. Tudi modelski faktor za zmanjšanje rasti zaradi suše (*TRANRF*), ki je v modelu mera za sušo, je v teh letih najmanjši. Iz oblike naključne komponente razčlenjene časovne vrste dnevni podatkov *TRANRF* lahko sklepamo, da se variabilnost v drugi polovici obdobja povečuje.

Potencialni pridelek ni v nobenem primeru statistično značilno odvisen niti od posameznih meteoroloških spremenljivk niti od njihove kombinacije. Pokazala se je le povezava izredno majhnega pridelka z visokimi temperaturami zraka (najvišjimi in najnižjimi), majhno količino padavin in zelo negativno vodno bilanco poleti in v vegetacijskem obdobju. Zaključili smo torej lahko le, da se pridelek zmanjša v izrazito sušnih ali sušnih in vročih letih.

Odzivi posameznih vrst trave na sušo so bili v sušnem letu 2003 zelo dobro vidni. Vsebnost vode v tleh močno določa pridelek travne ruše, med drugim močno vpliva na indeks listne površine. Prav tako se v sušnem obdobju ne morejo v polni meri razrasti korenine. Pri navadni pasji travi v Jabljah je masa korenin (*WRT*) v letu 2003 tudi med sušnim obdobjem naraščala precej enakomerno, a precej počasneje; ob koncu sezone je tako dosegla 62 % vrednosti *WRT* v letu 2005. Pri J-DG je bilo v letu 2003 prestreženih 59 % fotosintetsko aktivnega sevanja (v letu 2005 72 %), pri J-LP 32 %, pri J-PP 42 % in pri R-LP 27 %. Potrdil se je velik vpliv suše na učinkovitost izrabe sončnega obsevanja.

Pri modeliranju pridelka suhega zelinja ob višjih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka ter povišani koncentraciji CO₂ se v večini primerov mediana pridelka zmanjšuje. Rezultati za obdobje 1989–2013 so najbolj primerljivi z varianto dviga temperatur zraka za 2 °C. Za v osnovi sušno leto, kot je bilo, na primer, leto 1983, se je po pričakovanjih pokazalo, da povišanje temperatur zraka pomeni precej manjši pridelek. V vseh treh primerih v Jabljah so se pri zvišanju temperature zraka pri pridelku suhega zelinja začeli pojavljati osamelci (eden do trije). Pri višjih temperaturah zraka ob nespremenjeni koncentraciji CO₂ se mediana pridelka premakne še k manjšim vrednostim, hkrati pa se poveča variabilnost pridelka.

Rezultati osvetlujejo pomen novih raziskav, tako poljskih poskusov kot modelskih simulacij. Najboljša rešitev bi bilo načrtovanje travniških poskusov več let vnaprej, pri katerih bi dodatno vključili meritve nekaterih pomembnih parametrov in spremenljivk, kot so indeks listne površine, indeks listne površine po košnji, specifična listna površina, začetna gostota poganjkov, masa zelenih listov ipd. Prav tako bi bilo zelo koristno, če bi se na mestu poskusa izvajale meritve vsebnosti vode v tleh. Pomembna dejavnika pri izbiri lokacije sta bližina meteorološke postaje in dostopnost pedoloških podatkov (ali izkop profila ob izvajanju poskusa). Za modeliranje bi bilo najbolj uporabno, če bi spremljali eno do dve leti staro travno rušo, s čimer bi izločili vpliv starosti na rezultate.

Zavedati se moramo negotovosti, ki jo prinašajo modelski rezultati. Ta izvira iz netočnosti vhodnih podatkov (meteoroloških, pedoloških, podatkov o gospodarjenju), iz (za določeno

obdobje) umerjenih modelskih parametrov, iz modelske strukture in koncepta. Zato je pomembno, da za določanje vpliva vremena, podnebja in podnebnih sprememb na rast in pridelek travne ruše naredimo čim več različnih simulacij. Za Slovenijo so pomembnejše simulacije za trajno travinje, a ob doslej neuspelem umerjanju bi bilo najbolje nadaljevati po korakih, z različnimi travnimi monokulturami na različnih lokacijah. V nadaljevanju pa bi bil velik izziv uspeti pri trajnem travinju, morda s podatki iz novejših poskusov, pri katerih bi po možnosti imeli dodatno na voljo meritve katere izmed vhodnih ali izhodnih spremenljivk.

5 SKLEPI

- a. Analiza fenološke faze začetka cvetenja navadne pasje trave v dveh 16-letnih obdobjih (1968–1983 in 1998–2013) na 12 fenoloških postajah po Sloveniji je pokazala statistično značilen ($p = 0,01$) premik povprečnega nastopa faze na zgodnejše datume, in sicer za 7 do 18 dni. V prvem obdobju ima največ postaj (od osmih, primernih za nadaljnjo obravnavo) največjo korelacijo nastopa cvetenja s trimesečnim povprečjem temperatur zraka od marca do maja, pri čemer so koeficienti korelacije med 0,68 in 0,82. V drugem obdobju so razen v Staršah vsi koeficienti korelacije občutno manjši, največji za vsako postajo so med 0,53 in 0,65. V primerjavi s prvim obdobjem so največje korelacije v drugem obdobju s povprečji en mesec zgodnejših temperatur zraka. Za prvo obdobje so v vseh letih vsote aktivnih temperatur zraka do fenološke faze cvetenja v intervalu med 650 in 1100 °C, v drugem obdobju pa se interval raztegne na 510 do 1110 °C.
- b. Dinamični model LINGRA-N se je po primerjavi z drugimi modeli zdel najboljši izbor za začetek modeliranja rasti in pridelka travne ruše v Sloveniji. Omogoča pripravo (in menjavo) vhodnih podatkov na enostaven način, prav tako ni težav pri uporabi meteoroloških spremenljivk, ki opisujejo pretekle ali prihodnje podnebne razmere. Pri pripravi vhodnih podatkov se je izkazalo, da so v Sloveniji meteorološki in pedološki podatki dobro dostopni, vendar prostorska pokritost ni najboljša. Dobro dostopni so tudi podatki o gospodarjenju s travno rušo pri poskusih, večino parametrov rastline pa je treba umeriti, ker niso izmerjeni.
- c. Delno moramo hipotezo o pričakovanem uspešnem umerjanju modela LINGRA-N zavrniti, saj za trajno travinje (poskusa v Ljubljani in Brestanici) modela nismo mogli dovolj dobro umeriti, da bi ga lahko uporabili za nadaljnje simulacije. Kazalec ujemanja d_w za poskus S72 v Ljubljani je le 0,37. Po drugi strani pa je bilo umerjanje uspešno za nekatere travne monokulture pri poskusih v Jabljah in Rakičanu. Najboljše je ujemanje za navadno pasjo travo v Jabljah ($RMSE\% = 12\%$, $d_w = 0,84$), sledi travniški mačji rep v Jabljah, nato trpežna ljuljka v Jabljah in v Rakičanu.
- d. Naredili smo 50-letne (1964–2013) simulacije rasti in pridelka travne ruše za tri monokulture, od tega za eno na dveh lokacijah. Modeliran potencialni pridelek ni v nobenem primeru statistično značilno odvisen od nobene meteorološke spremenljivke ali njihove kombinacije. Pokazala pa sta se izrazita odvisnost rasti od padavinskih razmer ter zmanjšanje pridelka suhega zelinja v najbolj sušnih ali vročih in sušnih vegetacijskih obdobjih. V primeru snežnih razmer pa so interakcije med različnimi okoljskimi faktorji preveč kompleksne in imajo precej večji pomen pri višjih geografskih širinah. Model modula za sneg ne vsebuje. Za Slovenijo smo

v predhodnih izračunih ugotovili, da ni neposredne povezave med pridelkom travne ruše in količino snega ali trajanjem snežne odeje.

- e. Prikazali smo, kako lahko uporabimo model tudi v spremenjenih podnebnih razmerah. Glede na pričakovanja za Slovenijo smo simulacije pripravili pri povišanih najnižjih in najvišjih temperaturah zraka ter višji ali nespremenjeni koncentraciji CO₂: +1 °C (360 ppm), +2 °C (360 in 540 ppm) in +3 °C (360 in 720 ppm). Rezultati za obdobje 1989–2013 so po mediani pridelka in poteku najbolj primerljivi z varianto povišanja temperature zraka za 2 °C (ne glede na CO₂). Mediane pridelkov suhega zelinja se ob povišanih temperaturah zraka in koncentraciji CO₂ večinoma zmanjšujejo, razen v Rakičanu, kjer je variabilnost v vseh primerih zelo velika. Pri povišanju temperature zraka ob nespremenjeni koncentraciji CO₂ se mediane pridelkov še bolj zmanjšajo (tudi v Rakičanu, najmanj opazna je razlika pri navadni pasji travi v Jabljah). Pri vseh treh travnih monokulturah v Jabljah so se pri zvišanju temperature zraka pri simulacijah pridelka začeli pojavljati osamelci (eden do trije), kar kaže na verjetno spremenjeno variabilnost, in sicer v obliki pogostejših zelo velikih zmanjšanj pridelka.
- f. Model LINGRA-N je uporaben za nadaljnje delo, a še ne za operativno rabo. Če se zavedamo negotovosti modelskih rezultatov pri dobro umerjenem modelu, razumemo velik pomen novih raziskav in simulacij, ki bi z večjo gotovostjo opredelile vpliv vremena, podnebja in podnebnih sprememb na rast in pridelek travne ruše. Predvsem je pomembna kakovost vhodnih podatkov, zato bi bili nujni stalni dobro načrtovani daljši travniški poskusi. Priporočamo nadaljnje umerjanje za druge travne kulture, na primer za travniško bilnico, ki je v Sloveniji glavna trava na trajnem travinju. Največji izziv pa bo predstavljalo uspešno modeliranje rasti in pridelka trajnega travinja, pri katerem bi uporabili še druge dostopne podatke iz novejših poskusov in preizkusili nove metode umerjanja ali prilagoditve modela.

6 POVZETEK (SUMMARY)

6.1 POVZETEK

Vrednost travinja postaja čedalje bolj prepoznana. Pridelki travne ruše najbolj nihajo zaradi vremenskih in podnebnih razmer, največje izpade povzročajo sušna obdobja. Za razumevanje odzivov travnih monokultur in trajnega travinja na različne vplive okolja so raziskave na tem področju nujne, tako poljski poskusi kot uporaba agrometeoroloških modelov.

Analizirali smo podatke o fenološki fazi začetka cvetenja navadne pasje trave (*Dactylis glomerata* L.) v dveh 16-letnih obdobjih (1968–1983 in 1998–2013), v vmesnem času se meritve te fenološke faze na Agenciji RS za okolje namreč niso izvajale. Na vseh 12 lokacijah po Sloveniji se je izkazalo, da je navadna pasja trava v drugem obdobju cvetela prej kot v prvem, in sicer za 7 do 18 dni. Spremembe so se pokazale tudi pri nadaljnji obravnavi 8 lokacij v kombinaciji s povprečnimi dnevnimi temperaturami zraka. Korelacije začetka cvetenja in povprečnih temperatur zraka v enem predhodnem mesecu, dveh ali treh so v drugem obdobju manj izrazite in časovno zamaknjene večinoma za en mesec nazaj.

Med vrsto agrometeoroloških modelov, ki simulirajo rast in pridelek travne ruše, se je nizozemski model LINGRA-N (Wolf, 2012) s srednjo zahtevnostjo glede vhodnih podatkov in z dobrimi dosedanjimi rezultati pokazal kot dobra možnost za naše raziskave. Poleg dnevnih meteoroloških podatkov potrebujemo še štiri skupine vhodnih podatkov: specifikacije za vsako simulacijo, ekofiziološke podatke o rastlini, pedološke podatke in podatke o gospodarjenju s travno rušo. Dovolj dobre vhodne podatke za umerjanje smo lahko pripravili za dva poskusa na trajnem travinju (S72 v Ljubljani in S9 v Brestanici; Leskošek, 199?) in pet na travnih monokulturah (navadna pasja trava, trpežna ljujka (*Lolium perenne* L.) in travniški mačji rep (*Phleum pratense* L.)) v Jabljah in Rakičanu (Verbič, 2014). Z analizo občutljivosti smo izločili 11 manj pomembnih parametrov. Preostalih 26 in datume košenj smo za vsak travniški poskus posebej umerjali na podatkih lihih let v 12 korakih z metodo zmanjševanja korena povprečne kvadratne napake (*RMSE*) simuliranih vrednosti pridelka suhega zelinja travne ruše glede na izmerjene. Za preverjanje kakovosti modelskih simulacij smo uporabili *RMSE* (npr. Willmott, 1982; Jegu in sod., 2013) v sodih in vseh letih ter kazalec ujemanja d_w (Willmott, 1982). Pri tem se je za oba poskusa na travnem travinju (S72 in S9) in za poskus na travniškem mačjem repu v Rakičanu izkazalo, da jih ne moremo dovolj dobro umeriti, da bi jih lahko uporabili za nadaljnje modeliranje. Najboljši so rezultati umerjanja za navadno pasjo travo v Jabljah ($RMSE_{\%} = 12 \%$, $d_w = 0,84$).

Rast in pridelek travne ruše smo simulirali v 50-letnem obdobju (1964–2013) za štiri različne umeritve modela – za navadno pasjo travo (J-DG), trpežno ljujko (J-LP) in

travniški mačji rep (J-PP) v Jabljah ter za trpežno ljuljko v Rakičanu (R-LP). Pomembno vlogo pri rasti travne ruše ima vsebnost vode v tleh, med drugim ima zelo velik vpliv na indeks listne površine. Ob majhni količini padavin se predvsem v kombinaciji z visokimi temperaturami zraka pridelek suhega zelinja občutno zmanjša. Kljub temu, da potencialni pridelek ni v nobenem primeru statistično značilno odvisen niti od posameznih meteoroloških spremenljivk niti od njihove kombinacije, lahko na primerih posameznih izstopajočih let zaključimo, da se pridelek zmanjša v izrazito sušnih ali sušnih in vročih letih. V sušnem obdobju se ne morejo v polni meri razrasti korenine, velik je vpliv suše na učinkovitost izrabe sončnega obsevanja: pri J-DG je bilo v letu 2003 prestreženih 59 % fotosintetsko aktivnega sevanja (v letu 2005 72 %), pri J-LP 32 %, pri J-PP 42 % in pri R-LP 27 %. Rezultati se v sušnih letih ujemajo tudi s primerljivimi raziskavami, dobro pa so se, na primer, v najbolj sušnem letu 2003 pokazale tudi lastnosti posameznih vrst trave. Navadna pasja trava sušo najbolj prenaša, zato se je kljub suši potencialni pridelek občasno nekoliko povečal. Trpežna ljuljka sušo najslabše prenaša, zato se po hudem sušnem obdobju niti jeseni potencialni pridelek ni več povečal. Travniški mačji rep v sušnem obdobju miruje in si je nekoliko opomogel v drugi polovici septembra, ko se je povečala vsebnost vode v tleh.

Pri potencialnem pridelku se je pokazal statistično značilen ($p = 0,05$) negativni trend za primera J-LP ($-24 \text{ kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$) in J-PP ($-29 \text{ kg}_{\text{SS}} \text{ ha}^{-1} \text{ leto}^{-1}$). Spremenjena variabilnost se pri simuliranem pridelku suhega zelinja (GRASS) kaže v Jabljah v drugi polovici obravnavanega obdobja s pojavljanjem osamelcev, ki jih v prvi polovici ni bilo. GRASS je bil v Jabljah najmanjši v letih 1992, 1993 in 2003, v Rakičanu pa v letih 1983, 1993, 2003, 2007 in 2013. Prav tako je v teh letih najmanjši modelski faktor za zmanjšanje rasti zaradi suše (TRANRF). Kot kaže analiza časovne vrste, se njegova variabilnost v drugi polovici obdobja povečuje.

Na osnovi dviga najnižjih in najvišjih temperatur zraka za 1, 2 in 3 °C glede na obdobje 1964–1988 smo predstavili primer simulacije vpliva podnebnih sprememb na variabilnost in količino pridelka travne ruše (koncentracija CO₂ je bila pri tem po vrsti 360, 540 in 720 ppm). V večini primerov se je mediana pridelka zmanjšala. Rezultati za obdobje 1989–2013 so najbolj primerljivi z varianto povišanja temperatur zraka za 2 °C. Če ne upoštevamo dviga CO₂ (koncentracija ostane 360 ppm), se pridelki travne ruše še bolj očitno zmanjšajo. Pri vseh treh travnih monokulturah v Jabljah so se pri zvišanju temperatur zraka pri pridelku suhega zelinja začeli pojavljati osamelci (eden do trije).

Zavedati se moramo negotovosti, ki jo prinašajo modelski rezultati. Zato potrebujemo čim večje število različnih modelskih simulacij. Za Slovenijo bi bile zelo pomembne simulacije rasti in pridelka trajnega travinja, a ker umerjanje ni bilo uspešno, priporočamo nadaljevanje z različnimi travnimi monokulturami na različnih lokacijah. Velik izziv predstavlja umerjanje za trajno travinje z novjšimi poskusi, če je mogoče z dodatnimi meritvami, z uporabo novih metod umerjanja ali s prilagoditvijo modela.

6.2 SUMMARY

Grasslands have recently been gaining visibility. The major part of grass sward yield variability can be attributed to weather and climate conditions, and the greatest yield reductions are due to drought periods. Studies in this field are necessary to understand the responses of permanent grassland and grass monocultures to various environmental impacts. Both field experiments and agrometeorological model simulations are recommended.

Phenological data on the beginning of flowering of cock's foot (*Dactylis glomerata* L.) were examined for two 16-year periods (1968–1983 and 1998–2013), as in the mid time no measurements were made for this phenophase at the Slovenian Environment Agency. At all 12 locations there were significant shifts back in the beginning of flowering of cock's foot by 7 to 18 days. Further analysis in combination with the average daily air temperature at 8 locations has also shown some changes. Correlations of the beginning of flowering and average air temperatures for one, two or three previous months are weaker in the second period and mostly shifted back by one month.

Among many agrometeorological models simulating grass sward growth and yield, the Dutch LINGRA-N model (Wolf, 2012) appeared to be the best choice with its medium input data complexity and good results so far. Besides daily meteorological data for each simulated year, four more groups of input data have to be prepared. The first one includes specifications for each simulation, the second one crop parameters, the third one pedological data and the forth one grass sward management data. Good enough data for calibration was available for two experiments on permanent grassland (S72 in Ljubljana, S9 in Brestanica – data from Leskošek, 199?) and five on grass monocultures (cock's foot, perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and timothy grass (*Phleum pratense* L.)) in Jablje and Rakičan (data from Verbič, 2014). 11 less important parameters were excluded from calibration based on a sensitivity analysis. The remaining 26 and the mowing dates were calibrated with odd years' data for each experiment separately in 12 steps using the root mean square error (*RMSE*) minimisation method between the simulated and measured herbage dry matter yield. Validation was performed using *RMSE* (e.g. Willmott, 1982; Jegu et al., 2013) for even and all years, and the index of agreement d_w (Willmott, 1982). The calibration was successful neither on permanent grassland (S72 and S9) nor on timothy grass in Rakičan. The best results were obtained from calibration on cock's foot in Jablje ($RMSE_{\%} = 12 \%$, $d_w = 0.84$).

Grass sward growth and yield was simulated over the 50-year period (1964–2013) using four different versions of the calibrated model – for cock's foot (J-DG), perennial ryegrass (J-LP) and timothy grass (J-PP) in Jablje, and for perennial ryegrass in Rakičan (R-LP). Soil moisture content plays a major role in grass sward growth, especially with its significant impact on the leaf area index. A small amount of precipitation, especially in

combination with high air temperatures, can cause a major reduction in the herbage dry matter yield. A potential yield is not in any case statistically significantly dependent on separate meteorological variables nor on their combination. However, based on specific years' results, it can be concluded that the herbage dry matter yield is reduced in extremely dry or dry and hot years. In drought periods roots cannot develop to their full extent, and the drought impact on radiation use efficiency is also considerable: 59% of photosynthetically active radiation was intercepted in the J-DG case in the year 2003, 32% in J-LP, 42% in J-PP and 27% in R-LP. In dry years, the results are comparable with related studies. For example, differing responses of grass monocultures to drought were seen clearly in 2003, which was the driest year. Cock's foot copes with drought the most effectively, therefore its potential yield increased a little despite drought. The least effective is perennial ryegrass, which means there was no autumn recovering after the extreme summer drought. Timothy grass rests during the drought and it started slowly growing again in autumn after the improvement of soil moisture content.

A statistically significant ($p = 0.05$) negative trend was detected in the potential yield in J-LP ($-24 \text{ kg}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and J-PP ($-29 \text{ kg}_{\text{DM}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) cases. The changed variability in the simulated herbage dry matter yield (*GRASS*) is showing in the appearance of outliers in the second half of the studied period in Jablje, as there was none in the first half. *GRASS* was the smallest in Jablje in the years 1992, 1993 and 2003, and in Rakičan in the years 1983, 1993, 2003, 2007 and 2013. Furthermore, the growth reduction factor due to drought (*TRANRF*) was the lowest in these years. According to the decomposition of the time series, the variability of *TRANRF* increased in the second half of the studied period.

An example of the LINGRA-N model use for the simulation of climate change impact on the amount and variability of grass sward yield was set with the increase of minimum and maximum air temperatures by 1, 2 and 3°C (with CO₂ concentrations at 360, 540 and 720 ppm, respectively) according to the period 1964–1988. The yield median decreased in most of the cases, especially when CO₂ concentrations stayed unchanged (360 ppm). Results for the period 1989–2013 are similar to the case with air temperatures higher by 2°C. Outliers (one to three) began to appear with increasing air temperatures in all cases in Jablje.

As regards the model results, one has to keep in mind their uncertainty, which means that many simulations have to be done to reduce it. Growth and yield simulations of permanent grassland would be of great importance for Slovenia. Due to unsuccessful calibration in our case, it would be advisable to proceed with various grass monocultures on various locations. For permanent grassland it would be a great challenge to use new experiments, possibly with added measurements, to try new calibration methods or to adapt the model.

7 VIRI

- Agrometeorological modelling, processing and analysis. Methodology of the MARS crop yield forecasting system, vol 2. 2004. Lazar C., Genovese G. (ur.). Italija, Ispra, Joint Research Centre: 100 str.
- Angulo C., Rötter R., Lock R., Enders A., Fronzek S., Ewert F. 2013. Implications of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 32-46
- ARSO. 2014. »Klimatološki podatki iz baze«. Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje (izpis iz baze podatkov, maj 2014)
- Atlas okolja. 2014. »Izris karte z oznako meteorološke postaje in lokacije poskusa«. <http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/> (11. dec. 2014)
- Badeck F.W., Bondeau A., Bottcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S. 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 162, 2: 295-309
- Barrett P.D., Laidlaw A.S. 2005. Grass growth modelling: to increase understanding and aid decision making on-farm. V: Utilization of grazed grass in temperate animal systems. Murphy J.J. (ed.). Wageningen, Wageningen Academic Publishers: 79-88
- Barrett P.D., Laidlaw A.S., Mayne C.S. 2004. An evaluation of selected perennial ryegrass growth models for development and integration into a pasture management decision support system. *Journal of Agricultural Science*, 142: 327-334
- Barrett P.D., Laidlaw A.S., Mayne C.S. 2005. GrazeGro: a European herbage growth model to predict pasture production in perennial ryegrass swards for decision support. *European Journal of Agronomy*, 23: 37-56
- Bergant K. 2003. Projekcije simulacij globalne klime na lokalni nivo in njihova uporaba v agrometeorologiji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 170 str.
- Bergant K., Kajfež-Bogataj L., Trdan S. 2006. Uncertainties in modelling of climate change impact in future: An example of onion thrips (*Thrips Tabaci Lindeman*) in Slovenia. *Ecological Modelling*, 194: 244-255
- Bergant K. 2007. Projekcije podnebnih sprememb za Slovenijo V: Podnebne spremembe: vpliv na gozd in gozdarstvo. Jurc M. (ur.). *Studia forestalia Slovenica*, 130: 67-86
- Blombäck K., Eckersten H. 1997. Simulated growth and nitrogen dynamics of a perennial rye grass. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88: 37-45
- Bonesmo H., Belanger G. 2002. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model; I. Growth and nitrogen. *Agronomy Journal*, 94: 337-345
- Bouman B.A.M., Schapendonk A.H.C.M., Stol W., Van Kraalingen D.W.G. 1996. Description of the growth model LINGRA as implemented in CGMS. Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 7. Wageningen, Wageningen University: 56 str.

- Ceglar A. 2011. Uporaba dinamičnega simulacijskega modela rasti in razvoja rastlin za napovedovanje pridelka v spremenjenih podnebnih razmerah. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 184 str.
- Ceglar A., Kajfež-Bogataj L. 2012. Simulation of maize yield in current and changed climatic conditions: addressing modelling uncertainties and the importance of bias correction in climate model simulations. *European Journal of Agronomy*, 37, 1: 83-95
- Characterization of model prediction uncertainty. 2015. Netherlands, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Watermanagement.
<http://www.citg.tudelft.nl/en/about/faculty/departments/watermanagement/sections/water-resources/leerstoele/wrm/research/all-projects/projects/current-projects/model-prediction-uncertainty/> (3. jun. 2015)
- Coffin D.P., Lauenroth W.K. 1990. A gap dynamics simulation model of succession in a semiarid grassland. *Ecological Modelling*, 49: 229-266
- Coughenour M.B., McNaughton S.J., Wallace L.L. 1984. Modelling primary production of perennial graminoids – uniting physiological processes and morphometric traits. *Ecological Modelling*, 23: 101-134
- CPVO. 2014. »Pedološki podatki iz baze Centra za pedologijo in varstvo okolja«. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta (izpis iz baze podatkov, osebni vir, maj 2014)
- Čop J. 1992. Sezonska razporeditev rasti zelinja štirih vrst trav avtohtonega izvora v predalpskem območju Slovenije. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 82 str.
- Čop J. 1998. Vpliv pogostosti rabe na botanično sestavo travne ruše ter pridelek in kakovost zelinja. *Sodobno kmetijstvo*, 31, 4: 195-198
- Čop J. 2012. Suša vpliva na pomembnost mnogocvetne ljujke v Sloveniji. *Naše travinje*, 7: 9-12
- Čop J., Sinkovič T., Vidrih M., Hacin J. 2004. Vpliv košnje in gnojenja na botanično sestavo dveh različnih travnikov na Ljubljanskem barju. *Acta agriculturae Slovenica*, 83, 1: 157-169
- Čop J., Vidrih M., Hacin J. 2009. Influence of cutting regime and fertilizer application on the botanical composition, yield and nutritive value of herbage of wet grasslands in Central Europe. *Grass and Forage Science*, 64: 454-465
- Črepinšek Z. 2002. Napovedovanje fenološkega razvoja rastlin na osnovi agrometeoroloških spremenljivk v Sloveniji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 135 str.
- De Vries S.C., van de Ven G.W.J., van Ittersum M.K. 2014. First or second generation biofuel crops in Brandenburg, Germany? A model-based comparison of their production-ecological sustainability. *European Journal of Agronomy*, 52: 166-179

- Detling J.K., Parton W.J., Hunt H.W. 1979. A simulation model of *Bouteloua gracilis* biomass dynamics on the North American Shortgrass Prairie. *Oecologia*, 38: 167-191
- Dietl W. 1982. Weeds of pastures and meadows in the European Alps. V: *Biology and Ecology of Weeds*. Holzner W., Numata M. (ur.). Dr. W. Junk Publishers, Haag, Nizozemska: 375-385
- Donatelli M., Hammer G.L., Vanderlip R.L. 1992. Genotype and water limitation effects on phenology, growth, and transpiration efficiency in grain sorghum. *Crop Science*, 32: 781-786
- Dorigo W.A. 2003. A first approach towards estimating nutrient uptake of grasslands by assimilating multi- and hyperspectral remote sensing data in growth models. V: 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching, 13-16. 5. 2003. <http://elib.dlr.de/44298/> (22. dec. 2013)
- Dukes J.S., Chiariello, N.R., Cleland E.E., Moore L.A., Shaw M.R., Thayer S., Tobeck T., Mooney H.A., Field C.B. 2005. Responses of grassland production to single and multiple global environmental changes. *PloS Biology*, 3, 10: 1829-1837
- Duru M., Adam M., Cruz P. Martin G., Ansquer P., Ducourtieux C., Jouany C., Theau J.P., Viegas J. 2009. Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. *Ecological Modelling*, 220: 209-225
- Eitzinger J., Thaler S., Kubu G., Rischbeck P., Trnka M., Schaumberger, A. 2007. Methods of crop drought stress monitoring in Austria. V: DROSMON Crop drought stress monitoring by remote sensing, Vienna, Austria, 30. 11. 2007. http://ivfl-dyn.boku.ac.at/Projekte/drosmon/presentations/Drosmon_Pres_Eitzinger.pdf (14. feb. 2014)
- Fenologija v Sloveniji. Priročnik za fenološka opazovanja. 2015. Sušnik A. (ur.). Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 102 str. <http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/034186-Fenologija%20v%20Sloveniji.pdf> (7. jul. 2015)
- Gallego J., Conte C., Dittmann C., Stroblmair J., Bielza M. 2007. Mapping Climatic Risks in the EU Agriculture. V: 101st EAAE Seminar 'Management of Climate Risks in Agriculture', Berlin, 5.-6. 7. 2007. file:///C:/Users/Tja%C5%A1a/Downloads/Gallegoetal07_MapRisks_EAAEBerlin_web.pdf (31. mar. 2014)
- Gibon A. 2005. Managing grassland for production, the environment and the land scape. Challenges at the farmland the landscape level. *Livestock Production Science*, 96: 11-31
- Golmajer M. 2013. Desezoniranje časovnih vrst. Ljubljana, Statistični urad RS: 57 str. http://www.stat.si/dokument/486/Desezoniranje_casovnih_vrst.pdf (23. sep. 2015)
- Graux A.I., Bellocchi G., Lardy R., Soussana J.F. 2013. Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 114-131
- Gustavsson A.-M., Angus J.F., Torrsell B.W.R. 1995. An integrated model for growth and nutritive value of Timothy. *Agricultural Systems*, 47: 73-92

- Han D., Sun D.W., O'Kiely P.O. 2003. Linear models for the dry matter yield of the primary growth of a permanent grassland pasture. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 42: 17-38
- Handbook of Photosynthesis. Second Edition. 2005. Mohammad Pessarakli (ur.). ZDA, Boca Raton, CRC Press: 952 str.
https://books.google.si/books?id=onDLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sl&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (29. jul. 2015)
- 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
- Herrmann A., Kelm M., Kornher A., Taube F. 2005. Performance of grassland under different cutting regimes as affected by sward composition, nitrogen input, soil conditions and weather – a simulation study. *European Journal of Agronomy*, 22: 141-158
- Hewitt C.D. 2005. The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. *EGGS Newsletter*, 13: 22-25
- Höglind M., Schapendonk A.H.C.M., Van Oijen M. 2001. Timothy regrowth in Scandinavia: combining quantitative information and simulation modelling. *New Phytologist*, 151: 355-367
- Höglind M., Hanslin H.M., Mortensen L.M. 2011. Photosynthesis of *Lolium perenne* L. at low temperatures under low irradiances. *Environmental and Experimental Botany*, 70: 297-304
- Höglind M., Thorsen S.M., Semenov M.A. 2013. Assessing uncertainties in impact of climate change on grass production in Northern Europe using ensembles of global climate models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 103-113
- Hunt H.W., Trlica M.J., Redente E.F., Moore J.C., Detling J.K. in sod. 1991. Simulation model for the effects of climate change on temperate grasslands ecosystems. *Ecological Modelling*, 53: 205-246
- Jego G., Belanger G., Tremblay G.F., Jing Q., Baron V.S. 2013. Calibration and performance evaluation of the STICS crop model for simulating timothy growth and nutritive value. *Field Crops Research*, 151: 65-77
- Jing Q., Belanger G., Baron V., Bonesmo H., Virkajärvi P., Young D. 2012a. Regrowth simulation of the perennial grass timothy. *Ecological Modelling*, 232: 64-77
- Jing Q., Conijn S.J.G., Jongschaap R.E.E., Bindraban P.S. 2012b. Modeling the productivity of energy crops in different agro-ecological environments. *Biomass and Bioenergy*, 46: 618-633
- Johnson I.R., Thornley J.H.M. 1985. Dynamic model of the response of a vegetative grass crop to light, temperature and nitrogen. *Plant, Cell and Environment*, 8: 485-499
- Jones M.B., Jongen M., Doyle T. 1996. Effects of elevated carbon dioxide concentrations on agricultural grassland production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79: 243-252

- Kajfež-Bogataj L. 2005. Podnebne spremembe in ranljivost kmetijstva. *Acta agriculturae Slovenica*, 85, 1: 25-40
- Kaluder V. 2013. Spremljanje mobilnih oblik dušika v tleh pri različnih načinih dognojevanja hmelja (*Humulus lupulus* L.) z dušikom. Diplomsko delo. Velenje, Visoka šola za varstvo okolja: 37 str.
- Kapun S. 2005. Pridelovanje pasje trave. *Naše travinje*, 1, 1: 10-11
- Knapič V. 1988. Dinamika razvoja flore travne ruše v eni rastni dobi. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza E. Kardelja v Ljubljani, VDO Biotehniška fakulteta, VTOZD za agronomijo: 61 str.
- Korošec J. 1984. Pridelovanje krme na travinju. Ljubljana, ČZP Kmečki glas: 276 str.
- Korošec J. 1997. Travinje in trate: gospodarjenje in raba. Ljubljana, ČZP Kmečki glas: 230 str.
- Korošec J., Leskošek M. 1998. Pomen travnatega sveta za slovensko kmetijstvo. *Sodobno kmetijstvo*, 31, 4: 171-173
- Košmelj K. 2007. Uporabna statistika – 2. dopolnjena izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 239 str.
http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2721/Uporabna_statistika_okt_2007/Uporabna_statistika_01.pdf (27. mar. 2015)
- Kramberger B. 1994. Vpliv intenzivnega izkoriščanja na botanično sestavo ruše trajnega travinja. V: *Novi izzivi v poljedelstvu 1994*. Kočevje, 7.-8. avgust 1994. Kotnik T. (ur.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 209-216
- Kroes J.G., Supit I. 2011. Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in The Netherlands using historical and future climate data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144: 370-381
- Laidlaw A.S. 2009. The effect of soil moisture content on leaf extension rate and yield of perennial ryegrass. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 48: 1-20
- Lambert R., Peeters A., Toussaint B. 1999. LAI evolution of a perennial ryegrass crop estimated from the sum of temperatures in spring time. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97: 1-8
- Lazzarotto P., Calanca P., Fuhrer J. 2009. Dynamics of grass-clover mixtures – An analysis of the response to management with the PROductive GRASSland Simulator (PROGRASS). *Ecological Modelling*, 220: 703-724
- Lekšan D. 1995. Vpliv vremena na pridelek različno gnojenega travnika. Višješolska diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 34 str.
- Leskošek M. 1965. Vpliv fosfatov na pridelek ter na floristično in kemično sestavo mrve v Sloveniji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 183 str.
- Leskošek M. 1998. Gnojenje travinja – nekatere značilnosti in primerjava z alpskimi deželami. *Sodobno kmetijstvo*, 31, 4: 179-181

- Leskošek M. 199? »Osebni arhiv analize poljskih poskusov za obdobje 1955–1993«. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo (neobjavljeno gradivo v papirni, delno v elektronski obliki)
- Lukač B., Verbič J., Kramberger B., Kaligarič M., Meglič V. 2013. Pol-naravno travinje kot vir semena za obnovo ruše velike naravne vrednosti. *Acta agriculturae Slovenica*, 101, 1: 149-158
- Mannetje L.T. 2002. Advances in grassland science. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 50, 2: 195-221
- Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R. in sod. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12: 1969-1976
- Merot A., Bergez J. E., Wallach D., Duru M. 2008. Adaptation of a functional model of grassland to simulate the behaviour of irrigated grasslands under a Mediterranean climate: The Crau case. *European Journal of Agronomy*, 29: 163-174
- Milla R., Reich P.B., Niinemets Ü., Castro-Diez P. 2008. Environmental and developmental controls on specific leaf area are little modified by leaf allometry. *Functional Ecology*, 22: 565-576
- Moore A.D., Donnelly J.R., Freer M. 1997. GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agricultural Systems*, 55: 535-582
- Nadbath M. 2001. Meteorološka postaja Malkovec. Mesečni bilten Agencije RS za Okolje, september 2001: 26-27
- Olesen J.E., Bindi M. 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 16: 239-262
- Oven M. 2003. Morfološki razvoj petih vrst trav med spomladansko rastjo v predalpskem območju Slovenije. Visokošolska diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 34 str.
- Parsons A.J., Johnson I.R., Harvey A. 1988. Use of a model to optimise the interaction between the frequency and severity of intermittent defoliation and to provide a fundamental comparison of the continuous and intermittent defoliation of grass. *Grass and Forage Science*, 43: 49-59
- Persson T., Höglind M., Gustavsson A.M., Halling M., Jauhiainen L. in sod. 2014. Evaluation of the LINGRA timothy model under Nordic conditions. *Field Crops Research*, 161: 87-97
- Pintar M., Maver D. 2009. Končno poročilo za pilotno študijo o oceni porabljene količine vode za namakanje površin. Ljubljana, SURS in Eurostat: 23 str.
- Podnebne razmere v Sloveniji. 2006. Poročilo Agencije RS za okolje. Ljubljana: 27 str. http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/podnebne_razmere_Slo71_00.pdf (11. maj 2015)
- Pogačar T., Kajfež-Bogataj L. 2009a. WOFOST: model za napovedovanje pridelka – 1.del. *Acta agriculturae Slovenica*, 93, 2: 231-243

- Pogačar T., Kajfež-Bogataj L. 2009b. WOFOST: model za napovedovanje pridelka – 2.del. *Acta agriculturae Slovenica*, 93, 2: 245-257
- Pogačar T., Kajfež-Bogataj L. 2011. LINGRA: model za simulacijo rasti in pridelka travne ruše. *Acta agriculturae Slovenica*, 97, 3: 319-327
- Pogačar T., Ipavec D., Verbič J., Kajfež-Bogataj L. 2015. Calibration of the LINGRA-N model to simulate herbage yield of grass monocultures and permanent grassland in Slovenia. *Acta agriculturae Slovenica*, 105, 1: 111-123
- Pogačar T., Kajfež-Bogataj L. 2015. Simulation of herbage yield and growth components of Cock's foot (*Dactylis glomerata* L.) in Jablje using the calibrated LINGRA-N model. *Acta agriculturae Slovenica*, 105, 2: 279-292
- Prihodnje spremembe podnebja v Sloveniji. 2014. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje: 3 str.
http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/PSS/scenariji/podnebni_scenariji.pdf (21. maj 2015)
- Production and income variability of EU agriculture. EC report. 2008. Joint Research Centre. Agricultural insurance schemes, 4: 41-89.
http://ec.europa.eu/agriculture/analysis/external/insurance/production_en.pdf (27. jan. 2014)
- Rapacz M., Ergon A., Höglind M., Jorgensen M., Jurczyk B., Ostrem L., Rognli O.A., Tronsmo A.M. 2014. Overwintering of herbaceous plants in a changing climate. Still more questions than answers. *Plant Science*, 225: 34-44
- Richardson A.D., Keenan T.F., Migliavacca M., Ryu Y., Sonnentag O., Toomey M. 2013. Climate change, phenology, nad phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 156-173
- Riedo M., Gyalistras D., Grub A., Rosset M., Fuhrer J. 1997. Modelling grassland responses to climate change and elevated CO₂. *Acta Ecologica*, 18: 305-311
- Robertson H.R. 2015. Fotografija trpežne ljuljke. Iziko, Biodiversity explorer.
http://www.biodiversityexplorer.org/plants/poaceae/lolium_perenne.htm (7. jul. 2015)
- Rodriguez D., Van Oijen M., Schapendonk A.H.C.M. 1999. LINGRA-CC: a sink-source model to simulate the impact of climate change and management on grassland productivity. *New phytology*, 144: 359-368
- Saxton K.E., Rawls W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1569-1578
- Schapendonk A.H.C.M., Stol W., Van Kraalingen D.W.G., Bouman B.A.M. 1998. LINGRA, a sink/source model to simulate grassland productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, 9: 87-100

- Schaumberger A., Trnka M., Eitzinger J., Formayer H., Bartelme N. 2007. Agrometeorological monitoring of Austrian grasslands using GIS based modeling. Geophysical Research Abstracts, 9, poster: 3 str.
<http://meetings.copernicus.org/www.cosis.net/abstracts/EGU2007/10449/EGU2007-J-10449.pdf> (20. jan. 2014)
- Schippers P., Kropff M.J. 2001. Competition for light and nitrogen among grassland species: a simulation analysis. Functional Ecology, 15: 155-164
- Schleip C., Menzel A., Estrella N., Dose V. 2006. The use of Bayesian analysis to detect recent changes in phenological events throughout the year. Agricultural and Forest Meteorology, 141: 179-191
- Schleip C., Rais A., Menzel A. 2009. Bayesian analysis of temperature sensitivity of plant phenology in Germany. Agricultural and Forest Meteorology, 149: 1699-1708
- Shen M., Tang Y., Chen J., Zhu X., Zheng Y. 2011. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 151: 1711-1722
- Shibu M.E., Leffelaar P.A., Van Keulen H., Aggarwal P.K. 2010. LINTUL3, a simulation model for nitrogen-limited situations: Application to rice. European Journal of Agronomy, 32: 255-271
- Siehoff S., Lennartz G., Heilburg I.C., Ross-Nickoll M., Ratte H.T., Preuss T.G. 2011. Process-based modelling of grassland dynamics built on ecological indicator values for land use. Ecological Modelling, 222: 3854-3868
- Siliranje trave. 2011. Nova Gorica, Kmetijsko gozdarski zavod Nova Gorica.
http://www.kmetijskizavod-ng.si/priponke/Zivinoreja/Siliranje_trave_2011.pdf
(27. jul. 2015)
- Smit H.J., Metzger M.J., Ewert F. 2008. Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. Agricultural Systems, 98: 208-219
- SURS. 2014. Statistični urad RS za okolje (izpis podatkov o travinju).
<http://pxweb.stat.si/pxweb/Database/Okolje/Okolje.asp> (17. dec. 2014)
- Sušnik A. 2006. Vodni primanjkljaj v Sloveniji in možni vplivi podnebnih sprememb. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 147 str.
- Sušnik A. 2014. Zasnove kazalcev spremljanja suše na kmetijskih površinah. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 256 str.
- Sušnik A., Pogačar T. 2010a. Modeliranje vodne bilance travinja kot orodje pri analizi suše v obdobju 1973–2009. V: Novi izzivi v poljedelstvu 2010. Rogaška Slatina, 2.-3. 12. 2010. Kocjan Ačko D., Čeh B. (ur.). Ljubljana, Slovensko agronomsko društvo: 299-306
- Sušnik A., Pogačar T. 2010b. Motena vodna bilanca kmetijskih rastlin leta 2009: od suše do moče. Ujma, 24: 54-64

- Tajnšek A. 2003. Deset let trajnih poskusov IOSDV v Sloveniji, Jable in Rakičan 1993–2003. V: Namen in cilj trajnih poljskih poskusov IOSDV Jable in IOSDV Rakičan. Žalec, 12. 12. 2003. Tajnšek A., Čeh Brežnik B., Kocjan Ačko D. (ur.). Zbornik posveta, Slovensko agronomsko društvo: 7-24
- Taubert F., Frank K., Huth A. 2012. A review of grassland models in the biofuel context. *Ecological Modelling*, 245: 84-93
- Tehnološka priporočila za zmanjšanje občutljivosti kmetijske pridelave na sušo: poljedelstvo, travništvo, zelenjadarstvo in hmeljarstvo. 2008. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano: 44 str.
http://www.arsktrp.gov.si/fileadmin/arsktrp.gov.si/pageuploads/Aktualno/Aktualno/2013/Tehnoloska_priporocila_za_zmanjsanje_obcutljivosti_na_suso.pdf
(18. nov. 2013)
- Thornley J.H.M., Cannell M.H.R. 1997. Temperate grassland responses to climate change: an analysis using the Hurley Pasture Model. *Annals of Botany*, 80: 205-221
- Thorsen S.M., Höglind M. 2010. Assessing winter survival of forage grasses in Norway under future climate scenarios by simulating potential frost tolerance in combination with simple agroclimatic indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 1272-1282
- Thorsen S.M., Roer A., Van Oijen M. 2010. Modelling the dynamics of snow cover, soil frost and surface ice in Norwegian grasslands. *Polar Research*, 29: 110-126
- Topp C.F.E., Doyle C.J. 1996. Simulating the impact of global warming on milk and forage production in Scotland. 1. The effects on dry matter yield of grass and grass-white clover swards. *Agricultural Systems*, 52: 213-242
- Topp C.F.E., Doyle C.J. 2004. Modelling the comparative productivity and profitability of grass and legume systems of silage production in northern Europe. *Grass and Forage Science*, 59, 3: 274-292
- Trnka M., Eitzinger J., Gruszczynski G., Formayer H., Dubrovsky M., Schaumberger A., Žalud Z. 2005. Grassland statistical yield modelling with focus on 'dry' seasons. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 17: 215-216
- Trnka M., Eitzinger J., Gruszczynski G., Buchgraber K., Resch R., Schaumberger A. 2006. A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland. *Grass and Forage Science*, 61: 253-271
- Trnka M., Kocmankova E., Balek J., Eitzinger J., Ruget F., Formayer H., Hlavinka P., Schaumberger A., Horakova V., Možny M., Žalud Z. 2010. Simple snow cover model for agrometeorological applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 1115-1127
- Trnka M., Schaumberger A., Formayer H., Eitzinger J., Hlavinka P., Semerádova D., Dubrovsky M., Možny M., Thaler S., Žalud Z. 2011. Evaluating drought risk for permanent grasslands under present and future climate conditions. *Procedia Environmental Sciences*, 3: 50-57

- Updated system description of the WOFOST crop growth simulation model as implemented in the CGMS applied by European Commission. 2003. Supit I., Van der Goot E. (ur.). Nizozemska, Treemail Publishers, Treemail 7. <http://www.treemail.nl/download/treebook7/index.htm> (8. feb. 2014)
- Van Oijen M., Höglind M., Hanslin H.M., Caldwell N. 2005. Process-based modeling of Timothy regrowth. *Agronomy Journal*, 97: 1295-1303
- Verbič J. 2014. »Podatki o pridelku travne ruše«. Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije (osebni vir, maj 2014)
- Weiss S. 1997. Vpliv dvajsetletne različne rabe in različnega gnojenja na pridelek mrve. Višješolska diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 33 str.
- Willmott C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63: 1309-1313
- Winkler J.B., Herbst, M. 2004. Do plants of a semi-natural grassland community benefit from long-term CO₂ enrichment? *Basic and Applied Ecology*, 5: 131-143
- Wolf J. 2006. Grassland data from PASK study and testing of LINGRA in CGMS. ASEMARS Project report no. 2. Wageningen, Alterra: 38 str. http://models.pps.wur.nl/sites/models.pps.wur.nl/files/LINGRA-PASK_report_Wolf-2006.pdf (8. jan. 2010)
- Wolf J. 2012. LINGRA-N: Simple generic model for simulation of grass growth under potential, water limited and nitrogen limited conditions. User guide for LINGRA-N. Wageningen, Wageningen University: 65 str. <http://www.wageningenur.nl/en/Publication-details.htm?publicationId=publication-way-343434373232> (28. mar. 2013)
- Wolf J., Van Ittersum M. 2009. Crop models: main developments, their use in CGMS and Integrated modeling. *Agro Informatica*, 22, 2: 15-18
- Woodward S.J.R. 2001. Validating a model that predicts daily growth and feed quality of New Zealand dairy pastures. *Environment International*, 27: 133-137
- Yin X., Schapendonk A.H.C.M. 2004. Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between roots and shoot in crop and grass plants. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 51, 4: 407-426
- Žalud Z., Trnka M., Ruget F., Hlavinka P., Eitzinger J., Schaumberger A. 2006. Evaluation of crop model STICS in the conditions of the Czech Republic and Austria. V: Zbornik povzetkov konference (predstavitev posterja) Bioclimatology and water in the land, Strecno, 11.-14. 9. 2006: 7 str. http://www.cbks.cz/sbornikStrecno06/prispevky/PosterII_clanky/P2-16.pdf (11. nov. 2013)
- Žitek D. 1991. Dinamika razvoja pridelka travne ruše pri različnem gnojenju v enem letu. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 128 str.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. Lučki Kajfež Bogataj, ki ni dovolila, da bi vrgla puško v koruzo. Hvala za ideje, popravke, nasvete in zgodbe. Hvala, da smo ob kavah predebatirali marsikaj, kar mi je razširilo obzorja. Hvala, da sem se v vaši družbi vedno počutila sprejeto in mi je bilo delo v veselje. Ni zanemarljivo, da smo ljudje pomembnejši od števil.

Hvala članom komisije, da so doktorsko disertacijo hitro in učinkovito pregledali ter s konkretnimi komentarji pripomogli k boljše zaključeni celoti.

Velika zahvala gre g. Janku Verbiču s Kmetijskega inštituta Slovenije za velikodušno posredovanje podatkov z njihovih travniških poskusov, za izredno pripravljenost za sodelovanje in za komentarje in razlage pri podatkih o pridelku travnih monokultur. Prav tako hvala g. Joostu Wolfu za prijazno korespondenco po elektronski pošti glede uporabe in razumevanja modela LINGRA-N.

Hvala bivšim sodelavcem na ARSO in sedanjim na BF, da smo skupaj dobro delali in da sem se od vas lahko veliko naučila. Agrometeorologije, papirologije in še marsičesa. Hvala Damijani, Ajdi, Maji in Alenki za popravke vseh vrst.

Zahvaljujem se mami Bredi in tatu Pavlu, da sta mi že od malih nog pustila, da domače naloge pišem sama, ne da bi mi gledala pod prste. Hvala za zaupanje, poslušanje, odličen zgled in občasno brezkompromisnost. Hvala Petri, Nini in Domnu, da je medsebojna pomoč samoumevna. Domnu še posebej hvala za Python.

Hvala Boštjanu, ki je verjel vame, še preden sem sploh zares začela, da ni nikoli nehal verjeti. Hvala za najboljšo družbo, kadar sem slučajno imela čas. In hvala, da sem se lahko naučila brezskrbnejšega pogleda na življenje, veselje in sploh vse. Hvala Lovru, Lari in Lenartu, da so veliko spali in da so mi vsak dan znova brez besed povedali, da doktorat ni življenjsko delo.



PRILOGA A

Primer uporabljenih vhodnih podatkov za datoteko BATCHG.INP za Ljubljano

An example of used input file BATCHG.INP for Ljubljana

Ime	Opis	Vrednost
RUNNAME	ime simulacije	S72
IYEAR	začetno leto	1974
INYEAR	število let za eno postajo	20
IDPL	<i>če je 0 ali neg., je prvi dan simulacije rasti IDEM</i>	-99
IDEM	<i>dan vznika</i>	1
IFINIT	<i>zadnji dan simulacije</i>	365
STATR	ime meteorološke postaje	192
CO	koncentracija CO ₂	360
ISOIL	oznaka za datoteko z lastnostmi tal	1
ICROP	oznaka za datoteko z lastnostmi travne ruše	1
IOPT	oznaka: 1 – potencialna simulacija, 2 – omejena zaradi dostopnosti vode, 3 – omejena zaradi dostopnosti vode in dušika	3
IRRI	namakanje: 0 – brez, 1 – z	0
IOUT	časovni interval za izpis v izhodno datoteko (d)	5
WTRDIR	pot do mape z meteorološkimi podatki	...
CONTW	začetno stanje vode v tleh iz prejšnjega leta: da (Y)/ne (N)	N

PRILOGA B

Pregled poskusov prof. dr. Mirka Leskoška, ki smo jih uredili v elektronski obliki
The base of experiments carried out by prof. dr. Mirko Leskošek, now arranged in a file

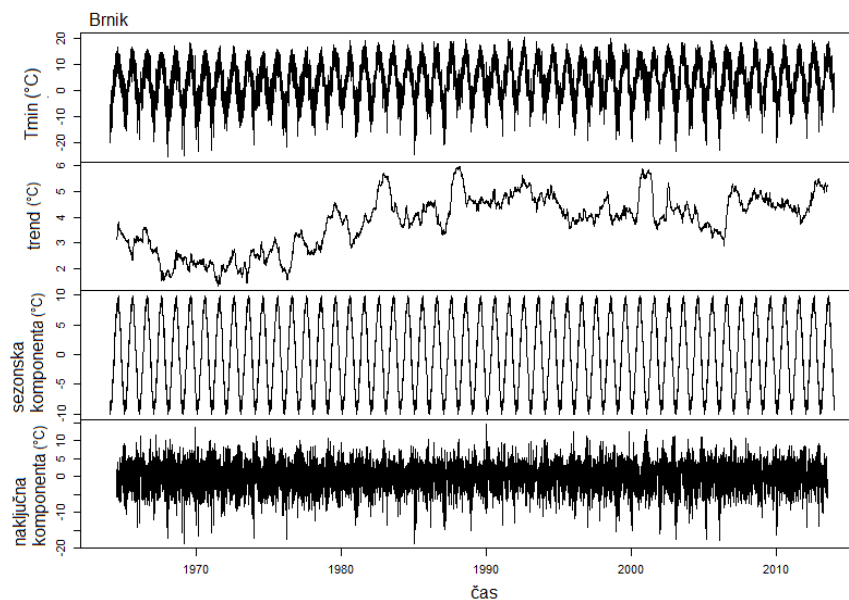
Oznaka	Obdobje	Št. košenj	Št. variant gnojenja	Lokacija	Opis tal	Opombe
S 2	1955–1966	2	5 + negnojeno	Hoče	globoka, ilovnata rjava tla na diluvialnem nanosu	
S 5	1955–1969	2	5 + negnojeno	Pristava pri Mestinju	slabo ogledna ilovnato-glinasta travniška	
S 6	1955–1960	2	5 + negnojeno	Imeno	močno ogledna travniška	
S 7	1955–1970	2	3 + negnojeno	Sela pri Podčetrtku	koluvialna rjava karbonatna ilovnato-glinasta	
S 8	1955–1968	2	5 + negnojeno	Brestanica	psevdoogledna rjava tla na koluvialnem nanosu	
S 9	1955–1970	2	3 + negnojeno	Rožno pri Brestanici	obredna slabo razvita ilovnato peščena karbonatna	
S 10	1955–1970	2	3 + negnojeno	Arto pri Sevnici	obredna peščeno-ilovnata slabo razvita karbonatna	
S 11	1955–1968	2	3 + negnojeno	Škofljica	ogledna glinasto-ilovnata travniška tla	
S 12	1955–1968	2	5 + negnojeno	Blatna Brezovica pri Vrhniki	plitva travniška močvirna tla na polžarici	
S 13	1956–1965	2	6 + negnojeno	Predoslje pri Kranju		
S 26	1960–1970	2	5 + negnojeno	Horjul	ogledna	slab travnik
S 27	1961–1970	1 ali 2	4 + negnojeno	Dragatuš	močno ogledna	
S 34	1963–1968	2	4 + negnojeno	Rožno pri Brestanici	peščeni savski aluvij	
S 35	1963–1968	2	4 + negnojeno	Vnanje Gorice	bareka črnica	
S 40	1972–1981	2	5 + negnojeno	Rožno pri Brestanici	nevtralna karbonatna tla	se nadaljuje

nadaljevanje pregleda poskusov prof. dr. Mirka Leskoška, ki smo jih uredili v elektronski obliki

Oznaka	Obdobje	Št. košenj	Št. variant gnojenja	Lokacija	Opis tal	Opombe
S 42	1972–1980	2	5 + negnojeno	Gabrovčec blizu Krke	kisla rjava tla	višinski travnik
S 44	1969–1973	2	4 + negnojeno	Polšnik nad Litijo		višinski travnik
S 45	1969–1973	2	4 + negnojeno	Nova vas - Bloke		višinski travnik
S 46	1969–1973	2	5 + negnojeno	Lome nad Idrijo		višinski travnik
S 47	1969–1973	2	4 + negnojeno	Preska nad Litijo		višinski travnik
S 48	1969–1973	2	5 + negnojeno	Sorica nad Šk. Loko		višinski travnik
S 49	1969–1973	2	4 + negnojeno	Cerknica		višinski travnik
S 50	1969–1973	2	5 + negnojeno	Gorjuše nad Bohinjem		višinski travnik
S 72	1974–1993	2, 3, 4	več + negnojeno	Ljubljana BF		meritve vsebnosti dušika
S 77	1975–1980	5	10 + negnojeno	Bašelj		
S 78	1975–1978	4	8 + negnojeno	Letenice		
S 79	1975–1979	3	10 + negnojeno	Ljubljana BF		
S 80	1981–1988	3	6 + negnojeno	Ljubljana BF		meritve vsebnosti dušika
S 87	1984–1989	3	7 + negnojeno	Ljubljana BF		meritve vsebnosti dušika

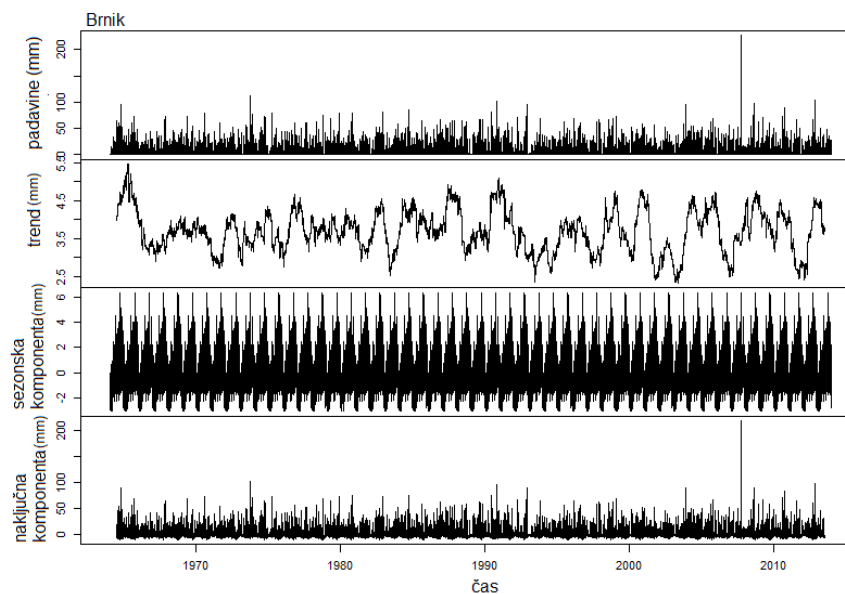
PRILOGA C

Razčlenitev časovne vrste dnevnih meteoroloških podatkov Decomposition of daily meteorological time series



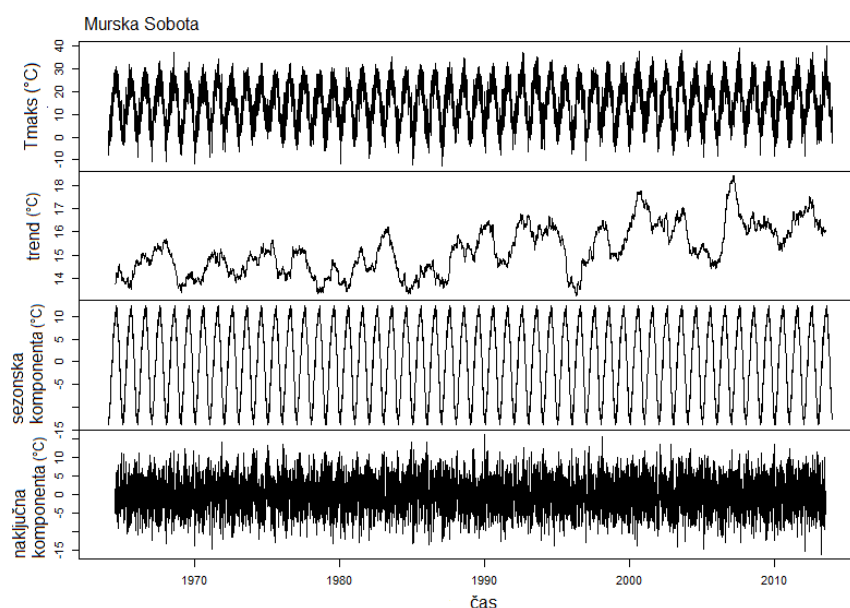
Pril. C1: Razčlenitev časovne vrste najnižjih dnevnih temperatur zraka (*Tmin*) na Brniku v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento

App. C1: Decomposition of the time series of minimal daily air temperatures (*Tmin*) in Brnik in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)



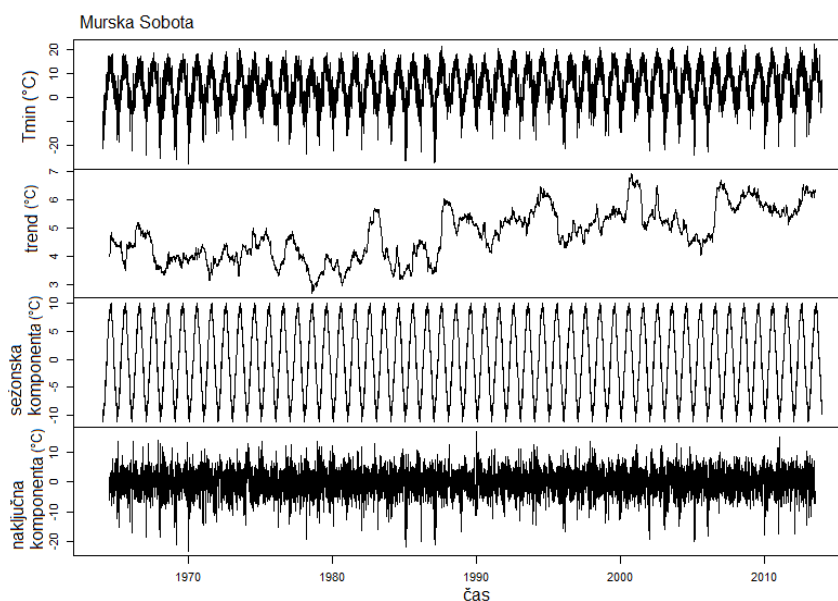
Pril. C2: Razčlenitev časovne vrste dnevnih padavin (*padavine*) na Brniku v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento

App. C2: Decomposition of the time series of daily precipitation (*padavine*) in Brnik in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)



Pril. C3: Razčlenitev časovne vrste najvišjih dnevnih temperatur zraka (*Tmaks*) v Murski Soboti v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento

App. C3: Decomposition of the time series of maximal daily air temperatures (*Tmaks*) in Murska Sobota in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)



Pril. C4: Razčlenitev časovne vrste najnižjih dnevnih temperatur zraka (*Tmin*) v Murski Soboti v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento

App. C4: Decomposition of the time series of minimal daily air temperatures (*Tmin*) in Murska Sobota in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)

PRILOGA Č

Privzete vrednosti parametrov modela LINGRA-N, ki smo jih umerjali, in rezultati umeritve za trajno travinje v Ljubljani (S72) ter za travniški mačji rep v Rakičanu (R-PP). Kratice so opisane v poglavju 3.5 (Preglednica 9–Preglednica 12).

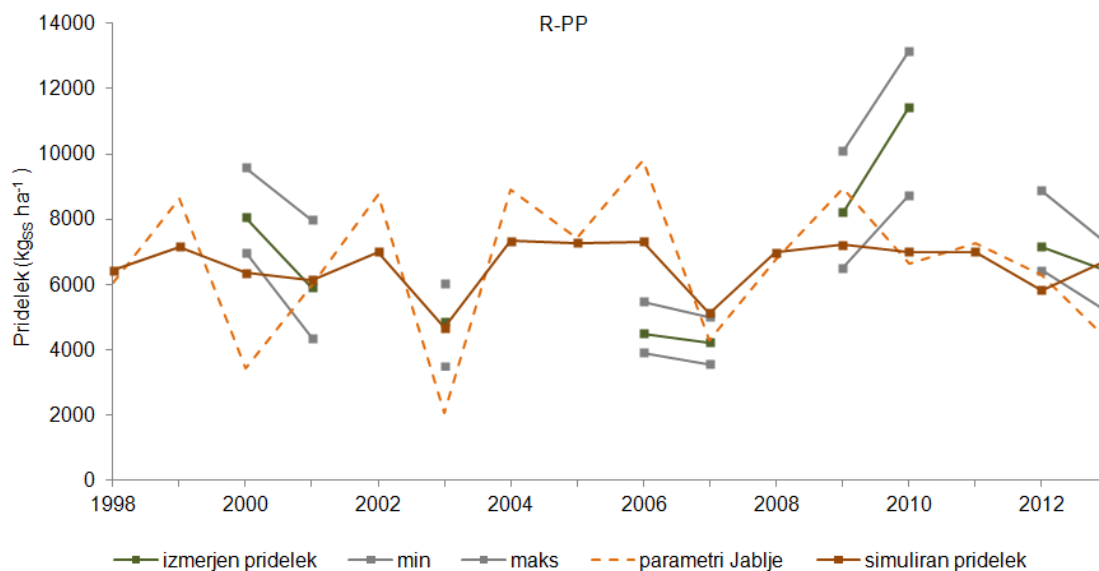
Default parameter values in LINGRA-N model that were calibrated for permanent grassland in Ljubljana (S72) and for timothy grass in Rakičan (R-PP). Abbreviations are explained in chapter 3.5 (Table 9–Table 12).

Parameter in enota	Privzeta vrednost	Umerjena S72	Umerjena R-PP
RUNFR (-)	0	0,08	0
SOITMI (°C)	5	7	9
NRFTAB (kg kg ⁻¹)	0,7	0,7	0,9
NMINS (kg N ha ⁻¹)	150	450	250
CLAI (ha ha ⁻¹)	0,8	0,4	0,4
MNDAT (julijanski dan)	-	142; 209; 270	123; 186; 249
TSUM1 (°C)	600	600	550
DTSMTB (°C)	3	5	4
TDWI (kg ha ⁻¹)	300	300	200
SLA (ha kg ⁻¹)	0,0025	0,0025	0,0035
LAICR (-)	4	4	4,25
KDIF (-)	0,6	0,7	0,7
RUETB (g _{SS} MJ ⁻¹ _{PAR})	3	3,4	3
TMPFTB (°C)	3	2	1
TMNFTB (°C)	-1	-1	-3
RDDTB (°C)	10	12	10
FRTB (kg kg ⁻¹)	0,165	0,135	0,15
RDRL (d ⁻¹)	0,05	0,065	0,045
TILLI (m ⁻²)	7000	8000	7000
WREI (kg ha ⁻¹)	200	300	400
TMBAS1 (°C)	3	7	5
RDI (cm)	40	30	30
RDMCR (cm)	40	70	80
FRNX (-)	1	1	0,7
LRNR (-)	0,5	0,6	0,55
RNFLV (kg N kg ⁻¹ _{SS})	0,01	0,01	0,013
NMXLV (kg N kg ⁻¹ _{SS})	0,035	0,035	0,035

PRILOGA D

Rezultati umerjanja za travniški mačji rep v Rakičanu

Results of the calibration for timothy grass in Rakičan

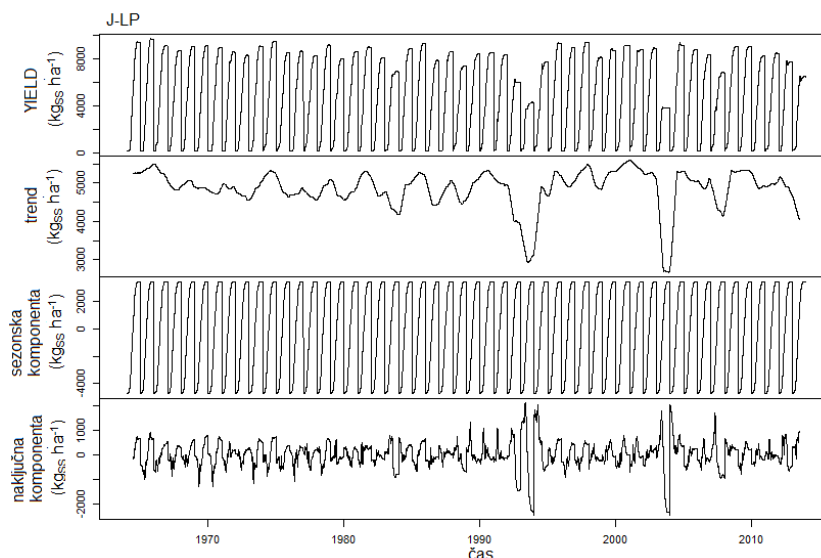


Pril. D1: Letni pridelok suhega zelinja travniškega mačjega repa v Rakičanu (R-PP): povprečne (izmerjen pridelok), najmanjše (min) in največje (maks) izmerjene vrednosti pridelka, simulacija pridelka s parametri, umerjenimi za travniški mačji rep v Jabljah (parametri Jablje) in simulacija pridelka (*GRASS*) z umerjenim modelom (simuliran pridelok)

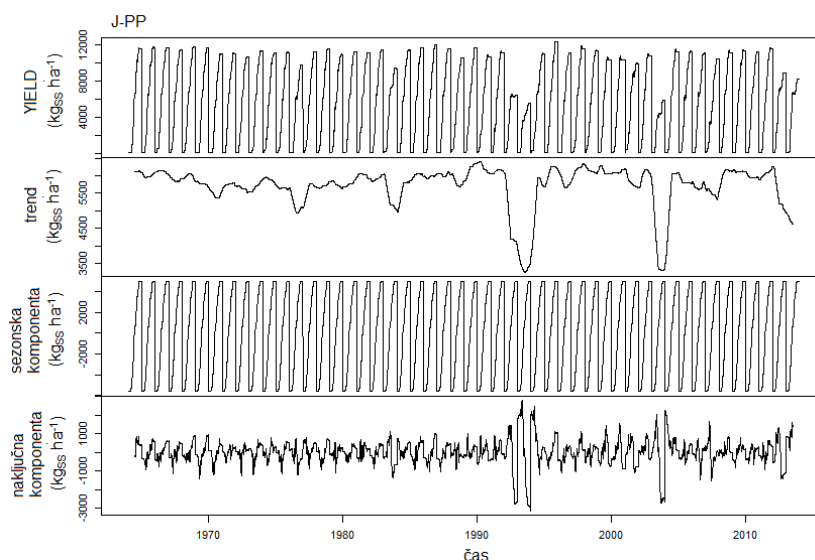
App. D1: Annual herbage dry matter yield of timothy grass in Rakičan (R-PP): average (izmerjen pridelok), minimum (min) and maximum (maks) values of observed yield, the output of the model with parameters calibrated for timothy grass in Jablje (parametri Jablje) and model predicted yield (*GRASS*) at the end of the calibration (simuliran pridelok)

PRILOGA E

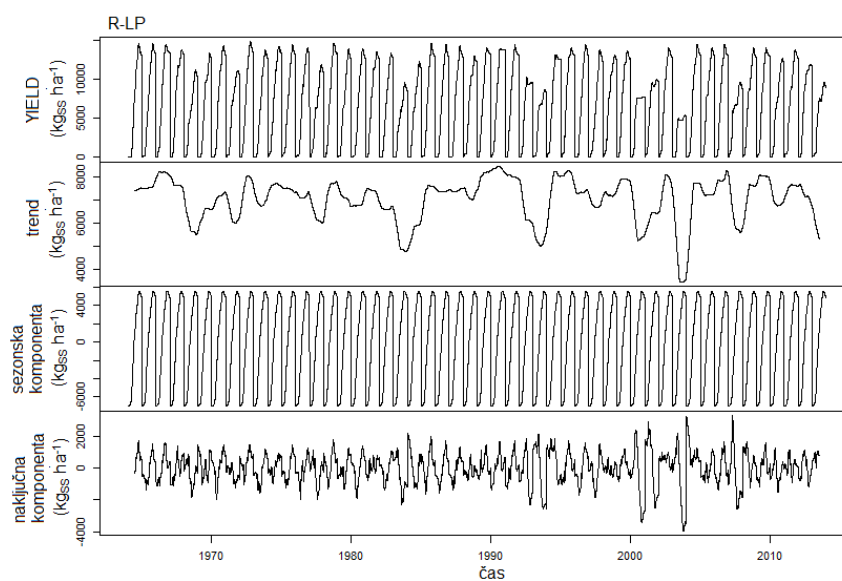
Razčlenitev časovne vrste dnevnih simulacij potencialnega pridelka (*YIELD*) Decomposition of the time series of daily simulations of potential yield (*YIELD*)



Pril. E1: Razčlenitev časovne vrste dnevnih simulacij potencialnega pridelka suhega zelinja (*YIELD*) trpežne ljujke v Jabljah v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento
App. E1: Decomposition of the time series of daily simulations of potential herbage dry matter yield (*YIELD*) of perennial ryegrass in Jablje in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)



Pril. E2: Razčlenitev časovne vrste dnevnih simulacij potencialnega pridelka suhega zelinja (*YIELD*) travniškega mačjega repa v Jabljah v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento
App. E2: Decomposition of the time series of daily simulations of potential herbage dry matter yield (*YIELD*) of timothy grass in Jablje in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)



Pril. E3: Razčlenitev časovne vrste dnevni simulacij potencialnega pridelka suhega zelinja (*YIELD*) trpežne ljujke v Rakičanu v celotnem obdobju 1964–2013 na trend, sezonsko in naključno komponento

App. E3: Decomposition of the time series of daily simulations of potential herbage dry matter yield (*YIELD*) of perennial ryegrass in Rakičan in the entire period 1964–2013 into trend, season (sezonska komponenta) and random component (naključna komponenta)

PRILOGA F

Tabela za pretvorbo datuma v julijanski dan
Table for the calculation of Julian day from date

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365