

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Zalika ČREPINŠEK

**NAPOVEDOVANJE FENOLOŠKEGA RAZVOJA
RASTLIN NA OSNOVI AGROMETEOROLOŠKIH
SPREMENLJIVK V SLOVENIJI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2002

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Zalika ČREPINŠEK

**NAPOVEDOVANJE FENOLOŠKEGA RAZVOJA RASTLIN NA
OSNOVI AGROMETEOROLOŠKIH SPREMENLJIVK V SLOVENIJI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

**PREDICTIONS OF PHENOLOGICAL DEVELOPMENT OF PLANTS
BASED ON AGROMETEOROLOGICAL VARIABLES IN SLOVENIA**

DOCTORAL DISSERTATION

Ljubljana, 2002

Doktorska disertacija je bila opravljena na Katedri za biometeorologijo, Oddelek za agronomijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani. Fenološki in meteorološki podatki so iz arhiva Agencije republike Slovenije za okolje.

Senat Biotehniške fakultete in senat Univerze v Ljubljani sta odobrila temo doktorske disertacije in za mentorico imenovala prof. dr. Lučko KAJFEŽ-BOGATAJ.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Franc BATIČ
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Članica: prof. dr. Lučka KAJFEŽ-BOGATAJ
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Član: prof. dr. Mitja KALIGARIČ
Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta, Oddelek za biologijo

Datum zagovora:

Doktorska disertacija je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Zalika ČREPINŠEK

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dd
DK	UDK 551.586:631.547(497.4)"1955-2000"(043.3)
KG	agrometeorologija/fenologija/trendi/statistični modeli/Slovenija/1955-2000
KK	AGRIS P40
AV	ČREPINŠEK, Zalika, univ. dipl. inž. agr., mag. znanosti
SA	KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka (mentorica)
KZ	SI-1000, Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo
LI	2002
IN	NAPOVEDOVANJE FENOLOŠKEGA RAZVOJA RASTLIN NA OSNOVI AGROMETEOROLOŠKIH SPREMENLJIVK V SLOVENIJI
TD	doktorska disertacija
OP	XX, 135, [42] str., 43 pregl., 24 sl., 56 pril., 185 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Proučevali smo možnosti napovedovanja fenološkega razvoja rastlin na osnovi agrometeoroloških spremenljivk v Sloveniji. Analiza temelji na fenoloških in meteoroloških podatkih Agencije republike Slovenije za okolje za 8 lokacij (Celje, Ilirska Bistrica, Lesce, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota, Novo Mesto in Rateče) za obdobje 1955-2000. Obravnavali smo 31 fenofaz gojenih in samoniklih rastlin. Statistično značilni linearni trendi so pokazali, da se približno polovico spomladanskih in poletnih fenofaz pojavlja zadnja leta bolj zgodaj (1 do 3 dni na dekada) kot na začetku obravnavanega obdobja, pri ostali polovici fenofaz trenda ni, jesenske fenofaze rumenjenja listja pa nastopijo povprečno 2 do 3 dni na dekada kasneje. Povezanost med fenološkim razvojem in agrometeorološkimi spremenljivkami smo proučevali s korelacijsko analizo in z multiplo linearno regresijo. Vrednosti korelacijskih koeficientov med nastopom fenofaz ter povprečni temperatur zraka dveh ali treh zaporednih mesecev pred nastopom fenofaz so visoke (0,60 do 0,85), statistično značilne so tudi korelacije med zimskim indeksom severno atlantskega nihanja in povprečno temperaturo zraka od decembra do marca ter nastopom spomladanskih fenofaz. Na čas pojava večine fenofaz količina padavin ne vpliva statistično značilno. Spodnjo temperaturo praga (TP) smo določili s statistično metodo najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur, za nastop najzgodnejših fenofaz so izračunane TP negativne (-3°C do -1°C), za kasnejše fenofaze pa med 3°C in 7°C. Variabilnost izračunanih vsot efektivnih in aktivnih temperatur med leti je velika (koeficient variabilnosti znaša od 10% do 30%), v Ratečah je potreben termalni čas za nastop fenofaz krajši kot na ostalih lokacijah. Uporaba fototermalnega časa za Ljubljano je pokazala, da z njim lahko fenološki razvoj opišemo bolje kot s termalnim časom. Z metodo multiple linearne regresije smo oblikovali fenološke in fenoklimatske modele za napoved fenofaz, pri katerih lahko te napovedi koristno uporabimo za izvajanje določenih ukrepov. Izmed obravnavanih rastlin so najboljši fenološki indikatorji breza, regrat ter divji kostanj. V povprečju smo lahko pojasnili s fenološkimi modeli 70%, s fenoklimatskimi pa 86% variabilnosti nastopa fenofaz. V fenoklimatskih modelih so največkrat vključene meteorološke pojasnjevalne spremenljivke termalni čas, povprečne mesečne temperature ter za Ljubljano v vseh primerih fototermalni čas. Izdelani modeli, ki smo jih preverili z metodo navzkrižnega preverjanja, dajejo dokaj natančne in pravočasne napovedi.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dd
 DC UDC 551.586:631.547(497.4)"1955-2000"(043.3)
 CX agrometeorology/phenology/trends/statistical models/Slovenia/1955-2000
 CC AGRIS P40
 AU ČREPINŠEK, Zalika
 AA KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka (supervisor)
 PP SI-1000, Ljubljana, Jamnikarjeva 101
 PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy
 PY 2002
 TI PREDICTIONS OF PHENOLOGICAL DEVELOPMENT OF PLANTS BASED ON AGROMETEOROLOGICAL VARIABLES IN SLOVENIA
 DT Doctoral Dissertation
 NO XX, 135, [42] p., 43 tab., 24 fig., 56 ann., 185 ref.
 LA sl
 AL sl/en
 AB Possibilities of predicting phenological development of plants were studied based on agrometeorological variables in Slovenia. Environmental Agency of republic of Slovenia provided phenological and meteorological data for eight locations (Celje, Ilirska Bistrica, Lesce, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota, Novo Mesto, Rateče) for the period 1955-2000; 31 phenophases of cultivated and autochthonous plants were investigated. The statistically significant linear trends show that approximate half of spring and summer-time phenological phases occurred earlier (1-3 days per decade), the other half of phenophases showed no trends; the autumn phases of leaf coloring moved later during study period (2-3 days per decade). Correlation analysis and linear multiple regression were used to establish the relationship among phenological development and agrometeorological variables. Correlation coefficients between the starting dates of phenological phases with the air temperature of the previous 2-3 months were relatively high (0,60 to 0,85). North Atlantic Oscillation Index was also statistically significant correlated with average air temperatures from December to March and spring phenophases. The amount of monthly precipitation in concrete conditions was not significantly correlated to majority of discussed phenophases. Lower threshold temperature (TP) was determined statistically with least standard deviation of growing degree-days. For plants flowering in early spring, most of calculated TP were negative (-3°C to -1°C), for later phenophases between 3°C and 7°C. Coefficients of variability of calculated sums of effective and active temperatures among years were relatively high (10% to 30%), sums of active temperatures were smaller in Rateče. We calculated also photothermal time for location Ljubljana, correlation coefficients were higher for all phenophases when we used photothermal instead thermal time. With linear multiple regression we formed phenological and phenoclimatic models. The most frequently included independent variables of phenological models were common silver birch, dandelion and horse chestnut, we can state that they are phenological indicators in given conditions. On average we could explain 70% of variability with phenological models, respectively 86% with phenoclimatic models. Thermal time, mean monthly temperatures and photothermal time for Ljubljana were most frequently included variables in phenoclimatic models. We tested models with cross validation method; predictions were quite accurate with sufficiently long foresight period.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija	III
Key words documentations	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VIII
Kazalo slik	XII
Kazalo prilog	XIV
Okrajšave in simboli	XVIII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 CILJI RAZISKAVE	5
1.3 HIPOTEZE	6
2 PREGLED OBJAV	7
2.1 ZGODOVINSKI PREGLED RAZVOJA FENOLOGIJE	7
2.2 POMEMBNEJŠE SVETOVNE RAZISKAVE S PODROČJA FENOLOGIJE	8
2.2.1 Zbiranje fenoloških podatkov	8
2.2.2 Abiotski dejavniki, ki vplivajo na variabilnost fenoloških pojavov	8
2.2.2.1 Temperatura	8
2.2.2.2 Padavine	10
2.2.2.3 Dolžina dneva	10
2.2.2.4 Nadmorska višina	11
2.2.3 Časovna analiza pojavljanja fenofaz	11
2.2.4 Modeliranje fenološkega razvoja	12
2.3 FENOLOŠKE RAZISKAVE V SLOVENIJI	13
2.3.1 Sadno drevje in vinska trta	14
2.3.2 Poljščine	15
2.3.3 Gozdno drevje	15
2.3.4 Ostale fenološke raziskave	16
2.4 METODE OBDELAVE FENOLOŠKIH PODATKOV	16
2.4.1 Določitev temperature praga	16
2.4.1.1 Metoda najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur	18
2.4.1.2 Metoda najmanjšega standardnega odklona števila dni	18
2.4.1.3 Metoda najmanjšega koeficienta variabilnosti števila dni	19
2.4.1.4 Metoda regresijskega koeficienta linearne regresijskega modela	20
2.4.1.5 Metoda stopnje razvoja	20
2.4.2 Izračun temperaturnih vsot	21
2.4.2.1 Metoda pravokotnika	23
2.4.2.2 Metoda trikotnika	25
2.4.2.3 Metoda sinusoide	26
2.4.2.4 Huberova metoda	27
2.4.2.5 Modificirane metode za izračun vsot efektivnih temperatur	27
2.4.3 Izračun fototermalnega časa	29
2.4.4 Indeks severno atlantskega nihanja	30

		str.
3	MATERIAL IN METODE	33
3.1	FENOLOŠKI PODATKI	33
3.1.1	Negojene zelnate rastline	34
3.1.2	Gozdno drevje in grmičevje	34
3.1.3	Trave	34
3.1.4	Sadno drevje	35
3.2	METEOROLOŠKI PODATKI	35
3.3	METODE OBDELAVE FENOLOŠKIH PODATKOV	37
3.3.1	Določitev temperature praga	37
3.3.2	Termalni čas	37
3.3.3	Fototermalni čas	38
3.4	STATISTIČNE METODE	38
3.4.1	Opisne ali deskriptivne statistike	38
3.4.2	Analiza variance	38
3.4.3	Regresija	39
3.4.4	Korelacija	39
3.4.5	Navzkrižno preverjanje modelov	40
3.4.6	Analiza časovnih vrst	40
3.5	FENOLOŠKO MODELIRANJE	41
3.5.1	Statistični modeli	42
3.5.1.1	Tranzitivni modeli	42
3.5.1.2	Kombinirani modeli	42
3.5.2	Dinamični modeli	43
4	REZULTATI	44
4.1	ANALIZA FENOLOŠKIH PODATKOV	44
4.1.1	Opisne statistike	44
4.1.2	Časovna analiza pojavljanja fenofaz	52
4.2	KORELACIJE MED NASTOPI FENOFAZ IN POVPREČNIMI MESEČNIMI TEMPERATURAMI ZRAKA	59
4.3	KORELACIJE MED NASTOPI FENOFAZ IN MESEČNIMI KOLIČINAMI PADAVIN	63
4.4	KORELACIJE MED NASTOPI FENOFAZ IN INDEKSOM SEVERNO ATLANTSKEGA NIHANJA	65
4.5	DOLOČITEV TEMPERATURE PRAGA	67
4.6	IZRAČUN TERMALNEGA ČASA	70
4.6.1	Vsote aktivnih temperatur ob nastopu fenofaz	70
4.6.2	Vsote efektivnih temperatur ob nastopu fenofaz	74
4.7	IZRAČUN FOTOTERMALNEGA ČASA	76
4.8	REGRESIJSKI MODELI ZA NAPOVED NASTOPA FENOFAZ	78
4.8.1	Fenološki modeli	78
4.8.2	Fenoklimatski modeli	87
4.9	PREVERJANJE MODELOV	98
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	102
5.1	RAZPRAVA	102

	str.
5.1.1 Analiza fenoloških podatkov	102
5.1.2 Časovna analiza pojavljanja fenofaz	103
5.1.3 Korelacije med nastopi fenofaz in agrometeorološkimi spremenljivkami	105
5.1.4 Določitev temperature praga	107
5.1.5 Termalni in fototermalni čas, potreben za nastop fenofaz	108
5.1.6 Regresijski modeli za napoved nastopa fenofaz	110
5.2 SKLEPI	114
6 POVZETEK (SUMMARY)	117
6.1 POVZETEK	117
6.2 SUMMARY	120
7 VIRI	124
7.1 CITIRANI VIRI	124
7.2 DRUGI VIRI	135
ZAHVALA	
PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Hipotetični primer prikaza napake izračuna vsote efektivnih temperatur ob uporabi nepravilne temperature praga	17
Preglednica 2: Razpoložljivi fenološki in meteorološki podatki za obdobje 1955-2000	36
Preglednica 3: Povprečni nastop (v julijanskih dneh) fenofaz v obdobju 1955-1999	45
Preglednica 4: Razvrstitev postaj v homogene skupine glede na nastop fenofaz	50
Preglednica 5: Predznak trenda pojavov fenofaz za obdobje 1955-1999, - negativen trend, + pozitiven trend, * statistično značilen trend, $p=0,05$	52
Preglednica 6: Predznak dolgoletnih trendov povprečnih mesečnih in letnih temperatur zraka za obdobje 1955-1999, - negativen trend, + pozitiven trend, * statistično značilen trend, $p=0,05$	58
Preglednica 7: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Ljubljani za obdobje 1955-1999, največji koeficient je označen z rdečo bravo, statistično značilni trendi so v potemnjenih celicah	61
Preglednica 8: Statistično značilne povezave ($p=0,05$) med nastopom fenofaz ter mesečno količino padavin (R_{mes}), v oklepaju so navedeni korelacijski koeficienti	63
Preglednica 9: Korelacijski koeficienti - med $NAOI_{zim}$ ter povprečno temperaturo zraka za zimske mesece ($T_{dec-mar}$) in - med $NAOI_{zim}$ ter nastopom različnih spomladanskih fenofaz za obdobje 1956-1999, koeficienti v potemnjenih celicah so statistično značilni pri $p=0,05$	65
Preglednica 10: Izračunane temperature pragov (v °C) za (A) olistanje, (B) začetek cvetenja in (C) polno cvetenje za obdobje 1955-1999	68
Preglednica 11: Primer izračuna povprečne temperature pri spremembi maksimalne temperature (T_{max}) ob konstantni minimalni temperaturi (T_{min}) -5°C	69
Preglednica 12: Povprečne vsote aktivnih temperatur (v °C), izračunane iz povprečnih dnevnih temperatur zraka, potrebne za nastop fenofaz za obdobje 1955-1999, $TP=0^{\circ}C$	72

Preglednica 13:	Povprečne vsote efektivnih temperatur, potrebne za nastop fenofaz za obdobje 1955-1999, v oklepajih so podane statistično določene TP (oboje v °C)	75
Preglednica 14:	Izračunan povprečen fototermalni čas (v °D), potreben za nastop obravnavanih fenofaz v Ljubljani za obdobje 1955-1999	77
Preglednica 15:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' (C_{Pd}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Pd}^1	79
Preglednica 16:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja domače češplje (C_{Pd}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Pd}^2	80
Preglednica 17:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja jablane, sorta 'Bobovec' (C_{Md}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Md}^1	80
Preglednica 18:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja jablane, sorta 'Bobovec' (C_{Md}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Md}^2	81
Preglednica 19:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja breze (C_{Bp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Bp}^1	81
Preglednica 20:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja leske (C_{Ca}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Ca}^2	82
Preglednica 21:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja pasje trave (C_{Dg}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Dg}^1	82
Preglednica 22:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja regrata (C_{To}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{To}^1	82

Preglednica 23:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja lipe (C_{Tp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Tp}^1	83
Preglednica 24:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja robinije (C_{Rp}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Rp}^2	83
Preglednica 25:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja španskega bezga (C_{Sv}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Sv}^2	84
Preglednica 26:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja breze (L_{Bp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze L_{Bp}^1	85
Preglednica 27:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja lipe (L_{Tp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze L_{Tp}^1	85
Preglednica 28:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja bukve (L_{Fs}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze L_{Fs}^1	86
Preglednica 29:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved (A) začetka cvetenja (C_{Pd}^1) in (B) polnega cvetenja (C_{Pd}^2) češplje, sorta 'Domača češplja'	88
Preglednica 30:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved (A) začetka cvetenja (C_{Md}^1) in (B) polnega cvetenja (C_{Md}^2) jablane, sorta 'Bobovec'	90
Preglednica 31:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja breze (C_{Bp}^1)	90
Preglednica 32:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja leske (C_{Ca}^2)	91
Preglednica 33:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja pasje trave (C_{Dg}^1)	92

Preglednica 34:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja regrata (C_{To}^1)	92
Preglednica 35:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja lipe (C_{Tp}^1)	93
Preglednica 36:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja robinije (C_{Rp}^2)	94
Preglednica 37:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja španskega bezga (C_{Sv}^2)	94
Preglednica 38:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja breze (L_{Bp}^1)	95
Preglednica 39:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja lipe (L_{Tp}^1)	96
Preglednica 40:	Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja bukve (L_{Fs}^1)	96
Preglednica 41:	Koeficienti determinacije (r_p^2 v %) za modele, ki vsebujejo fototermalni čas (P_t) in tiste, ki ga ne vsebujejo, v zadnji vrstici je podana razlika koeficientov determinacije (v %) za posamezen model	98
Preglednica 42:	Korelacijski koeficienti med opazovanimi in napovedanimi datumi nastopa fenofaz, izračunani z metodo navzkrižnega preverjanja modelov	99
Preglednica 43:	Primerjava z modeli napovedanih ter opazovanih datumov pojava obravnavanih fenofaz v Celju na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000	101

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Vsota efektivnih temperatur je akumuliran produkt časa in temperature med temperaturo spodnjega in zgornjega praga	22
Slika 2: Metoda enojnega trikotnika za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree days..., 2001)	25
Slika 3: Metoda dvojnega trikotnika za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree days..., 2001)	26
Slika 4: Metoda enojne sinusoide za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree days..., 2001)	26
Slika 5: Metoda dvojne sinusoide za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree days..., 2001)	27
Slika 6: Modifikacije izračuna V_{ef} z različnimi metodami odštevkov na primeru enojne sinusoide za šest možnih razmerij med dnevno temperaturno krivuljo ter spodnjo in zgornjo TP. Dnevna temperaturna krivulja je lahko : 1. Nad obema TP 2. Pod obema TP 3. Med obema TP 4. Omejena s spodnjo TP 5. Omejena z zgornjo TP ali 6. Omejena z obema TP (prirejeno po Degree days..., 2001)	28
Slika 7: Vpliv severno atlantskega nihanja na vremenske razmere v Evropi (prirejeno po Hurrell-u, 1995)	31
Slika 8: Potek $NAOI_{zim}$ za obdobje 1864-2000 s 4-letnimi drsečimi sredinami	31
Slika 9: Povprečni nastop (v julijanskih dneh) fenofaz v obdobju 1955-1999	44
Slika 10: Okvir z ročaji za fenofaze: olistanja in rumenenja listja breze ter cvetenja regrata in leske v Celju za obdobje 1955-1999	46
Slika 11: Zaporedje fenoloških faz v Celju za 17 različnih rastlin v obdobju 1955-1999	49
Slika 12: Trendi cvetenja španskega bezga za obdobje 1955-1999 na 8 lokacijah; $p=0,05$	54
Slika 13: Trendi jesenskega rumenenja listja bukve v obdobju 1955-1999 na 6 lokacijah; $p=0,05$	56
Slika 14: Trend dolžine obdobja med olistanjem in jesenskim rumenenjem listja pri brezi v Ljubljani za obdobje 1955-1999, $p=0,05$	57

Slika 15:	Obratna sorazmernost med povprečno temperaturo zraka (v °C) za januar in februar ($T_{\text{jan-feb}}$) in cvetenjem leske (v julijanskih dneh) v Ljubljani v obdobju 1955-1999	59
Slika 16:	Vpliv temperature kasnih zimskih mesecev (januar-februar) na cvetenje leske v Ljubljani	60
Slika 17:	Podobnost hodov $NAOI_{\text{zim}}$ in povprečne temperature zraka v obdobju december-marec ($T_{\text{dec-mar}}$) v Ratečah (1956-1999)	66
Slika 18:	Obratna sorazmernost hodov $NAOI_{\text{zim}}$ in cvetenja leske v Ratečah (1956-1999)	66
Slika 19:	Povprečne vsote aktivnih temperatur (v °C), izračunane iz povprečnih dnevnih temperatur zraka, potrebne za nastop fenofaze cvetenja za obravnavane rastline v Celju v obdobju 1955-1999, $TP=0^{\circ}\text{C}$	71
Slika 20:	Povprečne vsote aktivnih temperatur, potrebne za olistanje breze v obdobju 1955-1999, $TP=0^{\circ}\text{C}$	73
Slika 21:	Izračunan fototermalni čas, potreben za polno cvetenje španskega bezga v Ljubljani	76
Slika 22:	Vpliv dodanih neodvisnih spremenljivk na % pojasnjene variabilnosti modela za napoved cvetenja lipe (C_{Tp}^1) v Ljubljani, največji delež variabilnosti pojasnimo s cvetenjem robinije	86
Slika 23:	Primerjava opazovanega in napovedanega časa nastopa polnega cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' v Mariboru	99
Slika 24:	Studentizirani ostanki pri navzkrižnem preverjanju modela za napoved polnega cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' v Mariboru	100

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Opis obravnavanih rastlin in fenofaz
- Priloga B: Opis obravnavanih postaj
- Priloga C: Tabela pretvarjanja datuma v julijanski dan
- Priloga D: Seznam obravnavanih fenofaz po posameznih postajah in število podatkov (let) za posamezne fenofaze za obdobje 1955-1999, v Celju za obdobje 1955-2000
- Priloga E1: Opisne statistike za olistanje navadne breze za obdobje 1955-1999
- Priloga E2: Opisne statistike za začetek cvetenja navadne breze za obdobje 1955-1999
- Priloga E3: Opisne statistike za splošno rumenenje navadne breze za obdobje 1955-1999
- Priloga E4: Opisne statistike za trajanje obdobja med olistanjem in rumenenjem navadne breze za obdobje 1955-1999
- Priloga E5: Opisne statistike za olistanje bukve za obdobje 1955-1999
- Priloga E6: Opisne statistike za splošno rumenenje bukve za obdobje 1955-1999
- Priloga E7: Opisne statistike za trajanje obdobja med olistanjem in rumenenjem bukve za obdobje 1955-1999
- Priloga E8: Opisne statistike za začetek cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja', za obdobje 1955-1999
- Priloga E9: Opisne statistike za splošno cvetenje češplje, sorta 'Domača češplja', za obdobje 1955-1999
- Priloga E10: Opisne statistike za prve zrele plodove češplje, sorta 'Domača češplja', za obdobje 1955-1999
- Priloga E11: Opisne statistike za začetek obiranja češplje, sorta 'Domača češplja', za obdobje 1955-1999
- Priloga E12: Opisne statistike za splošno cvetenje črnega bezga za obdobje 1955-1999
- Priloga E13: Opisne statistike za prve zrele plodove črnega bezga za obdobje 1955-1999
- Priloga E14: Opisne statistike za olistanje divjega kostanja za obdobje 1955-1999

- Priloga E15: Opisne statistike za splošno cvetenje divjega kostanja za obdobje 1955-1999
- Priloga E16: Opisne statistike za prve zrele plodove divjega kostanja za obdobje 1955-1999
- Priloga E17: Opisne statistike za začetek cvetenja ive za obdobje 1955-1999
- Priloga E18: Opisne statistike za začetek cvetenja ivanjščice za obdobje 1955-1999
- Priloga E19: Opisne statistike za začetek cvetenja jablane, sorta 'Bobovec,' za obdobje 1955-1999
- Priloga E20: Opisne statistike za splošno cvetenje jablane, sorta 'Bobovec', za obdobje 1955-1999
- Priloga E21: Opisne statistike za prve zrele plodove jablane, sorta 'Bobovec', za obdobje 1955-1999
- Priloga E22: Opisne statistike za začetek obiranja jablane, sorta 'Bobovec', za obdobje 1955-1999
- Priloga E23: Opisne statistike za splošno cvetenje leske za obdobje 1955-1999
- Priloga E24: Opisne statistike za olistanje lipe za obdobje 1955-1999
- Priloga E25: Opisne statistike za začetek cvetenja lipe za obdobje 1955-1999
- Priloga E26: Opisne statistike za splošno rumenenje lipe za obdobje 1955-1999
- Priloga E27: Opisne statistike za trajanje obdobja med olistanjem in rumenenjem lipe za obdobje 1955-1999
- Priloga E28: Opisne statistike za začetek cvetenja pasje trave za obdobje 1955-1999
- Priloga E29: Opisne statistike za začetek cvetenja regrata za obdobje 1955-1999
- Priloga E30: Opisne statistike za začetek splošnega cvetenja robinije za obdobje 1955-1999
- Priloga E31: Opisne statistike za prve poganjke smreke za obdobje 1955-1999
- Priloga E32: Opisne statistike za splošno cvetenje španskega bezga za obdobje 1955-1999
- Priloga E33: Opisne statistike za začetek cvetenja spomladanskega žafrana za obdobje 1955-1999
- Priloga E34: Opisne statistike za začetek cvetenja malega zvončka za obdobje 1955-1999

- Priloga F1: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Celju za obdobje 1955-1999
- Priloga F2: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Ilirski Bistrici za obdobje 1955-1999
- Priloga F3: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Lescah za obdobje 1955-1999
- Priloga F4: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Mariboru za obdobje 1955-1999
- Priloga F5: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Murski Soboti za obdobje 1955-1999
- Priloga F6: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Novem mestu za obdobje 1955-1999
- Priloga F7: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Ratečah za obdobje 1955-1999
- Priloga G1: Povprečne vsote aktivnih temperatur (v °D), izračunane iz minimalnih dnevnih temperatur zraka, potrebne za nastop fenofaz v obdobju 1955-1999
- Priloga G2: Korelacijski koeficienti med številom dni od 1. januarja do dneva, 5 dni zgodnejšega od pojava fenofaze v posameznem letu, ter vsotami aktivnih temperatur za isto obdobje (izračunanih iz povprečnih dnevnih temperatur zraka); temperatura praga za vse fenofaze je 0°C; v stolpcu označenim z LJ(P_t) so podani korelacijski koeficienti med številom dni in fototermalnim časom za Ljubljano
- Priloga G3: Korelacijski koeficienti med številom dni od 1. januarja do dneva, 5 dni zgodnejšega od pojava fenofaze v posameznem letu, ter vsotami efektivnih temperatur za isto obdobje; v oklepaju je podana temperatura praga (v °C), izračunana s statistično metodo za vsako fenofazo in lokacijo posebej
- Priloga H1: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Celje (1955-1999)
- Priloga H2: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Ilirska Bistrica (1955-1999)
- Priloga H3: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Lesce (1955-1999)
- Priloga H4: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Ljubljana (1955-1999)

- Priloga H5: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Maribor (1955-1999)
- Priloga H6: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Murska Sobota (1955-1999)
- Priloga H7: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Novo mesto (1955-1999)
- Priloga H8: Korelacijska matrika vseh obravnavanih fenofaz za postajo Rateče (1955-1999)

KAZALO OKRAJŠAV IN SIMBOLOV

Oznake fenofaz

C^1	<u>fenofaza začetka cvetenja</u>
C_{Bp}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja navadne breze (<i>Betula pendula</i> Roth)
C_{Pd}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' (<i>Prunus domestica</i> L.)
C_{Sc}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja ive (<i>Salix caprea</i> L.)
C_{Li}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja navadne ivanjščice (<i>Leucanthemum ircutianum</i> Turcz.)
C_{Md}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja jablane, sorta 'Bobovec' (<i>Malus domestica</i> Borkh)
C_{Tp}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja lipe (<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.)
C_{Dg}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja navadne pasje trave (<i>Dactylis glomerata</i> L.)
C_{To}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja navadnega regrata (<i>Taraxacum officinale</i> Weber in Wiggers)
C_{Cn}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja pomladanskega žafrana (<i>Crocus napolitanus</i> Mordant&Loisel.)
C_{Gn}^1	julijanski dan nastopa začetka cvetenja navadnega malega zvončka (<i>Galanthus nivalis</i> L.)
C^2	<u>fenofaza splošnega (polnega) cvetenja</u>
C_{Pd}^2	julijanski dan nastopa splošnega cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' (<i>Prunus domestica</i> L.)
C_{Sn}^2	julijanski dan nastopa splošnega cvetenja črnega bezga (<i>Sambucus nigra</i> L.)
C_{Ah}^2	julijanski dan nastopa splošnega cvetenja navadnega divjega kostanja (<i>Aesculus hippocastanum</i> L.)
C_{Md}^2	julijanski dan nastopa splošnega cvetenja jablane, sorta 'Bobovec' (<i>Malus domestica</i> Borkh)
C_{Ca}^2	julijanski dan nastopa splošnega cvetenja navadne leske (<i>Corylus avellana</i> L.)
C_{Rp}^2	julijanski dan nastopa splošnega cvetenja navadne robinje (<i>Robinia pseudacacia</i> L.)

C_{Sv}^2	julijanski dan nastopa splošnega cvetenja španskega bezga (<i>Syringa vulgaris</i> L.)
L^1	<u>fenofaza prvih listov (olistanja)</u>
L_{Bp}^1	julijanski dan nastopa prvih listov navadne breze (<i>Betula pendula</i> L.)
L_{Fs}^1	julijanski dan nastopa prvih listov navadne bukve (<i>Fagus sylvatica</i> L.)
L_{Ah}^1	julijanski dan nastopa prvih listov navadnega divjega kostanja (<i>Aesculus hippocastanum</i> L.)
L_{Tp}^1	julijanski dan nastopa prvih listov lipe (<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.)
L_{Pa}^1	julijanski dan nastopa prvih poganjkov navadne smreke (<i>Picea abies</i> (L.) Karsten)
L^2	<u>fenofaza splošnega (jesenskega) rumenenja listov</u>
L_{Bp}^2	julijanski dan nastopa splošnega rumenenja listov navadne breze (<i>Betula pendula</i> L.)
L_{Fs}^2	julijanski dan nastopa splošnega rumenenja listov navadne bukve (<i>Fagus sylvatica</i> L.)
L_{Tp}^2	julijanski dan nastopa splošnega rumenenja listov lipe (<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.)
P^1	<u>fenofaza prvih zrelih plodov</u>
P_{Pd}^1	julijanski dan nastopa prvih zrelih plodov češplje, sorta 'Domača češplja' (<i>Prunus domestica</i> L.)
P_{Sn}^1	julijanski dan nastopa prvih zrelih plodov črnega bezga (<i>Sambucus nigra</i> L.)
P_{Ah}^1	julijanski dan nastopa prvih zrelih plodov navadnega divjega kostanja (<i>Aesculus hippocastanum</i> L.)
P_{Md}^1	julijanski dan nastopa prvih zrelih plodov jablane, sorta 'Bobovec' (<i>Malus domestica</i> Borkh)
P^2	<u>fenofaza začetka obiranja plodov</u>
P_{Pd}^2	julijanski dan začetka obiranja plodov češplje, sorta 'Domača češplja' (<i>Prunus domestica</i> L.)
P_{Md}^2	julijanski dan začetka obiranja plodov jablane, sorta 'Bobovec' (<i>Malus domestica</i> Borkh)

Okrajšave imen postaj

CE	Celje
IL	Ilirska Bistrica
LE	Lesce
LJ	Ljubljana
MB	Maribor
MS	Murska Sobota
NM	Novo mesto
RA	Rateče

Ostale okrajšave in simboli

d_i	število dni, potrebnih za nastop fenofaze	
d_s	dolžina svetlega dela dneva	
KV	koeficient variabilnosti	
NAO	severno atlantsko nihanje	
NAOI	indeks severno atlantskega nihanja	
$NAOI_{zim}$	indeks severno atlantskega nihanja za zimski čas (povprečje mesecev od decembra do marca)	
p	stopnja tveganja	
P_t	fototermalni čas	°D
r	korelacijski koeficient	
r^2	koeficient determinacije	
r_p^2	prilagojeni koeficient determinacije	
R_{mes}	mesečna količina padavin	mm
σ	standardni odklon	
T_{ds}	povprečna temperatura zraka za svetli del dneva	°C
T_{min}	minimalna dnevna temperatura zraka	°C
T_{max}	maksimalna dnevna temperatura zraka	°C
T_{mes}	povprečna mesečna temperatura zraka	°C
TP	spodnja temperatura praga	°C
V_{akt}	vsota aktivnih temperatur	°C
V_{ef}	vsota efektivnih temperatur	°C
VR	variacijski razpon	

1 UVOD

Agrometeorologija kot del biometeorologije je interdisciplinarna znanost, ki proučuje sistem medsebojne povezanosti med vremenom in kmetijskimi kulturami, domačimi živalmi, rastlinskimi boleznimi ter koristnimi in škodljivimi živalmi v ekosferi (Sivakumar in sod., 2000). Proučevanje vpliva vremenskih razmer in drugih dejavnikov na rast in razvoj različnih vrst rastlin nam omogoča, da pri načrtovanju kmetijske proizvodnje čimbolj izkoristimo podnebne danosti in tako dosežemo optimalno kakovost in velikost pridelka (Rijks in Baradas, 2000). Agrometeorološka dejavnost se z zbiranjem klimatskih in fenoloških podatkov neposredno vključuje v problematiko raziskovalnega dela v posameznih kmetijskih dejavnostih, fenološki podatki pa poleg meteoroloških predstavljajo osnovo za proučevanje vpliva vremena in podnebja na razvoj rastlin.

Beseda fenologija izhaja iz grških besed »phainesthai«, ki pomeni pojaviti se ter »logos«, razlog (Sivertsen in sod., 1998). Fenologija je časovno proučevanje periodičnih bioloških faz in vzrokov njihovega pojava ob upoštevanju biotičnih in abiotičnih dejavnikov ter medsebojnih odnosov zaporednih razvojnih faz znotraj ene vrste ali znotraj večih vrst (Lieth, 1974). Fenologijo delimo na

- fitofenologijo ali fenologijo rastlin, ki obravnava faze rastlin od začetka do konca rastne dobe in
- zoofenologijo ali fenologijo živali, ki spremlja pojave v razvoju živali (Otorepec, 1980).

Termin fenološko opazovanje pogosto označuje samo opazovanja razvoja rastlin, saj je število raziskav bistveno večje na področju fitofenologije kot zoofenologije. Raziskave na področju zoofenologije so usmerjene predvsem na fenologijo škodljivih žuželk (Gray in sod., 2001; Lindblad in Sigvald, 1996) in spremenjene vzorce selitev ptic (Sparks, 1999).

Fenološka opazovanja vključujejo opazovanje pojava fenofaze, ki ga izražamo kot julijanski dan (zaporedni dan v letu), beležimo dolžino fenofaze ter časovni interval med zaporednimi fenofazami iste rastline (Ahas, 1999).

Fenološke podatke uporabljamo na različnih področjih – v kmetijstvu so pomembni pri izdelavi agrometeoroloških analiz (primerjava povprečnih in ekstremnih vrednosti v določenem letu), ki nam služijo predvsem pri pripravi agrometeoroloških napovedi, pri načrtovanju kmetijske proizvodnje (Baumgärtner in sod., 1998), primernosti posameznih področij za gojenje določenih kmetijskih rastlin, predvsem z vidika toplotnih zahtev rastlin, pri načrtovanju agrotehničnih ukrepov kot so varstvo rastlin, setev, spravilo pridelka, namakanje, rez, zaščita pred pozebo (Esteves in Manso-Orgaz, 2001; Sivertsen in sod., 1998). Podolsky (1984) poroča, da so pri spravilu pridelka pšenice 2% izgube, če zamujamo dva dni in kar 20% izgube, če s spravilom zamujamo 12 dni. Cicogna in Gani (1999) sta v svoji raziskavi izdelala za koruzo karte povprečnih letnih vsot efektivnih temperatur zraka nad 10°C za večje število fenoloških postaj v Sloveniji in italijanski regiji Furlaniji-Juljski krajini. Na osnovi analize klimatskih in fenoloških podatkov sta predlagala izbor sort, ki so najbolj primerne za omenjeno območje s specifičnimi klimatskimi razmerami; ker obstaja za koruzo na tem področju velika verjetnost vodnega stresa v avgustu, je primerno gojiti sorte, ki cvetijo prej. Baumgärtner in sod. (1998) so razvili fenološki model za napoved časa fenofaz od setve do fiziološke zrelosti pri ajdi

(*Fagopyrum esculentum* Moench.). Uporabljajo ga za načrtovanje pridelave ajde v nekaterih predelih Švice in Italije; napoveduje pa zadnji možni datum setve ajde glede na temperaturo, ki že povzroča poškodbe rastlin preden dosežejo fiziološko zrelost in je uporaben kot dopolnilna informacija pri odločanju o gojenju ajde kot edine poljščine na višjih predelih ali kot dopolnilne poljščine po spravi žit. Napadi škodljivcev ter izbruhi rastlinskih bolezni so pogosto povezani s točno določeno razvojno fazo rastline, s primernim časom setve se lahko v določeni meri izognemo zgoraj omenjenim neugodnim razmeram (Podolsky, 1984).

Vse bolj pomembna je tudi uporaba fenoloških podatkov v medicini na področju alergij, saj so rastline vzrok številnim alergijam (npr. cvetenje breze, leske, številnih trav...). Pravočasna in natančna napoved cvetenja alergenih rastlin omogoči tako pacientom kot zdravniku, da se pravočasno pripravijo na izbruh bolezni, oz. se jim izognejo (Laaidi, 2001; Sušnik in Kofol-Seliger, 1999). Poleg tega so fenološke napovedi velikega pomena tudi pri rastlinah, ki jih uporabljamo v zdravilne namene - kopičenje aktivnih sestavin je tesno povezano s točno določeno stopnjo razvoja v rastlini (Sanderson in Wedin, 1989).

Pri sodobnih metodah modeliranja rasti, razvoja in pridelka rastlinske odeje potrebujemo številne vhodne podatke modela o rastlini in njenem okolju kot tudi podatke o obojem med rastno dobo (Lischke in sod., 1997; Mahmood, 1997; Schröder in Söndgerath, 1996). Še posebej so pomembni podatki o nastopu posameznih fenoloških faz, ki predstavljajo v simulacijskih modelih kretnice za sprožitev raznih procesov ali za spremembe njihove jakosti (Kajfež-Bogataj in Šušteršič, 1991; Jame in sod., 1998).

Pomemben vidik fenologije je tudi ta, da je le-ta pomembno orodje pri ugotavljanju prilagoditev rastlin na različna okolja, oziroma pomoč pri določitvi izvirne domovine rastlin, saj nam oblika in položaj razvojne krivulje določene rastline glede na dejavnike okolja lahko nakazujeta poreklo rastline (Desclaux in Roumet, 1996; Podolsky, 1984; Birch in sod., 1998).

Proučevanje fenoloških faz v dolgem časovnem nizu je vse pomembnejše orodje za ugotavljanje vpliva klimatskih sprememb tako na rastlinski kot živalski svet (Sparks in sod., 2000; Chmielewski in Rötzer, 2000; Sušnik, 2000; Esteves in Manso-Organ, 2001). Številne raziskave zadnjih let so pokazale, da višje temperature v spomladanskem obdobju na območjih zmernih geografskih širin vplivajo na zgodnejši fenološki razvoj rastlin (Beaubien in Freeland, 2000; Menzel, 2000), jesenske faze kažejo manjše spremembe, tako da na podaljšanje rastne sezone vplivajo predvsem zgodnejše pomladi (Ahas in sod., 2000).

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Fenološki razvoj rastlin je odvisen od biotskih in abiotskih dejavnikov okolja. Med abiotskimi dejavniki okolja sta temperatura in dolžina dneva dva izmed najpomembnejših dejavnikov okolja, ki odločujoče vplivata na fenološki razvoj rastlin (Huang in sod., 2001; Galan in sod., 2001; Rötzer in sod., 2000). Rastline potrebujejo za prehod iz ene v drugo razvojno stopnjo v svojem življenjskem krogu določeno količino toplote. Razvoj temelji na akumuliranih toplotnih enotah in je zato merjen kot fiziološki ali termalni čas namesto

koledarskega časa (Zalom in sod., 1983). Vsaka vrsta ima določeno spodnjo in zgornjo temperaturo praga, to sta temperaturi, pod katero oziroma nad katero je stopnja procesov rasti minimalna (Black in Ong, 2000). Skupna množina energije, ki jo organizem potrebuje za svoj razvoj od takrat, ko je temperatura višja od spodnje temperature praga in nižja od zgornje temperature praga, se računa v enotah, imenovanih stopinjski dnevi (Wielgolaski, 1999). Optimalna in minimalna temperatura za določeno stopnjo razvoja se z rastno dobo spreminjata (Lemos in sod., 1997; Liu in sod., 1998). Metode za določevanje toplotnih dejavnikov za rast rastlin so številne (določitev minimalne, optimalne in maksimalne temperature za rast, temperature pragov, vsote stopinjskih dni), raziskav na tem področju je narejenih že precej, čeprav univerzalno uporabljane metode ni (Liu in sod., 1998; Lemos in sod., 1997; McMaster in Wilhelm, 1997; Mygdakos in Gemtos, 1998; Roltsch in sod., 1999; Snyder in sod., 1999).

Pri nekaterih rastlinah je začetek ontogenetskega razvoja rastline odvisen od sprememb v dolžini dneva (Hakkinen, 1999), opredelitev vpliva dolžine dneva na fenologijo pa je bolj problematična kot določitev fenološke temperature odvisnosti. Vzrok, zakaj je tako težko natančno opredeliti vpliv dolžine dneva na fenološke procese, je najbrž v multikolinearnosti temperature in dolžine dneva (Hodges, 1991). V zmernem pasu dolžina dneva in povprečna temperatura zraka sledita sinusni krivulji, vendar so najvišje temperature zraka dosežene šele približno en mesec po najdaljšem dnevu v letu. Med posameznimi rastlinskimi vrstami obstajajo velike razlike glede odzivnosti na dolžino dneva (Keatinge in sod., 1998), še posebej pa je na dolžino dneva ter sprejeto sevanje občutljiva fenofaza cvetenja oziroma zasnova cvetnih organov pri mnogih rastlinah (Black in Ong, 2000; Carberry in sod., 2001). Ena izmed pogosto uporabljenih skal za izražanje fenološkega razvoja je fototermalna skala, s katero opišemo fenološki razvoj glede na temperaturo in dolžino dneva. Pogosto uporabljena metoda za izračun fototermalnega časa je ta, da termalni čas pomnožimo z dolžino dneva (Perry in sod., 1997; Jame in sod., 1998; McMasters, 1988). Natančnejša metoda za izračun fototermalnega časa upošteva povprečno temperaturo samo svetlega dela dneva (Masle in sod., 1989).

Odvisnost fenološkega razvoja od padavin pride do izraza predvsem na območjih, kjer rastlinam med vegetacijo vode primanjkuje (Loss in sod., 1997), oziroma tam kjer je voda omejujoči dejavnik rasti. Vpliv vodnega stresa na rastlinsko fenologijo je odvisen od trajanja in jakosti pomanjkanja padavin, pri čemer je zelo pomembno, v katerem obdobju razvoja rastline se to dogaja. Premalo padavin lahko povzroči zakasnen vzni, kasnejše cvetenje, skrajšajo se nekatera medfazna obdobja, rumenenje listja v jeseni je zgodnejše (Desclaux in Roumet, 1996). Primarni vpliv vodnega stresa se kaže predvsem v procesih rasti, lahko pa upočasní proces zasnove cvetenja. Ob pomanjkanju vode se zmanjša tok latentne toplote z lista v okolje, zaradi česar naraste temperatura rastline in se zaradi tega rastlina hitreje stara (Sivertsen in sod., 1998). Prezgodnejše staranje lahko povzročijo tudi nekateri drugi dejavniki okolja kot je na primer ultravijolično sevanje, pomanjkanje dušika, onesnaženost zraka, vode ali tal. Visoke dnevne temperature so odvisne od vpadajočega sončnega sevanja, tako da je razumljivo, da oblačno in deževno vreme tik pred začetkom cvetenja zakasni to fenofazo pri mnogih vrstah (jerebika, španski bezeg, jablane, hruške, maline). Pri večini gozdnega drevja pa veliko padavin zgodaj v rastni sezoni očitno pospeši razvoj popkov in povzroči zgodnejše brstenje (breza, prav tako rdeči ribez, slive). Ob predolgi zasičenosti tal z vodo lahko pride v območju korenin do pomanjkanja kisika, ki je

potreben za rast korenin in dihanje, zato je aktivnost koreninskega sistema zmanjšana, transport vode v rastlino zmanjšan, rastlina kaže podobne simptome kot ob suši (Hoogenboom, 2000).

Variabilnost klime v makro skali močno vpliva na povprečne klimatske razmere in tako tudi vpliva na fenologijo rastlin. Severno atlantsko nihanje (NAO) je meridialno nihanje atmosferskih mas med Islandijo in Azori, to nihanje opisujemo z NAO indeksom (NAOI), ki temelji na razliki med standardiziranim zračnim pritiskom na morskem nivoju med dvema krajema, ki ležita v centrih z različnim zračnim pritiskom (Hurrell in van Loon, 1997). Področje nizkega zračnega pritiska se nahaja okrog Islandije, področje visokega zračnega pritiska pa okrog Azorskih otokov (Post in Stenseth, 1999). V letih z visokim NAOI (pozitivne vrednosti) sta obe področji pritiska zelo močni in relativno blizu, nahajata se bolj na severo-vzhodni lokaciji, kar ima za posledico močne zračne tokove toplega vlažnega zraka iznad Severnega Atlantika proti Evropi. Nasprotno pa sta v letih z nizkim NAOI (negativne vrednosti) obe področji pritiska sorazmerno šibki, področji sta locirani južneje in kot posledica tega so zračni tokovi iznad Atlantika proti Evropi manj izraziti (Hurrell, 1995). Čeprav sam indeks opisuje polji pritiska, pa je seveda z njim povezan bolj ali manj intenziven transport toplih in vlažnih zračnih mas iznad Atlantika proti Evropi kar ima za posledico tudi velik vpliv na rastlinsko fenologijo. Hurrell (1996) je ugotovil, da je 31% variance v nihanju temperature med leti v zimskem času na severni polobli pojasnjeno z variabilnostjo NAOI, Glowienka-Hense (1990) pa trdi, da lahko v lokalni skali NAO pojasnimo celo do 60% variabilnosti temperature, posledično pa lahko z NAOI pojasnimo tudi del variance v pojavu fenofaz (Post in Stenseth, 1999). Številne raziskave kažejo v zadnjih desetletjih trend zgodnejšega cvetenja rastlin oziroma daljše vegetacijske dobe tako v Evropi kot tudi drugod po svetu (Menzel, 2000; Beaubien in Freeland, 2000; Ahas in sod., 2000), obenem pa tudi NAOI kaže trend od prevladujočih let z nizkim indeksom v 1970-tih in 1980-tih do let z visokim indeksom v zadnjih dvajsetih letih. Za mnoga področja so že ugotovili povezanost med NAOI ter nastopi fenoloških faz (Esteves in Manso-Orgaz, 2001; Post in Stenseth, 1999; Chmielewski in Rötzer, 2001), med drugim tudi za področje osrednje Italije (Piovesan in Schirone, 2000) in Slovenije (Skaar, 1999). NAOI v zimskih mesecih (december-marec) je značilno koreliran s temperaturo in padavinami, v poletnem času pa nima direktnega vpliva na centralni del Evrope, južneje od 50° (Glowienka-Hense, 1990).

Poleg temperature zraka, padavin in sevanja oziroma dolžine dneva, vplivajo na razvoj rastlin še nekateri drugi vremenski dejavniki kot so temperatura tal, veter, relativna zračna vlaga. Na mnogih področjih je temperatura tal zelo pomembna na samem začetku rastne sezone v smislu setve in kalitve, pri prezimnih žitih pa temperatura tal lahko vpliva tudi na vernalizacijo (Hoogenboom, 2000). Relativna vlaga, absolutna vlaga, temperatura rosišča in deficit vlažnosti so pomembnejše agrometeorološke spremenljivke, s katerimi izražamo količino vodne pare v zraku. Vplivajo na evapotranspiracijo, to je količino izhlapele vode iz rastlinske odeje, kar lahko privede ob visoki stopnji evapotranspiracije in pomanjkanju padavin do vodnega stresa za rastline. Količina vlage v zraku pa lahko vpliva na rastline tudi posredno kot biološki stres in sicer preko številnih rastlinskih bolezni in škodljivcev, katerih razvoj in aktivnost sta močno odvisni od vlažnostnih razmer v okolju.

Ugotovitev o vplivu agrometeoroloških dejavnikov na rast in razvoj rastlin ne moremo posplošiti, saj ista vrsta lahko različno reagira glede na področje, kjer jo gojimo oziroma v skladu s svojo genetsko variabilnostjo (Willits in Peet, 1988). Tako Chmielewski in Köhn (2000) navajata, da potrebuje ječmen za svoj razvoj v sub-arktičnih predelih manj kot 80 dni, v severovzhodnem delu Nemčije pa v povprečju 111 dni. Birch in sod. (1998) navajajo, da koruza potrebuje za razvoj dveh zaporednih listov manj časa v zmernih področjih kot v tropskem in subtropskem pasu. Gre za prilagoditve tako na temperaturo zraka kot tudi dolžino dneva (Hodges, 1991). Čeprav je v svetu narejenih veliko število raziskav o vplivu različnih agrometeoroloških spremenljivk na fenologijo rastlin, za Slovenijo obsežnejše študije o tem še ni. Kvantificiranje odnosov med fenološkimi fazami različnih vrst rastlin ter agrometeorološkimi dejavniki na klimatsko različnih področjih bo pripomoglo k opredelitvi kritičnih spremenljivk, ki najbolj vplivajo na variabilnost fenološkega razvoja v Sloveniji.

1.2 CILJI RAZISKAVE

Namen našega dela je izdelava modelov, s katerimi bomo lahko napovedovali fenološki razvoj različnih rastlinskih vrst v Sloveniji na osnovi nekaterih agrometeoroloških spremenljivk. Določili oziroma izračunali bomo

- vsote aktivnih temperatur za nastop posameznih fenofaz obravnavanih rastlin na različnih lokacijah (iz povprečnih in minimalnih dnevnih temperatur zraka);
- temperature spodnjega praga za nastop posameznih fenofaz obravnavanih rastlin na različnih lokacijah;
- vsote efektivnih temperatur za nastop posameznih fenofaz obravnavanih rastlin na različnih lokacijah;
- fototermalni čas za nastop fenofaz na izbrani lokaciji za vse obravnavane rastline;
- korelacije med nastopom fenofaz ter povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka, mesečnimi količinami padavin in NAO indeksom;
- trende nastopa fenofaz ter trajanja rastne dobe za nekatere drevesne vrste;
- izdelali in preverili bomo fenološke ter mešane fenoklimatske multiple regresijske modele za napoved nastopa 14 fenofaz po načelu parsimoničnosti (preprostosti) za tiste fenofaze, pri katerih napovedi časa pojava lahko uporabimo za določene ukrepe oziroma analize.

Napovedi cvetenja jablane in češplje lahko uporabimo pri načrtovanju agrotehničnih ukrepov. Cvetenje leske, breze in pasje trave je pomembno z vidika alergenih obolenj, ki jih povzroča cvetni prah omenjenih rastlin, čas cvetenja pasje trave pa poleg tega tudi glede določitve krmne vrednosti rastline. Napovedi cvetenja regrata, lipe, robinije ter španskega bezga so pomembne v farmacevtski industriji in pri načrtovanju paše čebel, poleg tega pa sta španski bezeg in robinija na seznamu rastlin, za katere poteka mednarodna izmenjava fenoloških podatkov. Čas olistanja drevesnih vrst ter trajanje rastne dobe pri brezi, bukvi in lipi uporabljamo pri časovni analizi pojavljanja fenofaz glede na spremembe klime.

Rezultati naših raziskav bodo pripomogli k boljšemu razumevanju vpliva meteoroloških dejavnikov na fenološki razvoj rastlin, točne in pravočasne napovedi fenoloških modelov

pa so lahko neposredno uporabne tako pri kmetijski proizvodnji kot tudi pri reševanju problematike raziskovalnega dela v posameznih agrometeoroloških dejavnostih.

1.3 HIPOTEZE

- S pravilno izbiro izmerjenih ter izračunanih agrometeoroloških spremenljivk lahko izdelamo dovolj točne in pravočasne napovedi fenološkega razvoja obravnavanih rastlin.
- Velik del variabilnosti nastopa fenofaz lahko pojasnimo s temperaturo zraka in njenimi izpeljankami (povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka, vsoto aktivnih temperatur, vsoto efektivnih temperatur glede na temperaturo spodnjega praga, določeno za vsako rastlino posebej s statistično metodo) ter količino padavin.
- Predvidevamo, da s fototermalnim časom lahko bolje opišemo pojav določenih fenofaz kot s termalnim časom.
- Del variabilnosti v nastopu fenofaz lahko pojasnimo z NAO indeksom za zimske mesece.
- Predvidevamo, da se klimatske spremembe odražajo na zgodnejšem fenološkem razvoju rastlin ter da obstajajo spremembe v dolžini rastne dobe v Sloveniji v obravnavanem obdobju (1955-1999).

2 PREGLED OBJAV

2.1 ZGODOVINSKI PREGLED RAZVOJA FENOLOGIJE

Človek je že od vsega začetka opazoval značilnosti v življenjskem krogu rastlin, saj je bilo od poznavanja le teh odvisno njegovo preživetje. Na podlagi izkušenj so se prvi kmetovalci naučili, kako v dobrih letih pridelati največ in kako imeti v slabih letih čim manjše izgube pridelka. Tako je že v prvem stoletju pred našim štetjem kitajski agronom Fan Sheng-Chih napisal kmetijski priročnik, ki so ga pred nedavnim prevedli v angleščino, v njem pa je mnogo primerov, ki jih danes opredeljujemo kot predmet agrometeorologije (Monteith, 2000). Najstarejša zapisana fenološka opazovanja so poznana iz Kitajske in so stara skoraj 2500 let, obstajajo pa tudi fenološki koledarji, ki so jih uporabljali Rimljani. Danes poznan najdaljši niz fenoloških podatkov imajo na Japonskem, kjer zaradi tradicionalnega »praznika cvetenja češenj« obstajajo zapisi o datumu začetka cvetenja češenj že od leta 812 dalje (Otošec, 1980). Na osnovi teh fenoloških podatkov sta Aono in Omoto (1994) razvila metodo, s katero sta ocenila temperaturne razmere za Kyoto od 11. stoletja do današnjih dni. Prva sistematska fenološka opazovanja v znanstvene namene je izvajal švedski botanik Carl von Linné, ki velja za začetnika moderne fenologije in fenoloških opazovanj. V svojem delu *Philosophia Botanica*, ki je izšlo l. 1751, je opisal metode za izdelavo fenoloških koledarjev na osnovi fenoloških in klimatoloških podatkov. To je bila vzpodbuda za številna nova fenološka opazovanja in izdelavo fenoloških koledarjev, tako je npr. Stellingfleet v Angliji l. 1755 izdal »*Floral Calendar*«, l. 1762 Scopoli »*Calendarium Florae Carniolicae*«, Hänke l. 1780 »*Beobachtung der Blütezeiten in Prag*« (Lieth, 1974). Konec 18. stoletja so v Nemčiji ustanovili prvo mednarodno meteorološko-fenološko mrežo, v katero so bile vključene številne evropske države: Belgija, Italija, Francija, Švica, Anglija, Nizozemska in Nemčija. Sistematična opazovanja fenoloških faz raznih rastlinskih vrst pa so se v Evropi začela konec 19. stoletja. V tem času je bil najpomembnejši fenolog Ihne, ki je 59 let zapored (od 1883 do 1941) zapisoval fenološke faze nekaterih rastlin in jih izdal v letnih publikacijah, izdelal pa je tudi eno prvih fenoloških kart v Evropi. Z leti se je mreža fenoloških opazovanj zelo razširila, povečal se je program opazovanj in tudi izboljšala kakovost le-teh.

Danes so fenološka opazovanja sestavni del opazovanj na agrometeoroloških lokacijah v vseh državah članicah Svetovne meteorološke organizacije. Velik problem je standardizacija opazovanj: potrebna je enotna izbira rastlin, natančne definicije fenofaz, poenotenje časovne periode opazovanj in glede na izmenjave fenoloških podatkov tudi univerzalen format shranjevanja le-teh (Nejedlik, 2000).

V Evropi je bila večina opazovalnih mrež, ki obstajajo še danes, vzpostavljena med leti 1940 in 1950 (Bussay, 1999). Za mednarodno izmenjavo fenoloških podatkov pa so pomembni »Mednarodni fenološki vrtovi«, ki so povezani v fenološko mrežo Evrope, ustanovila sta jo Schnelle in Volkert leta 1957 (Chmielewski in Rötzer, 2000). Osnovna zamisel te mreže je bila zagotovitev primerljivih fenoloških podatkov širom Evrope, ki ne bi vključevali različnih genetskih lastnosti pri isti rastlinski vrsti. Tako so vegetativno razmnožili nekatere splošno razširjene drevesne in grmovne vrste ter v letu 1959 začeli s prvimi fenološkimi opazovanji. Danes je v Evropi okrog 50 mednarodnih fenoloških vrtov,

v katerih opazujejo fenološke faze 26 rastlinskih vrst. Mednarodni fenološki vrt imamo tudi v Sloveniji in sicer v parku Tivoli v Ljubljani od leta 1959 dalje.

2.2 POMEMBNEJŠE SVETOVNE RAZISKAVE S PODROČJA FENOLOGIJE

2.2.1 Zbiranje fenoloških podatkov

Raziskave na področju fenologije potekajo v več glavnih smereh. Prvi, manjši del raziskav se ukvarja s problematiko fenoloških opazovanj in zbiranja podatkov. Na težave pri standardizaciji v fenologiji sta v zadnjem času opozorila Bussay (1999) in Nejedlik (1999). Niz fenoloških podatkov naj bi bil čim daljši, poleg tega pa naj bo mreža fenoloških postaj organizirana prostorsko tako, da bo dajala optimalne ocene fenološkega razvoja (Maak in Storch, 1997). Na podlagi omejenega števila podatkov s fenoloških postaj, ki so razporejene na nekem območju, z različnimi prostorskimi interpolacijskimi tehnikami lahko ocenimo vrednosti za celotno obravnavano območje (Valter in Kott, 1999). Orlandini in sod. (1999) so v svoji raziskavi ocenili uporabnost metode z nevronske mreže na osnovi fenoloških podatkov za vinsko trto, rezultati pa so pokazali, da modeli z nevronske mreže dajejo dobre ocene fenološkega razvoja tako v regionalni kot lokalni skali. V zadnjem času potekajo tudi poskusi daljinskega zaznavanja fenoloških pojavov, satelitsko skenirane podatke pa so uporabili pri izdelavi fenoloških kart (Schwartz in Karl, 1990; Schwartz, 1992; Schwartz, 1994; Chen in sod., 2000; Chen in sod., 2001).

2.2.2 Abiotski dejavniki, ki vplivajo na variabilnost fenoloških pojavov

2.2.2.1 Temperatura

Drugi del raziskav proučuje, kateri so tisti dejavniki, ki najbolj vplivajo na variabilnost fenoloških pojavov. V naši nalogi se bomo omejili na nekatere abiotske agrometeorološke dejavnike. Temperatura in dolžina dneva sta dva najpomembnejša dejavnika okolja, ki vplivata na fenološki razvoj rastlin (Huang in sod., 2001), zato je tudi razumljivo, da je največ raziskav narejenih ravno na tem področju. Rastline potrebujejo za prehod iz ene v drugo razvojno stopnjo v svojem življenjskem krogu določeno količino toplote. Razvoj temelji torej na akumuliranih toplotnih enotah, čas, potreben za razvoj pa izražamo kot fiziološki ali biološki čas namesto koledarskega (Zalom in sod., 1982). Metode za ugotavljanje vpliva toplotnih dejavnikov na fenologijo rastlin so številne. Zelo pomembna je določitev spodnje in zgornje temperature praga, to sta temperaturi, ki določata hitrost razvoja rastline. Izbira pravilne temperature praga je kritična vrednost za izračun stopinjskih dni oziroma vsote efektivnih temperatur (Black in Ong, 2000). Koncept temperature praga je lahko fiziološki ali statističen. Če ne obstaja s poskusi določena fiziološka temperatura praga, lahko le-to izračunamo s statističnimi metodami, ki se med sabo precej razlikujejo tudi glede na cilje raziskave (Gorski in Jazurek, 1996). Splošno načelo pri izračunu je, da mora biti standardna deviacija glede na izračunane stopinjske dneve čim manjša (Spano in sod., 1999). Temperatura spodnjega praga je za mnoge rastline dobro definiran, medtem ko so temperature zgornjega praga slabše raziskane. Poznavanje teh temperatur pa je pomembno za fenofaze, ki se pojavljajo v poletnem času (Black in Ong, 2000). Kritična vrednost pri izračunu akumuliranih toplotnih enot je tudi začetni datum, od katerega dalje računamo akumulacijo. V nekaterih primerih je ta čas

podan s setvijo ali saditvijo. Spano in sod. (1999) so v svoji raziskavi kot začetni datum uporabili začetek koledarskega leta, Wielgolaski (1999) pa ga je določil s statističnimi metodami. Galan in sod. (2001) so določili temperaturo spodnjega praga za oljko, Perry in sod. (1997) za paradižnik, Mahmood (1997) za riž, Piper in sod. (1996) za sojo... Temperatura praga je za posamezne razvojne faze pri isti rastlini različna (Lemos in sod., 1997; Liu in sod., 1998), spreminja pa se celo iz leta v leto (Arnold, 1959). Naslednja stopnja pri analizi vpliva toplotnih dejavnikov na rast rastlin je izračun stopinjskih dni ali efektivnih temperatur. Obstaja veliko število uporabljenih metod (Aceituno, 1979; Arnold, 1959; Bewick in sod., 1988; Liu in sod., 1988; Lemos in sod., 1997; McMaster in Wilhelm, 1997; Perry in sod., 1986; Snyder in sod., 1999; Yang in sod., 1995). Navadno pri izračunu vsote efektivnih temperatur upoštevamo povprečno temperaturo zraka, narejene pa so tudi raziskave o vplivu maksimalnih ali minimalnih dnevnih in nočnih temperatur zraka na hitrost razvoja (Piper in sod., 1996; Masle in sod., 1989; Perry in sod., 1997). Med pojavom prvih listov in začetkom cvetenja je razvojna stopnja mnogih rastlin zelo močno povezana z naraščajočo dnevno, oziroma maksimalno temperaturo, medtem ko je na drugi strani razvoj listnih brstov pred brstenjem v splošnem močnejše koreliran s temperaturnimi razmerami ponoči (White, 1979; Wielgolaski in Klaveness, 1996), prav tako polnjenje zrnja pri pšenici oziroma gomoljev pri krompirju (Willits in Peet, 1988). Piper in sod. (1996) so razvili preprost model za napovedovanje cvetenja soje na osnovi minimalne temperature zraka in z njim razložili več variabilnosti v času cvetenja kot z maskimalno ali povprečno temperaturo zraka.

Velik del variabilnosti temperature zraka med leti v zimskem času lahko na severni polobli pojasnimo s severno atlantskim nihanjem (NAO). Razliko v zračnem pritisku med centrom visokega in nizkega pritiska v Evropi lahko izrazimo kot NAO indeks. Polja pritiska vplivajo na transport zračnih mas in spremenljivost vremena v makro skali, od česar so odvisne tudi povprečne podnebne razmere (Hurrell in Loon, 1997) in s tem posredno rast in razvoj rastlin. Številni avtorji so ugotavljali posreden vpliv zračnega pritiska na fenologijo rastlin (Beaubien, 1996; Post in Stenseth, 1999; Chmielewski in Rötzer, 2000; Piovesan in Schirone, 2000; Esteves in Manso-Orgaz, 2001).

Poleg temperature zraka vpliva na razvoj rastlin tudi temperatura tal (Zalom in sod., 1983). Rastline na zemeljskem površju segajo s stebli, vejami in listjem v prosto ozračje, s koreninami pa v zemljo. Zato vplivajo na njihov življenjski ritem zračne in zemeljske temperature. Za Slovenijo je naredil analizo povezanosti zračnih in zemeljskih temperatur za 12 klimatsko različnih krajev Gams (1989). Ugotovil je, da je do globine enega metra zemlja v letnem povprečju za približno 1.5°C toplejša od zraka in da obstaja večja povezava med zračnimi in zemeljskimi temperaturami kot med sprejetim sevanjem in zemeljskimi temperaturami. Na mnogih območjih je temperatura tal zelo pomembna na samem začetku rastne sezone v smislu setve in kalitve, pri prezimnih žitih pa temperatura tal lahko vpliva tudi na vernalizacijo (Hoogenboom, 2000). Kirchgäßnerjeva (2000) je ugotovila, da lahko variabilnost rastne dobe pri buki opiše s temperaturami zraka 5 cm nad tlemi, visoke temperature tal pa lahko delujejo zaviralno na razvoj rastlin (Black in Ong, 2000).

2.2.2.2 Padavine

Količina padavin je dejavnik, od katerega je rast rastlin sicer močno odvisna, vendar pa na količino rastlinam dostopne vode bistveno lažje vplivamo z agrotehničnimi ukrepi kot na svetlobni in temperaturni režim rastišča. To je eden izmed vzrokov, zakaj je raziskav o odvisnosti fenološkega razvoja od padavin relativno malo. Bistvenega pomena pa je ta vpliv v sušnih predelih (Loss in sod., 1997; Thomson in sod., 1997). Kakšne so posledice pomanjkanja vode na pojav fenofaz, je odvisno od trajanja in jakosti pomanjkanja padavin, rastlina pa je v posameznih fenofazah različno občutljiva na vodni stres (Zalom in sod., 1983; Willits in Peet, 1988). Hodges (1991) navaja, da blagi vodni stres lahko pri nekaterih vrstah razvoj pospeši, medtem ko ga močan stres upočasni ali celo ustavi. Pomanjkanje vode vpliva na kasnejši vznik in s tem cvetenje, pospešijo se procesi staranja (Desclaux in Roumet, 1996). Pri večini gozdnega drevja pa veliko padavin zgodaj v rastni sezoni očitno pospeši razvoj brstov in povzroči zgodnejše brstenje. Kirchgäßner in sod. (2000) navajajo, da količina padavin statistično značilno vpliva na dolžino rastne dobe v Nemčiji. Nekateri avtorji v svoje fenološke modele vključujejo tudi padavinske razmere (Laaidi, 2001; Šegula-Ilič, 1990).

2.2.2.3 Dolžina dneva

Poleg temperature zraka je dolžina dneva eden od dveh glavnih dejavnikov, ki določata hitrost razvoja rastline. Jame in sod. (1998) so preizkusili različne metode za določitev vpliva dolžine dneva na fenologijo rastlin, poleg linearnih in kvadratnih funkcij tudi eksponentne. Vendar pa mnoge od teh predlaganih matematičnih funkcij vsebujejo preveliko število koeficientov, ki izhajajo iz regresijskih analiz brez upoštevanja fiziologije procesov rasti in razvoja. Posledično so informacije, izhajajoč iz takih modelov, krajevno specifične. Dolžina dneva je zelo pomembna pri zasnovi reproduktivnih organov (Carberry in sod., 2001), zato so raziskave številčnejše pri rastlinah, ki so pomembne pri proizvodnji semen. Vpliv dolžine dneva na fenologijo pšenice je proučeval McMasters (1988), prav tako Masle in sod., (1989), ki so ugotovili, da je pojav zaporednih listov pri pšenici bolj koreliran s fototermalnim časom kot s termalnim. Podobne raziskave so bile narejene tudi za ajdo (Baumgärtner in sod., 1998), sojo (Piper in sod., 1996), riž (Kawakata in Yajima, 1993) in številne druge (Hakkinen in sod., 1995; Perry in sod., 1997; Lemos in sod., 1997). Problem pri ugotavljanju vpliva svetlobnih razmer na fenologijo rastlin je v multikolinearnosti temperature in svetlobe, zato izvajajo številne poskuse v kontroliranih razmerah v rastnih komorah, kjer lahko ločeno proučujejo vpliv temperature in dolžine dneva (Hodges, 1991) na rast in razvoj rastlin. Huang in sod. (2001), ki so v nadzorovanih razmerah spremljali vpliv fotoperiode na fenološki razvoj njivske gorjušice, so ugotovili, da ima ta rastlina veliko sposobnost prilagajanja na različne fotoperiodične razmere v okolju. Vpliv dolžine dneva na fenologijo metuljnic v kontroliranih razmerah so proučevali Keatinge in sod. (1998) in ugotovili velike razlike med posameznimi vrstami. Pri sevanju pa je seveda pomembna tudi jakost obsevanja. Birch in sod. (1998) so s poskusom na primeru koruze dokazali, da so majhne vrednosti fotosintetsko aktivnega sevanja značilno podaljšale plastokron (čas med pojavom zaporednih listov na rastlini).

2.2.2.4 Nadmorska višina

Nadmorska višina prav tako vpliva na variabilnost pojava fenofaz (Jeanneret, 1996). Kochova (2000) je ugotavljala vpliv nadmorske višine na začetek cvetenja češnje ter zorenje divjega kostanja. Za vsakih 100 m višje nadmorske višine cvetenje češnje kasni za 3 dni, zorenje pri divjem kostanju pa za 1,5 dneva. Fenološke značilnosti cvetenja črnega bezga, regrata in domače češplje je proučeval Zrnec (1994). Ugotovljena je bila tesna povezanost med datumom pojava prvih cvetov izbranih vrst in nadmorsko višino. Cvetenje robinije je močno povezano z nadmorsko višino (Walkovszky, 1998; Gorski in Jazurek, 1996). Dolgoletna opazovanja geografskega inštituta v Bernu so pokazala pri leski 5-7 dni poznejše cvetenje za vsakih 100 m višje nadmorske višine (Defila, 1996). Rötzer in sod. (2000) so ugotovili močno statistično značilno odvisnost fenoloških faz od nadmorske višine, geografske dolžine in širine.

2.2.3 Časovna analiza pojavljanja fenofaz

Tretji, praktično uporaben del raziskav v fenologiji, zajema analize fenoloških podatkov in uporabo izsledkov le-teh za prognoze na različnih področjih. V zadnjih desetletjih je narasla potreba po raziskavah o vplivu spremenjene klime na fenologijo rastlin. Večina raziskav analizira vpliv spremenjenih temperatur zraka na začetek pojava fenofaz ter trajanje rastne sezone (dolžina medfaznega obdobja, npr. med fenofazo olistanja ter fenofazo rumenjenja listja). Poznavanje odvisnosti fenološkega razvoja rastlin od temperature pa nam lahko omogoči tudi ocenitev temperaturnih razmer v preteklosti, če imamo na voljo fenološke podatke. Tako sta Aono in Omoto (1994) razvila metodo, s katero sta na osnovi fenoloških podatkov o cvetenju češnje od 11. stoletja dalje ocenila temperaturo za Kyoto. Nekatere rastlinske vrste se na spremenjene klimatske razmere še posebej močno odzivajo in so zato bolj primerne za takšne vrste proučevanj. Primer je robinija, katere cvetenje je zelo močno korelirano s povprečno spomladansko temperaturo zraka, zato se je z njeno fenologijo ukvarjalo precej avtorjev (Gorski in Jazurek, 1996; Walkovszky, 1998; Bergant in Kajfež-Bogataj, 1999).

Rötzer (2000) je analiziral podatke mednarodnih fenoloških vrtov po Evropi in ugotovil v več kot polovici naravnih regij, ki predstavljajo vso Evropo, trend podaljšanja rastne sezone. Te raziskave se ujemajo z izsledki Menzlove (2000) ter Chmielewskega in Rötzerja (2000), ki sta za Evropo ugotovila za obdobje zadnjih 30-tih let približno 8 dni zgodnejše pojavljanje spomladanskih fenofaz, jesenske fenofaze trenda niso pokazale. Kochova (2000) je ugotovila zgodnejši pojav nekaterih spomladanskih fenofaz za zahodne Alpe v Avstriji. Wielgolaski in Klaveness (1996) sta analizirala podatke o začetku cvetenja 41 različnih rastlinskih vrst in ugotovila trend zgodnejšega pojavljanja začetka pomladi oziroma poletja v severnejših predelih Norveške, medtem ko za južne dele trend ni bil statistično značilen. Vpliv klimatskih sprememb na pojave fenofaz je proučeval v Nemčiji Sachweh (1996) in ugotovil pri malem zvončku ter forzitiji značilno zgodnejše pojavljanje fenofaze začetek cvetenja. Nasprotno pa Defila (1996) v svoji raziskavi ni dokazal trenda zgodnejšega pojavljanja fenofaz v Švici, z izjemo pojavljanja prvih listov pri divjem kostanju v Genevi, kar pa naj bi bila posledica ogrevanja mesta in ne klimatskih sprememb. Ahas in sod. (2000) navajajo, da so v Estoniji predvsem spomladanske fenofaze značilno zgodnejše, manjše spremembe so v času pojava jesenskih fenofaz, tako

da je podaljšanje rastne sezone v zadnjih treh desetletjih predvsem posledica zgodnejšega začetka rastne dobe. Obenem tudi zaključujejo, da bi se naj ob predvidenih scenarijih klimatskih sprememb povečala variabilnost v času nastopa fenofaz. Za Kanado so Beaubienova (1996) ter Beaubien in Freeland (2000) analizirali indekse spomladanskega cvetenja in ugotovili trend 10 dni zgodnejšega cvetenja za obdobje zadnjih šestdesetih let.

Predmet raziskav v fenologiji so tudi vplivi klimatskih sprememb v bodočnosti na pojave fenofaz. Tako sta Maakova in Storch (1997) na osnovi GCM modela, ki predvideva do leta 2035 podvojeno koncentracijo CO₂, napovedala za severne predele Nemčije dva tedna zgodnejše cvetenje malega zvončka. Ahas in sod. (2000) glede na izsledke raziskave predvidevajo, da bo fenološki razvoj v Estoniji ob spremembi temperature zraka za 2 stopinji ostal znotraj meja naravne variabilnosti (ekstremno topla, ekstremno hladna leta), še bolj pa bi se naj povečala variabilnost v nastopu fenofaz.

2.2.4 Modeliranje fenološkega razvoja

S hitrim razvojem računalništva v zadnjih desetletjih se je povečalo število raziskav na področju agrometeoroloških modelov. Modeliranje je način kvantificiranja odnosov med biološkimi procesi (vključujoč tudi fenološke) in dejavniki okolja ali med različnimi biološkimi procesi z namenom bolj natančnega opisa, razumevanja in napovedovanja letih glede na pogonske spremenljivke (Lieth, 1974). Če naše poznavanje bioloških in okoljskih procesov lahko izrazimo na kvantitativen način oziroma matematično, potem lahko procese rasti in razvoja, njihove medsebojne interakcije ter interakcije z okoljem opišemo z računalniškim programom oziroma modelom (Scharrer in Schmidt, 1998). Eno izmed načel pri agrometeoroloških modelih je parsimoničnost ali preprostost modelov (Mechlia in Carroll, 1989a; Landau in sod., 2000). McMasters (1988) predlaga multiplo regresijo kot najpreprostejši način za oblikovanje modelov za napoved fenoloških dogodkov.

Hodges (1991) navaja, da je za učinkovit prenos znanja (modela) do uporabnika, ki bo lahko to znanje uporabil za rešitev praktičnega problema ali načrtovanje kmetijske proizvodnje, potrebno izpolniti nekatere minimalne zahteve:

- program mora biti uporaben za ljudi, katerim je namenjen, to je tistim, ki bi od njega naj imeli koristi. Če je potrebno za učinkovito uporabo modela veliko izkušenj s področja računalništva ali znanja najnovejših znanstvenih dosežkov agronomske znanosti, potem bo relativno malo število potencialnih uporabnikov lahko izkoristilo še tako dober program;
- program mora potrebovati samo tiste vhodne podatke, do katerih bodo uporabniki lahko prišli z relativno malo napora in stroškov glede na koristi, ki jih bodo imeli ob uporabi modela;
- program naj zagotovi natančne in pravočasne uporabne informacije za rešitev problema, za katerega smo iskali modelsko rešitev.

Izdelani so bili številni modeli za napoved fenološkega razvoja različnih kmetijskih rastlin, npr. za pšenico (Harrison in sod., 2000; Landau in sod., 2000), paradižnik (Perry in sod., 1997), koruzo (Cicogna in Gani, 1999; Birch in sod., 1998), ajdo (Baumgärtner in sod., 1998), sadno drevje (Kajfež-Bogataj in Bergant, 1998; Mechlia in Carroll, 1989a,b; Aono

in Omoto, 1990), hmelj (Zmrzlak, 1991), oljko (Galan in sod., 2001), sojo (Piper in sod., 1996), vinsko trto (Orlandini in sod., 1999; Žust, 1994; Esteves in Manso-Organ, 2001). Poleg kmetijskih rastlin so predmet modeliranja tudi fenološke faze gozdnega drevja (Šegula-Ilič, 1990; Veselič, 1990; Chen, 1996). Kott in Valter (1999) sta raziskovala, ali lahko izbrane fenofaze nekaterih divjih rastlin uporabimo kot napovednik za najbolj pomembne fenofaze pri gojenih rastlinah.

Fenološki podatki so lahko uporabni tudi pri določanju trajanja rastne dobe. Chen (1996) je v svoji raziskavi z različnimi metodami določeval dolžino rastne dobe gozdnega drevja za gorato področje centralne Nemčije in ugotovil, da lahko dolžino rastne dobe opišemo bolje na osnovi nastopa fenofaz (obdobje od faze olistanja do faze rumenjenja listja) kot na osnovi števila dni nad izbranim temperaturnim pragom oziroma obdobjem med zadnjo spomladansko in prvo jesensko slano. Rastna doba, definirana na osnovi nastopa fenofaz, je dejanska rastna doba, ki temelji na fotosintetsko aktivnem obdobju rastline, medtem ko rastna doba na osnovi povprečnih temperatur opisuje le termalne razmere v vegetacijski dobi. Kirchgäßner in sod. (2000) so dolžino vegetacijske dobe za bukev v Nemčiji določili kot obdobje od fenofaze olistanja do rumenjenja listja, Chmielewski in Rötzer (2000) pa sta definirala rastno dobo na osnovi povprečnega datuma olistanja in odpadanja listja za štiri rastlinske vrste (breza, češnja, jerebika in ribez).

Nastop fenofaze je zunanje vidna sprememba na rastlini, ki pa je posledica notranjih biokemičnih procesov rasti in razvoja (Otorepec, 1980). Kemična sestava rastline in s tem kopičenje aktivnih sestavin je torej povezano s točno določeno razvojno stopnjo rastline, zato je poznavanje nastopa določene fenofaze odločilno pri proizvodnji zdravih rastlin (Podolsky, 1984). Kvaliteta travne ruše navadno upada z zrelostjo, zato bi poznavanje povezave med spremembo kvalitete trave in fenološkim razvojem pomenilo velik napredek pri modeliranju optimiziranja pašništva in kvalitete krme. Poskus v kontroliranih razmerah, v katerem so proučevali odnos med kemično sestavo določenih vrst trav in detelj ter njihovim fenološkim razvojem, sta opravila Sanderson in Wedin (1989). Ugotovila sta tesno zvezo med kemično sestavo proučevanih rastlin in fenološkimi fazami.

Vse bolj pomembna je tudi uporaba fenoloških podatkov ali modelov za napoved cvetenja alergenih rastlin, kajti cvetni prah rastlin povzroča približno polovico vseh alergij pri ljudeh (Laaidi, 2001). Pravočasna napoved cvetenja alergenih rastlin mogoči tako pacientom kot zdravniku, da se pripravijo na izbruh bolezni, obenem pacienti lahko načrtujejo kraj in datum dopusta tako, da se čimbolj izognejo možnosti alergije (Podolsky, 1984). V Evropi lahko ažurne podatke o stanju cvetnega prahu v zraku glede na območja oziroma posamezne rastline dobimo na naslovu <http://www.cat.at/pollen/index.en.html> (Jäger, 2001). Če meritev koncentracij cvetnega prahu nimamo na voljo, lahko uporabimo v ta namen fenološke modele za napovedovanje cvetenja alergenih rastlin, tak primer je model za napoved cvetenja trav, ki ga je izdelal Laaidi (2001).

2.3 FENOLOŠKE RAZISKAVE V SLOVENIJI

Raziskave na področju fenologije v Sloveniji so relativno mlade, čeprav je arhiv podatkov sorazmerno obsežen in zajema petdesetleten niz podatkov. Do začetka devetdesetih let je bilo fenoloških raziskav zelo malo, na pomen poznavanja fenoloških faz rastlin za uspešno

simulacijo njihovega razvoja, rasti in pridelka pa sta opozorila Hočevar in Kajfež-Bogatajeva (1991).

2.3.1 Sadno drevje in vinska trta

Največ fenoloških raziskav pri nas je povezanih s sadnim drevjem. Hočevar (1964) je v svojem delu določil povezavo med fenološkim razvojem rastline (češnja, jablana) in tipom vremena, katerega so določali naslednji parametri: osončenje, relativna zračna vlaga in sprememba povprečne dnevne temperature glede na predhodni dan. Raziskoval je tudi korelacijo med nastopi fenofaz ter fototermalnim časom, izraženim kot Geslinov heliotermični faktor. S fenologijo češenj se je ukvarjala tudi Smoletova (1979), ki je v svojem delu primerjala čas pojava različnih fenofaz pri 49 kultivarjih češenj na območju Goriške. Določila je povprečne datume začetka brstenja, cvetenja, zorenja in konca rasti ter izračunala dolžino rastnega obdobja, obdobje počitka, potrebno število dni za razvoj plodov ter trajanje cvetenja. S fenološkim razvojem jablan sta se ukvarjali Sušnikova (1990) in Tabernikova (1990). Sušnikova je določevala variabilnost temperaturnih pragov 0°C in 5°C ter temperaturne vsote za fenofazi olistanja in začetek cvetenja pri štirih sortah jablan. Statistični izračuni so pokazali, da je temperaturni prag 5°C manj variabilen in zato bolj primeren za jablane v naših razmerah. Tabernikova (1990) je določila povprečne dneve pojavov fenofaze olistanja in cvetenja ter dolžine medfaznih obdobj za štiri sorte jablan za 21 krajev Slovenije. Škrjančeva (1997) je v svojem delu proučevala značilnosti fenološkega razvoja treh sort hrušk ('Tepka', 'Viljamovka', 'Pastorijevka') ter nastop temperaturnih pragov 0°C in 5°C za tridesetletno obdobje za 11 fenoloških postaj v Sloveniji.

Na osnovi dolgoletnih fenoloških podatkov so bile proučevane možnosti napovedovanja pojavljanja fenofaze splošnega cvetenja jablane (*Malus domestica* Borkh) sorte 'Bobovec' v Ljubljani (Kajfež-Bogataj in Bergant, 1998). Kot neodvisne spremenljivke so bile uporabljene: vsota akumuliranih temperatur zraka od prestopa temperaturnega praga 6°C, povprečne mesečne temperature zraka v pomladnih mesecih, predhodne fenološke faze pri jablani in fenološke faze pri drugih rastlinah (breza in lipa). Rezultati so pokazali, da za napovedovanje cvetenja jablane lahko uporabimo tako fenološke podatke negojenih rastlin kot tudi predhodne faze razvoja jablane. Na osnovi te raziskave so bile narejene tudi primerjave napovedovanja splošnega cvetenja jablane, hruške in češplje (Kajfež-Bogataj in Bergant, 1999; Bergant in sod., 2001). Tako v primeru uporabe multiple linearne regresije kot tudi metode temperaturnih vsot so bile podobnosti med modeli napovedovanja vseh treh sadnih vrst očitne.

Narejenih je bilo tudi nekaj raziskav glede možnosti uporabe fenoloških podatkov samoniklih rastlin za napovedovanje fenofaz sadnih rastlin. Strajnarjeva (1997) je v svojem delu na osnovi meteoroloških in fenoloških podatkov iskala zveze med nastopom fenoloških faz sadnih rastlin (jablana, domača češplja, hruška, oreh) in samoniklih rastlin (breza, bukev, lipa, divji kostanj, španski bezeg, ivanjščica, robinija). Fenološke značilnosti cvetenja črnega bezga, regrata in češplje je proučeval Zrnec (1994). Ugotovil je tesno povezanost med datumom pojava prvih cvetov izbranih vrst in nadmorsko višino ter povezanost med časom cvetenja samoniklih vrst in gojenega sadnega drevja, s čimer je lahko napovedal cvetenje češplje, sorta 'Domača češplja'.

Žustova (1994) je proučevala zveze med dolžinami glavnih medfaznih obdobj vinske trte in vsotami temperatur nad izbranimi temperaturnimi pragovi za postaji Gornja Radgona ter Slap pri Vipavi, pri čemer so bile ugotovljene pozitivne linearne zveze med dolžino medfaznih obdobj in vsotami temperatur nad izbranimi temperaturami pragovi. S fenologijo vinske trte se je v svojem delu ukvarjala tudi Sanda (1999), ki je ugotavljala pogojenost nastopa fenofaz štirih sort vinske trte glede na vinorodni rajon oziroma geografsko lego. Poleg tega je analizirala tudi možnost napovedovanja določenih fenofaz pri vinski trti na osnovi predhodnih fenofaz in različnih temperaturnih pragov.

2.3.2 Poljščine

S fenologijo hmelja se je v svoji raziskavi ukvarjal Zmrzlak (1991), ki je analiziral pojav vseh fenofaz pri hmelju za sorti 'Savinjski golding' in 'Auroro', izračunal vsote efektivnih temperatur za nastop fenofaze zrelosti pri obeh sortah in na osnovi linearne regresije izdelal modele za napovedi nastopa določenih fenofaz glede na predhodne fenofaze in meteorološke spremenljivke.

Povezavo med fenofazami pri ovsu in nekaterimi agrometeorološkimi spremenljivkami je proučeval Hočevar (1964). Okornova (1994) je ugotavljala značilnosti dinamike fenološkega razvoja ozimne pšenice za različne kultivarje in lokacije glede na meteorološke parametre (povprečne dnevne temperature zraka ter dneve s snežno odejo debelejšo od 1 cm). Raziskava je pokazala, da obstajajo izrazite medsebojne povezanosti posameznih fenofaz, na osnovi katerih je možno oblikovanje fenoloških modelov za napoved fenofaz vznika, cvetenja, mlečne, voščene in polne zrelosti ter žetve.

Dolžino medfaznih fenoloških obdobj pri koruzi in njene toplotne potrebe je proučevala Sušnikova (1994) za področje severovzhodne Slovenije. Uporabila je tri različne metode izračunavanja toplotnih potreb: vsote efektivnih temperatur nad pragom 10°C, modificirane vsote efektivnih temperatur in vsote koruznih toplotnih enot po Brownu. S fenologijo koruze sta se ukvarjala Cicogna in Gani (1999), ki sta v svoji raziskavi izdelala karte povprečnih letnih vsot efektivnih temperatur zraka za večje število fenoloških postaj v Sloveniji in italijanski regiji Furlaniji-Juljski krajini.

2.3.3 Gozdno drevje

Nekaj raziskav je obravnavalo tudi fenologijo gozdnega drevja. Model ozelenitve nekaterih drevesnih vrst (breza, bukev, hrast dob in smreka) je izdelal Šegula-Ilič (1990). Pri tem je uporabil dve metodi: prva uporablja kot neodvisne spremenljivke efektivne temperature zraka, globalno obsevanje, veter in padavine, druga metoda za izračun ozelenitve pa temelji na vsoti efektivnih temperatur iglic glede na njihovo energijsko bilanco. Veselič (1990) je v svoji nalogi analiziral pojav olistanja bukve glede na različne meteorološke dejavnike na treh postajah (Rateče-Planica, Rovte in Maribor). Na osnovi poskusa z bukovimi mladikami v nadzorovanih razmerah je nakazal tudi vpliv dolžine dneva, spektralne sestave svetlobe in vlažnosti tal na olistanje bukve. Hočevar (1990) je v svojem delu podal značilnosti fenološkega razvoja nekaterih listopadnih vrst v Sloveniji.

2.3.4 Ostale fenološke raziskave

Zaradi omejenega števila fenoloških opazovalnih postaj je potrebno včasih z različnimi metodami prostorsko interpolirati fenološke podatke, da bi dobili bolj globalen vpogled na različne fenofaze cvetenja na različnih lokacijah. V raziskavi sta bili za interpolacijo fenoloških podatkov za cvetenje robinije za hladno in toplo pomlad uporabljeni dve metodi: navadni kriging (brez informacije o reliefu) in kriging z zunanjim odklonom (vključena nadmorska višina) (Bergant in Kajfež-Bogataj, 1999). S statističnim interpoliranjem povprečnih mesečnih temperatur zraka v manjšo prostorsko skalo pri napovedovanju cvetenja regrata so se ukvarjali Bergant in sodelavci (2002).

Dečmanova (1995) je analizirala nastop spomladanskih in jesenskih temperaturnih pragov, dolžino obdobja med pragovoma ter vsoto aktivnih temperatur nad temperaturnimi pragi 0°C, 5°C in 10°C za pet klimatsko različnih krajev v Sloveniji. Črepinškova in Kajfež-Bogatajeva (2001) pa sta s statistično metodo določili spodnje temperature pragov za nastop fenofaz pri različnih samoniklih in gojenih rastlinah na osmih lokacijah v Sloveniji.

Fenološki podatki so uporabni tudi na področju varovanja človekovega zdravja. V raziskavi so proučevali sinhronizem med pojavom fenološke faze in začetkom sezone pojava peloda, ki pri določenih osebah povzroča alergije (Sušnik in Kofol-Seliger, 1999). Za lesko, jelšo in brezo so primerjali datume nastopa fenološke faze cvetenja s podatki o pojavu peloda (meritve le-tega izvaja pri nas Inštitut za varovanje zdravja v Ljubljani). Analiza je pokazala, da z beleženjem fenološke faze cvetenja lahko ocenimo začetek sezone pojava peloda v zraku za regije, kjer še ni vzpostavljen monitoring peloda.

Glede na pričakovane spremembe svetovne klime so narejene že številne raziskave fenoloških trendov, prve tudi pri nas. Strajnarjeva (1997) je raziskovala spremembe fenološkega razvoja nekaterih sadnih in samoniklih rastlin glede na klimatska nihanja. Spremembe v času pojava fenoloških faz ter trende za nekatere samonikle rastline v Sloveniji je analizirala Sušnikova (2000). Za cvetenje regrata in olistanje breze je bil pojav zgodnejši za obdobje 1951-1997, medtem ko je za bukev ugotovila kasnejše olistanje in kasnejše rumenenje. Izračunala je tudi, da bi naj do leta 2025 regrat cvetel približno 10 dni zgodneje, jesensko rumenenje bukve pa naj bi se pričelo 12 dni kasneje. Kajfež-Bogatajeva (2001) je ugotavljala vpliv povišanja pomladanskih temperatur zraka na olistanje nekaterih dreves in grmovnic, olistanje je bilo na večini lokacij zgodnejše, najmočnejša trenda pa sta bila značilna za lesko in ivo. V okviru mednarodne izmenjave fenoloških podatkov je narejenih tudi nekaj tujih raziskav o fenoloških trendih v Sloveniji (Skaar, 1999; Chmielewski in Rötzer, 2000).

2.4 METODE OBDELAVE FENOLOŠKIH PODATKOV

2.4.1 Določitev temperature praga

Izbira pravilne temperature praga je kritična vrednost za izračun akumulirane toplote, potrebne za nastop določene fenološke faze (Spano in sod., 1999). V preglednici 1 je prikazan hipotetičen primer, ki nam prikazuje, kakšno napako naredimo pri izračunu toplotnih enot ob nepravilni izbiri temperature spodnjega praga (TP).

Preglednica 1 : Hipotetični primer prikaza napake izračuna vsote efektivnih temperatur ob uporabi nepravilne temperature praga

Table 1: Hypothetical example illustrating the error of degree-days sum through the use of an incorrect base temperature

T_{pov} (°C)	Št. potrebnih dni do nastopa F_x	Vsota efektivnih temperatur		
		TP=3°C	TP=5°C	TP=7°C
15	n=120	1440 (+240)	1200	960 (-240)
20	n=80	1360 (+160)	1200	1040 (-160)
25	n=60	1320 (+120)	1200	1080 (-120)

V gornjem primeru predpostavljamo, da je pravilna temperatura praga za neko izbrano rastlino 5°C, potrebna vsota efektivnih temperatur do nastopa obravnavane fenofaze (F_x) pa znaša 1200°C. Vsota efektivnih temperatur pri TP=5°C je enaka ne glede na to, pri kakšni povprečni temperaturi smo rastlino vzgajali; količina toplote, potrebna za celoten razvoj organizma, se ne spreminja, produkt temperature in časa je vedno enak (Zalom in sod., 1983). Ob višji temperaturi (25°C) je potreben za razvoj krajši čas (60 dni) kot ob nižji temperaturi (15°C) (120 dni). Pri izbiri prenizke TP (TP=3°C) je izračunana V_{ef} previsoka (npr. pri $T_{pov}=15^\circ\text{C}$ za 240°C); ravno nasprotno pa nam izračun V_{ef} daje prenizke vrednosti, kadar je izbrana TP previsoka (pri TP=7°C in $T_{pov}=15^\circ\text{C}$ je izračunana V_{ef} enaka 960°C namesto 1200°C). Na splošno lahko trdimo, da bo ob previsoko izbrani TP vsota efektivnih temperatur za določeno rastlino naraščala skladno z naraščajočo povprečno temperaturo med rastno dobo, če izberemo prenizko temperaturo praga, bo trend obraten.

Koncept temperature praga lahko opišemo fiziološko ali statistično. Določitev temperature praga na osnovi fizioloških parametrov rastline je precej zahtevna, saj so za to potrebni dolgotrajni in obsežni poljski poskusi, na temperaturo praga pa vplivajo številni dejavniki kot so npr. kultivarji rastlin, starost rastline, razvojna faza, karakteristike tal, preskrbljenost rastlin z vodo in hranili (Arnold, 1959; Lemos in sod., 1997; Liu in sod., 1988). Zato se za izračun V_{ef} uporabljajo metode, ki temeljijo na oceni, da sta stopnja razvoja rastline in temperatura linearno povezani, kar popolnoma ne drži, še posebej pri nižjih temperaturah (Arnold, 1959; McMasters, 1988). Zaradi vseh že omenjenih spremenljivk, ki vplivajo na temperaturo praga in dejanske nelinearnosti temperaturne odvisnosti rasti, so vse statistične metode za izračun temperature praga v linearnem sistemu samo ocena dejanskih fizioloških temperatur praga za izbrano rastlino (Wielgolaski, 1999). Potrebno je preizkusiti niz različnih temperatur v območju možnih temperatur praga, tako so npr. za določitev TP za cvetenje koruze testirali temperature med 0°C in 15°C po korakih za 1°C, za fenofazo razraščanja pri sladkornem trstu temperature v območju med -2°C ter 20°C (Liu in sod., 1998). Perry in sod. (1986) so določili TP za fenofazo zrelosti kumar po analizi temperatur med 0°C in 25.5°C. Tista temperatura, ki nam da najmanjši koeficient variacije ali standardnega odklona oziroma vrednosti regresijskega koeficienta najbližje vrednosti 0, je statistično določena temperatura praga za izbrano rastlino.

Pregled najbolj pogosto uporabljenih statističnih metod za določitev TP podajajo Arnold (1959), Snyder in sod. (1999), Wielgolaski (1999) ter Yang in sod. (1995):

2.4.1.1 Metoda najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur

Po tej metodi (Arnold, 1959; Yang in sod., 1995) je izbrana temperatura praga tista, z uporabo katere je standardni odklon vsote izračunanih efektivnih temperatur do nastopa F_x minimalen. Najmanjši standardni odklon vsote efektivnih temperatur je definiran kot:

$$\sigma(V_{ef}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{ef}^i - V_{ef})^2}{n-1}} \quad \dots(1)$$

pri čemer je V_{ef} povprečna vsota efektivnih temperatur za vse rastline, n je število vseh obravnavanih rastlin, V_{ef}^i je V_{ef} za i -to rastlino in $\sigma(V_{ef})$ najmanjši standardni odklon V_{ef} . Pri tej metodi izračunamo niz vsot efektivnih temperatur glede na niz možnih temperatur praga. Za vsako vsoto efektivnih temperatur izračunamo standardni odklon. Tista temperatura praga, na osnovi katere je standardni odklon V_{ef} najmanjši, je statistično določena najprimernejša TP za izbrano fenofazo. Ker je postopek določitve TP na ta način dolgotrajen in zahteva precej računanja, so Yang in sod. (1995) iz gornje metode izpeljali enačbo, ki nam omogoča hitrejši izračun TP s sorazmerno malim številom potrebnih podatkov:

$$TP = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i \cdot \sum_{i=1}^n d_i - n \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot T_i}{\left(\sum_{i=1}^n d_i\right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad \dots(2)$$

pri čemer je T_i povprečna dnevna temperatura zraka za obdobje, izraženo kot število dni (d_i), ki ga i -ta rastlina potrebuje za nastop F_x , n pa je število vseh obravnavanih rastlin.

2.4.1.2 Metoda najmanjšega standardnega odklona števila dni

Po tej metodi (Snyder in sod., 1998; Yang in sod., 1995) je izbrana temperatura praga tista, z uporabo katere je standardni odklon števila dni do nastopa F_x minimalen. Najmanjši standardni odklon v dnevih je definiran kot:

$$\sigma_d = \frac{\sigma(V_{ef})}{T_{pov} - TP} \quad \dots(3)$$

pri čemer je σ_d najmanjši standardni odklon v dnevih, $\sigma(V_{ef})$ najmanjši standardni odklon V_{ef} , T_{pov} povprečna dnevna temperatura zraka za obdobje, potrebno za nastop F_x pri vseh rastlinah in TP temperatura praga.

Metoda 2.4.1.2 vključuje isti postopek kot metoda 2.4.1.1, se pravi izbiro prave TP iz niza možnih TP. Razlika je le v enotah, v katerih izražamo napako; pri prvi metodi jo izražamo

kot stopinje in pri drugi kot dneve, ki jih toplotne enote v bistvu predstavljajo. Število dni nam bolj nazorno prikazuje odstopanje od povprečnega datuma nastopa F_x za obravnavano rastlino. Tudi pri tej metodi lahko skrajšamo računski postopek določitve TP:

$$TP = T_{pov} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (T_{pov} - T_i) \cdot d_i \right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n (T_{pov} - T_i)^2 \cdot d_i^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot (T_{pov} - T_i) - n \cdot \sum_{i=1}^n (T_{pov} - T_i) \cdot d_i \cdot \sum_{i=1}^n d_i} \quad \dots(4)$$

V enačbi (4) je T_{pov} povprečna dnevna temperatura zraka za obdobje, potrebno za nastop F_x pri vseh (n) rastlinah, T_i pa povprečna dnevna temperatura zraka za obdobje (d_i), potrebno za nastop F_x pri i-ti rastlini.

2.4.1.3 Metoda najmanjšega koeficienta variabilnosti števila dni

Metodi 2.4.1.1 in 2.4.1.2 dajeta absolutne vrednosti odstopanja vsote efektivnih temperatur oziroma dni od povprečja, ne pokažeta pa relativne velikosti teh odstopanj. Yang in sod. (1995) ter Wielgolaski (1999) predlagajo kot eno izmed možnih metod za izračun TP naslednjo enačbo:

$$KV = \frac{\sigma_d}{d} \cdot 100\% \quad \dots(5)$$

KV je koeficient variabilnosti, izražen v odstotkih, σ_d najmanjši standardni odklon v dnevih in d povprečno število dni, ki so potrebni za nastop F_x za n rastlin. V enačbi (5) je d enak za vse rastline, izračunan pa je kot povprečje vseh obdobj (d_i), potrebnih za nastop F_x za vsako posamezno (i-to) rastlino. Iz enačbe (5) izpeljemo TP kot:

$$TP = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i - \sum_{i=1}^n d_i \sum_{i=1}^n T_i^2 \cdot d_i^2}{\sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i - \sum_{i=1}^n d_i \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i^2} \quad \dots(6)$$

V gornji enačbi je T_i povprečna dnevna temperatura zraka za obdobje d_i , potrebno za nastop F_x pri i-ti rastlini, n pa število vseh obravnavanih rastlin.

Vse tri zgoraj opisane metode so empirične. Za določitev TP, ki nam da najmanjšo variabilnost efektivnih temperatur ali dni, je potrebno izbrati niz možnih temperatur za izračun V_{ef} ali d in njihove pripadajoče standardne odklone. Če je TP, ki daje najmanjše standardne odklone, precej pod ničlo, smo lahko pogrešili že pri izbiri možnih TP.

2.4.1.4 Metoda regresijskega koeficienta linearnega regresijskega modela

Ta metoda vsebuje TP kot neodvisno spremenljivko in V_{ef} kot odvisno spremenljivko (Wielgolaski, 1999; Yang in sod., 1995).

Da bi izboljšali metodo oziroma odpravili del pomanjkljivosti prvih treh empiričnih metod, so Yang in sod. (1995) razvili metodo regresijskega koeficienta za določitev TP. Metoda temelji na opredelitvi odvisnosti med povprečno temperaturo zraka v obdobju, potrebnem za nastop F_x in vsoto učinkovitih temperatur, potrebnih za nastop F_x , z linearnim regresijskim modelom:

$$V_{ef}^i = a + b \cdot T_i \quad \dots(7)$$

$$V_{ef}^i = (T_i - TP) \cdot d_i \quad \dots(8)$$

V_{ef}^i je vsota učinkovitih temperatur, potrebnih za nastop F_x za i -to rastlino, T_i je povprečna dnevna temperatura zraka za obdobje d_i , potrebno za nastop F_x pri i -ti rastlini, TP je temperatura praga, a in b pa sta konstanti regresijskega modela. V tem linearnem regresijskem modelu je neodvisna spremenljivka povprečna temperatura zraka in odvisna spremenljivka vsota učinkovitih temperatur, model temelji na predpostavki, da V_{ef} konstantna in neodvisna od povprečne temperature (Zalom in sod., 1982). Kadar je izbrana TP previsoka, je regresijski koeficient pozitiven in obratno negativen ob prenizko izbrani TP. Kadar je regresijski koeficient enak nič, je izbrana temperatura TP. Izračunamo jo lahko kot:

$$TP = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_i - n \cdot \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_i^2}{\sum_{i=1}^n d_i \cdot \sum_{i=1}^n T_i - n \cdot \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_i} \quad \dots(9)$$

pri čemer je T_i povprečna dnevna temperatura zraka za obdobje d_i , potrebno za nastop F_x pri i -ti rastlini, n pa število vseh obravnavanih rastlin.

2.4.1.5 Metoda stopnje razvoja

Gre prav tako za metodo linearne regresije, kjer določimo TP glede na stopnjo razvoja rastline (Arnold, 1959):

$$1/d = a + b \cdot T_{pov} \quad \dots(10)$$

$$TP = -a/b, \text{ kadar je } 1/d = 0 \quad \dots(11)$$

V enačbi (10) je $1/d$ stopnja razvoja, d je število dni, potrebnih za nastop F_x , T_{pov} povprečna temperatura zraka, a je nagib regresijske premice in b regresijski koeficient. Kadar je $1/d=0$, takrat je $TP=-a/b$. Potrebujemo podatek o povprečni temperaturi in povprečni stopnji razvoja glede na V_{ef} . Iz podatkov za n -ponovitev (rastlin) nato lahko oblikujemo regresijsko enačbo, v kateri je T_{pov} neodvisna in $1/d$ odvisna spremenljivka.

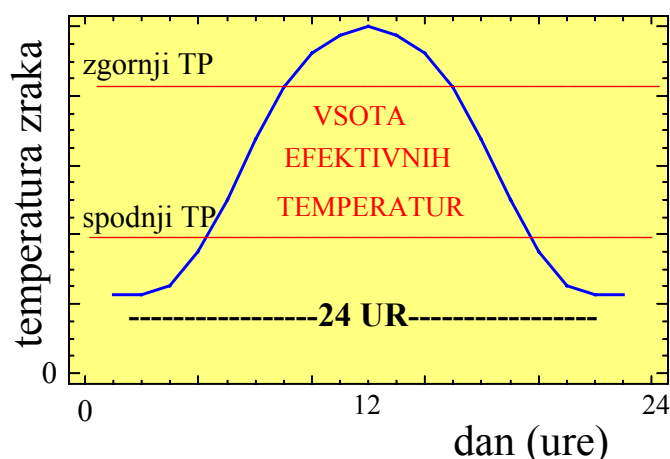
Metoda temelji na predpostavki, da serijo morfoloških in biokemičnih sprememb, katerih posledica so vidne spremembe (pojav fenofaze), lahko merimo s t.i. enotami razvoja. Arnold (1959) je stopnjo razvoja izrazil v % na dan. Nekateri avtorji v zgodnjih stopnjah merijo razvoj glede na število nodijev na rastlini (Podolsky, 1984), drugi ga izražajo kot plastokron, to je termalni čas, ki je potreben za pojav dveh zaporednih listov na rastlini (Masle in sod., 1989), pri tej metodi pa je problematično to, da ne moremo enačiti razvoja v vegetativni in generativni fazi.

Pri določanju dejanske spomladanske temperature praga po definiciji velja, da nastopi ta temperatura z dnem, po katerem se povprečna dnevna temperatura spomladi ne spusti več pod temperaturo praga. Pred nastopom temperature praga povprečna dnevna temperatura niha okrog temperature praga, kasneje pa se dvigne in le izjemoma pade pod temperaturo praga. Pojav nizkih temperatur kasneje lahko vpliva na zastoj rasti pri rastlinah, ne spremeni pa začetka fizioloških procesov oziroma datuma prestopa temperature praga. Glede na predhodne raziskave Dečmanove (1995) in Abseca (2001) bomo kot kriterij za nastop dejanskega temperaturnega praga preizkusili dve dolžini obdobja, ko mora biti povprečna dnevna temperatura zaporedoma višja (spomladi) od temperature praga in sicer 5 in 10 dni.

2.4.2 Izračun temperaturnih vsot

Temperatura nadzoruje stopnjo razvoja pri mnogih organizmih. Rastline potrebujejo določeno količino toplote za razvoj od ene do druge točke razvoja v njihovem življenjskem ciklu. Količina toplote, potrebna za celoten razvoj organizma, se ne spreminja, produkt temperature in časa je vedno enak (Zalom in sod., 1983). Za kvantifikacijo vpliva temperature na razvoj rastline uporabljamo izraz termalni čas ali fiziološki čas. Akumuliran termalni čas računamo kot vsoto efektivnih temperatur (V_{ef}), ki jim je bila rastlina tekom vegetacije izpostavljena. Lahko gre za linearen odnos ali različne nelinearne povezave. Termalni čas temelji na temperaturi zraka, razen v zgodnjih stadijih pri nekaterih rastlinah, ko je meristem še pod površino tal ali blizu tal, v takih stadijih je boljše kot temperaturo zraka uporabiti temperaturo tal.

Metode za izračun vsote efektivnih temperatur so številne. Nekatere temeljijo na uporabi urnih vrednosti temperature zraka, uporabne so v primerih, ko potrebujemo zelo natančne izračune. Ker pa je s tem postopek računanja veliko bolj zapleten, predvsem pa, ker podatki vedno niso na voljo, večina metod uporablja za izračun dnevne minimalne in maksimalne temperature zraka. Izračun V_{ef} temelji na predpostavki, da lahko dnevni temperaturni profil izrazimo z določeno krivuljo, oziroma izračunamo akumulirane toplotne enote kot površino pod temi dnevnimi temperaturnimi krivuljami v območju med spodnjo in zgornjo temperaturo praga (TP).



Slika 1: Vsota efektivnih temperatur je akumuliran produkt časa in temperature med temperaturo spodnjega in zgornjega praga

Figure 1: Degree-days are the accumulated product of time and temperature between lower and upper developmental thresholds

Temperatura spodnjega praga je za organizem definirana s temperaturo zraka, pod katero se razvoj in rast ustavita, temperatura zgornjega praga pa je temperatura zraka, nad katero se stopnja rasti ali razvoja začne zmanjševati ali se ustavi. Skupna količina za organizem potrebne toplote, med temperaturo spodnjega in zgornjega praga, ki povzroči prehod od ene do druge razvojne točke življenjskega cikla, se pogosto računa kot vsota efektivnih temperatur, ki so akumuliran produkt časa in temperature med razvojnima pragoma za vsak dan. Ena efektivna stopinja je dosežena, če imamo en dan (24 ur) s temperaturo, višjo za eno stopinjo od temperature praga. Večja kot je torej razlika med temperaturo zraka in temperaturo praga, večja je vsota efektivnih temperatur oziroma hitrejša je stopnja razvoja rastline.

Temperaturne vsote dobimo s seštevanjem pozitivnih povprečnih temperatur zraka, torej od datuma, ko je presežena temperatura spodnjega praga 0°C (Kramer in sod., 2000). To so vsote aktivnih temperatur (V_{akt}):

$$V_{akt} = \sum_{i=1}^n T(i) ; T(i) \geq 0^{\circ} C \quad \dots(12)$$

Če pa vsote računamo od prestopa višje temperature praga, moramo od povprečne dnevne temperature odšteti izbrano temperaturo praga (oziroma biološkega temperaturnega minimuma). To vsote efektivnih temperatur (V_{ef}):

$$V_{ef} = \sum_{i=1}^n (T(i) - TP) \quad \dots(13)$$

Izbira prave TP je bistvenega pomena za pravilen izračun V_{ef} , pomen in metode za določitev TP smo opisali v poglavju 2.4.1. Za izračun akumuliranih toplotnih enot pa poleg že omenjenih temperatur potrebujemo tudi začetni datum, s katerim začnemo šteti termalni čas (starting date ali biofix). Pri enoletnicah glede tega ni težav, saj poznamo datum setve oziroma sajenja. Pri trajnicah bi bilo vsekakor najboljšje ta začetni datum določiti fiziološko, kar pa je zelo težko, saj je dejanski datum začetka razvoja rezultat predhodnih razmer (pretekla rastna doba) in dejanskih razmer v tekočem letu (Mechlia in Carroll,

1989a). Zato se v fenoloških študijah pogosto uporablja kot začetni datum kar začetek koledarskega leta, to je 1. januar (McMaster, 1988; Menzel, 1996; Spano in sod., 1999). Wielgolaski (1999) predlaga za Norveško, kjer je pričetek rastne dobe v primerjavi z našimi kraji zakasnen zaradi nizkih temperatur, ta začetni datum od 1. aprila dalje. Veselič (1990) pa je v svoji raziskavi ugotovil, da so v Ratečah za čas olistanja bukve pomembne šele temperaturne razmere od 1. marca dalje, medtem ko je ta datum za Maribor 1. februar. Eden izmed možnih način določitve začetnega datuma je seštevanje inaktivnih temperatur po koncu rastne dobe, ki so potrebne za prekinitev dormance (Vučetić M. in Vučetić V. , 1996). Vsi izračuni, ne glede na uporabljeno metodo, so le ocena dejanske vsote efektivnih temperatur za dane temperature in temperaturi obeh pragov (Roltsch in sod., 1999). Vendar pa so ocene dovolj dobre glede na zanesljivost merilnih instrumentov in zahtevano natančnost glede na uporabo rezultatov. Metode se med sabo precej razlikujejo po stopnji matematične zapletenosti, najpogosteje uporabljane metode za izračun V_{ef} pa so: metoda pravokotnika, metoda trikotnika in metoda sinusoide.

2.4.2.1 Metoda pravokotnika

Je najenostavnejša metoda za izračun V_{ef} , sicer manj natančna od metod trikotnika in sinusoide, vendar daje zadovoljive rezultate in velja kot standardna metoda. Najbolj pogosto uporabljana enačba za izračun V_{ef} po tej metodi je naslednja (McMaster in Wilhelm, 1997; Perry in sod., 1997; Liu in sod., 1998) :

$$V_{ef} = \sum_{i=1}^n \left(\left[\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} \right] - TP \right) \quad \dots(14)$$

Vsoto efektivnih temperatur od začetka rasti do dneva n , ko nastopi fenofaza, računamo kot vsoto razlik med povprečno dnevno temperaturo zraka in izbrano temperaturo spodnjega praga za obravnavano rastlino. Pri uporabi enačbe (14) pa sta možni dve interpretaciji glede na to, kdaj temperaturo zraka primerjamo s temperaturo praga (McMaster in Wilhelm, 1997).

Primer A:

$$\text{Če je } \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right] < TP, \text{ potem velja } \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right] = TP$$

V primeru A primerjamo temperaturo praga s povprečno dnevno temperaturo ($\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$). Ta metoda je splošno razširjena metoda za izračun V_{ef} , posebno v simulacijskih modelih.

Primer B:

$$\text{Če je } T_{\min} < TP, \text{ potem velja } T_{\min} = TP$$

če je $T_{\max} < TP$, potem velja $T_{\max} = TP$.

V primeru B pa primerjamo temperaturo praga pred izračunom povprečne temperature, oz. naredimo primerjavo posebej z minimalno ($T_{\min}$), oziroma maksimalno ($T_{\max}$) temperaturo. Kadar sta obe temperaturi, minimalna in maksimalna, višji ($TP < T_{\min} < T_{\max}$) ali nižji ($TP > T_{\max} > T_{\min}$) od TP, dajeta obe metodi isti izračun povprečne temperature in s tem tudi vsote efektivnih temperatur. Razlika v izračunu nastane, kadar je TP večja od minimalne temperature in manjša od maksimalne ($T_{\min} < TP < T_{\max}$); V primeru B daje izračun večje vrednosti kot v primeru A, ker je povprečna temperatura po tej metodi večja zaradi predpostavke, da je $T_{\min} = TP$. McMaster in Wilhelm (1997) sta prikazala razlike med tema dvema metodama na podlagi hipotetičnih in dejanskih podatkov za pšenico in koruzo, pri čemer so bile razlike zelo velike (do 376%).

Obstajajo številne modifikacije metode pravokotnika, navajamo samo nekaj primerov:

- namesto povprečnih dnevni temperatur zraka uporabimo samo maksimalne dnevne temperature zraka (Perry in sod., 1997)

$$V_{ef} = \sum_{i=1}^n (T_{\max} - TP) \quad \dots(15)$$

- namesto povprečnih dnevni temperatur zraka uporabimo samo minimalne dnevne temperature zraka (Liu in sod., 1998)

$$V_{ef} = \sum_{i=1}^n (T_{\min} - TP) \quad \dots(16)$$

- poleg temperature spodnjega praga upoštevamo tudi temperaturo zgornjega praga (Perry in sod., 1986)

če je $T_{\max} < TP^{ZG}$, velja enačba (15)

če pa $T_{\max} > TP^{ZG}$, potem velja $T_{\max} = TP^{ZG} - (T_{\max} - TP^{ZG})$ in sledi

$$V_{ef} = \sum (TP^{ZG} - (T_{\max} - TP^{ZG})) - TP_{SP} \quad \dots(17)$$

- po tej metodi natančneje definiramo V_{ef} , kadar je temperatura praga v območju med dnevnima temperaturnima ekstremoma (Liu in sod., 1998)

$$V_{ef} = \sum_{i=1}^n \left(\left[\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} \right] - TP \right); \text{ če } TP \leq T_{\min}$$

$$V_{ef} = \sum_{i=1}^n \left(\left[\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} + \left(\frac{TP - T_{\min}}{2 \cdot (T_{\max} - T_{\min})} \right) \right] - TP \right) \text{ če } T_{\min} < TP < T_{\max} \quad \dots(18)$$

$$V_{ef} = 0; \text{ če } T_{\max} \leq TP$$

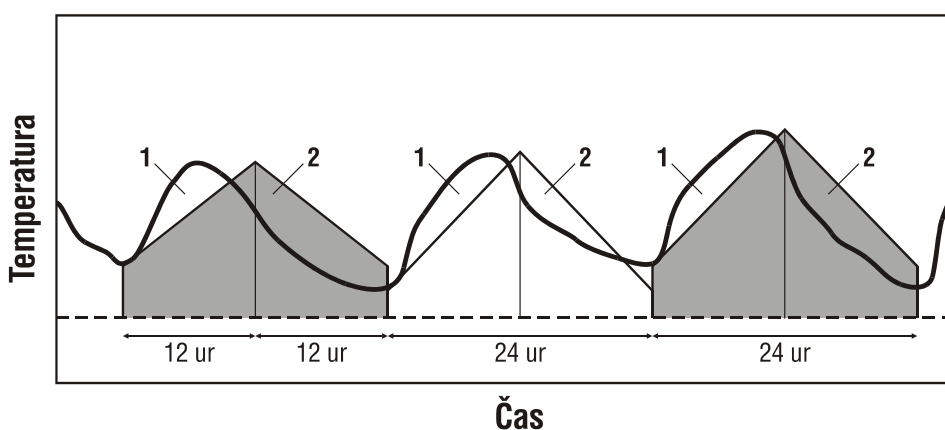
- v enačbo vključimo dolžino svetlega dela dneva (ds) (Perry in sod., 1997)

$$V_{ef} = \sum_{i=1}^n \left(ds \cdot \left[\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} \right] - TP \right) \quad \dots(19)$$

2.4.2.2 Metoda trikotnika

a) Metoda enojnega trikotnika

Na sliki 2 je prikazana metoda enojnega trikotnika za izračun V_{ef} . Dnevna minimalna in maksimalna vrednost temperature sta povezani s premico, ob predpostavki, da bo vrednost minimalne temperature zraka naslednji dan ista; na ta način dobimo dve stranici trikotnika. Metoda predpostavlja simetrično temperaturno krivuljo okrog maksimalne temperature. Vsoto efektivnih temperatur izračunamo kot površino znotraj trikotnika med temperaturama obeh pragov.



Slika 2: Metoda enojnega trikotnika za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree-days..., 2001)

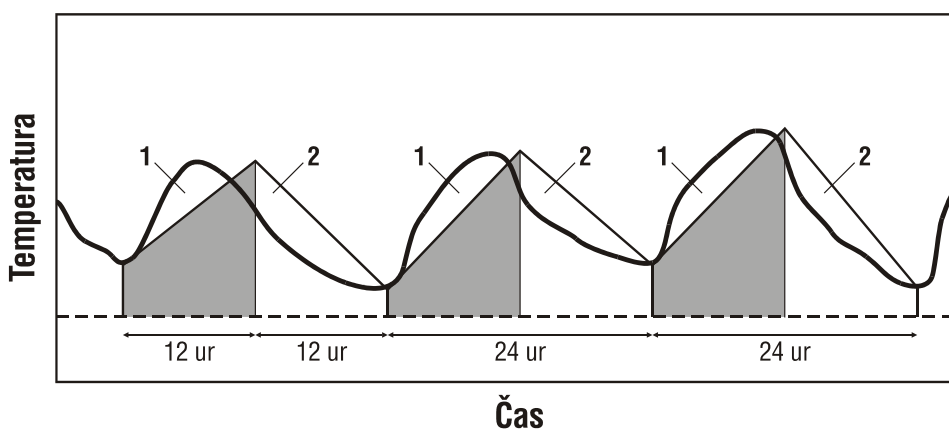
Figure 2: The single triangle method of accumulation of growing degree-days (after Degree-days..., 2001)

Slike 2 do 5 prikazujejo ocene izračuna V_{ef} različnih metod za tridnevno obdobje. V prvi polovici dneva (prvih 12 ur) je ocena V_{ef} prenizka za vrednost, ki je predstavljena kot površina 1, v drugi polovici dneva (drugih 12 ur) pa je ocena V_{ef} previsoka za vrednost, podano s površino 2. V obdobju enega dneva (24 ur) se tako primanjkljaji in presežki v povprečju izravnavajo.

b) Metoda dvojnega trikotnika

Ocena V_{ef} temelji na seštevanju površin pod temperaturno krivuljo za dve pol-dnevni obdobji. Med vrednostima za dnevno minimalno in maksimalno temperaturo zraka potegnemo premico, nato pa vertikalno skozi vrednost maksimalne temperature. Tako dobimo dve stranici trikotnika. Ocena vsote efektivnih temperatur za prvih 12 ur sledi iz izračuna površine trikotnika med temperaturama pragov. Za izračun naslednje pol-dnevne periode uporabimo isti postopek, pri čemer upoštevamo minimalno temperaturo

naslednjega dne (nesimetrična temperaturna krivulja). Površino drugega trikotnika za naslednjih 12 ur prištejemo k površini prvega trikotnika, iz skupne površine ocenimo V_{ef} .



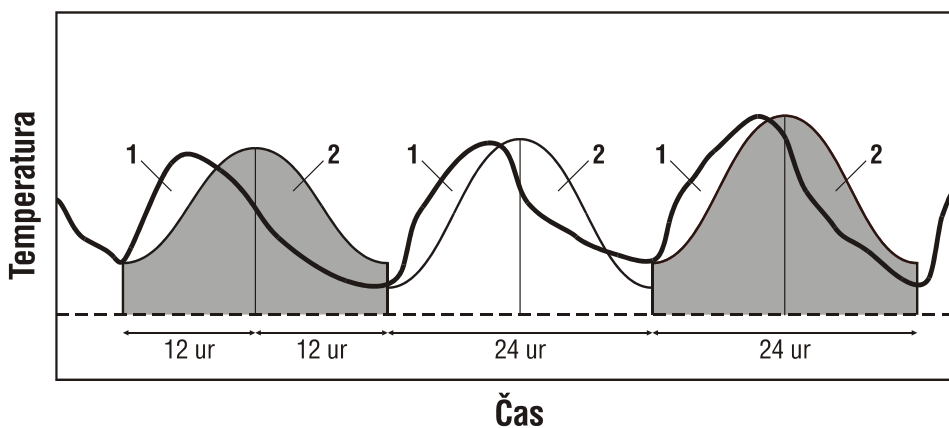
Slika 3: Metoda dvojnega trikotnika za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree-days..., 2001)

Figure 3: The double triangle method of accumulation of growing degree-days (after Degree-days..., 2001)

2.4.2.3 Metoda sinusoide

a) Metoda enojne sinusoide

Na sliki 4 je prikazana metoda enojne sinusoide. Pri tej metodi prikažemo potek temperaturne krivulje za 24-urno obdobje kot sinusoido. Ocena V_{ef} za ta dan sledi iz izračuna površine pod sinusno krivuljo in med temperaturama obeh pragov. Metoda predpostavlja, da je temperaturna krivulja simetrična okrog maksimalne temperature.



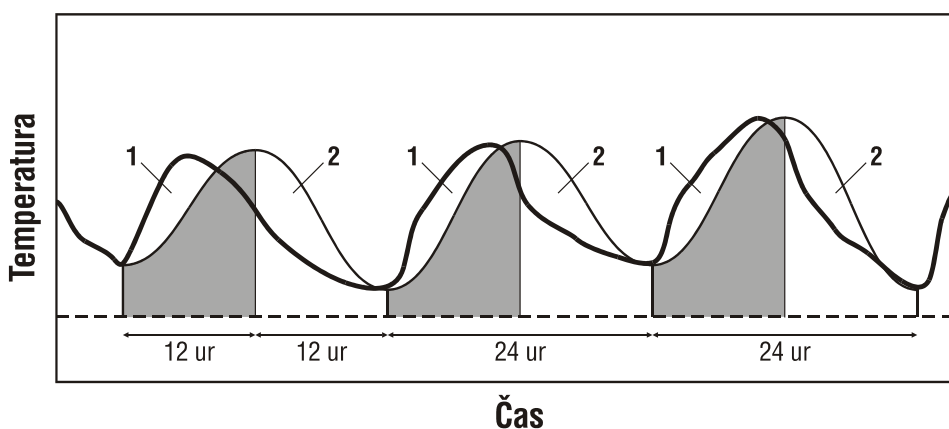
Slika 4: Metoda enojne sinusoide za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree-days..., 2001)

Figure 4: The single sine method of accumulation of growing degree-days (after Degree-days..., 2001)

b) Metoda dvojne sinusoide

Na sliki 5 je prikazana metoda dvojne sinusoide. Po tej metodi prikažemo potek temperature za prvo polovico dneva (od minimalne do maksimalne temperature) kot prvi del sinusne krivulje, drugi del sinusne krivulje za naslednjo polovico dneva pa upošteva

minimalno temperaturo naslednjega dne, zato krivulja ni simetrična okrog maksimalne temperature. Ocena V_{ef} temelji torej na seštevkju površin za dve pol-dnevni obdobji.



Slika 5: Metoda dvojne sinusoide za izračun vsote efektivnih temperatur (prirejeno po Degree-days..., 2001)
Figure 5: The double sine method of accumulation of growing degree-days (after Degree-days..., 2001)

2.4.2.4 Huberova metoda

Daje iste rezultate kot metoda sinusoide s horizontalnim odštevkom, razen v primerih, če sta minimalna in maksimalna dnevna temperatura med temperaturama obeh pragov. V takšnem primeru od vsote efektivnih temperatur za vsak dan odštejemo 0.3°C . Ta metoda se uporablja predvsem za sušne predele.

2.4.2.5 Modificirane metode za izračun vsot efektivnih temperatur

Uporabimo jih lahko, kadar imamo določeno tudi temperaturo zgornjega praga. Metode odštevkov se nanašajo na način, kako bo izračunana površina za oceno V_{ef} prilagojena (zmanjšana) glede na temperaturo zgornjega praga (slika 6). Od celotne površine pod krivuljo (V_{ef}) odštejemo določen del površine in dobimo tako modificirano V_{ef} glede na predpostavko, kako poteka hitrost razvoja pri temperaturah, višjih od temperature zgornjega praga. Tri osnovne metode so: metoda horizontalnega odštevkja, metoda sredinskega odštevkja in metoda vertikalnega odštevkja.

a) Metoda horizontalnega odštevkja

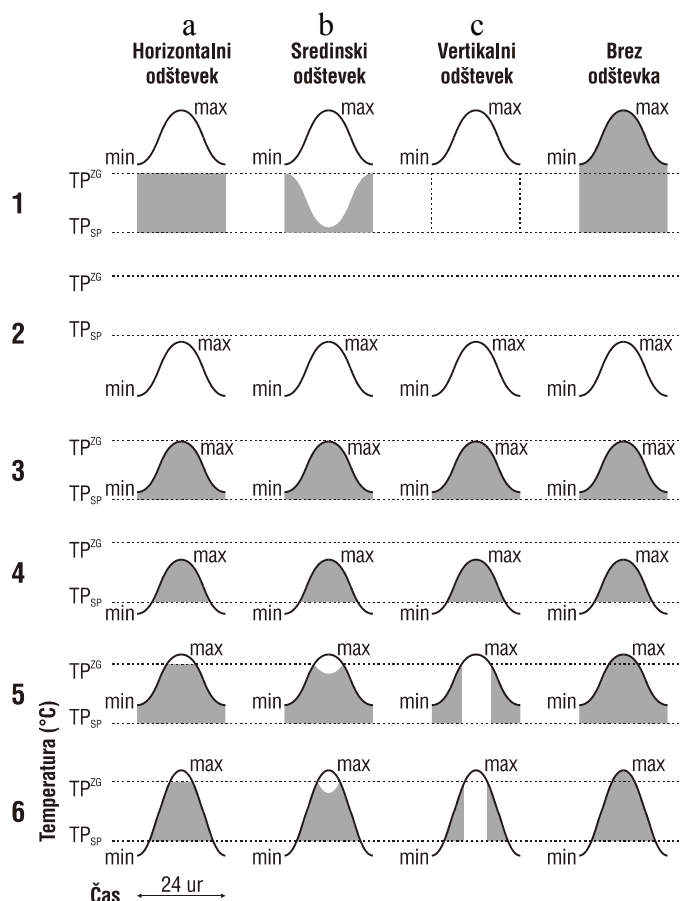
Pri tej metodi predpostavimo, da se razvoj nadaljuje z nespremenjeno stopnjo rasti pri temperaturah zraka nad temperaturo zgornjega praga. Matematično gledano od celotne površine pod temperaturno krivuljo med obema temperaturama pragov odštejemo del površine nad temperaturo zgornjega praga.

b) Metoda sredinskega odštevkja

Metoda sredinskega odštevkja predpostavlja, da se hitrost razvoja pri temperaturah zraka nad temperaturo zgornjega praga upočasni, a ne ustavi. Matematično gledano od celotne površine pod temperaturno krivuljo med obema pragoma odštejemo dvakratno površino nad temperaturo zgornjega praga.

c) Metoda vertikalnega odšteevka

Ta metoda predpostavlja, da je hitrost razvoja pri temperaturah zraka nad temperaturo zgornjega praga nič oziroma da se razvoj ustavi. Matematično gledano od celotne površine pod temperaturno krivuljo med obema temperaturama pragov odštejemo celotno površino pod krivuljo za čas, ko je temperatura zraka nad temperaturo zgornjega praga.



Slika 6: Modifikacije izračuna V_{ef} z različnimi metodami odšteevkov na primeru enojne sinusoide za šest možnih razmerij med dnevno temperaturno krivuljo ter spodnjo in zgornjo TP. Dnevna temperaturna krivulja je lahko : 1. Nad obema TP 2. Pod obema TP 3. Med obema TP 4. Omejena s spodnjo TP 5. Omejena z zgornjo TP ali 6. Omejena z obema TP (prirejeno po Degree-days..., 2001)

Figure 6: The modifications of the degree-day calculation by different cut-off methods to the single sine method of calculation for six possible relationships between the daily temperature cycle and the upper and lower thresholds. The temperature cycle can be: 1. Above both thresholds 2. Below both thresholds 3. Between both thresholds 4. Intercepted by the lower threshold 5. Intercepted by the upper threshold 6. Intercepted by both thresholds (after Degree-days..., 2001)

2.4.3 Izračun fototermalnega časa

Termalni čas računamo kot akumulacijo temperatur nad temperaturo praga v času enega dneva (24 ur), pri izračunu fototermalnega časa pa upoštevamo tudi dolžino svetlega dela dneva (McMaster, 1988):

$$P_t = \sum_{i=1}^n ds_i \cdot (T_{pov} - TP) \quad \dots(20)$$

kjer je P_t fototermalni čas, potreben za nastop F_x , ds_i dolžina svetlega dela i-tega dneva, T_{pov} povprečna dnevna temperatura zraka za i-ti dan in TP temperatura praga. Dolžina dneva je v tej metodi definirana kot obdobje med sončnim vzhodom in zahodom.

Jame in sod. (1998) so uporabili za opredelitev vpliva dolžine dneva na razvoj rastlin preprosto multiplo regresijsko enačbo:

$$1/d = a + b \cdot T_{pov} + c \cdot ds_{pov} \quad \dots(21)$$

kjer je $1/d$ dnevna stopnja razvoja, T_{pov} povprečna dnevna temperatura zraka in ds_{pov} povprečna dolžina dneva za nastop F_x , a, b in c pa so koeficienti regresijske enačbe. V enačbah (20) in (21) sta vključeni povprečni dnevni temperaturi zraka. Masle in sod. (1989) pa predlagajo enačbo, v katero vključimo povprečno temperaturo zraka le za svetli del dneva:

$$P_t = \sum_{i=1}^n ds_i \cdot (T_{ds} - TP) \quad \dots(22)$$

kjer je P_t fototermalni čas, potreben za nastop F_x , ds_i dolžina svetlega dela i-tega dneva, T_{ds} povprečna temperatura zraka za svetli del i-tega dneva in TP temperatura praga.

$$T_{ds} = T_{min} + k \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad \dots(23)$$

Iz podatkov o minimalni in maksimalni dnevni temperaturi zraka lahko po gornji enačbi izračunamo povprečno temperaturo zraka za samo svetli del dneva. Koeficient k v enačbi (23) lahko določimo empirično ali s pomočjo fizikalnega modela, Masle in sod. (1989) so določili povprečno vrednost koeficienta k za $\phi = 48^\circ$ severne geografske širine 0,65.

V meteorološkem terminološkem slovarju (1990) je dolžina dneva definirana kot časovni interval med sončnim vzhodom in sončnim zahodom ali kot interval 24 ur. V nalogi bomo zaradi nedvoumnosti uporabljali izraz dolžina svetlega dela dneva, ki pomeni čas med vzhodom in zahodom sonca. Dolžina dneva je funkcija lokacije in letnega časa. Perry in sod. (1986) predlagajo izračun dolžine dneva po enačbi (24):

$$ds_i = 2 \cdot \cos^{-1} \left(-\tan \phi \tan(23.45^\circ) \cdot \sin[(0.9856) \cdot (i_p)] \right) \quad \dots(24)$$

v kateri je ds_i dolžina svetlega dela i -tega dneva, ϕ geografska širina in i_p datum, izražen kot zaporedni dan po začetku astronomske pomladi. V nalogi smo računali dolžino svetlega dela dneva kot funkcijo geografske širine in dneva v letu, podanega z odklonskim kotom sonca (Fernhout in Kurtz, 2001):

$$ds_i = \frac{7.64 \cdot a \cos \cdot (-\sin((2 \cdot \pi / 360) \cdot \phi) - 0.044)}{\cos \cdot ((2 \cdot \pi / 360) \cdot \phi) \cdot \cos \delta} \quad \dots(25)$$

$$\delta = 0.4102 \cdot \sin((2 \cdot \pi / 365) \cdot (i - 80.25)) \quad \dots(26)$$

pri čemer je ds dolžina svetlega dela dneva, ϕ geografska širina, δ je deklinacija sonca in i datum, izražen kot zaporedni dan v letu (julijanski dan).

2.4.4 Indeks severno atlantskega nihanja

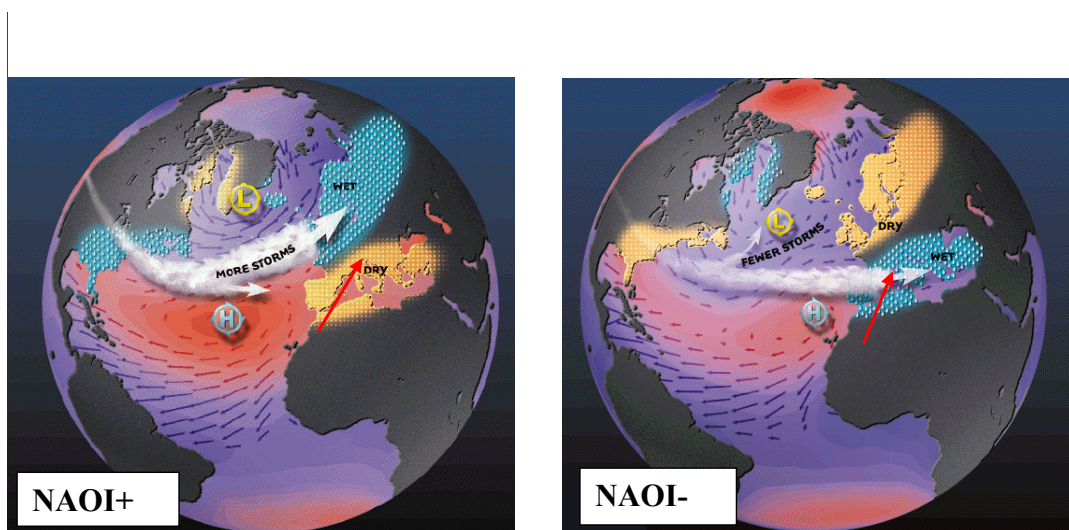
Severno atlantsko nihanje (NAO) je povezano z gibanjem zračnih mas med subtropskim področjem visokega zračnega pritiska blizu Azorov ter področjem nizkega zračnega pritiska blizu Islandije. Ta pojav močno vpliva na variabilnost klime v severnih geografskih širinah, še posebej v zimskih mesecih (Post in Stenseth, 1995). NAO indeks (NAOI) temelji na razliki standardiziranega zračnega pritiska med krajem Stykkisholmur/Reykjavik na Islandiji (SLP_2), kot južno postajo (SLP_1) pa lahko uporabimo podatke za Lizbono, Gibraltar ali Ponto Delgado (Hurrell, 2001) .

$$NAOI = SLP_1 - SLP_2 \quad \dots(27)$$

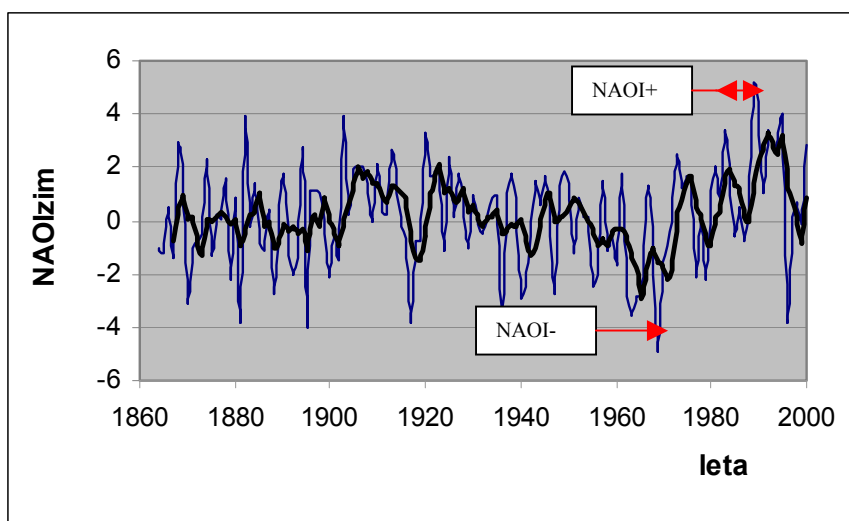
$$SLP_1 = \frac{\bar{X}_{SLP_1}}{\sigma_{SLP_1}}; SLP_2 = \frac{\bar{X}_{SLP_2}}{\sigma_{SLP_2}} \quad \dots(28)$$

Pritisk za posamezno lokacijo je standardiziran tako, da vrednosti pritiska za posamezno leto odštejemo dolgoletno povprečno vrednost in dobljeno razliko ($\bar{X}_{SLP}$) delimo z vrednostjo standardnega odklona SLP za dolgoletno obdobje (σ_{SLP}). Absolutne vrednosti indeksov se nekoliko razlikujejo glede na dolžino obdobja, ki ga uporabimo za standardizacijo (Hurrell, 1995).

Na sliki 7 je prikazan vpliv NAO na vremenske razmere v Evropi. Čeprav sam NAOI opisuje polja pritiska, pa je z njim močno povezan transport toplih zračnih mas proti severo-zahodni Evropi. V letih s pozitivnim NAOI sta oba centra pritiska zelo močna in relativno blizu skupaj, posledica tega je močno zahodno gibanje zraka iznad severnega Atlantika proti Evropi. V takšnih letih imamo v osrednji in južni Evropi tople in suhe zime. Nasprotno pa sta v letih z negativnim NAOI centra pritiska šibka in je tudi gibanje zahodnih zračnih mas proti Evropi šibkejša. V južni in osrednji Evropi to pomeni hladne in bolj vlažne zime.



Slika 7: Vpliv severno atlantskega nihanja na vremenske razmere v Evropi (prirejeno po Hurrell-u, 1995)
Figure 7: Influence of North Atlantic Oscillation on weather conditions over Europe (after Hurrell, 1995)



Slika 8: $NAOI_{zim}$ za obdobje 1864-2000 s 4-letnimi drsečimi sredinami
Figure 8: $NAOI_{zim}$ for the period 1864-2000 with 4-years moving averages

Na gornji sliki je prikazan potek zimskega NAOI s pripadajočimi 4-letnimi drsečimi sredinami. Iz slike je razvidna velika variabilnost indeksa med posameznimi leti, za obdobje zadnjih štirih dekad pa so značilne prevladujoče pozitivne vrednosti indeksa. Ker variabilnost NAOI vpliva na temperaturne in padavinske razmere, je proučevanje vpliva severno atlantskega nihanja na fenologijo zadnje čase predmet številnih raziskav, v katerih avtorji poskušajo z variabilnostjo severno atlantskega nihanja pojasniti določen del variabilnosti nastopa fenofaz (Chmielewski in Rötzer, 2001). Korelacije so močnejše za zimske mesece, v poletnem času pa severno atlantsko nihanje nima direktnega vpliva na centralni del Evrope, južneje od 50° (Glowienka-Hense, 1990). Za področje osrednje Italije so dokazali značilen vpliv severno atlantskega nihanja na rast in razvoj pri bukvi (Piovesan

in Schirone, 2000), zato predvidevamo, da lahko tudi za področje Slovenije del variabilnosti predvsem spomladanskih fenofaz pojasnimo z variabilnostjo NAOI za zimske mesece.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 FENOLOŠKI PODATKI

Fenološke podatke smo dobili iz arhiva fenoloških podatkov Agencije republike Slovenije za okolje (bivši Hidrometeorološki zavod) za obdobje 1955-2000, ki zajema podatke o fenofazah gojenih in samoniklih vrst rastlin. V računalniški obliki so arhivirani za obdobje od leta 1980 dalje. Fenološke podatke za obdobje 1955-1979, ki so hranjeni v klasični obliki v knjigah (fenološka letna poročila), smo dodatno vnesli v računalnik, kar je pomenilo glede na obravnavane lokacije in fenofaze preko 10 000 datumov. Ob tem pa moramo poudariti, da smo dejansko izpisali še dvakrat večje število podatkov, vendar se je kasneje pri kontroli podatkov izkazalo, da le-ti niso primerni za našo raziskavo (prekratki nizi, prekinitve opazovanj, spremembe opazovanih objektov, fenofaz, sort, lokacij postaj, pozebe rastlin, poškodbe zaradi toče, fenološka postaja ima pomankljive meteorološke podatke...). Podatki v klasični obliki so na voljo v obliki datumov ali kot julijanski dan (zaporedni dan v letu), izpisovali smo jih kot datume zaradi sprotne logične kontrole. Fenološki podatki temeljijo na vizualnih ocenah posameznikov, zato pri teh opazovanjih kljub zelo natančnim navodilom za opazovanje in beleženje fenofaz obstaja mnogo večja možnost napak kot pri inštrumentalnih meritvah. Kako velika bo subjektivna napaka opazovalca, je odvisno predvsem od izkušenosti in vestnosti opazovalca, načeloma pa pri primerjavi med posameznimi kraji lahko računamo na natančnost 1 do 2 dni. Brez predhodne logične in kritične kontrole podatkov bi lahko prišli do napačnih zaključkov, zato sta le-ti kontroli zelo potrebni in smiselni.

Z logično kontrolo smo izločili grobe, lažje opazne napake, ki so nastale pri prepisovanju v obrazce, oziroma v knjige, tu smo tudi preverili vrstni red nastopa fenoloških faz (fenofaza splošno cvetenje ne more nastopiti pred začetkom cvetenja, začetek obiranja plodov mora slediti fazi prvih zrelih plodov...).

Pri kritični kontroli pa smo s statističnimi metodami preverili točnost podatkov. Pri tem je pomembno, da za vsako rastlinsko vrsto in fenološko fazo razpolagamo z objektivnimi merili (statistični izračuni) kot sta na primer standardni odklon in meje zaupanja. Tako lahko s povprečnim dolgoletnim nastopom določene fenofaze in njenim standardnim odklonom definiramo, ali je fenofaza nastopila ekstremno zgodaj, zgodaj, normalno, pozno ali ekstremno pozno (Otočec, 1980). V primeru, da je naš podatek izven teh meja, je potrebna posebna analiza. Kadar merila za pojav fenofaze niso točno določena, se največkrat kritična kontrola vrši tako, da sumljiv podatek primerjamo z dolgoletnimi vrednostmi na isti lokaciji ali pa z vrednostmi na sosednjih lokacijah v istem letu. Najboljša je prostorska primerjava, pri kateri na delovno karto vrišemo relief ter izohipse in tako lažje odkrijemo izstopajoče podatke. Kontrola podatkov lahko obsega tudi primerjavo dolžin medfaznih obdobj med lokacijami istega klimatskega območja. Naš podatek pa lahko primerjamo tudi z ekstremnimi ter povprečnimi vrednostmi za dolgoletno povprečje na tej lokaciji ob upoštevanju vremenskih razmer v danem letu.

Fenološki arhiv Agencije republike Slovenije za okolje je zelo obsežen, vsebuje podatke za 206 postaj, vendar ima od tega le četrtno postaj nepretrgan niz fenoloških podatkov. Za začetek opazovanj pri enoletnicah ni podatkov o sortah, zato primerjave s kasnejšimi

opazovanji niso možna. Kvalitetnejši so podatki za negojene rastline, porazdeljeni so normalno in primerni za statistične analize. Problem predstavljajo manjkajoči podatki, ki jih je v celotnem arhivu precej. Za vse podatke do leta 1980, ki so še vedno hranjeni v klasični obliki, bi bilo potrebno narediti kritično in logično kontrolo ter jih hraniti tudi v elektronski obliki. Kvaliteta podatkov se med postajami precej razlikuje in je v veliki meri odvisna od vestnosti opazovalcev. Kljub določenim pomanjkljivostim, ki smo jih omenili, predstavlja obstoječ fenološki arhiv veliko vrednost pri osnovnih in aplikativnih kmetijskih raziskavah in je kot tak edinstven v Sloveniji.

Trenutna fenološka mreža v Sloveniji obsega 60 postaj, na katerih opazujejo 38 negojenih in 23 gojenih rastlinskih vrst, seznam opazovanih rastlin in uporabo fenoloških podatkov je podala Žustova (1999). V raziskavo smo vključili 17 rastlin (oziroma 31 fenofaz), ki sodijo v naslednje skupine fenoloških objektov:

3.1.1 Negojene zelnate rastline:

Navadna ivanjščica (*Leucanthemum ircutianum* Turcz.)

Navadni mali zvonček (*Galanthus nivalis* L.)

Navadni regrat (*Taraxacum officinale* Weber in Wiggers)

Pomladanski žafran (*Crocus napolitanus* Mordant&Loisel.)

Pri negojenih rastlinah opazujejo samo eno fenofazo in sicer začetek cvetenja.

3.1.2 Gozdno drevje in grmičevje:

Navadna breza (*Betula pendula* Roth)

Navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.)

Črni bezeg (*Sambucus nigra* L.)

Navadni divji kostanj (*Aesculus hippocastanum* L.)

Iva (*Salix caprea* L.)

Navadna leska (*Corylus avellana* L.)

Lipa (*Tilia platyphyllos* Scop.)

Navadna robinija (*Robinia pseudacacia* L.)

Navadna smreka (*Picea abies* (L.) Karsten)

Španski bezeg (*Syringa vulgaris* L.)

V raziskavo smo vključili naslednje fenofaze:

- prvi listi (navadna breza, bukev, navadni divji kostanj, lipa, navadna smreka)
- prvi cvetovi (navadna breza, iva, lipa)
- splošno cvetenje (črni bezeg, navadni divji kostanj, navadna leska, navadna robinija, črni bezeg)
- prvi zreli plodovi (navadni divji kostanj)
- splošno rumenenje listja (navadna breza, navadna bukev, lipa)

3.1.3 Trave:

Navadna pasja trava (*Dactylis glomerata* L.)

V raziskavo smo vključili fenofazo cvetenja.

3.1.4 Sadno drevje:

Češplja (*Prunus domestica* L.), sorta 'Domača češplja'

Jablana (*Malus domestica* Borkh), sorta 'Bobovec'

Pri jablani in češplji smo v raziskavo vključili naslednje fenofaze: začetek cvetenja, splošno cvetenje, začetek zorenja in začetek obiranja.

Zaradi poenostavitve pisanja bomo v nadaljnjem tekstu iz binarne nomenklature rastlin izpustili besedo navaden oziroma navadna (primer: namesto navadna leska pišemo leska).

Kriteriji za izbiro gornjih rastlin so bili naslednji:

- **niz podatkov naj bo za izbrano rastlino čim daljši in popolnejši ter kvaliteten**

Za vse izbrane rastline smo obravnavali 46-letni niz podatkov (obdobje 1955-2000), razen za ivanjščico, pri kateri so pričeli z opazovanji šele l. 1961. Z letom 1985 so spremenili program opazovanja pri travah, podatki do vključno leta 1984 opisujejo pojav cvetenja, od leta 1985 dalje pa se opazuje klasenje trav, obe fenofazi se med sabo statistično značilno razlikujeta v času pojava, zato smo pri pasji travi uporabili samo podatke za obdobje 1955-1984. V fenološkem arhivu obstajajo za nekatere rastline tudi fenološki podatki za obdobje med leti 1949 in 1954, vendar so precej nepopolni. Pri določenih rastlinah je problem, da kljub neprekinjenim opazovanjem podatkov o nastopu fenofaz ni (zelo pogoste pozebe pri orehu, nekatere rastline ne cveto vsako leto (bukev, smreka), toča uniči rastlino med razvojem...). Ker je datum nastopa fenofaze beležen na podlagi vidnih znamenj na rastlini, je kvaliteta fenoloških podatkov v določeni meri lahko odvisna tudi od opazovalca.

- **izbrane fenofaze naj bodo takšne, da njihovo opazovanje ni problematično**

Čeprav so navodila za beleženje fenofaz zelo natančno definirana, je opredelitev nastopa določenih fenofaz lahko vseeno problematična. Takšen primer je splošno rumenenje listja, ki jo številni opazovalci beležijo prezgodaj, ker listje včasih porumeni zaradi bolezni ali suše, kar ni običajno jesensko rumenenje listja.

- **izbrane rastline naj bodo opazovane na čim več fenoloških postajah in naj pripadajo različnim skupinam fenoloških objektov**

Večino obravnavanih rastlin spada med negojene rastline. Več gojenih rastlin nismo izbrali, ker na njihovo rast in razvoj močno vpliva človek z agrotehničnimi ukrepi. Poleg tega se iz leta v leto menjujejo sorte, ki pa imajo lahko precej različne karakteristike rasti in razvoja in s tem čas nastopa fenoloških faz.

Podrobnejši opis obravnavanih rastlin in fenofaz je podan v prilogi A.

3.2 METEOROLOŠKI PODATKI

Meteorološke podatke smo dobili iz arhiva meteoroloških podatkov Agencije republike Slovenije za okolje (bivši Hidrometeorološki zavod) v računalniški obliki za obdobje 1955-2000. V nalogi smo uporabili vrednosti naslednjih meteoroloških spremenljivk:

- dnevne maksimalne temperature zraka,
- dnevne minimalne temperature zraka,
- povprečne dnevne temperature zraka,
- povprečne mesečne temperature zraka
- in povprečne mesečne količine padavin.

Obravnavali smo 8 lokacij (priloga B):

Celje (46°15'N, 15°15'E, 244 m)

Ilirska Bistrica (45°34'N, 14°15'E, 414 m)

Lesce (46°22'N, 14°11'E, 515 m)

Ljubljana (46°04'N, 14°31'E, 299 m)

Maribor (46°32'N, 15°39'E, 275 m)

Murska Sobota (46°39'N, 16°11'E, 190 m)

Novo mesto (45°48'N, 15°11'E, 220 m)

Rateče (46°30'N, 13°43'E, 864 m)

Kriteriji za izbiro lokacij so bili naslednji:

- izbrana meteorološka postaja naj bo hkrati tudi fenološka postaja za izbrano obravnavano obdobje;
- niz potrebnih meteorološki podatkov za obdobje 1955-2000 naj bo čimbolj popoln;
- izbrane postaje naj zajamejo podnebno različne predele Slovenije.

V preglednici 2 smo podali, za katere rastline na posameznih postajah obstajajo fenološki podatki v obravnavanem obdobju, seveda ob predpogoju, da so za isto lokacijo na voljo tudi meteorološki podatki. Za vsako posamezno fenofazo pa smo v prilogi D podali število razpoložljivih podatkov, to je število let s fenološkimi podatki.

Preglednica 2: Razpoložljivi fenološki in meteorološki podatki za obdobje 1955-2000
Table 2: Available phenological and meteorological data for the period 1955-2000

Rastlina	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
bukev	•		•	•	•		•	•
češplja	•	•	•		•	•	•	•
črni bezeg	•	•	•	•	•	•	•	•
divji kostanj	•	•	•	•	•	•	•	•
iva	•	•	•	•	•	•	•	•
ivanjščica	•	•	•	•	•		•	
jablana	•			•				
leska	•	•	•	•	•	•	•	•
lipa	•	•	•	•	•	•	•	•
mali zvonček	•	•	•	•	•		•	•
navadna breza	•	•	•	•	•	•	•	•
pasja trava	•			•	•	•	•	•
regrat	•	•	•	•	•		•	•
robinja	•	•	•	•	•		•	
smreka	•	•	•	•	•		•	•
pomladanski žafran	•	•	•	•			•	•
španski bezeg	•	•	•	•	•	•	•	•

Poleg že omenjenih meteoroloških parametrov, katerih vrednosti smo dobili iz arhiva Agencije republike Slovenije za okolje, smo v nalogi uporabili tudi vrednosti NAO indeksa, ki smo jih povzeli po Hurrellu (2001). V nalogi smo uporabili vrednosti

- mesečnega (vrednost za posamezen mesec),
- sezonskega (povprečje treh zaporednih mesečnih vrednosti),

- zimskega (povprečje mesečnih vrednosti december-marec)
- in letnega (povprečje vseh 12-tih mesečnih vrednosti) NAO indeksa za obdobje 1955-2000.

V nalogi uporabljen NAO indeks za zimske mesece (december–marec) je izračunan kot razlika med standardiziranim zračnim pritiskom na morskem nivoju med Lizbono, Portugalska, in krajem Stykkisholmur/Reykjavik, Islandija. Pritisk je standardiziran glede na dolgoletno povprečje za obdobje 1864-1983. Vsi ostali NAO indeksi (letni, sezonski in mesečni) so izračunani kot razlika med standardiziranim zračnim pritiskom med krajem Ponta Delgada, Azori, in krajem Stykkisholmur /Reykjavik, Islandija, standardizirani pa na osnovi obdobja 1865-1984.

3.3 METODE OBDELAVE FENOLOŠKIH PODATKOV

3.3.1 Določitev temperature praga

Za določitev temperature spodnjega praga smo uporabili metodo najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur (Yang in sod., 1995) oziroma enačbo (1). Metodo smo podrobneje opisali v poglavju 2.4.1. Z enačbo (14) smo izračunali niz V_{ef} glede na niz možnih TP za vsako fenofazo. Preizkusili smo niz temperatur v območju med -5°C ter $+10^{\circ}\text{C}$ s korakom 1°C , širino območja smo izbrali glede na rezultate predhodnih domačih in tujih raziskav (Črepinšek in Kajfež-Bogataj, 2001; Gorski in Jazurek, 1996; Veselič, 1990; Wielgolaski, 1999). Izbrana TP je tista, ki nam da V_{ef} z najmanjšim standardnim odklonom.

3.3.2 Termalni čas

Razvoj rastlin temelji na akumulaciji toplotnih enot in ga namesto v koledarskih dneh v fenologiji najpogosteje izražamo s termalnim časom, oziroma vsotami aktivnih ali efektivnih temperatur. Korelacije datuma fenofaze z vsotami aktivnih in efektivnih temperatur nam omogočajo, da na osnovi vsote meteoroloških elementov, zbranih do nekega datuma, predvidimo, koliko dni bo še preteklo do nastopa fenofaze. Prognoza je seveda tem boljša, čim poznejši je datum, do katerega te temperaturne vsote računamo. V naši nalogi smo vsote aktivnih in efektivnih temperatur računali za konkretno leto od 1. januarja do datuma, ki je za pet dni bolj zgođen kot nastop fenofaze v posameznem letu, kar nam torej omogoča napovedovanje fenološkega razvoja na osnovi termalnega časa vsaj pet dni vnaprej. Preizkusili smo tudi dve različni obdobji (5 dni in 10 dni), ko naj bo povprečna dnevna temperatura zraka zaporedoma višja od TP. Na osnovi korelacijske analize se je izkazalo, da je primernejše smatrati prestop TP takrat, ko je povprečna dnevna temperatura zraka vsaj 5 dni zaporedoma višja od TP. Če smo vzeli to obdobje daljše (10 dni), so bile vsote aktivnih in efektivnih temperatur za nekatere zgodnje fenofaze zelo nizke ali so imele v posameznih letih celo vrednosti vsot 0°C .

Vsote efektivnih in aktivnih temperatur smo računali z metodo pravokotnika (Liu in sod., 1998) z uporabo enačbe (14), pri čemer smo temperaturo spodnjega praga primerjali s povprečno dnevno temperaturo zraka (glej poglavje 2.4.2.1, primer A). Kot začetni datum za seštevanje efektivnih temperatur smo vzeli 1. januar (Spano in sod., 1999). Vsote

aktivnih temperatur smo računali na dva načina: z uporabo povprečnih dnevnih in minimalnih dnevnih temperatur zraka, da bi ugotovili, ali imajo morda minimalne temperature zraka spomladi odločilnejši vpliv na fenološki razvoj določenih rastlin.

3.3.3 Fototermalni čas

Za izračun fototermalnega časa (P_t) uporabljamo modificirane enačbe za izračun termalnega časa, v katere poleg temperature zraka (ali tal) vključimo dodatno spremenljivko okolja, to je dolžino dneva. Fototermalni čas smo izrazili v enotah stopinjski dnevi ($^{\circ}\text{D}$), mednarodno uporabljan izraz zanje je degree-days (Zalom in sod., 1983). Stopinjski dnevi so akumuliran produkt časa in temperature med razvojnima pragoma za vsak dan. En stopinjski dan je en dan (24 ur) s povprečno temperaturo zraka, višjo za eno stopinjo od spodnje temperature praga. Če je na primer temperatura spodnjega praga 5°C in temperatura zraka ostaja 24 ur 6°C (ali 1°C nad spodnjo temperaturo praga), je akumuliran en stopinjski dan (1°D). Akumulirane toplotne enote smo izračunali le za čas dolžine svetlega dela dneva, namesto povprečne dnevne temperature (povprečje za 24 ur) pa smo v enačbi (22) upoštevali povprečno temperaturo samo svetlega dela dneva (enačba (23)). V naši nalogi smo izračunali fototermalni čas za nastop vseh obravnavanih fenofaz cvetenja in olistanja samo za lokacijo Ljubljana. Parameter k v enačbi (23) smo povzeli po vrednosti v literaturi za lokacijo $\Phi=48^{\circ}$ severne geografske širine in je znašal 0,65 (Masle in sod., 1989). Dolžino dneva smo računali kot čas med sončnim vzhodom in zahodom z enačbama (25) in (26) (Fernhout in Kurtz, 2001).

3.4 STATISTIČNE METODE

Vse v nalogi uporabljene statistične metode so podrobno opisane v knjigi Mead-a in sod. (1993) ter Šošića in Serdarja (1992), zato tukaj navajamo le nekaj osnovnih informacij o uporabljenih postopkih.

3.4.1 Opisne ali deskriptivne statistike

Uporabili smo jih za prikaz povprečnih vrednosti nastopa fenofaz. Aritmetična sredina nam v našem primeru podaja povprečen nastop F_x na določeni lokaciji izražen kot zaporedni dan v letu (julijanski dan). Odstopanja od povprečja smo prikazali s standardnim odklonom. Iz razlike med najzgodnejšim in najpoznejšim pojavom F_x smo izračunali variacijsko širino ali razpon.

3.4.2 Analiza variance

Za primerjavo variabilnosti različnih skupin podatkov smo uporabili koeficient variabilnosti, z analizo variance pa smo ugotavljali, ali obstajajo statistično značilne razlike med postajami glede na datum pojava določene fenofaze. Na osnovi analize variance in Duncanove metode smo za vsako posamezno fenofazo določili homogene skupine, znotraj katere med postajami ne obstajajo statistično značilne razlike v datumu nastopa določene fenofaze.

3.4.3 Regresija

Regresija je statistična metoda, s katero skušamo empiričnim podatkom prilagoditi ustrezno funkcijo oziroma matematični model. Namen regresije je proučevanje odvisnosti ene spremenljivke od drugih spremenljivk z namenom novih spoznanj in napovedovanje vrednosti ene spremenljivke na osnovi znanih vrednosti drugih spremenljivk. Odvisno spremenljivko označimo z Y (npr. nastop fenofaze cvetenja), neodvisne ali pojasnjevalne spremenljivke pa $X_1, X_2, \dots, X_n$ (npr. temperatura zraka, količina padavin, NAO indeks). Odvisnost pomeni, da vrednost ene spremenljivke vpliva na vrednost druge spremenljivke, ne pa tudi obratno. Linearno multiplo regresijsko odvisnost zapišemo z matematičnim modelom:

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad \dots(29)$$

pri čemer so $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ parametri regresijskega modela, ki podajajo parcialno odvisnost Y od X_n pri upoštevanju soodvisnosti ostalih neodvisnih spremenljivk v modelu; ε so naključni vplivi, medsebojno neodvisni. Model mora izpolnjevati dva osnovna kriterija: vsota kvadratov odklonov opazovanih vrednosti od napovedanih vrednosti (regresija) odvisne spremenljivke mora biti minimalna (metoda najmanjših kvadratov), vsota odklonov opazovanih vrednosti od napovedanih vrednosti (regresija) naj bo enaka 0. Koeficient determinacije (r^2) izraža odstotek z modelom pojasnjene variabilnosti odvisne spremenljivke, preostali del variabilnosti odvisne spremenljivke z modelom ni pojasnjen. Ker smo pri izdelavi regresijskih modelov razpolagali z različnim številom spremenljivk (fenofaz) za posamezne lokacije, smo delež pojasnjene variabilnosti izrazili s prilagojenim koeficientom determinacije (r_p^2), ki nam omogoča realno primerjavo takih modelov (Guilford, 1968):

$$r_p^2 = 1 - (1 - r^2) \cdot \left(\frac{n-1}{n-k} \right) \quad \dots(30)$$

V enačbi (30) pomeni n velikost vzorca in k število neodvisnih spremenljivk, izraz $n-k$ nam podaja torej število stopenj prostosti. Razlika med obema koeficientoma determinacije je največja, kadar imamo majhen vzorec (n) in relativno veliko število neodvisnih spremenljivk (k). Model velja le na območju, ki ga določajo vrednosti neodvisnih spremenljivk našega vzorca, kar pomeni, da ne smemo ekstrapolirati oziroma, da lahko računamo samo napovedi na definicijskem območju neodvisne spremenljivke. Modele pri multipli regresiji gradimo na dva načina: a) začnemo z najenostavnejšim modelom, vsakokrat dodamo nov linearen člen in analiziramo nov model glede na predhodnega (regresija po korakih naprej) ali b) začnemo z vključitvijo vseh neodvisnih spremenljivk, nato postopoma odvezujemo posamezne linearne člene in analiziramo spremembo modela glede na predhodnega (regresija po korakih nazaj).

3.4.4 Korelacija

Korelacija ali povezanost pomeni, da se s spreminjanjem vrednosti ene spremenljivke (X) spreminjajo tudi vrednosti druge spremenljivke (Y) in obratno. Spremenljivki sta

enakovredni. Tesnost povezave pri linearni zvezi nam meri korelacijski koeficient (r). Vrednosti koeficienta so lahko med -1 in $+1$. Pozitivna korelacija kaže, da se spremenljivki X in Y spreminjata v isto smer (vrednosti spremenljivk hkrati naraščata ali hkrati padata), negativna korelacija pa kaže, da so spremembe spremenljivk X in Y v nasprotni smeri (ob naraščanju vrednosti ene spremenljivke vrednost druge pada). Kadar korelacija ne obstaja, je vrednost koeficienta 0. Primer korelacije je lahko povezava nastopa fenofaz dveh različnih rastlin, ki sta med seboj neodvisni, a močno povezani, vzrok za to je lahko tretja spremenljivka, na primer temperatura.

3.4.5 Navzkrižno preverjanje modelov

Rezultate modelov je potrebno analizirati in ovrednotiti dobljene rezultate. Če imamo na voljo dolg niz podatkov, to lahko naredimo tako, da podatke razdelimo na dva dela. Prvi del podatkov uporabimo za izdelavo modelov, nato pa na drugem delu podatkov rezultate preverimo (primerjamo modelirane in izmerjene vrednosti). Ker je naš niz podatkov prekratek, da bi ga lahko razdelili na dva dela, smo uporabili metodo navzkrižnega preverjanja (cross validation). Postopek je naslednji: izbran regresijski model uporabimo v postopku multiple regresije tako, da posamezno leto izločimo iz postopka in izračunamo vrednost za to leto; to ponovimo za vsa leta (in vsako posamezno postajo). Poleg ocene regresijske konstante, pojasnjevalnih spremenljivk ter koeficienta determinacije vključuje analiza regresijskega modela uporabo različnih postopkov, s katerimi smo s statističnega vidika preverili njegovo kakovost. Sklop takšnih metod imenujemo tudi *regresijska diagnostika*. Med najvažnejše metode diagnostike spada analiza ostankov. Ostanki ocenjujejo napako, se pravi razlike med modeliranimi ter opazovanimi vrednostmi. Če je model sprejemljiv, mora biti pričakovana vrednost ostankov 0, ostanki morajo biti razporejeni simetrično okoli abscise, standardni odklon pa mora biti čim manjši. Če bi bil model idealen, bi bile vse točke na premici (izračunane vrednosti), prileganje točk (opazovane vrednosti) merimo s korelacijskim koeficientom med opazovanimi in modeliranimi vrednostmi.

Na osnovi ostankov navzkrižnega preverjanja izračunamo tri statistike: relativno povprečno napako, relativno povprečno kvadrirano napako (vrednosti obeh morata biti čim bližje 0) in standardizirano povprečno kvadrirano napako. Izračunamo tudi korelacijski koeficient med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi. Model je tem boljši, bližji je koeficient vrednosti 1.

3.4.6 Analiza časovnih vrst

Osnovo za analizo pojava v času tvori časovni niz ali časovna vrsta, ki jo sestavlja skupek kronološko urejenih vrednosti. Velikost posameznih vrednosti imenujemo frekvenca, skupno število vseh vrednosti pa nam daje dolžino niza. Statistična analiza časovnih pojavov temelji na neprekinjenosti (konsistentnosti) časovnega niza, ki nam določen pojav številčno predstavlja. Časovni niz je konsistenten, če so frekvence medsebojno primerljive, to pa pomeni, da v proučevanem obdobju ne smemo spremeniti pojmovne in prostorske definicije pojava. V nalogi bomo obravnavali intervalne nize, ki imajo lastnost kumulativnosti, za razliko od trenutnih časovnih vrst, ki predstavljajo stanje v določenem trenutku. Analiza časovnih vrst mora opisati razvoj obravnavanega pojava v času, pojasniti

variabilnost pojava v času na osnovi drugih pojavov (dejavnikov) in omogočiti napovedovanje razvoja pojava. Pri statistični analizi spremljanja pojava v času uporabljamo klasično razčlenbo serije na posamezne komponente (dekompozicija). Posamezne komponentne odražajo tipične časovne tokove, na katere delujejo številni dejavniki. Časovne pojave pa lahko opišemo z manjšim številom tipičnih komponent:

- trend komponenta, ki nam predstavlja osnovno dolgoročno tendenco razvoja obravnavanega pojava v času. Če je sprememba pojava po posameznih obdobjih približno enako velika, govorimo o linearnem trendu. O trendu lahko govorimo le, če razpolagamo z dovolj dolgim časovnim nizom, le-ta naj bi bil v klimatoloških analizah vsaj 30 let. Najpogostejše uporabljene časovne funkcije v trend modelih so podane v obliki polinomske funkcije (model trend polinoma prve stopnje imenujemo tudi model linearnega trenda), eksponentne funkcije, recipročne funkcije ali asimptotične funkcije. Trend izrazimo v številu dni na določeno časovno obdobje, navadno deset let. Negativni trend pomeni, da se vrednost obravnavane spremenljivke v obravnavanem obdobju v zadnjem obdobju zmanjšuje glede na začetno obdobje, pozitiven trend pa pomeni povečanje vrednosti obravnavane spremenljivke glede na začetno obdobje.

- ciklična komponenta nakazuje, da se pojav ponavlja na približno enak način s periodo vsaj dveh let ali več. Začetek cikla nakazuje relativno nizka vrednost pojava, ki se nato v fazi vzpona poveča do neke maksimalne vrednosti, nato sledi padec vrednosti do minimalne vrednosti. Po doseženi minimalni vrednosti se cikel ponovi na približno isti način. Pri nalogi ciklične komponente je prav tako pomemben dovolj dolg niz, ki nam omogoča statistično pravilno izvrednotenje pojava. Ciklična gibanja so prisotna na mnogih področjih, med drugim tudi v kmetijstvu.

- sezonska komponenta je prisotna, kadar se pojav v vsakem letu obnovi v določeni periodi leta. Sezonske spremembe lahko proučujemo, če razpolagamo s serijo mesečnih ali kvartalnih podatkov. Trend, ciklična in sezonska komponenta so sistematske ali deterministične komponente, ker jih lahko izrazimo z neko časovno funkcijo. Za razliko od njih je naključna komponenta nesistematska.

4. naključna komponenta kaže na obstoj variabilnosti pojava v času, ki pa ne kaže neke pravilnosti.

3.5 FENOLOŠKO MODELIRANJE

Z hitrim razvojem mikrometeorologije, ekofiziologije, merilnih tehnik in predvsem računalništva se je v zadnjih desetletjih povečalo število raziskav na področju agrometeoroloških modelov. Modeliranje je način kvantificiranja odnosov med biološkimi procesi (vključujoč tudi fenološke) in dejavniki okolja ali med različnimi biološkimi procesi z namenom bolj natančnega opisa, razumevanja in napovedovanja le-teh glede na pogonske spremenljivke (Lieth, 1974). Procese rasti in razvoja, njihove medsebojne interakcije ter interakcije z okoljem lahko opišemo z računalniškim programom oziroma modelom (Scharrer in Schmidt, 1998). Eno izmed načel pri agrometeoroloških modelih je parsimoničnost ali preprostost modelov (Mechlia in Carroll, 1989a; Landau in sod., 2000). Model naj bi imel naslednje lastnosti:

- relevantnost: model naj bi obravnaval vsebinsko pomemben problem;
- teoretična sprejemljivost: specifikacija modela naj bi bila v skladu z domnevami teorije;
- preprostost ali parsimoničnost: s čim manj spremenljivkami naj bi pojasnili čim več variabilnosti odvisne spremenljivke;
- pojasnjevalna sposobnost: model naj bi čim bolj razložil dejanska dogajanja;
- kakovost ocenjenih parametrov: ocene parametrov naj bi bile natančne, nepristranske, učinkovite;
- napovedna moč: pri danih vrednostih neodvisnih spremenljivk naj bi čim boljše napovedali vrednosti odvisne spremenljivke.

McMasters (1988) predlaga multiplo regresijo kot najpreprostejši način za oblikovanje modelov za napoved fenoloških dogodkov. Pri fenološkem modeliranju običajno tvorimo prognostične modele za napoved nastopa posameznih fenofaz. Modele delimo v statistične in dinamične.

3.5.1 Statistični modeli

Zgodovinsko gledano so se statistični modeli pojavili pred dinamičnimi. Temeljijo na dolgoletnih zaporednih opazovanjih parametrov okolja ter pojavov fenofaz na isti lokaciji. Metodologija zanje temelji na analizi korelacijskih koeficientov med proučevanimi spremenljivkami ter uporabi različnih regresijskih tehnik. Na osnovi korelacijskih koeficientov poiščemo tiste zveze med fenofazami (odvisna spremenljivka) ter neodvisnimi spremenljivkami, pri katerih se pojavljajo statistično značilne povezave in nato oblikujemo enostavne ali multiple regresijske enačbe. Na podlagi izračunanih determinacijskih koeficientov ugotovimo, kolikšen del variabilnosti odvisne spremenljivke lahko pojasnimo z našim modelom. Izdelava takih modelov je sorazmerno preprosta, vendar pa so modeli specifični za vsako posamezno lokacijo in rezultatov takih modelov ne moremo posploševati.

3.5.1.1 Tranzitivni modeli

Pri tranzitivnih fenoloških modelih uporabimo za napovedovanje določene fenofaze datume nastopa predhodnih fenofaz iste rastline (Kajfež-Bogataj in Bergant, 1998; Stewart in Dwyer, 1987; Yin in sod., 1997; Zmrzlak, 1990). Na splošno je določena faza v najboljši korelaciji s fazo, ki ji po razvojnem ciklusu sledi, kasneje pa soodvisnost pada lahko celo do negativnih korelacij.

3.5.1.2 Kombinirani modeli

Pogosto v fenološke modele poleg nastopa predhodnih fenofaz iste rastline vključimo tudi druge spremenljivke, od katerih je fenološki razvoj kake rastline odvisen ali je z njim povezan. Takšne modele imenujemo kombinirani ali mešani fenoklimatski modeli. V mešanih fenoloških modelih kot neodvisne spremenljivke lahko nastopajo poleg predhodnih fenofaz iste rastline tudi fenološke faze drugih rastlin - pogost primer je uporaba fenoloških podatkov samoniklih rastlin za napoved fenofaz gojenih rastlin (Cenci in Ceschia, 2000; Bergant in sod., 2001). V kombinirane modele lahko vključimo tudi

meteorološke elemente okolja (fenoklimatski modeli) ali pa kombinacije vsega naštetega. Od meteoroloških elementov se najpogosteje uporablja termalni čas (vsote aktivnih ali efektivnih temperatur), fototermalni čas, povprečne mesečne temperature zraka, sončno obsevanje in količino padavin. Kombinirani fenološki modeli so bili narejeni tudi za številne kmetijske rastline (Baumgärtner in sod., 1998; Kajfež-Bogataj, 1997; O'Brien in sod., 1983; Thomson in sod., 1997).

3.5.2 Dinamični modeli

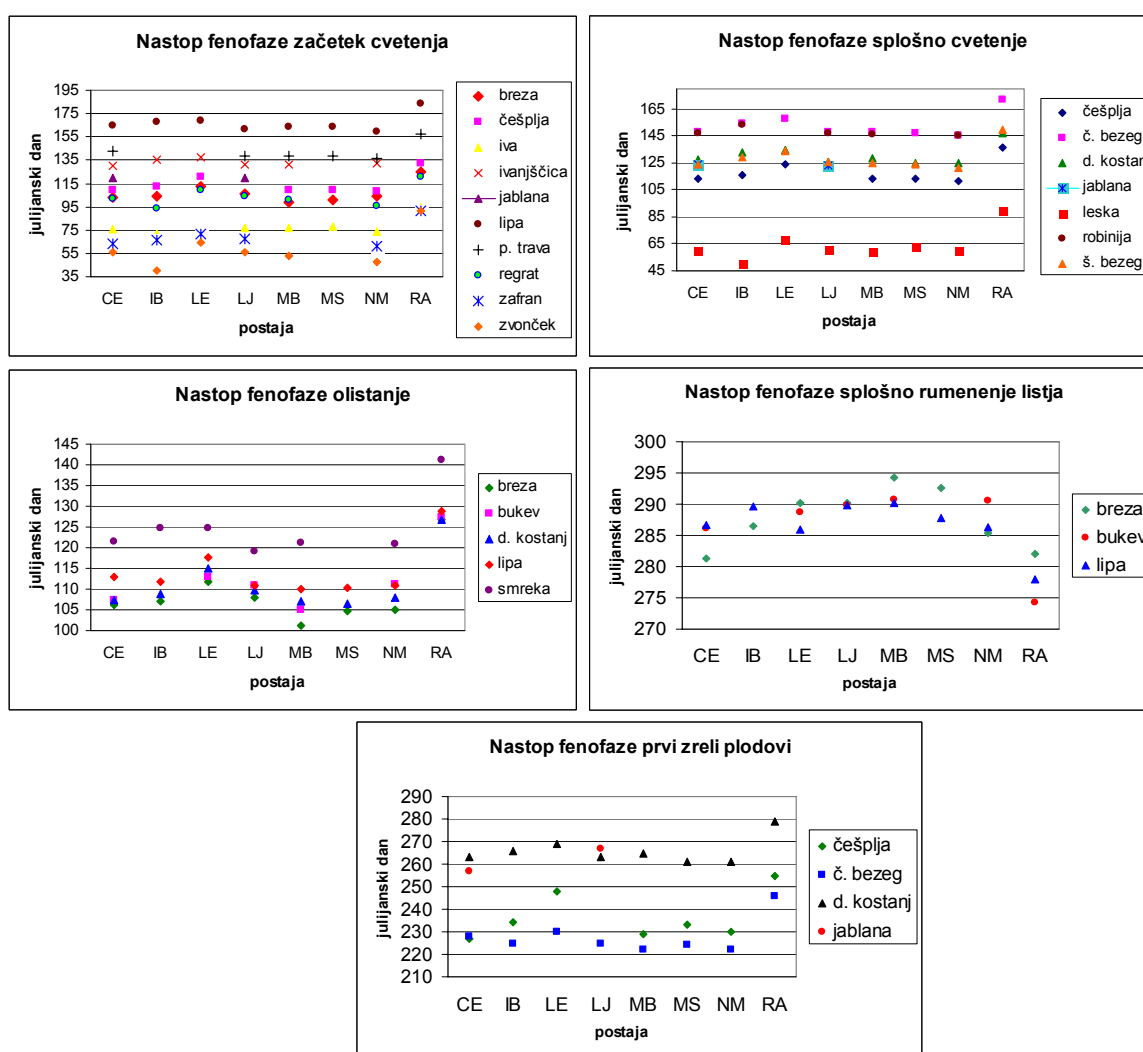
Modeliranje procesov, ki vplivajo na rast in razvoj rastlin, kot tudi modeliranje rasti in razvoja samih, ki temelji na vzročnih povezavah, imenujemo dinamično modeliranje. (Kajfež-Bogataj, 1989). Izhodni parametri dinamičnih modelov so razna stanja vseh treh komponent ekosistema (atmosfere, rastline in tal). Ob poznavanju teh stanj in procesov je možno modeliranje specifičnih komponent razvoja rastline, med drugim tudi modeliranje nastopa posameznih fenofaz. Dinamični modeli poleg spreminjanja rastlinske odeje lahko upoštevajo različne razmere okolja. To pomeni, da so takšni modeli uporabni za različne lokacije, različne vremenske razmere (dejanske ali pa uporabimo različne vremenske scenarije), različne tipe tal ali agrotehnične ukrepe. Dinamični modeli nam dajejo veliko število izhodnih parametrov, so vsestransko uporabni in jih je možno dograjevati oziroma izpopolnjevati. Zavedati pa se moramo, da so taki modeli precej zapleteni in zahtevajo veliko število vhodnih parametrov. Določitev parametrov rastline (fitometrične, optične, fiziološke lastnosti rastline) je lahko zelo dolgotrajna in zahteva večletne poljske in laboratorijske poskuse. Poleg rastlinskih dinamičnih modelov (Harrison, 2000; Klein, 1997) so v fenologiji pogosti tudi dinamični modeli za napoved razvojnih faz pri kmetijsko škodljivih živalih (Ro in Long, 1999; Gray in sod., 2001).

4 REZULTATI

4.1 ANALIZA FENOLOŠKIH PODATKOV

4.1.1 Opisne statistike

Pred uporabo fenoloških podatkov za izdelavo regresijskih modelov smo naredili njihovo osnovno analizo. Na ta način smo dobili predstavo tako o časovni kot tudi prostorski spremenljivosti nastopa fenofaz ter o ekstremnih ali neobičajnih vrednostih podatkov. V preglednici 3 so podani povprečni dnevi (izraženi kot zaporedni dan v letu ali julijanski dan - priloga C) nastopa vseh obravnavanih fenofaz na osmih postajah, isti podatki pa so prikazani tudi na sliki 9. Srednje večletne vrednosti nastopa fenoloških faz nam dajo predstavu o spremembi časa pojava določene fenofaze na različnih lokacijah v odvisnosti od meteoroloških razmer.



Slika 9: Povprečni nastop (v julijanskih dneh) fenofaz v obdobju 1955-1999

Figure 9: The average appearance (in Julian days) of phenophases for the period 1955-1999

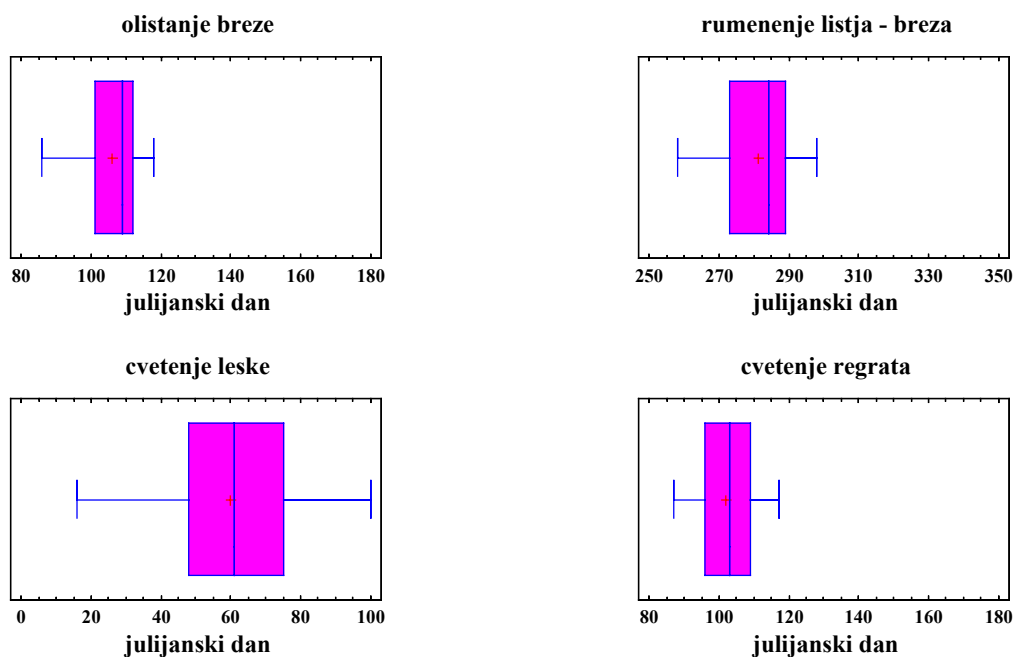
Preglednica 3: Povprečni nastop (v julijanskih dneh) fenofaz v obdobju 1955-1999

Table 3: The average appearance (in Julian days) of phenophases for the period 1955-1999

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	L_{Bp}^1	106	107	112	108	101	105	105	127
breza	C_{Bp}^1	103	104	112	107	99	101	104	125
breza	L_{Bp}^2	281	287	290	290	294	293	285	282
bukev	L_{Fs}^1	107		113	111	105		111	127
bukev	L_{Fs}^2	286		289	290	291		291	277
češplja	C_{Pd}^1	109	112	121		109	110	108	132
češplja	C_{Pd}^2	113	116	124		113	113	111	136
češplja	P_{Pd}^1	227	234	248		229	233	230	255
češplja	P_{Pd}^2	252	255	263		251	251	248	268
črni bezeg	C_{Sn}^2	148	154	158	148	148	147	146	172
črni bezeg	P_{Sn}^1	228	225	230	225	222	224	222	246
divji kostanj	L_{Ah}^1	107	109	115	110	107	107	108	127
divji kostanj	C_{Ah}^2	128	133	135	126	128	125	125	147
divji kostanj	P_{Ah}^1	263	266	269	263	265	261	261	279
iva	C_{Sc}^1	75	71		77	77	78	74	94
ivanjščica	C_{Li}^1	130	136	137	131	131		137	
jablana	C_{Md}^1	120			120				
jablana	C_{Md}^2	124			123				
jablana	P_{Md}^1	257			267				
jablana	P_{Md}^2	282			281				
leska	C_{Ca}^2	60	51	68	61	59	63	60	89
lipa	L_{Tp}^1	113	112	118	111	110	110	111	129
lipa	C_{Tp}^1	165	168	169	161	163	164	160	184
lipa	L_{Tp}^2	287	291	286	289	290	288	286	278
pasja trava	C_{Dg}^1	146			145	144	144	142	165
regrat	C_{To}^1	102	93	109	104	101		96	121
robinija	C_{Rp}^2	147	153	156	147	147		146	
smreka	L_{Pa}^1	121	125	125	119	121		121	141
španski bezeg	C_{Sv}^2	124	130	134	126	125	124	121	150
mali zvonček	C_{Gn}^1	56	41	64	56	53		48	91
pomladanski žafran	C_{Cn}^1	63	66	72	68			61	92

Vendar pa nam srednji datumi povedo premalo o nastopu fenofaze v posameznih letih, čeprav je znano, da nastopi fenofaza najpogosteje okoli srednjega datuma in da odstopanja od te vrednosti v večini primerov niso večja od ± 15 dni (Otorepec, 1980). Zaradi velikega števila podatkov so izračuni osnovnih opisnih statistik (povprečni dan nastopa fenofaze,

najzgodnejši in najpoznejši dan nastopa fenofaze, razpon nastopa fenofaze, standardni odklon ter koeficient trenda) podani v prilogah E1 do E34. Na sliki 10 pa smo kot primer z metodo okvirov z ročaji prikazali štiri fenofaze za postajo Celje. Okvir posamezne slike predstavlja srednjih 50% vrednosti, navpična črta v okviru prikazuje mediano. Fenofaza olistanje breze v Celju se je v obravnavanem obdobju v povprečju pojavila 106. dan (označeno z znakom +), najzgodneje 86. dan (spodnja meja levega ročaja) in najpozneje 118. dan (zgornja meja desnega ročaja). Variacijski razpon (VR) za omenjeno fenofazo znaša torej 32 dni. Razpon za fenofazo rumenenja listja pri brezi v Celju znaša 40 dni, najprej se je pojavila fenofaza 258. dan in najkasneje 298. dan, v povprečju pa 281. dan. Bistveno drugačna vrednost VR velja za cvetenje leske in sicer znaša 84 dni, minimalna vrednost je 16, maksimalna pa 100, v povprečju pa se pojavi splošno cvetenje leske v Celju 60. dan. Cvetenje regrata se je v obravnavanem obdobju v Celju pojavilo povprečno 102. dan, najzgodneje 87. dan in najkasneje 117. dan, razpon znaša torej 30 dni. Ker je variabilnost nastopa fenofaz, ki se pojavijo na začetku rastne dobe (leska, iva, žafran, zvonček), velika, je za te fenofaze še posebej pomembno, da imamo dovolj dolg niz podatkov (Otorepec, 1980).



Slika 10: Okvir z ročaji za fenofaze: olistanja in rumenenja listja breze ter cvetenja regrata in leske v Celju za obdobje 1955-1999

Figure 10: Box-and-Whisker Plot for phenophases: first leaf unfolding and colouring of the laeves of common silver birch, flowering of dandelion and hazel in Celje for the period 1955-1999

Za nastop fenofaz olistanja breze, buke, divjega kostanja, lipe in smreke (priloge E1, E5, E14, E24 in E31) je značilen velik razpon med najzgodnejšim in najkasnejšim dnevom olistanja na vseh obravnavanih postajah. Vrednosti povprečnega VR (povprečje vseh postaj) znašajo od 29 dni (bukev) do 39 dni (smreka), standardni odklon pa med 7 in 10 dni. Zelo podobne rezultate smo dobili tudi za pojav rumenenja pri brezi, buki in lipi (priloge E3, E6 in E26). Razpon med ekstremnimi dnevi pojava fenofaze je velikosti 33 do

40 dni, standardni odklon pa med 8 do 10 dni. Za fenofazo cvetenja pri zgodaj cvetočih rastlinah (priloge E17, E23, E33 in E34) je značilna izredno velika variabilnost – pri žafranu znaša povprečen razpon med najzgodnejšim in najkasnejšim dnevom cvetenja 50 dni, pri ivi in zvončku je razpon 60 oziroma 61 dni, največji pa je pri leski, kjer znaša kar 80 dni. Skladno s tem so pri teh rastlinah tudi standardni odkloni (σ) pojava fenofaze cvetenja veliko višji v primerjavi z vsemi ostalimi rastlinami. Na veliko variabilnost podatkov pri leski so opozorili že Ahas in sod. (2000). Pri ostalih rastlinah, ki zacvetijo kasneje, med minimalnimi in maksimalnimi vrednostmi ni tako velikega razpona, le-ta je istega velikostnega reda kot pri olistanju ter rumenjenju listja in znaša v povprečju med 30 in 40 dni. Fenofaza prvih zrelih plodov pri češplji, črnem bezgu, divjem kostanju in jablani (priloge E10, E13, E16 in E21) v obravnavanem obdobju nastopi v najzgodnejših letih za približno 40 dni prej kot v najkasnejših letih.

Velikost σ nastopa fenofaz je največja pri tistih fenofazah, ki se pojavljajo spomladi, za kasnejše fenofaze se σ zmanjšuje, najmanjše vrednosti kažejo fenofaze, ki nastopijo poleti, ko so tudi temperaturna nihanja med leti manjša. Velikost odstopanj od povprečja se zmanjšuje, če se fenofaza pojavlja v termično stabilnejšem delu leta (Oturepec, 1980). σ pa je različen tudi pri fenofazah, ki se pojavljajo v istem delu leta. Razlike lahko nastanejo zaradi različnih reakcij rastline na razmere v okolju, če pa gre za isto rastlinsko vrsto, zaradi različne reakcije rastline glede na fazo razvoja, v kateri se nahaja. Tako so ugotovili, da je variabilnost časa cvetenja večja od variabilnosti olistanja, čeprav se obe fenofazi pojavljata skoraj istočasno – sprememba zunanjih razmer vpliva bolj na generativne kot na vegetativne faze razvoja (Roberts in Summerfield, 1987).

Izračunali smo tudi trajanje obdobja med olistanjem in rumenjenjem listja pri treh drevesnih vrstah: brezi, bukvi in lipi (priloge E4, E7 in E27). Dolžino obdobja med omenjenima fenofazama mnogi avtorji smatrajo kot dolžino rastne dobe (Beaubien in Freeland, 2000; Chmielewski in Rötzer, 2001), proučevanje le-te pa je vse bolj pomembno tudi s stališča klimatskih sprememb. Naša analiza kaže, da se lahko dolžina tega obdobja precej razlikuje – pri brezi in lipi za skoraj dva meseca (57, oz. 58 dni), pri bukvi za skoraj mesec in pol (41 dni).

Fenološki podatki za posamezno postajo so precej razpršeni okoli povprečne vrednosti na kar vplivajo biološke lastnosti opazovanih rastlin oziroma njihovo različno reagiranje na spremenjene pogoje v okolju. Pogosto majhne razlike v vlažnosti tal zaradi drugačnega tipa tal pospešijo cvetenje ali olistanje, zelo pomembna pa je mikrolokacija, na kateri opazovalec beleži pojav fenofaze (severna ali južna stran). Za ugotavljanje razlik v nastopu fenofaz med posameznimi postajami in leti smo uporabili statistično metodo analizo variance, s to metodo smo variabilnost v nastopu fenofaze razdelili na tri dele: del, na katerega vplivajo leta, del, na katerega vplivajo postaje in nepojasnen del. Rezultati analize so pokazali, da oba faktorja (leta in postaje) statistično značilno vplivata na datum pojava fenofaz.

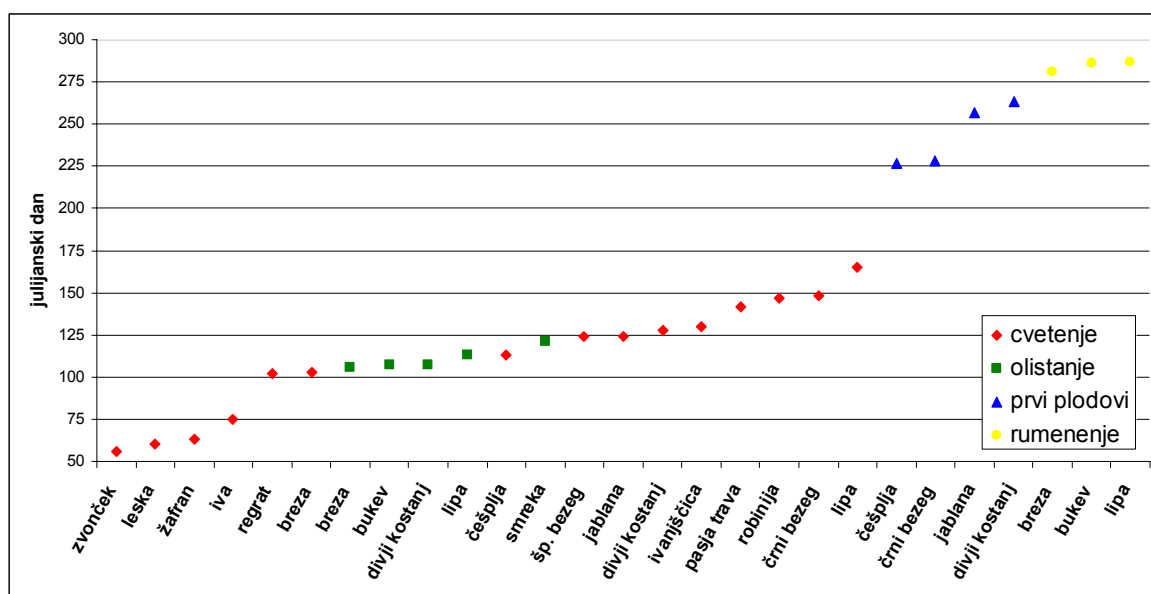
Na osnovi rezultatov Duncanovega testa pri 5% tveganju smo postaje razdelili v homogene skupine glede na nastop vsake posamezne fenofaze (preglednica 4). V posameznih tabelah preglednice 4, ki nam predstavljajo različne fenofaze, so postaje razvrščene v homogene skupine. Znotraj vsakega stolpca tvorijo postaje, označene s črko X, skupino povprečnih

vrednosti nastopa fenofaze, ki se med sabo statistično značilno ne razlikujejo. Poglejmo si primer fenofaze cvetenja leske (C_{Ca}^2), za katero lahko vidimo, da so postaje razvrščene v štiri homogene skupine. V prvi skupini je postaja Ilirska Bistrica, kjer nastopi fenofaza cvetenja leske najbolj zgodaj, v povprečju 51. dan v letu (priloga E23) in se statistično značilno razlikuje od vseh ostalih postaj. Naslednjo homogeno skupino tvorijo postaje Celje, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota in Novo mesto, kjer nastopi v povprečju cvetenje leske med 59. in 63. dnevom, med temi postajami ne obstajajo statistično značilne razlike v dnevu nastopa fenofaze. V tretji homogeni skupini je postaja Lesce, nastop fenofaze tukaj se statistično značilno razlikuje od vseh ostalih postaj in nastopi povprečno 68. dan v letu. V Ratečah, ki sodijo v četrto homogeno skupino, pa je pojav cvetenja leske statistično značilno najkasnejši in nastopi v povprečju šele 89. dan.

Poglejmo še primer, ko pri določeni fenofazi posamezna postaja spada v dve ali celo tri homogene skupine hkrati. Za fenofazo cvetenja breze (C_{Bp}^1) smo postaje razdelili v šest homogenih skupin. Postaje Maribor, Lesce in Rateče vsaka zase tvorijo homogeno skupino. Murska Sobota in Celje tvorita posebno homogeno skupino, hkrati pa Celje spada tudi v homogeno skupino skupaj s postajama Ilirsko Bistrico in Novim mestom. Takšna razporeditev pomeni torej, da se cvetenje breze v Murski Soboti statistično značilno razlikuje od cvetenja breze v Ilirski Bistrici in Novem mestu. Postaja Novo mesto pa tvori s postajo Ljubljano še eno homogeno skupino, torej se cvetenje breze v Ljubljani in Novem mestu ne razlikuje statistično značilno.

V skladu s pričakovanji so povprečni, prav tako pa tudi najzgodnejši in najpoznejši dnevi nastopov fenofaz vseh rastlin v Lescah in Ratečah kasnejši v primerjavi z ostalimi šestimi postajami. Tudi med samima postajama Lesce in Rateče obstajajo v vseh primerih statistično značilne razlike. Fenofaze rumenenja listja (priloge E3, E6 in E26) v Ratečah zaradi nižjih povprečnih temperatur zraka nastopijo prej kot na ostalih postajah. Zato je tudi trajanje obdobja med olistanjem in rumenjenjem listja pri brezi, bukvi in lipi najkrajše v Ratečah (priloge E4, E7 in E27). Postaja Ilirska Bistrica se v sedmih primerih (fenofazah) značilno razlikuje od vseh ostalih postaj, na vseh ostalih obravnavanih fenoloških postajah (Celje, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota in Novo mesto) se povprečni dnevi nastopa fenofaz pri isti rastlini pojavljajo precej sočasno, ne glede na različne nadmorske višine, geografske širine in dolžine ter same mikrolokacije postaj. Pri razvrstitvi postaj v posamezne homogene skupine je seveda pomembno, v kateri podnebni razred oziroma podtip spada posamezna lokacija, saj so razlike v padavinskih in temperaturnih razmerah lahko precej velike.

Na osnovi dolgoletnih povprečnih datumov nastopa posameznih fenoloških faz na izbrani postaji lahko izdelamo fenološki koledar, ki nam podaja zaporedje nastopa fenofaz opazovanih rastlin. Kot primer smo na sliki 11 prikazali, kako si sledijo fenofaze 17 obravnavanih rastlin v Celju, datum nastopa posamezne fenofaze je izražen kot julijanski dan.



Slika 11: Zaporedje fenoloških faz v Celju za 17 različnih rastlin v obdobju 1955-1999

Figure 11: The sequence of phenological events in Celje for 17 different plants for the period 1955-1999

Dolgoletna povprečja nastopa fenofaz so učinkovit pripomoček pri pripravi agrometeoroloških prognoz (primernost področja za gojenje določene kulture, nevarnost pozebe, nevarnost vodnega stresa, potrebe po namakanju), v medicinski meteorologiji ter pri študiju vpliva spremenjene klime na kmetijstvo (Ahas in sod., 2000).

Preglednica 4: Razvrstitev postaj v homogene skupine glede na nastop fenofaz
Table 4: Identified homogenous groups among stations regarding phenophases appearance

L_{Bp}^1 - breza

MB	X				
MS		X			
NM		X			
CE		X	X		
IB			X		
LJ			X		
LE				X	
RA					X

C_{Pd}^2 - češplja

NM	X			
MS	X			
CE	X			
MB	X			
IB		X		
LE			X	
RA				X

C_{Ah}^2 - divji kostanj

NM	X			
MS	X			
LJ	X			
CE		X		
MB		X		
IB			X	
LE			X	
RA				X

C_{Bp}^1 - breza

MB	X				
MS		X			
CE		X	X		
IB			X		
NM			X	X	
LJ				X	
LE					X
RA					X

P_{Pd}^1 - češplja

CE	X				
MB	X				
NM	X	X			
MS		X	X		
IB			X		
LE				X	
RA					X

P_{Ah}^1 - divji kostanj

NM	X				
MS	X				
LJ	X	X			
CE	X	X			
MB		X	X		
IB			X		
LE				X	
RA					X

L_{Bp}^2 - breza

CE	X				
RA	X	X			
NM		X	X		
IB			X	X	
LE				X	X
LJ				X	X
MS					X
MB					X

P_{Pd}^2 - češplja

NM	X			
MS	X			
MB	X	X		
CE	X	X		
IB		X		
LE			X	
RA				X

C_{Sc}^1 - iva

IB	X			
NM	X	X		
CE		X	X	
MB		X	X	
LJ		X	X	
MB			X	
RA				X

L_{Fs}^1 - bukev

MB	X				
CE		X			
LJ			X		
NM			X	X	
LE				X	
RA					X

C_{Sn}^2 - črni bezeg

NM	X				
MS	X	X			
MB		X			
LJ		X			
CE		X			
IB			X		
LE				X	
RA					X

C_{Li}^1 - ivanjščica

CE	X			
LJ	X	X		
MB	X	X		
NM		X		
IB			X	
LE				X

L_{Fs}^2 - bukev

RA	X		
CE		X	
LE		X	X
LJ			X
NM			X
MB			X

P_{Sn}^1 - črni bezeg

NM	X			
MB	X			
LJ	X			
IB	X	X		
MS	X	X		
CE		X	X	
LE			X	
RA				X

C_{Md}^1 - jablana

LJ	X
CE	X

C_{Pd}^1 - češplja

NM	X			
CE	X			
MB	X			
MS	X			
IB		X		
LE			X	
RA				X

L_{Ah}^1 - divji kostanj

MS	X				
MB	X	X			
CE	X	X			
NM	X	X	X		
IB		X	X		
LJ			X		
LE				X	
RA					X

C_{Md}^2 - jablana

CE	X
LJ	X

(se nadaljuje)

(nadaljevanje)

P_{Md}^1 - jablana

CE	X	
LJ		X

P_{Md}^2 - jablana

LJ	X
CE	X

C_{Ca}^2 - leska

IB	X			
MB		X		
CE		X		
NM		X		
LJ		X		
MS		X		
LE			X	
RA				X

L_{Tp}^1 - lipa

MB	X				
MS	X	X			
NM	X	X	X		
LJ	X	X	X		
IB		X	X		
CE			X		
LE				X	
RA					X

C_{Tp}^1 - lipa

NM	X				
LJ	X	X			
MB		X	X		
MS			X		
CE			X		
IB				X	
LE				X	
RA					X

L_{Tp}^2 - lipa

RA	X			
LE		X		
NM		X		
CE		X	X	
MS		X	X	X
LJ		X	X	X
MB			X	X
IB				X

C_{Dg}^1 - pasja trava

NM	X		
LJ	X		
MS	X		
MB	X		
CE		X	
RA			X

C_{To}^1 - regrat

IB	X				
NM		X			
MB			X		
CE			X	X	
LJ				X	
LE					X
RA					X

C_{Rp}^2 - robinija

NM	X	
MB	X	
CE	X	
LJ	X	
IB		X

L_{Pa}^1 - smreka

LJ	X		
NM	X		
MB	X		
CE	X		
LE		X	
IB		X	
RA			X

C_{Sv}^2 - španski bezeg

NM	X			
CE		X		
MB		X		
MS		X		
LJ		X		
IB			X	
LE				X
RA				X

C_{Cn}^1 - pomlad. žafran

NM	X			
CE	X			
IB		X		
LJ		X		
LE			X	
RA				X

C_{Gn}^1 - mali zvonček

IB	X				
NM		X			
MB			X		
LJ			X		
CE			X		
LE				X	
RA					X

4.1.2 Časovna analiza pojavljanja fenofaz

V nalogi smo proučevali tudi osnovno dolgoletno tendenco razvoja obravnavanih fenofaz v obdobju 1955-1999. Prav fenološka opazovanja nam dajejo možnost, da na osnovi podatkov teh opazovanj ugotovljamo, kako rastline reagirajo na regionalne klimatske razmere in na klimatske spremembe. Za vse izbrane fenofaze ter lokacije smo za obravnavanih 45 let izračunali časovne trende. Trend smo opisali z linearnim modelom, ki se je najbolje prilegal našim podatkom. V prilogah E1 do E34 so poleg drugih opisnih statistik podani tudi koeficienti trenda, ki smo ga izrazili v številu dni na deset let. Na tem mestu pa trende podajamo za vse fenofaze ovrednotene kot negativni (-) ali pozitiven trend (+) (preglednica 5). Negativni trend pomeni, da se določena fenofaza v obravnavanem nizu v zadnjih letih pojavlja v povprečju zgodneje kot v začetnih letih, pozitiven trend pa kaže na kasnejše pojavljanje določene fenofaze glede na začetno obdobje. Statistično značilne trende pri $p=0,05$ smo označili z znakom *. V preglednici 5 pomeni prazno polje bodisi da na lokaciji fenofaze ne opazujejo oziroma je niz prekratek in fenofaza ni bila vključena v časovno analizo.

Preglednica 5: Predznak trenda pojavov fenofaz za obdobje 1955-1999, - negativen trend, + pozitiven trend, * statistično značilen trend, $p=0,05$

Table 5: Sign of long-term trends of the phenological events for the period 1955-1999, - negative trend, + positive trend, * statistical significant trend, $p=0,05$

A – fenofaza cvetenja (phenophase of flowering)

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	C_{Bp}^1	-*	-	-*	-	-	-	-	-
češplja	C_{Pd}^1	-*	-*	-		-*	-*	-*	+
iva	C_{Sc}^1	-*	-		-*	-	-*	-*	-*
ivanjščica	C_{Li}^1	-	-	-	-	+		-	
jablana	C_{Md}^1	-			-				
lipa	C_{Tp}^1	-	-*	-	+	+	-	-	-*
pasja trava	C_{Dg}^1	-*			-	-*	-	-	+
regrat	C_{To}^1	-*	-*	-*	-	-		-*	-
pomlad. žafran	C_{Cn}^1	-	-	-*	-			-	-
mali zvonček	C_{Gn}^1	-	-*	-	-	-		-	-*
češplja	C_{Pd}^2	-*	-	-		-*	-*	-*	-
črni bezeg	C_{Sn}^2	-*	-	-	-*	-*	-*	-*	-
divji kostanj	C_{Ah}^2	-*	-	+	-*	-*	-	-*	-
jablana	C_{Md}^2	-*			-				
leska	C_{Ca}^2	-	-	-*	-*	-*	-	-*	-*
robinija	C_{Rp}^2	-*	-*		-*	-		-*	
španski bezeg	C_{Sv}^2	-*	-	+	-*	-*	-*	-*	-

(se nadaljuje)

(nadaljevanje)

B - fenofaza olistanja (phenophase of first leaf unfolding)

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	L_{Bp}^1	-*	-*	-*	-*	-*	-	-*	+
bukev	L_{Fs}^1	-*		-*	-*	-		-	+
divji kostanj	L_{Ah}^1	-*	-*	-*	-*	+	-*	-*	++
lipa	L_{Tp}^1	-	-	-*	-	+	-	-*	+
smreka	L_{Pa}^1	-*	-*	-	+	-		-*	-

C – fenofaza prvih zrelih plodov (first fruit ripeness)

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
češplja	P_{Pd}^1	-	-*	-		-	-	-*	-
črni bezeg	P_{Sn}^1	-*	-*	-*	-	-*	-*	-*	-
divji kostanj	P_{Ah}^1	-	-	++	+	++	+	-	++
jablana	P_{Md}^1	+			-				

D - fenofaza splošnega rumenjenja listov (phenophase of leaf colouring)

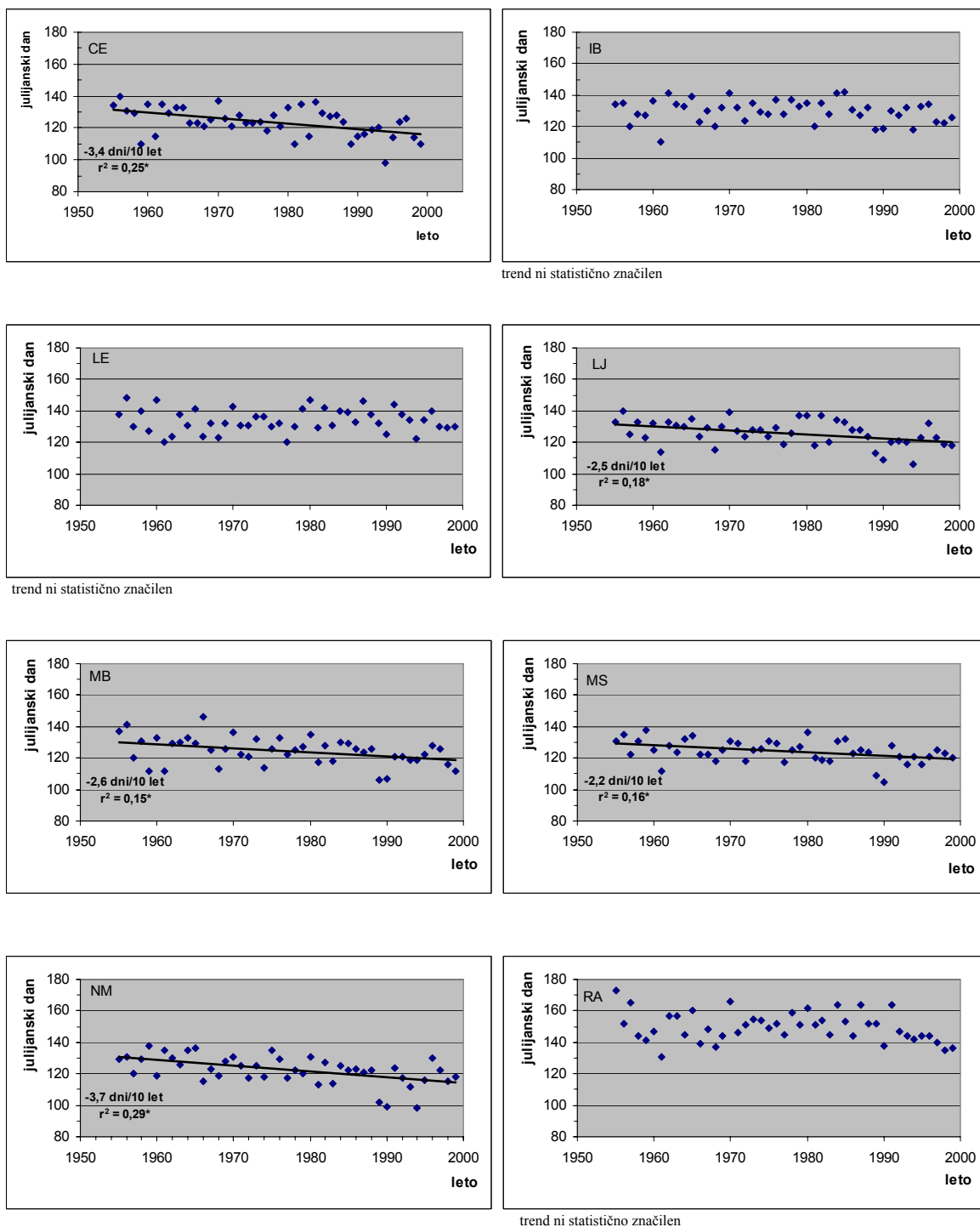
Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	L_{Bp}^2	-	-	++	++	++	-*	-	+
bukev	L_{Fs}^2	-		++	++	++		++	++
lipa	L_{Tp}^2	++	-	+	++	++	-*	+	+

E – dolžina obdobja med fenofazama olistanja in splošnega rumenjenja listja
(duration of period between first leaf unfolding and leaf colouring)

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	$L_{Bp}^1 - L_{Bp}^2$	+	-	++	++	++	-	+	+
bukev	$L_{Fs}^1 - L_{Fs}^2$	+		++	++	++		++	++
lipa	$L_{Tp}^1 - L_{Tp}^2$	++	+	++	+	++	-*	++	+

Za cvetenje lahko ugotovimo, da za 17 fenofaz in 8 lokacij ni niti enega pozitivnega statistično značilnega trenda, število primerov, ko je trend negativen pa je približno enako kot število primerov, ko trend ni statistično značilen. Največji koeficient trenda kažeta fenofazi cvetenja ive in leske. Iva zacveti v povprečju 5,1 dni na dekada prej, trend pa je negativen v Celju, Ljubljani, Murski Soboti, Novem mestu in Ratečah. Cvetenje leske se pojavlja zgodneje v Ljubljani, Mariboru, Novem mestu, Lescan in Ratečah, povprečen koeficient trenda za te postaje pa je -5,3 dni/10 let. Splošno cvetenje španskega bezga (slika 12) in črnega bezga je zgodnejše na istih postajah in sicer v Celju, Ljubljani, Mariboru, Murski Soboti in Novem mestu. V povprečju pa fenofaza cvetenja pri črnem

bezgu nastopi zgodnejše za 2,4 dni, pri španskem bezgu pa za 2,9 dni na dekada v obravnavanem obdobju.



Slika 12: Trendi cvetenja španskega bezga za obdobje 1955-1999 na 8 lokacijah; $p=0,05$

Figure 12: Trends of flowering of common lilac for the period 1955-1999 on 8 locations; $p=0,05$

Cvetenje breze je zgodnejše v Celju (-2,9 dni/10 let) in Ljubljani (-2,1 dni/10 let), na ostalih postajah trenda ni. Tudi cvetenje lipe je zgodnejše samo na dveh postajah in sicer v Ilirski Bistrici (-1,3 dni/10 let) in Ratečah (-1,8 dni/10 let). Pri divjem kostanju se kaže negativni trend na polovici postaj: v Celju, Ljubljani, Mariboru in Novem mestu, cvetenje pa je zgodnejše v povprečju za 2 dni na dekada v obravnavanem obdobju. Cvetenje robinije je zgodnejše v Celju, Ilirski Bistrici, Ljubljani in Novem mestu in sicer za 2,5 dni/10 let, trend pa ni značilen v Mariboru.

'Domača češplja' cveti zgodnejše v Celju, Ilirski Bistrici, Mariboru, Murski Soboti in Novem mestu, koeficient trenda znaša za te postaje v povprečju -2,1 dni/10 let, v Lescah in Ratečah trenda ni. Za 'Bobovec' smo imeli dovolj dolg niz podatkov samo za postaji Celje in Ljubljano, polno cvetenje se v Celju pojavlja 1,6 dni zgodnejše na dekada kot na začetku, v Ljubljani značilnega trenda ni.

Negojene zelnate rastline na splošno cvetijo zgodnejše v manj primerih kot drevje in grmičevje. Ivanjščica je edina od obravnavanih rastlin, pri kateri za nastop fenofaze cvetenja na nobeni postaji nismo ugotovili značilnega trenda. Razpoložljiv niz fenoloških podatkov je pri tej rastlini nekoliko krajši od ostalih, saj so jo začeli opazovati šele leta 1961. Cvetenje žafrana je zgodnejše samo v Lescah (-2,8 dni/10 let), zgodnejše cvetenje malega zvončka pa se pojavlja v Ilirski Bistrici (-2,2 dni/10 let) in Ratečah (-1,3 dni/10 let). Regrat cveti zgodnejše v zadnjih letih na postajah Celje, Ilirska Bistrica, Lesce in Novo mesto in sicer za 2,4 dni prej na dekada.

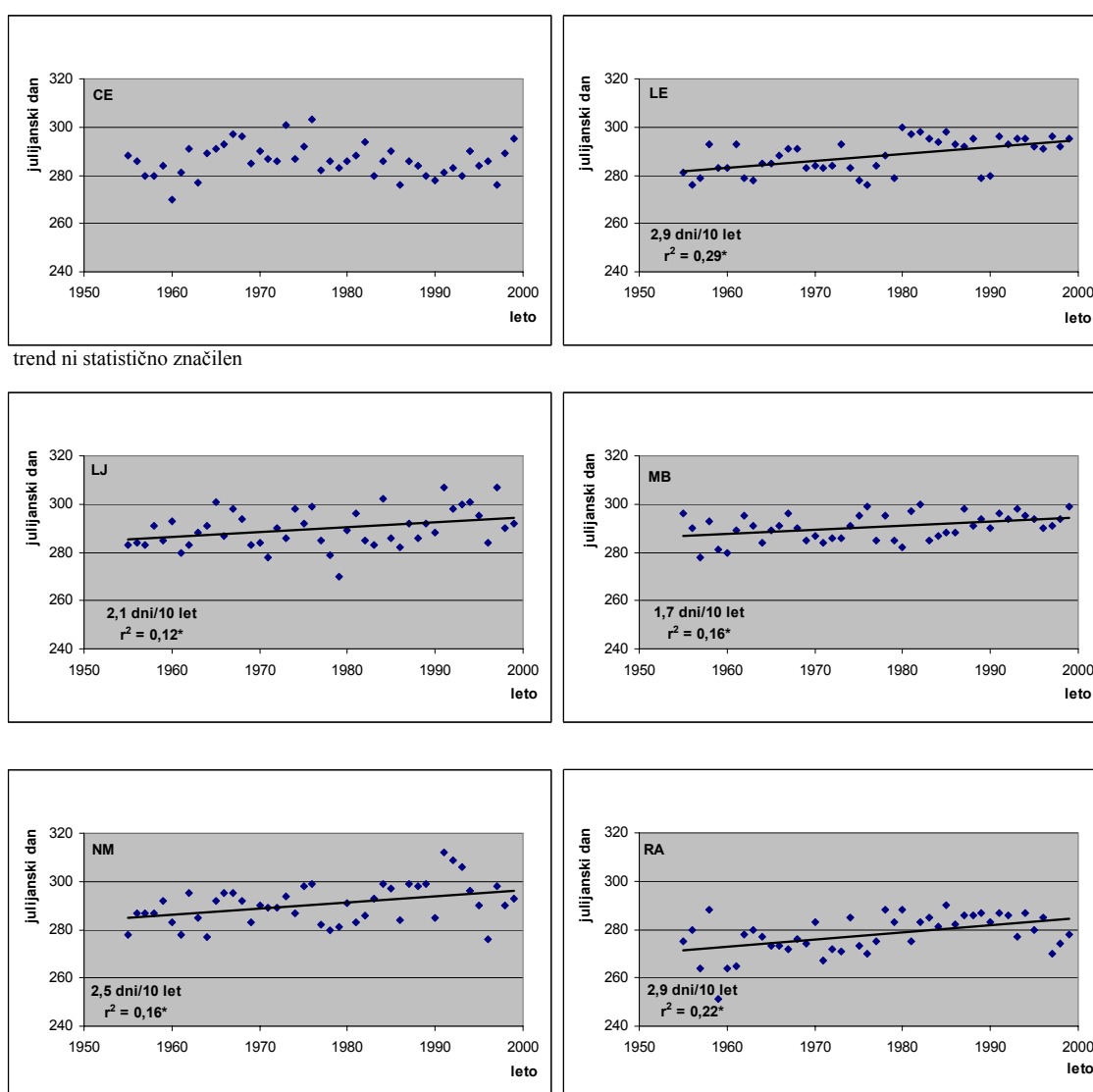
Pri pasji travi so do leta 1984 spremljali pojav začetka cvetenja, od tega leta dalje pa opazujejo klasenje, ki nastopi statistično značilno prej kot cvetenje. Za analizo časovnega trenda lahko uporabimo samo podatke iste fenološke faze, niz pa mora biti dolg vsaj 30 let, tako da smo pri pasji travi lahko izračunali trend začetka cvetenja samo v Celju; trend je negativen in znaša -3,6 dni na dekada v obdobju 1955-1984.

Za fenofazo cvetenja pri obravnavanih rastlinah in postajah je značilno, da v 54% trenda ni, v 46% pa obstaja negativni trend, kar pomeni, da se fenofaza cvetenja v zadnjih letih pojavlja zgodnejše kot v začetnih letih v obravnavanem nizu 1955-1999. Pozitivnega trenda v nastopu cvetenja nismo ugotovili pri nobeni rastlini. Negativen trend nastopa spomladanskih faz so ugotovili tudi številni drugi avtorji, tako sta Beaubienova in Freeland (2000) za Alberto (Kanada) izračunala koeficient trenda -2,7 dni/10 let za cvetenje topola, Menzel-ova (2000) pa povprečen koeficient trenda -2,1 dni/10 let za različne fenofaze olistanja in cvetenja. Ahas (1999) poroča, da je začetek pomladi v Estoniji glede na nastop pomladanskih fenofaz v zadnjih osemdesetih letih zgodnejši v povprečju za 8 dni, spremembe pa so izrazitejšje v zadnjih štiridesetih letih.

Precej podobne rezultate kot za cvetenje smo dobili tudi za fenofazo olistanja pri brezi, bukvi, divjem kostanju, lipi in smreki. Breza olista na šestih od osmih lokacij v zadnjih letih zgodnejše, v povprečju -2,3 dni na dekada, in sicer v Celju, Ilirski Bistrici, Lescah, Ljubljani, Mariboru in Novem mestu; v Murski Soboti in Ratečah trenda ni. Olistanje bukve je zgodnejše na polovici lokacij, v Celju, Lescah in Ljubljani, na ostalih značilnega trenda ni, povprečni negativni trend pa znaša -1,8 dni/10 let. Olistanje divjega kostanja kaže na večini postaj (Celje, Ilirska Bistrica, Lesce, Ljubljana, Murska Sobota, Novo

mesto) negativni trend, povprečni koeficient trenda znaša -2,1 dni/10 let. Edina postaja, na kateri je olistanja divjega kostanja kasnejše (+2,9 dni/10 let), so Rateče, to pa je obenem tudi edina fenofaza olistanja na splošno, ki nastopa v zadnjih letih kasneje. Olistanje lipe je zgodnejše (-1,6 dni/10 let) v Lescah in Novem mestu, na ostalih postajah značilnega trenda ni. Pri smreki nastopi fenofaza prvih poganjkov zgodnejše v Celju, Ilirski Bistrici ter Novem mestu in sicer za 1,7 dni na dekada.

Fenofaza olistanja nastopi v 54% primerov zgodnejše, v 43% primerov statistično značilnega trenda ni, le v enem primeru (3%) pa fenofaza nastopi v zadnjih letih kasneje kot v začetnih letih obravnavanega obdobja. Na splošno lahko ugotovimo, da približno polovica spomladanskih fenofaz (začetek cvetenja, splošno cvetenje, olistanje) nastopi zadnja leta statistično značilno zgodnejše, ostala polovica pa ne kaže značilnega trenda.



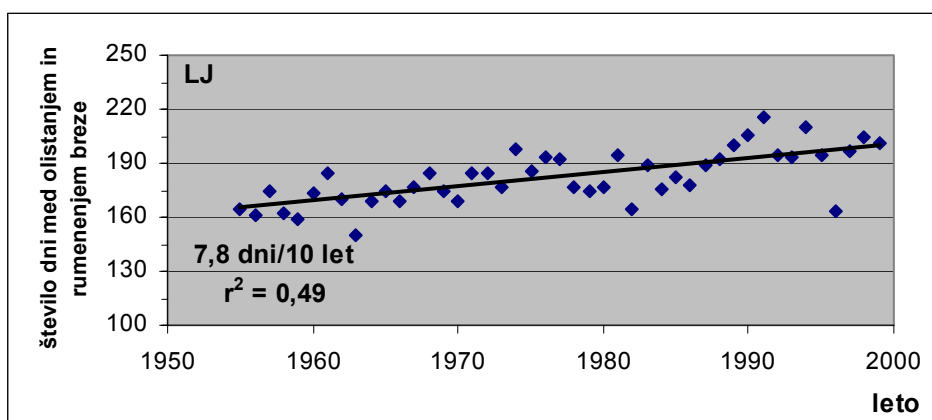
Slika 13: Trendi jesenskega rumenenja listja bukve v obdobju 1955-1999 na 6 lokacijah; $p=0,05$

Figure 13: Trends of beech leaf colouring in autumn for the period 1955-1999 on 6 locations; $p=0,05$

Drugačno sliko nam kaže jesenska fenofaza splošnega rumenenja listja, za katero prevladuje pozitiven trend, to pomeni, da listje rumeni zadnja leta kasneje. Pri bukvi je ta trend najbolj izrazit (slika 13), pozitiven je povsod razen v Celju, povprečen koeficient trenda za ostale postaje pa znaša +2,1 dni/10 let.

Rumenenje breze je kasnejše v Lescah, Ljubljani in Mariboru (+3 dni/10 let), v Celju, Novem mestu in Ratečah značilnega trenda ni, izjema pa je postaja Murska Sobota, za katero je značilno, da nastopi fenofaza rumenenja breze zadnja leta zgodneje (-2,3 dni/10 let). Tudi rumenje lipe na postaji Murska Sobota je zgodnejše (-3,1 dni/10 let), v Celju, Ljubljani in Mariboru pa je rumenenja lipe kasnejše, v povprečju nastopi fenofaza splošnega rumenenja listja 2,1 dni na dekada kasneje. Za jesenske fenološke faze (rumenenje in odpadanje listja) mednarodnih fenoloških vrtov Evrope je Menzlova (2000) ugotovila povprečen trend +1,6 dni na dekada, podobne rezultate kaže tudi raziskava Chmielewskega in Rötzerja (2000).

Na osnovi podatkov o nastopu fenofaz olistanja in rumenenja listja pri brezi, bukvi in lipi smo izračunali dolžino obdobja (število dni) med nastopom obeh fenofaz. V več kot polovici primerov je trend dolžine obdobja med obema fenofazama pozitiven, kar pomeni, da se pri omenjenih drevesnih vrstah obdobje rasti podaljšuje. Za področje Evrope so nekateri avtorji že dokazali, da se dolžina rastne dobe podaljšuje, analize Menzel-ove (2000) kažejo na podaljšanje rastne dobe za 3,6 dni na dekada v obdobju 1959-1996. Chmielewski in Rötzer (2000) sta ugotovila trend +2,7 dni na dekada v obdobju 1969-1998, oziroma sta z regresijo izračunala, da je povišanje povprečne mesečne temperature za 1°C povezano s podaljšanjem rastne sezone za približno 5 dni. Dolžina obdobja med fenofazo olistanja in rumenenja listja pri brezi se podaljšuje v Lescah, Ljubljani (slika 14) in Mariboru (+3,1 dni/10 let), na ostalih postajah značilnega trenda ni. Za bukev je dolžina obdobja med obema fenofazama daljša na vseh postajah razen v Celju, in znaša +3,1 dni na dekada v obravnavanem obdobju.



Slika 14: Trend dolžine obdobja med olistanjem in jesenskim rumenenjem listja pri brezi v Ljubljani za obdobje 1955-1999; $p=0,05$

Figure 14: Trend of the length of period between common silver birch leaf unfolding and leaf colouring in autumn in Ljubljana for the period 1955-1999; $p=0,05$

Pri lipi je to obdobje daljše v Celju, Lescah, Mariboru in Novem mestu (+2,9 dni/10 let), na postajah Ilirska Bistrica, Ljubljana in Rateče značilnega trenda ni. Izjema je tako kot pri fenofazi olistanja postaja Murska Sobota, tu se dolžina obdobja med olistanjem in rumenenjem lipe skrajšuje, koeficient trenda pa znaša -2,0 dni/10 let.

V prilogah E10, E21, E13 in E16 smo podali trende nastopa fenofaze prvih zrelih plodov pri 'Domači češplji', 'Bobovcu', divjem kostanju in črnem bezgu. Zgodnejši pojav prvih plodov je značilen za črni bezeg na večini postaj (Celje, Ilirska Bistrica, Lesce, Maribor, Murska Sobota in Novo mesto) ter 'Domačo češpljo' v Ilirski Bistrici in Novem mestu, kasnejši pojav prvih plodov pri divjem kostanju pa je značilen v Lescah, Mariboru in Ratečah. Pri ostalih fenofazah statistično značilnega trenda ni.

Analiza trendov po posameznih postajah fenofaze je pokazala, da je največ zgodnejših spomladanskih fenofaz (cvetenje in olistanje) v Celju in Novem mestu (68% oziroma 65% vseh fenofaz), v Ratečah znaša ta delež nekaj manj kot četrtino, na ostalih postajah (Ilirska Bistrica, Lesce, Ljubljana, Maribor in Murska Sobota) pa je zgodnejših med 40 in 50% vseh fenofaz. Edina kasnejša spomladanska fenofaza je olistanje divjega kostanja v Ratečah. Jesenska fenofaza rumenenja listja breze, bukve in lipe je kasnejša v vseh treh primerih v Ljubljani in Mariboru. V Lescah je ta trend pozitiven pri brezi in bukvi, v Celju pri lipi, v Novem mestu in Ratečah pa pri bukvi. Izstopa postaja Murska Sobota, ki kot edina postaja kaže zgodnejše rumenenje pri obeh opazovanih vrstah (brezi in lipi).

V preglednici 6 so podani trendi povprečnih mesečnih in letnih temperatur zraka za vse lokacije v obdobju 1955-1999. Trend povprečne letne temperature zraka je povsod pozitiven, rezultati pa se ujemajo z raziskavami za ostale dele Evrope (Chmielewski in Rötzer, 2001). Z naraščanjem temperature zraka pomladnih in poletnih mesecev lahko dobro pojasnimo tudi zgodnejše pojavljanje spomladanskih in poletnih fenofaz.

Preglednica 6: Predznak dolgoletnih trendov povprečnih mesečnih in letnih temperatur zraka za obdobje 1955-1999, - negativen trend, + pozitiven trend, * statistično značilen trend, $p=0,05$

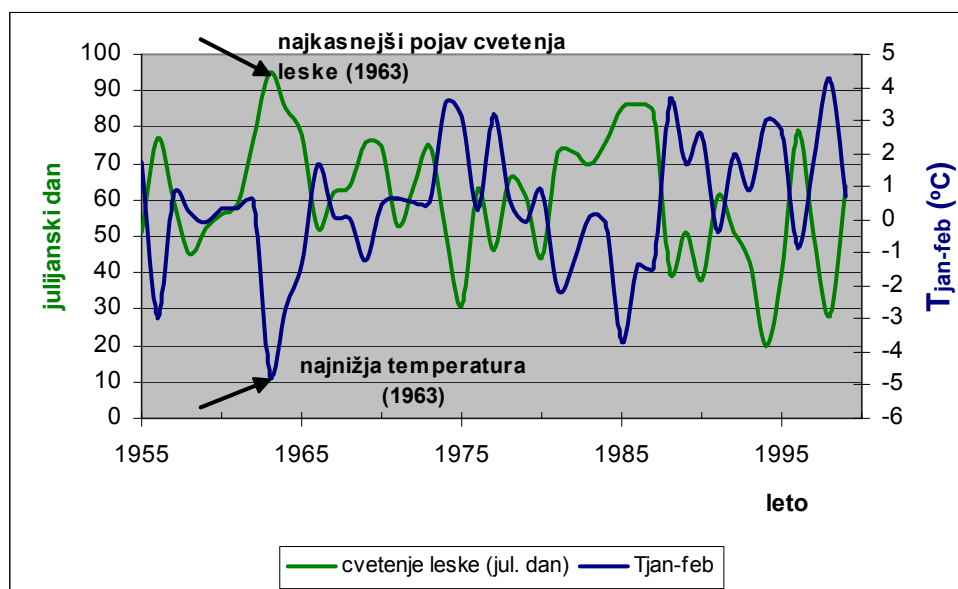
Table 6: Sign of long-term trends of mean monthly and annual air temperatures for the period 1955-1999, - negative trend, + positive trend, * statistical significant trend, $p=0,05$

	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
januar	+	+	+	+	+	+	+	+
februar	+	+	+	+	+	+	+	+
marec	+	+	+	+	+	+	+	+
april	+	+	+	+	+	+	+	+
maj	+	+	+	+	+	+	+	+
junij	+	+	-	+	+	+	+	+
julij	+	+	+	+	+	+	+	+
avgust	+	+	+	+	+	+	+	+
september	+	+	-	+	+	+	+	+
oktober	+	+	-	+	+	+	+	+
november	-	-	-	-	-	-	-	-
december	+	-	-	+	+	+	+	+
leto	+	+	+	+	+	+	+	+

4.2 KORELACIJE MED NASTOPI FENOFAZ IN POVPREČNIMI MESEČNIMI TEMPERATURAMI ZRAKA

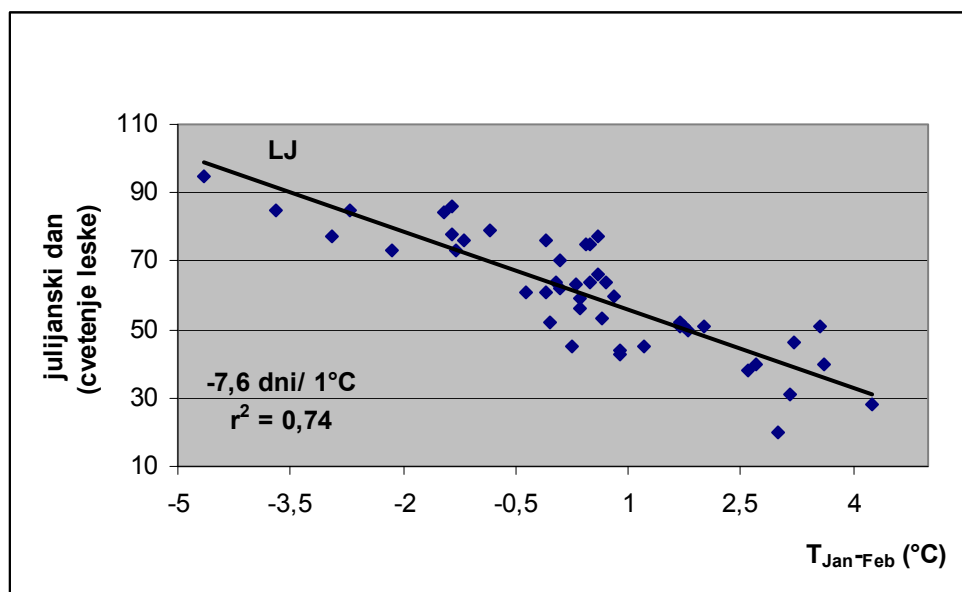
Vsakoletni nastop pomladnih fenofaz je v veliki meri temperaturno pogojen, zato datumi pojava fenofaz odražajo toplotne razmere v okolju. Na osnovi korelacijskih matrik smo proučevali povezanost med dnevi nastopa fenoloških faz in povprečnimi mesečnimi, povprečnimi dvomesečnimi in povprečnimi tromesečnimi temperaturami zraka za vse obravnavane fenofaze in postaje. V preglednici 7 so prikazani korelacijski koeficienti za postajo Ljubljana, za vse ostale postaje pa so podani v prilogah F1 do F7.

V preglednici 7 lahko vidimo, da na cvetenje zvončka in leske v Ljubljani najbolj vplivajo temperature v januarju in februarju (vrednost največjega koeficienta za posamezno fenofazo je označena z rdečo barvo), cvetenje žafrana in regrata pa je povezano s povprečno temperaturo mesecev februar in marec. Statistično značilni koeficienti so negativni, kar pomeni, da višje temperature konec zime in zgodaj spomladi vplivajo na zgodnejše cvetenje. Na sliki 15 smo prikazali obratno sorazmernost nastopa cvetenja leske in povprečne temperature zraka za meseca januar in februar ($T_{\text{jan-feb}}$) v Ljubljani v obdobju 1955-1999. Iz obeh krivulj je lepo razvidno, da nizke povprečne temperature pomenijo kasnejše cvetenje in obratno, označili smo primer najkasnejšega pojava cvetenja leske (95. dan oziroma 5. april) v Ljubljani, ki sovpada z najnižjo $T_{\text{jan-feb}}$ ($-4,7^{\circ}\text{C}$). Glede na izračunano regresijsko enačbo ($Y = -7,6 \cdot X + 63,6$) pomeni otoplitev za 1°C ($T_{\text{jan-feb}}$) 7,6 dni zgodnejše cvetenje leske v Ljubljani (slika 16). To je v skladu z izračuni Kajfež-Bogatajeve (2001), ki so pokazali za Slovenijo okrog 7 dni zgodnejše cvetenje leske in ive pri otoplitvi v januarju in februarju za 1°C . Chmielewski in Rötzer (2001) za klimatsko različna območja Evrope za lesko in ivo navajata prav tako zgodnejši začetek rastne dobe (6,7 dni pri otoplitvi za 1°C).



Slika 15: Obratna sorazmernost med povprečno temperaturo zraka ($v^{\circ}\text{C}$) za januar in februar ($T_{\text{jan-feb}}$) in cvetenjem leske (v julijanskih dneh) v Ljubljani v obdobju 1955-1999

Figure 15: Inversely-proportionality between mean air temperature (in $^{\circ}\text{C}$) from January to February ($T_{\text{jan-feb}}$) and the flowering of hazel (in Julian days) in Ljubljana for the period 1955-1999



Slika 16: Vpliv temperature kasnih zimskih mesecev (januar-februar) na cvetenje leske v Ljubljani
Figure 16: Influence of temperature of late winter months (January-February) on hazel flowering

Povprečen korelacijski koeficient med nastopom fenofaze cvetenja in povprečno dvomesečno temperaturo zraka za rastline, ki zacvetijo najbolj zgodaj (leska, iva, zvonček, žafran, regrat) znaša za postajo Ljubljana $-0,84$ ($p=0,05$). Skoraj isto vrednost korelacijskega koeficienta ($-0,83$) sta določila tudi Chmielewski in Rötzer (2001), ki sta proučevala povezanost med olistanjem štirih drevesnih vrst in povprečno temperaturo zraka od februarja do aprila za 12 različnih področij v Evropi. Ahas in sod. (2000) pa so podali velik razpon za korelacijski koeficient ($-0,60$ do $-0,80$) med nastopom fenofaz različnih vrst ter povprečno temperaturo dva do treh mesecev pred nastopom fenofaze. V naši nalogi so izračunani korelacijski koeficienti med nastopom olistanja in temperaturo zraka nekoliko manjši ($-0,74$) kot za fenofaze cvetenja. Olistanje breze in lipe v Ljubljani je najtesneje povezano s temperaturami od februarja do aprila, olistanje buke in divjega kostanja ter pojav prvih poganjkov pri smreki pa s temperaturami v marcu in aprilu. Prav tako je najbolje koreliran s temperaturo v marcu in aprilu začetek cvetenja španskega bezga, divjega kostanja, jablane ter breze, povprečen koeficient korelacije pa znaša $-0,80$. Začetek cvetenja pasje trave, črnega bezga, robinije in lipe, ki cvetijo relativno pozno, je statistično značilno povezan s temperaturo v aprilu in maju. Povprečna decembrska temperatura prejšnjega leta ni statistično značilno povezana z nastopom nobene fenofaze v tekočem letu.

Za nastop jesenskih fenofaz je značilna majhna korelacija s temperaturo zraka. Nastopi fenofaz rumenjenja listja pri brezi, buki in lipi v Ljubljani so sicer statistično značilno povezani s temperaturami od julija do septembra, vendar so vrednosti korelacijskih koeficientov zelo majhne: $+0,34$ pri buki in lipi, oziroma $+0,44$ pri brezi. Pozitivna vrednost koeficienta pomeni, da višje temperature vplivajo na kasnejše rumenjenje listja in s tem na podaljšanje rastne dobe.

Preglednica 7: Korelacijski koeficienti med povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka in nastopom fenofaz v Ljubljani za obdobje 1955-1999, največji koeficient je označen z rdečo barvo, statistično značilni trendi so v potemnjenih celicah

Table 7: Correlation coefficients between average air temperatures and phenophases appearance in Ljubljana for the period 1955-1999

The highest coefficient is indicated with red, statistical significant trends are in darker cells

	Tjan	Tfeb	Tmar	Tapr	Tmaj	Tjan-feb	Tfeb-mar	Tmar-apr	Tapr-maj	Tjan-feb-mar	Tfeb-mar-apr	Tmar-apr-maj
C_{Bp}^1	-0,30	-0,49	-0,69	-0,22	+0,08	-0,49	-0,69	-0,73	-0,08	-0,65	-0,72	-0,56
C_{Sc}^1	-0,57	-0,77	-0,64	-0,06	-0,15	-0,82	-0,84	-0,60	-0,13	-0,87	-0,81	-0,56
C_{Li}^1	-0,26	-0,66	-0,67	-0,40	-0,33	-0,57	-0,79	-0,80	-0,45	-0,70	-0,86	-0,81
C_{Md}^1	-0,12	-0,51	-0,67	-0,35	+0,03	-0,39	-0,70	-0,79	-0,20	-0,57	-0,77	-0,63
C_{Tp}^1	+0,01	-0,20	-0,20	-0,44	-0,50	-0,14	-0,24	-0,38	-0,61	-0,19	-0,34	-0,57
C_{Dg}^1	-0,20	-0,29	-0,34	-0,43	-0,48	-0,33	-0,38	-0,50	-0,59	-0,39	-0,47	-0,66
C_{To}^1	-0,26	-0,60	-0,77	-0,07	-0,05	-0,58	-0,81	-0,70	-0,07	-0,76	-0,78	-0,62
C_{Cn}^1	-0,36	-0,74	-0,62	+0,09	-0,05	-0,74	-0,82	-0,49	+0,01	-0,82	-0,75	-0,45
C_{Gn}^1	-0,54	-0,69	-0,42	+0,14	-0,07	-0,82	-0,69	-0,30	+0,03	-0,79	-0,60	-0,29
C_{Sn}^2	-0,31	-0,40	-0,57	-0,41	-0,51	-0,47	-0,57	-0,68	-0,62	-0,59	-0,64	-0,84
C_{Ah}^2	-0,15	-0,49	-0,67	-0,56	-0,18	-0,44	-0,68	-0,84	-0,47	-0,61	-0,79	-0,81
C_{Md}^2	-0,11	-0,33	-0,63	-0,41	+0,02	-0,30	-0,55	-0,73	-0,24	-0,49	-0,63	-0,62
C_{Ca}^2	-0,61	-0,71	-0,47	-0,02	-0,16	-0,87	-0,72	-0,40	-0,13	-0,85	-0,67	-0,43
C_{Rp}^2	-0,11	-0,21	-0,33	-0,49	-0,75	-0,22	-0,31	-0,52	-0,83	-0,30	-0,43	-0,81
C_{Sv}^2	-0,23	-0,46	-0,70	-0,53	-0,17	-0,47	-0,68	-0,84	-0,45	-0,65	-0,78	-0,82
L_{Bp}^1	-0,24	-0,57	-0,71	-0,34	+0,07	-0,56	-0,76	-0,75	-0,16	-0,72	-0,80	-0,63
L_{Fs}^1	-0,05	-0,23	-0,64	-0,37	-0,07	-0,20	-0,50	-0,72	-0,28	-0,43	-0,57	-0,66
L_{Ah}^1	-0,16	-0,43	-0,75	-0,28	+0,11	-0,40	-0,69	-0,76	-0,17	-0,62	-0,71	-0,66
L_{Tp}^1	-0,11	-0,53	-0,58	-0,26	-0,04	-0,44	-0,66	-0,61	-0,19	-0,58	-0,68	-0,55
L_{Pa}^1	-0,12	-0,38	-0,71	-0,29	-0,01	-0,20	-0,63	-0,73	-0,19	-0,45	-0,67	-0,65

(nadaljevanje)

	Tjul	Tavg	Tsep	Tokt	Tjul-avg	Tavg-sep	Tsep-okt	Tjul-avg-sep	Tavg-sep-okt
L_{Bp}^2	+0,41	+0,36	+0,20	+0,01	+0,44	+0,35	+0,14	+0,42	+0,31
L_{Fs}^2	+0,30	+0,22	+0,25	+0,02	+0,30	+0,29	+0,18	+0,34	+0,27
L_{Tp}^2	+0,30	+0,15	+0,32	+0,13	+0,26	+0,29	+0,31	+0,34	+0,33
P_{Sn}^1	-0,45	-0,15	+0,04	-0,22	-0,34	-0,07	-0,12	-0,24	-0,18
P_{Ah}^1	+0,08	+0,19	+0,16	-0,13	+0,16	+0,22	+0,02	+0,19	+0,12
P_{Md}^1	-0,02	-0,01	+0,01	-0,14	-0,02	+0,01	-0,09	-0,01	-0,07
P_{Md}^2	+0,02	+0,04	-0,03	-0,24	+0,04	+0,01	-0,18	+0,01	-0,12

Vrednosti korelacijskih koeficientov za ostale postaje (Celje, Ilirsko Bistrico, Lesce, Maribor, Mursko Soboto, Novo mesto in Rateče) so podane v prilogah F1 do F7. Za Rateče, ki imajo subalpsko klimo, smo analizirali korelacije med nastopom fenofaz ter srednjimi temperaturami od februarja do junija, saj se je izkazalo, da januarske temperature v Ratečah še ne vplivajo statistično značilno na pojav spomladanskih fenofaz. V Ratečah se razvoj rastlin začne značilno kasneje kot na ostalih lokacijah, na kar vplivajo nižje povprečne temperature zraka in večje število dni s snežno odejo, kar je v precejšni meri posledica višje nadmorske višine.

4.3 KORELACIJE MED NASTOPI FENOFAZ IN MESEČNIMI KOLIČINAMI PADAVIN

Tako kot za temperaturo smo tudi za padavine ugotavljali povezave z nastopom fenofaz. V preglednici 8 so podane le statistično značilne zveze ($p=0,05$) med nastopom posamezne fenofaze ter količino mesečnih padavin. Za 13 fenofaz nismo ugotovili nobene statistično značilne povezave (teh fenofaz nismo vpisali v preglednico), za ostale fenofaze pa smo podali, s katerim mesecem so statistično značilno korelirane glede količine padavin.

Preglednica 8: Statistično značilne povezave ($p=0,05$) med nastopom fenofaz ter mesečno količino padavin (R_{mes}), v oklepaju so navedeni korelacijski koeficienti

Table 8: Statistical significant correlations ($p=0,05$) between phenophases and the amount of monthly precipitation (R_{mes}), correlation coefficients are given in brackets below

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	L_{Bp}^2			R_{jul} (-0,34)					
breza	C_{Bp}^1	R_{feb} (0,32)	R_{jan} (0,33)		R_{jan} (0,31)				
breza	L_{Bp}^2			R_{jul} (-0,34)					
bukev	L_{Fs}^1	R_{feb} (0,31)						R_{jan} (0,30)	R_{mar} (0,39)
bukev	L_{Fs}^2					R_{sep} (0,31)			
češplja	C_{Pd}^1								R_{mar} (0,39)
češplja	C_{Pd}^2								R_{mar} (0,39)
črni bezeg	C_{Sn}^2	R_{apr} (0,35)	R_{maj} (0,32)		R_{maj} (0,34)	R_{apr} (0,38)		R_{jan} (0,37)	
divji kostanj	C_{Ah}^2	R_{jan} (0,33)	R_{jan} (0,38)					R_{jan} (0,38)	
divji kostanj	P_{Ah}^1	R_{avg} (-0,34)							
iva	C_{Sc}^1								R_{mar} (0,36)
ivanjščica	C_{Li}^1		R_{mar} (0,43)		R_{jan} (0,36)			R_{jan} (0,40)	
jablana	C_{Md}^2	R_{jan} (0,31)							
lipa	C_{Tp}^1	R_{mar} (0,30)							
lipa	L_{Tp}^1	R_{jan} (0,37)		R_{jan} (0,33)					R_{mar} (0,38)
robinija	C_{Rp}^2	R_{jan} (0,30)							
španski bezeg	C_{Sv}^2	R_{jan} (0,34)	R_{mar} (0,39)		R_{jan} (0,43)				

V Murski Soboti ni nobena fenofaza statistično značilno korelirana z mesečno količino padavin. V Lescah in Mariboru obstajata po dve značilni povezavi na vsaki postaji: v Mariboru je povezano cvetenje črnega bezga z aprilskimi padavinami ter rumenenje breze s septembrskimi padavinami, v Lescah pa olistanje lipe z januarskimi padavinami in rumenenje breze z julijskimi padavinami.

V Novem mestu je statistično značilno povezana količina padavin v januarju s cvetenjem ivanjščice, črnega bezga in divjega kostanja ter olistanjem lipe.

Tudi v Ljubljani je največ značilnih korelacij z januarskimi padavinami: cvetenje breze, ivanjščice in španskega bezga ter olistanje breze, cvetenje črnega bezga pa je statistično značilno korelirano s padavinami v maju.

V Ilirski Bistrici obstajajo naslednje značilne povezave: padavine v januarju ter cvetenje breze in divjega kostanja, padavine v marcu ter cvetenje ivanjščice in španskega bezga, padavine v maju ter cvetenje črnega bezga.

Za postajo Rateče je značilno, da se vse značilne povezave nanašajo na padavine v marcu, z njimi pa so korelirane naslednje fenofaze: cvetenje domače češplje in ive ter olistanje breze, bukke in lipe.

Največ statistično značilnih povezav med mesečno količino padavin ter nastopi fenofaz smo ugotovili v Celju. S padavinami v januarju so značilno povezane naslednje fenofaze: cvetenje divjega kostanja, jablane, robinije ter španskega bezga in olistanje lipe. Olistanje breze in bukke ter cvetenje breze pa je korelirano s količino februarških padavin. Cvetenje lipe kaže povezavo z marčevskimi, cvetenje črnega bezga pa z aprilskimi padavinami. Fenofaza prvih plodov pri divjem kostanju je statistično značilno povezana z avgustovskimi padavinami.

Vrednosti korelacijskih koeficientov so majhne ($r < 0,44$), nobena povezava ni močno statistično značilna ($p = 0,01$). Korelacije so povsod pozitivne, večja količina padavin pomeni zakasnitev fenofaze, izjema sta le dve jesenski fenofazi (rumenenje breze v Lescah ter prvi plodovi pri divjem kostanju v Celju), ki sta negativni. S količino padavin bi torej lahko pojasnili le majhen delež variabilnosti v nastopu manjšega števila fenofaz. Ob tem je potrebno upoštevati, da je ob oblačnem in deževnem vremenu energija sončnega obsevanja manjša, kar vpliva tudi na nižje temperature zraka. Menimo, da so korelacije značilne predvsem zaradi interakcije temperatur in padavin, oziroma odražajo prevladujoč tip vremena.

Vpliv količine padavin na olistanje bukke v Sloveniji je proučeval Veselič (1990), ki je ugotovil, da na čas olistanja bukke v naših razmerah ne vpliva količina padavin, niti v tekočem letu pred olistanjem niti v preteklem. Isti avtor meni, da je pri nas za drevje spomladi v tleh na voljo vedno dovolj vode, tako da količina padavin, tudi če bi le ta v ekstremnih razmerah vplivala na čas pojava fenofaz, v danih razmerah na čas olistanja bukke ne vpliva pomembneje. Do istih zaključkov je v svoji raziskavi prišel tudi Šegula-Ilič (1990), ki je ugotovil, da količina padavin ni značilno vplivala na olistanje breze, bukke, hrasta ter pojav poganjkov pri smreki. Kajfež-Bogatajeva (1997) poudarja, da v

Sloveniji, kjer v spomladanskem času količina rastlinam dostopne vode ni problematična, določa fenološki razvoj predvsem temperatura.

4.4 KORELACIJE MED NASTOPI FENOFAZ IN INDEKSOM SEVERNO ATLANTSKEGA NIHANJA

Na zimske in zgodnje spomladanske temperature v Evropi vpliva gibanje zračnih mas, ki ga lahko opišemo z indeksom severno atlantskega nihanja (NAOI). Pozitiven indeks od januarja do aprila je povezan z nadpovprečno visokimi temperaturami v Evropi v teh mesecih. Korelacija med povprečnim NAOI in temperaturo zraka za obdobje od februarja do aprila v Evropi znaša 0,73 (Hurrell, 1995).

V nalogi smo želeli proučiti, ali variabilnost NAOI vpliva tudi na pojav spomladanskih fenofaz v Sloveniji. Zimski NAOI ($NAOI_{zim}$) smo izračunali kot povprečno vrednost NAOI za mesece od decembra do marca. V preglednici 9 so podani korelacijski koeficienti med $NAOI_{zim}$, povprečno temperaturo zraka za obdobje december-marec ($T_{dec-mar}$) ter nastopom nekaterih spomladanskih fenofaz v obdobju 1956-1999.

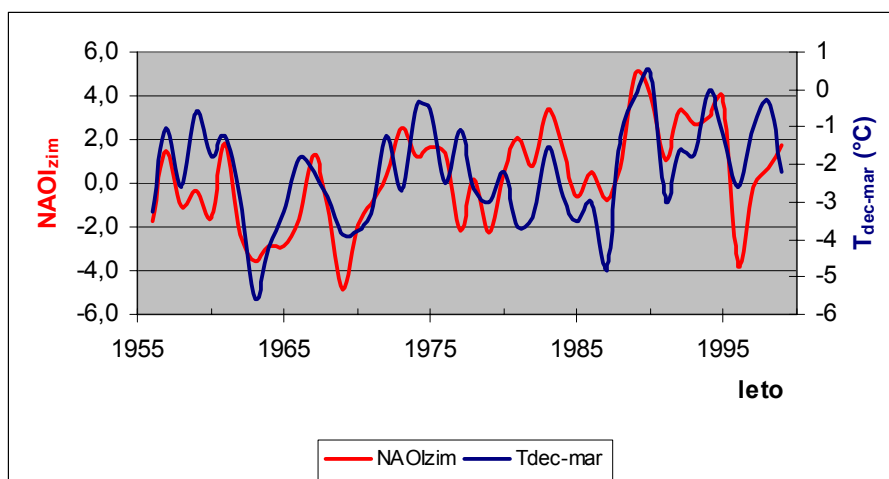
Preglednica 9: Korelacijski koeficienti - med $NAOI_{zim}$ ter povprečno temperaturo zraka za zimske mesece ($T_{dec-mar}$) in - med $NAOI_{zim}$ ter nastopom različnih spomladanskih fenofaz za obdobje 1956-1999, koeficienti v potemljenih celicah so statistično značilni pri $p=0,05$

Table 9: The correlation coefficients - between the $NAOI_{zim}$ and average air temperature for winter months ($T_{dec-mar}$) and - between the $NAOI_{zim}$ and dates of different spring phenophases for the period 1956-1999. Coefficients in darker cells are statistical significant at $p=0,05$

		CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
	$T_{dec-mar}$	+0,55	+0,49	+0,53	+0,58	+0,66	+0,62	+0,61	+0,60
breza	L_{Bp}^1	-0,48	-0,23	-0,47	-0,48	-0,47	-0,21	-0,37	-0,26
breza	C_{Bp}^1	-0,48	-0,23	-0,47	-0,48	-0,47	-0,21	-0,37	-0,26
bukev	L_{Fs}^1	-0,40		-0,41	-0,43	-0,42		-0,33	-0,23
češplja	C_{Pd}^2	-0,43	-0,42	-0,43		-0,56	-0,44	-0,40	-0,16
črni bezeg	C_{Sn}^2	-0,47	-0,30	-0,27	-0,45	-0,34	-0,46	-0,59	-0,24
divji kostanj	L_{Ah}^1	-0,38	-0,30	-0,27	-0,26	-0,31	-0,37	-0,28	-0,15
iva	C_{Sc}^1	-0,59	-0,55		-0,60	-0,52	-0,44	-0,42	-0,52
leska	C_{Ca}^2	-0,38	-0,32	-0,51	-0,49	-0,61	-0,42	-0,48	-0,63
lipa	L_{Tp}^1	-0,40	-0,31	-0,32	-0,17	-0,13	-0,34	-0,42	-0,22
regrat	C_{To}^1	-0,52	-0,52	-0,38	-0,31	-0,46		-0,53	-0,48
španski bezeg	C_{Sv}^2	-0,53	-0,42	-0,20	-0,59	-0,54	-0,55	-0,53	-0,11
mali zvonček	C_{Gn}^1	-0,28	-0,08	-0,16	-0,33	-0,12		-0,22	-0,04
pomlad. žafran	C_{Cn}^1	-0,32	-0,25	-0,48	-0,34			-0,40	-0,20

Povezava med $NAOI_{zim}$ ter povprečno zimsko temperaturo zraka je na vseh postajah močno statistično značilna ($p=0,01$), povprečna vrednost korelacijskega koeficienta za

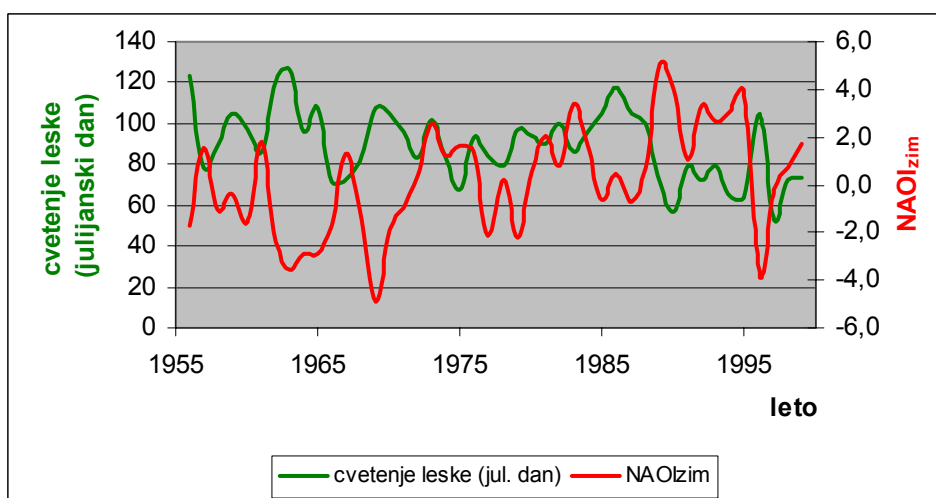
vseh osem postaj znaša +0,58. Na sliki 17 je prikazana podobnost hodov $NAOI_{zim}$ ter povprečne temperature zraka v obdobju december-marec v Ratečah. Vidno je, da velike vrednosti $NAOI_{zim}$ sovpadajo tudi z visokimi povprečnimi temperaturami zraka, v letih, ko je $NAOI_{zim}$ negativen, je tudi povprečna temperatura zraka sorazmerno nižja.



Slika 17: Podobnost hodov $NAOI_{zim}$ in povprečne temperature zraka v obdobju december-marec ($T_{dec-mar}$) v Ratečah (1956-1999)

Figure 17: Analogy of curves of $NAOI_{zim}$ and the average air temperature for period from December to March ($T_{dec-mar}$) in Rateče (1956-1999)

Iz korelacijskih koeficientov (preglednica 9) vidimo, da je nastop fenofaze cvetenja ive, leske in regrata statistično značilno povezan z $NAOI_{zim}$ na vseh postajah, povprečen korelacijski koeficient za regrat znaša 0,46, za lesko 0,48 in za ivo 0,52. Vse tri rastline zacvetijo zelo zgodaj in na nastop teh fenofaz močno vplivajo zimske temperature. Kot primer smo na sliki 18 prikazali obratno sorazmernost poteka $NAOI_{zim}$ in cvetenja leske v Ratečah.



Slika 18: Obratna sorazmernost hodov $NAOI_{zim}$ in cvetenja leske v Ratečah (1956-1999)

Figure 18: Inversely-proportionality between the $NAOI_{zim}$ and the flowering of hazel in Rateče (1956-1999)

V letu 1963 je v Ratečah nastopila fenofaza cvetenja leske ekstremno pozno (6. maja), nastop fenofaze je lepo koreliran z visoko negativno vrednostjo $NAOI_{zim}$ (-3,6). Primer ekstremno poznega cvetenja leske za Ljubljano prav tako za leto 1963 smo prikazali že na sliki 15. Najzgodnejši nastop fenofaze cvetenja leske (26. januarja), ki se je pojavil v letu 1990, kaže povezavo z visoko pozitivno vrednostjo $NAOI_{zim}$ (+4,0). Relativno pozen oziroma zgoden nastop fenofaze cvetenja leske je torej odraz nihanj $NAOI_{zim}$.

Primerjava korelacij po posameznih postajah kaže, da je v Celju, Ljubljani, Mariboru, Murski Soboti ter Novem mestu večina spomladanskih fenofaz statistično značilno povezana z vrednostmi $NAOI_{zim}$. Nekoliko manj značilnih povezav je v Ilirski Bistrici in Lescah, izstopa pa postaja Rateče, kjer je korelacija med $NAOI_{zim}$ in zimsko temperaturo precej velika (+0,60), medtem ko na čas nastopa spomladanskih fenofaz $NAOI_{zim}$ v večini primerov ne vpliva. V Ratečah, ki imajo ostrejšo klimo od ostalih obravnavanih postaj, nastopijo fenofaze zaradi nizkih temperatur kasneje. Za fenološki razvoj so tu pomembnejše temperature pozno spomladanskih mesecev (Veselič, 1990). Z $NAOI$ pa lahko pojasnimo največ variabilnosti temperaturnih in padavinskih razmer ravno za zimske mesece (Hurrell, 1995).

4.5 DOLOČITEV TEMPERATURE PRAGA

Z metodo najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur (V_{ef}), opisano v poglavju 2.4.1, smo za obravnavane rastline oziroma fenofaze izračunali povprečne temperature spodnjega praga (TP) na osnovi fenoloških in meteoroloških podatkov za obdobje 1955-1999.

Z enačbo (14) smo izračunali niz V_{ef} glede na niz možnih TP za vsako posamezno fenofazo. Preizkusili smo niz temperatur v območju med -5°C ter $+10^{\circ}\text{C}$, širino območja pa smo izbrali glede na rezultate predhodnih domačih in tujih raziskav (Kajfež-Bogataj in Bergant, 1998; Gorski in Jazurek, 1996; Veselič, 1990; Wielgolaski, 1999). Izbrana TP je tista, ki nam je dala V_{ef} z najmanjšim standardnim odklonom. V preglednici 10 so prikazane vrednosti TP v $^{\circ}\text{C}$ za pojav prvih listov, pojav začetka cvetenja in pojav polnega cvetenja za obravnavane rastline.

Za izračun V_{ef} za nastop fenofaze olistanja pri brezi je TP na vseh lokacijah zelo izenačena: v Celju, Mariboru in Novem mestu 3°C , na ostalih petih lokacijah pa 4°C . Tudi za bukev so TP povsod med 3°C ter 4°C ; v Celju, Ljubljani in Novem mestu 3°C , v Mariboru, Lescah in Ratečah pa za stopinjo večje. Rezultati za bukev in brezo potrjujejo predhodne raziskave Veseliča (1990), ki je za bukev na snežniško-javorniškem masivu določil TP 3°C in Šegule-Iliča (1990), ki je določil TP za brezo med 0°C ter 4°C . Pri TP za nastop fenofaze olistanja divjega kostanja je med lokacijami večji variacijski razmik. V Lescah in Ratečah sta izračunani TP glede na ostale postaje relativno nizki in sicer 3°C ; v Celju, Mariboru, Murski Soboti in Ilirski Bistrici pa zanaša TP 7°C . Podobne vrednosti smo izračunali za Ljubljano (6°C) in Novo mesto (5°C). Kot najprimernejšo TP za računanje akumulirane toplote do nastopa fenofaze olistanja pri lipi smo določili za večino lokacij 3°C (Celje, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota in Novo mesto), le za stopinjo nižjo v Ilirski Bistrici, za Lesce in Rateče pa znaša TP 5°C .

Preglednica 10: Izračunane temperature pragov (v °C) za (A) olistanje, (B) začetek cvetenja in (C) polno cvetenje za obdobje 1955-1999

Table 10: Calculated base temperatures (in °C) for (A) first leaf unfolding, (B) beginning of flowering and (C) full flowering for the period 1955-1999

A-olistanje

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	L_{Bp}^1	3	4	4	4	3	4	3	4
bukev	L_{Fs}^1	3		4	3	4		3	4
divji kostanj	L_{Ah}^1	7	7	3	6	7	7	5	3
lipa	L_{Tp}^1	3	2	5	3	3	3	3	5
smreka	L_{Pa}^1	7	6	6-7	6	7		6-7	3

B-začetek cvetenja

breza	C_{Bp}^1	3	4	4	4	3	4	3	4
iva	C_{Sc}^1	-2	-3		-1	-2	-2	-2	-2
ivanjščica	C_{Li}^1	5	6	6	3	5		6	
lipa	C_{Tp}^1	5	3	5	5	5	5	6	4
pasja trava	C_{Dg}^1	5			7	5-6	6	6	3
regrat	C_{To}^1	-1	-3	-2	1	1		-3	2
mali zvonček	C_{Gn}^1	-2	-2	-1	0	-2		0	-1
poml. žafran	C_{Cn}^1	1	-3	-1	1			0	-3

C-polno cvetenje

češplja	C_{Pd}^2	5	4	7		3	7	4	5
črni bezeg	C_{Sn}^2	5	6	5	6	5	5	6	5
divji kostanj	C_{Ah}^2	7	5	5-7	6	7	6-7	6-7	5
jablana	C_{Md}^2	7			6				
leska	C_{Ca}^2	-3	-3	-4	-2	-3	-4	-3	-5
robinijska	C_{Rp}^2	5	6-7	4	6	5		6	
španski bezeg	C_{Sv}^2	7	7	7	7	7	7	6	5

Izračunane TP za pojav prvih poganjkov pri smreki so med 6°C in 7°C, razen v Ratečah, kjer je izračunana TP samo 3°C. Šegula-Ilič (1990) je v svoji raziskavi za pojav prvih poganjkov pri smreki določil precej nižje TP in sicer okrog 2°C. Na splošno lahko ugotovimo, da je za računanje termalnega časa za nastop olistanja pri brezi, bukvi in lipi najprimernejša temperatura med 3°C in 4°C, izračunane temperature pragov so med posameznimi postajami precej izenačene.

Pri določevanju TP za fenofazo cvetenja je značilen večji variacijski razmik med lokacijami kot za fenofazo olistanja. Za rastline, pri katerih nastopi cvetenje relativno zgodaj spomladi oziroma še v času koledarske zime (iva, leska, mali zvonček, regrat in pomladanski žafran), je večina izračunanih TP negativnih. Absolutno najnižjo TP smo določili pri leski za postajo Rateče in sicer -5°C , nekoliko manjši vrednosti (-4°C) veljata za Lesce in Mursko Soboto; TP za Celje, Ilirsko Bistrico, Maribor in Novo mesto znaša -3°C in za Ljubljano -2°C . Povsod so negativne TP tudi za nastop cvetenja pri ivi in sicer na večini lokacij -2°C (Celje, Maribor, Murska Sobota, Novo mesto in Rateče), v Ljubljani je TP za stopinjo višja (-1°C) in v Ilirski Bistrici za stopinjo nižja (-3°C). Tudi druge raziskave so potrdile, da na zgodnejši pojav fenofaz na začetku pomladi vplivajo lahko že negativne povprečne dnevne temperature zraka, Wielgolaski (1999) je tako v svoji raziskavi izračunal TP za nastop fenofaze cvetenja pri leski $-2,6^{\circ}\text{C}$, pri ivi $-4,5^{\circ}\text{C}$ in pri čremsi celo $-5,9^{\circ}\text{C}$. Larcher (1995) navaja, da proces fotosinteze lahko poteka tudi pri temperaturah, nekaj nižjih od 0°C . Batič (1987) je z meritvami fotosinteze pri bodiki ugotovil pozitivno neto fotosintezo tudi pri negativnih temperaturah zraka. Pri tem pa je potrebno omeniti, da negativna TP pomeni povprečno temperaturo zraka, dnevna temperaturna krivulja pa je kljub temu lahko del dneva pozitivna. Navajamo primer (preglednica 11) izračuna povprečne dnevne temperature zraka ob predpostavki, da je minimalna temperatura v vseh primerih enaka (-5°C) pri razponu maksimalne temperature od 0°C do 7°C . Povprečno temperaturo izračunamo iz obeh ekstremnih vrednosti kot $T_{\text{pov}} = (T_{\text{min}} + T_{\text{max}})/2$. Primer izračunanih negativnih povprečnih temperatur v našem primeru torej kaže, da je maksimalna temperatura pozitivna oziroma dovolj visoka, da že omogoča procese razvoja v rastlini.

Preglednica 11: Primer izračuna povprečne temperature pri spremembi maksimalne temperature (T_{max}) ob konstantni minimalni temperaturi (T_{min}) -5°C

Table 11: Example illustrating calculation of average temperature using variable maximum temperature (T_{max}) at constant minimum temperature (T_{min}) -5°C

T_{min}	-5°C	-5°C	-5°C	-5°C	-5°C	-5°C	-5°C	-5°C
T_{max}	$+7^{\circ}\text{C}$	$+6^{\circ}\text{C}$	$+5^{\circ}\text{C}$	$+4^{\circ}\text{C}$	$+3^{\circ}\text{C}$	$+2^{\circ}\text{C}$	$+1^{\circ}\text{C}$	0°C
T_{pov}	$+1^{\circ}\text{C}$	$+0,5^{\circ}\text{C}$	0°C	$-0,5^{\circ}\text{C}$	$-1,0^{\circ}\text{C}$	$-1,5^{\circ}\text{C}$	$-2,0^{\circ}\text{C}$	$-2,5^{\circ}\text{C}$

Pojav fenofaze začetka cvetenja pri regratu, malem zvončku in pomladanskem žafranu je v največji korelaciji s temperaturami med -3°C in 2°C . Izračunana TP za regrat znaša -3°C v Ilirski Bistrici in Novem mestu, v Lescah -2°C , v Celju -1°C , za Ljubljano in Maribor je TP 1°C , najvišja TP za regrat pa je v Ratečah in sicer 2°C . Za mali zvonček in pomladanski žafran je značilno, da se cvetovi marsikatero leto odpro tik zatem, ko skopni sneg ali pa jih že cvetoče prekrije sneg. Pri malem zvončku je TP za Celje, Ilirska Bistrica in Maribor -2°C , v Lescah in Ratečah je za stopinjo višja, v Ljubljani in Novem mestu pa znaša 0°C . Podobne temperature veljajo tudi za pomladanski žafran, TP so negativne v Ratečah, Ilirski Bistrici (-3°C) in Lescah (-1°C), v Novem mestu je TP 0°C , v Celju in Ljubljani pa sta vrednosti TP pozitivni (1°C). Čeprav povprečna datuma nastopa fenofaz cvetenja regrata in cvetenja breze zelo sovpadata, pa so vrednosti TP za nastop cvetenja breze precej višje od le-teh za regrat. Izračunani TP za cvetenje breze so povsem enaki tistim za olistanje breze, kar je razumljivo, saj obe omenjeni fenofazi pri brezi nastopita skoraj istočasno – pojav cvetenja beležimo v povprečju dva dni pred olistanjem.

Od negojenih zelnatih rastlin smo obravnavali še začetek cvetenja pri ivanjščici, za katero smo izračunali TP v območju med 5°C (za Celje in Maribor) ter 6°C (za Novo mesto, Lesce in Ilirsko Bistrico), nekoliko odstopa Ljubljana, za katero smo izračunali TP praga 3°C. Pojav začetka cvetenja smo spremljali tudi pri pasji travi, kjer pa smo imeli na voljo samo niz podatkov za obdobje 1955-1984. Najnižja TP za pasjo travo je bila izračunana za Rateče in znaša 3°C, na vseh ostalih lokacijah pa so TP med 5°C in 7°C.

Pojav splošnega cvetenja smo obravnavali poleg leske še pri črnem in španskem bezgu, robiniji, divjem kostanju, češplji in jablani. Fenološke podatke za jablano, sorta 'Bobovec', smo imeli samo za Ljubljano in Celje. Izračunani TP sta 7°C za Celje in 6°C za Ljubljano, enak rezultat sta v svoji raziskavi podala za Ljubljano tudi Kajfež-Bogatajeva in Bergant (1998). Za češpljo, sorta 'Domača češplja', so izračunane TP med 3°C in 7°C; in sicer 3°C za Maribor, 4°C za Ilirsko Bistrico in Novo mesto, 5°C za Celje in Rateče, za Mursko Soboto in Lesce pa znaša TP 7°C.

Zelo izenačene TP za posamezne postaje smo določili pri španskem bezgu, za katerega je izračunana TP za Rateče 5°C in za Novo mesto 6°C, za vse ostale pa 7°C. Pri črnem bezgu so temperature v povprečju nekoliko nižje in prav tako zelo izenačene, znašajo pa 5°C za Celje, Maribor, Mursko Soboto, Lesce in Rateče, ter 6°C za Ilirsko Bistrico, Ljubljano in Novo mesto.

Cvetenje robinije je najbolj korelirano s temperaturami nad pragom 4°C do 7°C. Najnižjo TP smo izračunali za Lesce (4°C), sledijo pa TP za postaji Celje in Maribor (5°C), Ljubljano in Novo mesto (6°C) ter Ilirsko Bistrico (6°C do 7°C). Gorski in Jazurek (1996) navajata za cvetenje robinije prag 5°C do 7°C. Izračunana TP za cvetenje divjega kostanja je podobna kot za robinijo in sicer med 5°C in 7°C.

4.6 IZRAČUN TERMALNEGA ČASA

Vsote aktivnih in efektivnih temperatur smo računali za konkretno leto od 1. januarja do datuma, ki je za pet dni bolj zgođen kot nastop fenofaze v posameznem letu, kar nam torej omogoča napovedovanje fenološkega razvoja na osnovi termalnega časa vsaj pet dni vnaprej. Na osnovi korelacijske analize se je izkazalo, da je primernejše smatrati prestop TP takrat, ko je povprečna dnevna temperatura vsaj 5 dni zaporedoma višja od TP. Če smo vzeli to obdobje daljše (10 dni), so bile vsote aktivnih in efektivnih temperatur za nekatere zgodnje fenofaze zelo majhne ali so imele v posameznih letih celo vrednosti vsot 0°C.

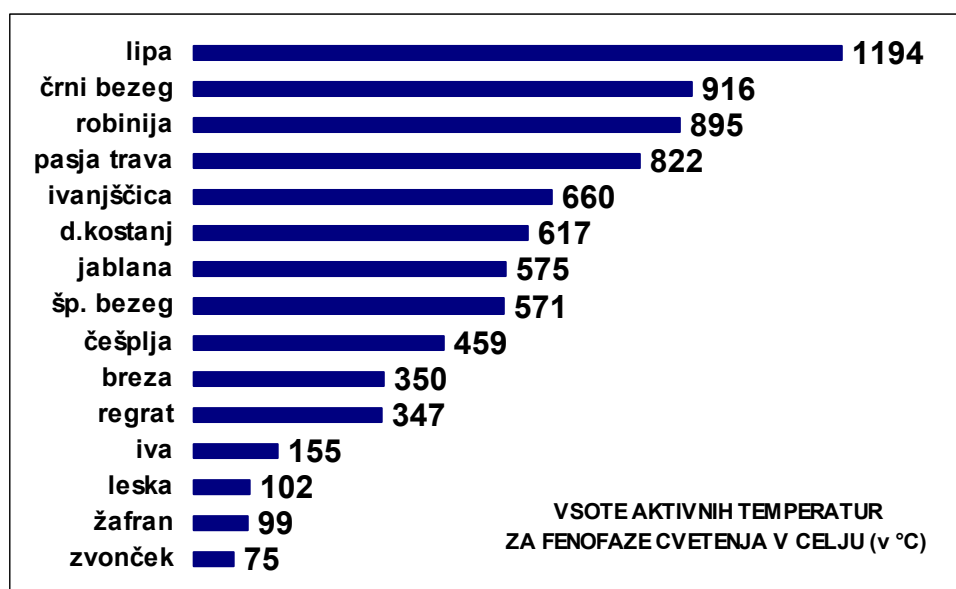
4.6.1 Vsote aktivnih temperatur ob nastopu fenofaz

V preglednici 12 so podane povprečne vsote aktivnih temperatur (V_{akt}), (izračunane iz povprečnih dnevnih temperatur zraka), potrebne za nastop obravnavanih fenofaz na vseh postajah v obdobju 1955-1999. Vsote aktivnih temperatur smo izračunali z enačbo (12), koeficient variabilnosti (KV) V_{akt} pa znaša od 10 do 25%, povprečen KV za fenofaze cvetenja in olistanja znaša 15%. Veliko variabilnost temperaturnih vsot med leti so dokazali tudi drugi avtorji. Tako so Spano in sod. (1999) pri računanju temperaturnih vsot za osem drevesnih vrst na Sardiniji ugotovili zelo veliko variabilnost med leti, koeficient variabilnosti je znašal do 42%. Veselič (1990) je ugotovil, da ista bukev lahko v različnih

letih olista pri zelo različni vsoti efektivnih temperatur, največje vrednosti vsot so bile dvakrat tolikšne kot najmanjše. Iz preglednice 12 je razvidno, da so V_{akt} v Ratečah manjše kot na ostalih lokacijah, kar je razumljivo, saj so povprečne temperature zraka tukaj statistično značilno nižje kot na ostalih lokacijah. Največje V_{akt} so največkrat dosežene v Ilirski Bistrici in Ljubljani. Kot primer smo na sliki 20 prikazali povprečne vsote aktivnih temperatur zraka, potrebne za olistanje breze na vseh lokacijah. Naše rezultate potrjujejo raziskave, v katerih so dokazali, da iste vrste rastlin v toplejših razmerah potrebujejo za svoj življenski krog večjo vsoto toplotnih enot kot v hladnejših predelih (Arnold, 1959; Perry in sod., 1986). Šegula-Ilič (1990) je v svoji raziskavi ugotovil, da so nekatere drevesne vrste v toplejših krajih Slovenije olistale pri znatno večjih vsotah efektivnih temperatur kot v hladnejših krajih.

Na vsoto aktivnih temperatur vpliva tudi datum prestopa TP 0°C, ki nastopi v Ljubljani, Novem mestu in Murski Soboti povprečno (izračuni temeljijo na nizu podatkov 1961-1990) sredi marca, v Ratečah pa šele 22. aprila (Dečman, 1995).

V_{akt} za nastop fenofaze cvetenja obravnavanih rastlin v Celju so prikazane na sliki 19. Kasnejši kot je nastop fenofaze pri določeni rastlini, večja je V_{akt} . Najmanjše V_{akt} so značilne za nastop cvetenja pri zvončku, leski, žafranu in ivi, na nobeni postaji pa velikost V_{akt} za te prve pomladi cvetoče rastline ne presega 200°C. V Celju od obravnavanih rastlin zacveti v povprečju najkasneje lipa (165. dan oziroma 14. junija), potrebna V_{akt} za cvetenje pa znaša okrog 1200°C. Razvrstitev rastlin glede na velikost V_{akt} je v bistvu eden izmed načinov predstavitve fenološkega koledarja, v katerem predstavimo zaporedje pojavljanja določenih fenofaz.

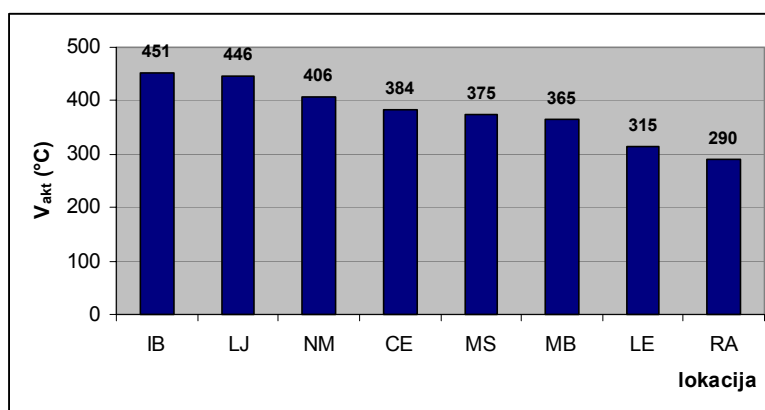


Slika 19: Povprečne vsote aktivnih temperatur (v °C), izračunane iz povprečnih dnevnihih temperatur zraka, potrebne za nastop fenofaze cvetenja za obravnavane rastline v Celju v obdobju 1955-1999; TP=0°C
Figure 19: Average degree-days sum (in °C), calculated from average daily air temperatures, needed for appearance of phenophases of flowering for studied plants in Celje for the period 1955-1999; TP=0°C

Preglednica 12: Povprečne vsote aktivnih temperatur (v °C), izračunane iz povprečnih dnevni temperatur zraka, potrebne za nastop fenofaz za obdobje 1955-1999, TP=0°C

Table 12: Average degree-days sum (active temperatures in °C), calculated from average daily air temperatures, needed for appearance of phenophases for the period 1955-1999, TP=0°C

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	L_{Bp}^1	384	451	315	446	365	375	406	290
breza	C_{Bp}^1	350	423	327	433	340	341	398	273
breza	L_{Bp}^2	3198	3239	2912	3457	3448	3353	3315	2361
bukev	L_{Fs}^1	395		326	475	401		466	296
bukev	L_{Fs}^2	3253		2903	3458	3423		3374	2274
češplja	C_{Pd}^1	419	500	400		447	421	438	341
češplja	C_{Pd}^2	459	538	435		487	458	472	387
češplja	P_{Pd}^1	2381	2378	2241		2494	2419	2436	2033
češplja	P_{Pd}^2	2809	2641	2328		2876	2723	2745	2184
črni bezeg	C_{Sn}^2	916	1039	877	980	964	914	916	833
črni bezeg	P_{Sn}^1	2388	2309	2132	2444	2367	2372	2335	1945
divji kostanj	L_{Ah}^1	396	465	344	464	423	394	434	283
divji kostanj	C_{Ah}^2	617	731	559	646	666	597	616	499
divji kostanj	P_{Ah}^1	2972	2924	2627	3117	3095	2984	3006	1947
iva	C_{Sc}^1	155	192		181	173	168	169	105
ivanjščica	C_{Li}^1	660	766	615	727	714		722	
jablana	C_{Md}^1	529			570				
jablana	C_{Md}^2	575			616				
jablana	P_{Md}^1	2885			3038				
jablana	P_{Md}^2	3204			3219				
leska	C_{Ca}^2	102	121	69	110	99	90	108	87
lipa	L_{Tp}^1	450	493	368	476	454	428	462	310
lipa	C_{Tp}^1	1194	1245	1047	1204	1220	1197	1151	1006
lipa	L_{Tp}^2	3261	3269	2875	3447	3335	3305	3323	2326
pasja trava	C_{Dg}^1	822			826	823	784	781	633
regrat	C_{To}^1	347	336	296	407	367		323	248
robinija	C_{Rp}^2	895	1023	819	967	918		921	
smreka	L_{Pa}^1	546	626	444	568	580		578	442
španski bezeg	C_{Sv}^2	571	691	549	655	623	587	582	544
mali zvonček	C_{Gn}^1	75	85	55	86	71		68	60
pomlad. žafran	C_{Cn}^1	99	175	77	134			103	86



Slika 20: Povprečne vsote aktivnih temperatur, potrebne za olistanje breze v obdobju 1955-1999, $TP=0^{\circ}C$
Figure 20: Average growing degree-days (active temperatures), needed for common silver birch unfolding for the period 1955-1999, $TP=0^{\circ}C$

Za fenofazo olistanja pri brezi, bukvi in divjem kostanju je v Ratečah v povprečju potrebnih $290^{\circ}C$, v Lescah $330^{\circ}C$, na ostalih lokacijah pa med $400^{\circ}C$ in $430^{\circ}C$. Za olistanje lipe so potrebne nekoliko večje V_{akt} , v Ratečah v povprečju $310^{\circ}C$, v Lescah okrog $370^{\circ}C$, za ostale znaša povprečje $460^{\circ}C$. Največjo V_{akt} od obravnavanih dreves potrebuje za prve poganjke smreka, v Lescah in Ratečah je ta vsota okrog $440^{\circ}C$, povprečje na ostalih lokacijah znaša $580^{\circ}C$.

V_{akt} za jesenske fenofaze rumenenja listja pri brezi, bukvi in lipi znašajo med $3300^{\circ}C$ in $3400^{\circ}C$, nižje so v Lescah ($2900^{\circ}C$) in Ratečah ($2300^{\circ}C$). Dolžina obdobja med nastopom spomladanske in jesenske $TP\ 0^{\circ}C$ znaša v Ratečah za obdobje 1961-1990 v povprečju 253 dni, medtem ko je to obdobje v Ljubljani, Murski Soboti in Novem mestu za 43 dni daljše (Dečman, 1995).

Po nekaterih raziskavah naj bi bile nočne, oziroma minimalne dnevne temperature zraka tiste, ki na hitrost razvoja pri določenih rastlinah vplivajo bolj kot povprečne dnevne temperature zraka (Wielgolaski, 1999). V naši nalogi smo zato izračunali V_{akt} tudi iz minimalnih dnevni temperatur zraka. Rezultati so predstavljeni v prilogi G1, izračunov za postajo Lesce ni, ker tu ni meritev minimalne temperature zraka. Primerjava vrednosti V_{akt} , izračunanih iz povprečnih dnevni temperatur zraka in minimalnih dnevni temperatur zraka kaže, da so razlike zelo velike v spomladanskem času. V_{akt} izračunanih iz minimalnih temperatur zraka so manjše za 60-80% glede na V_{akt} izračunane iz povprečnih temperatur zraka, jeseni so te vsote manjše za 40-45%. Variabilnost V_{akt} je bila v povprečju manjša v primeru, ko smo za izračun vsot uporabili povprečne dnevne temperature, pa tudi korelacijski koeficienti med nastopom fenofaz in V_{akt} so bili večji v tem primeru.

Če zelimo na osnovi V_{akt} napovedovati fenološki razvoj, je potrebno narediti korelacijsko analizo. V prilogi G2 smo podali korelacijske koeficiente med številom dni od 1. januarja do dneva, 5 dni zgodnejšega od pojava fenofaze v posameznem letu ter vsotami aktivnih temperatur za isto obdobje, izračunanimi iz povprečnih dnevni temperatur zraka. V prilogi smo podali samo tiste korelacije, ki so statistično značilne ob stopnji tveganja $p=0,05$. Korelacijski koeficienti so spremenljivih predznakov, značilno pa je, da za

fenofaze, ki nastopijo bolj zgodaj, prevladujejo negativne korelacije, medtem ko za kasnejše fenofaze veljajo pozitivne korelacije. Čim kasnejši je nastop fenofaze, večja je seveda vsota aktivnih temperatur. Vrednosti korelacijskih koeficientov so majhne (povprečno med 0,3 do 0,5), to pomeni, da samo z vsotami aktivnih temperatur lahko pojasnimo le majhen delež varabilnosti v času fenofaz. Če smo računali korelacije iz minimalnih dnevnih temperatur, so bile vrednosti korelacijskih koeficientov še manjše, ni pa se pokazala niti tendenca, da bi minimalne temperature bolj vplivale na pojav zgodnjih ali morda kasnejših fenofaz. V nadaljni postopek multiple linearne regresije smo vključili samo tiste vsote aktivnih temperatur (izračunanih iz minimalnih dnevnih temperatur), ki so bile statistično značilno korelirane s časom pojava fenofaz.

4.6.2 Vsote efektivnih temperatur ob nastopu fenofaz

Bolj kot uporaba vsot aktivnih temperatur je v fenologiji razširjena uporaba vsot efektivnih temperatur (V_{ef}). V naši nalogi smo efektivne temperature računali z metodo pravokotnika po enačbi (14). TP, ki je bistvenega pomena za pravilen izračun termalnega časa, pa smo določili za vsako posamezno fenofazo in postajo. TP se med vrstami, kultivarji in med samo rastno dobo spreminja (Mc Masters in Wilhelm, 1997), pri isti rastlini pa se lahko spreminja tudi iz leta v leto (Arnold, 1959) oziroma glede na lokacijo rastišča (Perry in sod., 1986). V naši nalogi so vse TP izračunane glede na dolgoletno povprečje (1955-1999), v preglednici 13 pa so podane prav tako povprečne V_{ef} , ki so potrebne za nastop določene fenofaze na različnih lokacijah. Z izbranimi TP je variabilnost V_{ef} med posameznimi leti na posamezni postaji v izbranem nizu vsot minimalna (enačba (1)), velikost teh vsot pa se med posameznimi postajami precej razlikuje zaradi različne TP. V obravnavanem obdobju je znašala povprečna letna temperatura zraka v Ratečah 5,9°C, v Lescah 8,3°C, na vseh ostalih lokacijah pa med 9,3°C in 10,0°C. Omenili smo že, da se nekatere rastline prilagodijo na hladnejšo klimo tako, da za svoj razvoj potrebujejo manj akumulirane toplote kot v toplejši klimi, to so potrdile raziskave pri številnih rastlinah npr. koruzi, grahu, jagodah, tobaku...(Wielgolaski, 1999).

Velikost V_{akt} narašča glede na zaporedje pojavljanja fenofaz in v skladu s temperaturnimi razmerami v obravnavanem obdobju (slika 19). Pri računanju V_{ef} pa izbrana TP vpliva na izračun vsot tako, da je za nastop zgodnejše fenofaze določene rastline V_{ef} lahko večja kot V_{ef} za nastop kasnejše fenofaze druge rastline. Kot primer omenimo cvetenje ive in češplje v Celju, iva zacveti tu povprečno 75. dan, potrebna V_{ef} za nastop fenofaze cvetenja pa znaša 245°C. Fenofaza cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja', nastopi povprečno 109. dan, zanjo pa je potrebna V_{ef} 149°C. Na izračun seveda vpliva TP, ki znaša za ivo -2°C, za češpljo pa 5°C.

Variabilnost pri izračunu v preglednici 13 podanih V_{ef} znaša 12-30%, povprečen KV za fenofaze cvetenja in olistanja pa 18%. Velika variabilnost nakazuje, da je poleg vpliva temperature potrebno upoštevati tudi druge dejavnike fenološkega razvoja. Šegula-Ilič (1990) in Veselič (1990) sta v svojih raziskavah dokazala, da bukev spomladi olista pri večji vsoti efektivnih temperatur, če sta bila meseca oktober in november prejšnjega leta toplejša. Razlike v variabilnosti vsot med posameznimi rastlinami oziroma med različnimi fenofazami iste rastline kažejo na to, da je določena rastlina ali fenofaza bolj občutljiva na temperaturne razmere in kot taka lahko služi kot indikator sprememb klime. Na splošno pa

velja, da so predvsem fenofaze cvetenja močno povezane s temperaturo zraka (Cenci in Ceschia, 2000).

Preglednica 13: Povprečne vsote efektivnih temperatur, potrebne za nastop fenofaz za obdobje 1955-1999, v oklepajih so podane statistično določene TP (oboje v °C)

Table 13: Average degree-days sum (effective temperatures), needed for appearance of phenophases for the period 1955-1999, in brackets are given statistically determined TP (both in °C)

Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	L_{Bp}^1	195 (3)	167 (4)	109 (4)	189 (4)	187 (3)	152 (4)	215 (3)	92 (4)
breza	C_{Bp}^1	189 (3)	164 (4)	112 (4)	187 (4)	181 (3)	142 (4)	215 (3)	85 (4)
bukev	L_{Fs}^1	203 (3)		115 (4)	258 (3)	165 (4)		257 (3)	95 (4)
češplja	C_{Pd}^1	149 (5)	212 (4)	112 (7)		265 (3)	81 (7)	203 (4)	55 (5)
češplja	C_{Pd}^2	154 (5)	218 (4)	115 (7)		273 (3)	90 (7)	212 (4)	58 (5)
črni bezeg	C_{Sn}^2	437 (5)	387 (6)	413 (5)	404 (6)	474 (5)	447 (5)	367 (6)	390 (5)
divji kostanj	L_{Ah}^1	57 (7)	52 (7)	163 (3)	116 (6)	73 (7)	66 (7)	145 (5)	121 (3)
divji kostanj	C_{Ah}^2	143 (7)	271 (5)	124 (5)	205 (6)	172 (7)	145 (6)	147 (6)	126 (5)
iva	C_{Sc}^1	245 (-2)	346 (-3)		228 (-1)	269 (-2)	261 (-2)	261 (-2)	190 (-2)
ivanjščica	C_{Li}^1	268 (5)	226 (6)	191 (6)	447 (3)	306 (5)		252 (6)	
jablana	C_{Md}^1	161 (7)			177 (6)				
jablana	C_{Md}^2	166 (7)			190 (6)				
leska	C_{Ca}^2	214 (-3)	231 (-3)	270 (-4)	185 (-2)	207 (-3)	245 (-4)	221 (-3)	340 (-5)
lipa	L_{Tp}^1	241 (3)	321 (2)	102 (5)	258 (3)	251 (3)	234 (3)	254 (3)	74 (5)
lipa	C_{Tp}^1	632 (5)	836 (3)	527 (5)	637 (5)	656 (5)	646 (5)	605 (6)	582 (4)
pasja trava	C_{Dg}^1	373 (5)			249 (7)	375 (5)	291 (6)	282 (6)	361 (3)
regrat	C_{To}^1	412 (-1)	566 (-3)	439 (-2)	327 (1)	294 (1)		538 (-3)	237 (2)
robinija	C_{Rp}^2	422 (5)	378 (6)	449 (4)	396 (6)	457 (5)		372 (6)	
smreka	L_{Pa}^1	201 (7)	208 (6)	144 (6)	234 (6)	224 (7)		226 (6)	234 (3)
španski bezeg	C_{Sv}^2	123 (7)	136 (7)	119 (7)	163 (7)	155 (7)	141 (7)	177 (6)	204 (5)
mali zvonček	C_{Gn}^1	131 (-2)	135 (-2)	113 (-1)	151 (0)	124 (-2)		116 (0)	184 (-1)
pomlad. žafran	C_{Cn}^1	59 (1)	327 (-3)	104 (-1)	90 (1)			96 (0)	224 (-3)

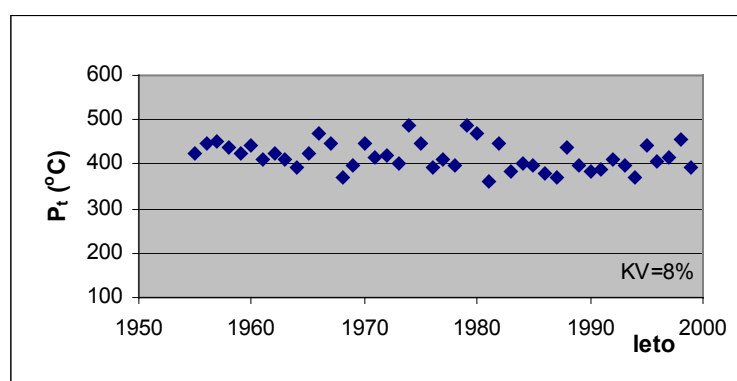
V prilogi G3 smo podali vrednosti korelacijskih koeficientov med številom dni od 1. januarja do dneva, 5 dni zgodnejšega od pojava fenofaze v posameznem letu ter vsotami efektivnih temperatur za isto obdobje ob stopnji tveganja $p=0,05$. Podali smo samo tiste koeficiente, ki so statistično značilni. Korelacijski koeficienti so spremenljivih predznakov, v povprečju med 0,50 ter 0,65, največje vrednosti smo izračunali za lesko in sicer znaša povprečje vseh postaj 0,75, kar pomeni, da lahko z vsoto efektivnih temperatur pojasnimo več kot polovico variabilnosti v času nastopa te fenofaze. Zgodnje fenofaze kažejo negativno korelacijo z vsotami efektivnih temperatur, medtem ko pri kasnejših fenofazah prevladujejo pozitivne korelacije. Poudariti pa moramo, da pri nadaljni uporabi multiple regresije lahko dobimo precej drugačno sliko o odvisnosti nastopa fenofaz od termalnega časa, ko v analizo vključimo tudi ostale spremenljivke.

4.7 IZRAČUN FOTOTERMALNEGA ČASA

Za določanje fototermalnega časa (P_t) smo uporabili modificirano enačbo za izračun termalnega časa, v katero smo poleg temperature zraka za samo svetli del dneva vključili tudi dolžino dneva. Izračunali smo fototermalni čas za nastop vseh obravnavanih fenofaz cvetenja in olistanja v Ljubljani, rezultati so podani v preglednici 14. V enačbi (23) je vrednost parametra $k=0,65$, $TP=0^{\circ}\text{C}$ za vse obravnavane fenofaze, kar pomeni, da gre za modificirano vsoto aktivnih temperatur, pri kateri je bil KV v Ljubljani manjši kot pri vsoti efektivnih temperatur.

KV za izračunan P_t je največji pri fenofazah cvetenja leske, pomladanskega žafrana ter malega zvončka in znaša 24%, povprečni KV za vse ostale fenofaze pa znaša 12%. Perry in sod. (1986) v svoji raziskavi zaključujejo, da mora biti razlika v velikosti KV za termalni in fototermalni čas dovolj velika, da opravičuje računanje fototermalnega časa, saj le-ta zahteva dodatne informacije, ki niso vedno na voljo.

Primerjali smo tudi vrednosti korelacijskih koeficientov, če smo fenološki razvoj opisali z vsotami aktivnih temperatur (termalni čas) ali pa s fototermalnim časom (priloga G2). Koeficienti so bili pri vseh fenofazah večji ob uporabi fototermalnega časa, torej fenološki razvoj v Ljubljani opišemo bolje s fototermalnim kot s termalnim časom.



Slika 21: Izračunan fototermalni čas, potreben za polno cvetenje španskega bezga v Ljubljani
Figure 21: Calculated photothermal time, needed for full flowering of common lilac in Ljubljana

Preglednica 14: Izračunan povprečen fototermalni čas (v °D), potreben za nastop obravnavanih fenofaz v Ljubljani za obdobje 1955-1999

Table 14: Calculated photothermal time (in °D), needed for appearance of discussed phenophases in Ljubljana for the period 1955-1999

Rastlina	Oznaka fenofaze	P _t (°D)	KV (%)
breza	L_{Bp}^1	278	11
breza	C_{Bp}^1	269	14
bukev	L_{Fs}^1	297	15
črni bezeg	C_{Sn}^2	642	8
divji kostanj	L_{Ah}^1	290	13
divji kostanj	C_{Ah}^2	412	9
iva	C_{Sc}^1	111	14
ivanjščica	C_{Li}^1	467	6
jablana	C_{Md}^1	361	12
jablana	C_{Md}^2	392	12
leska	C_{Ca}^2	65	24
lipa	L_{Tp}^1	297	15
lipa	C_{Tp}^1	800	8
pasja trava	C_{Dg}^1	536	18
regrat	C_{To}^1	253	12
robinija	C_{Rp}^2	634	9
smreka	L_{Pa}^1	360	14
španski bezeg	C_{Sv}^2	418	8
mali zvonček	C_{Gn}^1	50	24
pomlad. žafran	C_{Cn}^1	81	24

Na sliki 21 smo kot primer prikazali potreben fototermalni čas za nastop cvetenja španskega bezga, variabilnost vsot je med posameznimi leti relativno majhna (KV=8%), to pomeni, da v letih z visoko povprečno temperaturo zraka pomladanskih mesecev potrebuje rastlina manj časa za nastop fenofaze cvetenja kot v hladnih letih. Primerjava termalnega in fototermalnega časa za Ljubljano kaže, da je P_t manjši od V_{akt} in sicer je zmanjšanje sorazmerno glede na dolžino dneva. Fenološki razvoj smo torej opisali uteženo glede na temperaturo zraka za samo svetli del dneva. Večina raziskav v fenologiji, ki proučuje vpliv dolžine dneva na pojav fenofaz, se ukvarja z meritvami prirasta oziroma potrebnega časa (plastokron) za zasnovo dveh zaporednih listov na rastlini (Jame in sod., 1998; Lemos Filha in sod., 1997; Masle in sod., 1989). Za natančnejšo določitev vpliva temperature, dolžine dneva ter njune interakcije na fenološki razvoj določene rastline pa bi bilo potrebno izvesti poskuse v kontroliranih razmerah.

4.8 REGRESIJSKI MODELI ZA NAPOVED NASTOPA FENOLOŠKIH FAZ

Pravočasne in natančne napovedi nastopa fenoloških faz lahko nudijo veliko podporo pri odločanju na različnih področjih človekovih dejavnosti, še posebej v kmetijstvu. S fenološkimi modeli smo v nalogi poskušali napovedati nastop fenofaz rastlin glede na datum nastopa predhodnih fenofaz iste rastline ali pa glede na datume predhodnih fenofaz drugih rastlin, v fenoklimatske modele smo poleg fenoloških podatkov vključili tudi nekatere meteorološke spremenljivke.

Tvorili smo modele za 14 fenofaz, pri katerih napovedi časa pojava lahko uporabimo za določene ukrepe oziroma analize. Napovedi cvetenja jablane, sorta 'Bobovec' (C_{Md}^1, C_{Md}^2) in češplje, sorta 'Domača češplja' (C_{Pd}^1, C_{Pd}^2) lahko uporabimo pri načrtovanju agrotehničnih ukrepov; cvetenje leske (C_{Ca}^2), breze (C_{Bp}^1) in pasje trave (C_{Dg}^1) je pomembno z vidika alergenih obolenj, ki jih povzroča cvetni prah omenjenih rastlin, cvetenje pasje trave pa tudi glede določitve krmne vrednosti rastline. Napovedi cvetenja regrata (C_{To}^1), lipe (C_{Tp}^1), robinije (C_{Rp}^2) ter španskega bezga (C_{Sv}^2) so uporabne v farmacevtski industriji in pri načrtovanju paše čebel, poleg tega pa robinija in španski bezeg sodita v seznam rastlinskih vrst, dogovorjenih za mednarodno izmenjavo fenoloških podatkov. Čas olistanja gozdnega drevja ($L_{Bp}^1, L_{Fs}^1, L_{Tp}^1$) v zvezi s spremembami klime vse pogosteje uporabljajo kot pokazatelj začetka rastne dobe na določenem območju.

Metodologija za izdelavo modelov temelji na analizi korelacijskih koeficientov med zaporednimi fenofazami ter med fenofazami in meteorološkimi spremenljivkami. Na osnovi teh koeficientov smo oblikovali enostavne linearne regresijske enačbe (vključena ena pojasnjevalna spremenljivka) ter multiple linearne regresijske enačbe (v nalogi vključenih največ 6 pojasnjevalnih spremenljivk). Postopek multiple regresije vključi vsako posamezno spremenljivko v model ob hkratnem upoštevanju ostalih spremenljivk, če lahko z njo pojasnimo dovolj velik del (statistično značilen) variabilnosti odvisne spremenljivke. Na podlagi izračunanih prilagojenih determinacijskih koeficientov smo ugotovili delež z modelom pojasnjene variabilnosti v času nastopa fenofaz.

4.8.1 Fenološki modeli

Na osnovi korelacijskih matrik med obravnavanimi fenofazami za vse postaje, ki so podane v prilogah H1 do H8, smo poskušali narediti regresijske modele za napoved nekaterih fenofaz, pri čemer smo kot pojasnjevalne spremenljivke uporabili samo fenološke podatke. Korelacijski koeficienti med posameznimi zaporednimi fazami iste rastline ali med fenofazami različnih rastlin, ki si sledijo v kratkih časovnih presledkih, so v nekaterih primerih precej veliki. Na številnih fenoloških postajah meteoroloških meritev ni ali pa so merilna mesta precej oddaljena, tako da meteorološki podatki ne odražajo dejanskega stanja na mestu fenoloških opazovanj. V takem primeru lahko, če imamo na voljo dovolj dolg in obsežen niz fenoloških podatkov, napovedujemo razvoj rastline samo na osnovi zgodnejših fenofaz iste rastline ali zgodnejših fenofaz drugih rastlin. Obstajajo t.i. fenološki indikatorji, to so rastline, katerih fenološki razvoj lahko še posebno uspešno uporabimo pri napovedih razvoja kasnejših rastlin. Fenološki podatki takih rastlin so lahko

uporabni za napovedi razvoja gojenih rastlin, npr. sadnega drevja ali poljščin, prav tako pa je možno fenološke podatke indikatorske rastline zaradi korelativnih povezav uporabiti kot nadomestilo manjkajočega podatka primerjalne vrste.

Strajnarjeva (1997) je v svoji raziskavi ugotovila, da so fenofaze splošnega cvetenja sadnega drevja (jablana, češplja, hruška, navadni oreh) v Ljubljani, Murski Soboti in Mariboru močno korelirane z olistanjem navadne breze in cvetenjem divjega kostanja. Kajfež-Bogatajeva in Bergant (1999) sta z analizo fenoloških podatkov za Ljubljano potrdila, da so podatki o olistanju breze uporabni za napovedi cvetenja 'Bobovca' in 'Domače češplje', poleg tega pa sta lahko napovedala splošno cvetenje 'Domače češplje' tudi na osnovi fenoloških podatkov o olistanju buke in lipe.

V preglednicah 15 do 28 so predstavljeni rezultati regresijske analize za zgoraj omenjenih 14 fenofaz za modele, v katerih lahko s pojasnjevalnimi spremenljivkami pojasnimo vsaj polovico variabilnosti v času nastopa fenofaze ($r_p^2 \geq 0,5$). V vsaki preglednici je v prvem stolpcu navedena postaja, v drugem stolpcu pojasnjevalne spremenljivke, ki so vključene v model. Tretji stolpec nam podaja regresijsko konstanto, v četrtem sledijo regresijski koeficienti glede na zaporedje pojasnjevalnih spremenljivk v drugem stolpcu. V petem stolpcu je podan prilagojen koeficient determinacije (r_p^2 , enačba (30)) glede na to, da v postopek multiple regresije vključujemo različno število pojasnjevalnih spremenljivk za posamezne postaje. V zadnjem stolpcu je zapisano, koliko dni vnaprej lahko z modelom napovemo nastop posamezne fenofaze.

Preglednica 15: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' (C_{Pd}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Pd}^1

Table 15: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of plum, cultivar 'Domača češplja' (C_{Pd}^1), the last column shows, how many days ahead C_{Pd}^1 can be predicted

C_{Pd}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{To}^1	-6,4	1,1	0,72	7
IB	$L_{Bp}^1, L_{Ah}^1, C_{To}^1$	4,5	0,37; 0,34; 0,33	0,84	3
LE	$L_{Tp}^1, C_{Cn}^1, C_{To}^1$	34,6	0,40; 0,23; 0,16	0,72	3
MB	L_{Bp}^1, C_{To}^1	15,8	0,56; 0,37	0,80	8
MS	$L_{Ah}^1, C_{Bp}^1, C_{Ca}^2$	0,66	0,50; 0,45; 0,16	0,84	3
NM	L_{Bp}^1, C_{Ca}^2	18,0	0,77; 0,15	0,76	3
RA	$L_{Ah}^1, C_{To}^1, C_{Sc}^1$	-7,2	0,90; 0,35; 0,15	0,87	5

V preglednici 15 so podani regresijski modeli za napoved začetka cvetenja 'Domače češplje'. Delež pojasnjene variabilnosti je relativno velik in sicer med 72% in 87%, napovedi pa so možne od 3 do 8 dni vnaprej, kar je z vidika načrtovanja agrotehničnih

ukrepov povsem zadovoljivo. Kot pojasnjevalne spremenljivke se največkrat pojavljajo cvetenje regrata, olistanje breze in divjega kostanja, v posamezen model pa so vključene največ 3 spremenljivke. Regresijski modeli za napoved polnega cvetenja pri 'Domači češplji' so podani v preglednici 16. Determinacijski koeficienti znašajo od 92% do 97%, zelo velik delež pojasnjene variabilnosti z modelom je razumljiv, saj je od začetka cvetenja, ki je pojasnjevalna spremenljivka v vseh modelih, močno odvisno polno cvetenje. Napovedi lahko damo 3 do 4 dni vnaprej.

Preglednica 16: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja domače češplje (C_{Pd}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Pd}^2

Table 16: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of plum, cultivar 'Domača češplja' (C_{Pd}^2), the last column shows, how many days ahead C_{Pd}^2 can be predicted

C_{Pd}^2	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Pd}^1	10,8	0,94	0,96	4
IB	C_{Pd}^1, C_{Ca}^2	15,2	0,91; -0,04	0,97	4
LE	$C_{Pd}^1, L_{Bp}^1, L_{Fs}^1$	5,1	0,97; 0,14; -0,12	0,96	3
MB	C_{Pd}^1, L_{Fs}^1	19,7	0,99; -0,14	0,96	4
MS	C_{Pd}^1, C_{Sc}^1	9,4	0,98; -0,06	0,96	3
NM	C_{Pd}^1	17,2	0,87	0,92	3
RA	C_{Pd}^1, C_{Bp}^1	8,3	0,81; 0,18	0,94	4

Dovolj dolg in popoln niz fenoloških podatkov za jablano, sorta 'Bobovec', smo imeli na voljo samo za postaji Celje in Ljubljana. Začetek cvetenja jablane sorte 'Bobovec' lahko napovemo v Celju teden dni vnaprej na osnovi polnega cvetenja češplje in olistanja breze, v Ljubljani pa 9 dni vnaprej glede na cvetenje breze in olistanje lipe. V Celju smo z modelom lahko pojasnili 74% variabilnosti, v Ljubljani pa le 59%.

Preglednica 17: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja jablane, sorta 'Bobovec' (C_{Md}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Md}^1

Table 17: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of apple, cultivar 'Bobovec' (C_{Md}^1), the last column shows, how many days ahead C_{Md}^1 can be predicted

C_{Md}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Pd}^2, L_{Bp}^1	27,3	0,38; 0,47	0,74	7
LJ	L_{Tp}^1, C_{Bp}^1	36,5	0,45; 0,31	0,59	9

Precej večja sta koeficienta determinacije v modelih za nastop fenofaze polnega cvetenja 'Bobovca' in sicer 92%, v obeh primerih pa sta pojasnjevalni spremenljivki po

pričakovanih začetek cvetenja 'Bobovca'. Polno cvetenje 'Bobovca' lahko napovemo na osnovi predhodne faze v Celju štiri dni, v Ljubljani pa tri dni vnaprej.

Preglednica 18: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja jablane, sorta 'Bobovec' (C_{Md}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Md}^2

Table 18: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of apple, cultivar 'Bobovec' (C_{Md}^2), the last column shows, how many days ahead C_{Md}^2 can be predicted

C_{Md}^2	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Md}^1	13,3	0,92	0,92	4
LJ	C_{Md}^1	8,8	0,96	0,92	3

Linearne regresijske modele za napoved cvetenja 'Domače češplje' ter 'Bobovca' v Ljubljani sta izdelala tudi Kajfež-Bogatajeva in Bergant (1999) na osnovi podatkov za obdobje 1967-1996. Modeli vsebujejo kot pojasnjevalne spremenljivke fenološke podatke za olistanje breze, bukve in lipe, z njimi pa sta lahko pojasnila med 55% in 73% variabilnosti v času nastopa polnega cvetenja 'Domače češplje'.

Preglednica 19: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja breze (C_{Bp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo nastop fenofaze C_{Bp}^1

Table 19: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of common silver birch (C_{Bp}^1), the last column shows, how many days ahead C_{Bp}^1 can be predicted

C_{Bp}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{To}^1	23,9	0,77	0,53	2
IB	C_{To}^1	45,0	0,63	0,50	11

Za napoved cvetenja breze smo lahko oblikovali modela, ki pojasnita vsaj polovico variabilnosti v času nastopa te fenofaze samo za Celje in Ilirsko Bistrico, na vseh ostalih postajah pa so koeficienti determinacije znašali med 0,21 in 0,46. Oba modela vsebujeta enako pojasnjevalno spremenljivko in sicer cvetenje regrata, v Celju lahko napovemo cvetenje breze z modelom le dva dni vnaprej, v Ilirski Bistrici pa 11 dni vnaprej.

Modele za napoved cvetenja leske smo na osnovi fenoloških podatkov lahko tvorili na polovici postaj, pojasnjevalna spremenljivka je lahko edino cvetenje malega zvončka, ki na šestih postajah cveti malo pred lesko. Za postaji Rateče in Murska Sobota fenoloških modelov za cvetenje leske nismo mogli tvoriti, ker leska od obravnavanih rastlin tu cveti najprej. Koeficienti determinacije v modelih za napoved cvetenja leske so od 0,54 do 0,76 napovedi pa so možne 4 do 6 dni vnaprej.

Preglednica 20: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja leske (C_{Ca}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Ca}^2

Table 20: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of hazel (C_{Ca}^2), the last column shows, how many days ahead C_{Ca}^2 can be predicted

C_{Ca}^2	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Gn}^1	3,4	1,0	0,54	4
LE	C_{Gn}^1	8,7	0,9	0,58	4
LJ	C_{Gn}^1	1,4	1,1	0,76	5
MB	C_{Gn}^1	4,9	1,0	0,63	6

Preglednica 21: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja pasje trave (C_{Dg}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Dg}^1

Table 21: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of cock's-foot (C_{Dg}^1), the last column shows, how many days ahead C_{Dg}^1 can be predicted

C_{Dg}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
LJ	C_{Sv}^2, L_{Tp}^1	45,0	1,3; -0,6	0,53	12
MB	$C_{Ah}^2, L_{Tp}^1, L_{Fs}^1$	-1,3	-0,37; 0,94; 0,57	0,51	10

Za cvetenje pasje trave smo lahko oblikovali le dve regresijski napovedi in sicer za Ljubljano in Maribor, z njima smo pojasnili le okoli polovice variabilnosti. Cvetenje pasje trave lahko napovemo v Ljubljani 12 dni vnaprej glede na cvetenje španskega bezga in olistanje lipe, model za Maribor pa vključuje poleg olistanja lipe še olistanje bukve in cvetenje divjega kostanja, napoved je možna 10 dni vnaprej.

Preglednica 22: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja regrata (C_{To}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{To}^1

Table 22: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of dandelion (C_{To}^1), the last column shows, how many days ahead C_{To}^1 can be predicted

C_{To}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Gn}^1, C_{Sc}^1	63,4	0,16; 0,40	0,72	27
IB	C_{Sc}^1	47,3	0,65	0,50	22
LE	C_{Gn}^1, C_{Cn}^1	70,7	0,3; 0,2	0,53	37
MB	$C_{Gn}^1, C_{Sc}^1, C_{Bp}^1$	37,3	0,16; 0,19	0,73	2
NM	C_{Ca}^2, C_{Cn}^1	62,6	0,25; 0,29	0,54	22

Pred cvetenjem regrata se pojavi pet fenofaz, ki so vključene v naših modelih kot pojasnjevalne spremenljivke: cvetenje breze, leske, pomladanskega žafrana, malega zvončka in ive, pojasnijo pa med 50% in 73% variabilnosti v času nastopa cvetenja regrata. V Ljubljani in Ratečah smo z modelom lahko pojasnili manj kot polovico variabilnosti. Kljub temu, da so napovedi povsod razen v Mariboru možne nekaj tednov vnaprej, moramo upoštevati relativno majhne koeficiente determinacije.

Preglednica 23: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja lipe (C_{Tp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Tp}^1

Table 23: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of large-leaved lime (C_{Tp}^1), the last column shows, how many days ahead C_{Tp}^1 can be predicted

C_{Tp}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
LJ	$C_{Rp}^2, C_{Dg}^1, C_{Li}^1, C_{Sv}^2, C_{Ah}^2$	42,2	0,66; -0,13; 0,44; -0,77; 0,64	0,74	14
MS	$C_{Sn}^2, C_{Dg}^1, L_{Ah}^1$	49,7	0,87; -0,41	0,52	17
NM	C_{Rp}^2, C_{Sn}^2	43,7	0,41; 0,39	0,57	14
RA	$C_{Sn}^2, C_{Sv}^2, C_{Dg}^1, C_{Pd}^2$	45,4	0,35; 0,53; 0,25; -0,29	0,79	12

Cvetenje lipe nastopi glede na ostale obravnavane fenofaze najkasneje, zato imamo pri tvorbi modelov na razpolago več neodvisnih spremenljivk. Najboljši model smo lahko oblikovali za cvetenje lipe v Ratečah, v model pa so vključene spremenljivke cvetenje črnega bezga, španskega bezga, pasje trave in češplje. Z modelom pojasnimo 79% variabilnosti. Velik determinacijski koeficient ima tudi model za Ljubljano, v katerem nastopa kar pet spremenljivk, tri od teh so drugačne kot v modelu za Rateče: cvetenje robinije, ivanjščice in divjega kostanja. Modela za Novo mesto in Mursko Soboto pojasnita precej manj variabilnosti, vključene pa so fenološke faze istih rastlin kot v modelih za Rateče in Ljubljano. Napovedi lahko podamo 12 do 17 dni pred nastopom fenofaze.

Preglednica 24: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja robinije (C_{Rp}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Rp}^2

Table 24: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of black locust (C_{Rp}^2), the last column shows, how many days ahead C_{Rp}^2 can be predicted

C_{Rp}^2	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Li}^1, C_{Dg}^1	21,9	0,43; 0,48	0,67	5
IB	C_{Li}^1	-4,7	1,2	0,58	17
LJ	C_{Sv}^2	56,0	0,72	0,55	21
MB	C_{Ah}^2	40,3	0,83	0,50	19

Cvetenje robinije smo lahko napovedali na štirih od petih postaj z razpoložljivimi fenološkimi podatki. V Novem mestu smo z modelom lahko pojasnili manj kot polovico variabilnosti. Modeli za Maribor, Ljubljano in Ilirsko Bistrico vsebujejo samo po eno pojasnjevalno spremenljivko, ki pa je za vsako postajo druga: cvetenje ivanjščice v Ilirski Bistrici, cvetenje španskega bezga v Ljubljani in cvetenje divjega kostanja v Mariboru. Pojasnjene variabilnosti v teh treh modelih je od 50% do 58%. Model za Celje vsebuje dve spremenljivki, poleg cvetenja ivanjščice tako kot v modelu za Ilirsko Bistrico še cvetenje pasje trave, z njim pa lahko pojasnimo 67% variabilnosti v času nastopa cvetenja robinije. Napoved v Celju je možna 5 dni vnaprej, na ostalih postajah pa 17 do 21 dni prej.

Preglednica 25: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja španskega bezga (C_{Sv}^2), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo C_{Sv}^2 .

Table 25: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of common lilac (C_{Sv}^2), the last column shows, how many days ahead C_{Sv}^2 can be predicted

C_{Sv}^2	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Md}^1, L_{Ah}^1	11,6	0,58; 0,40	0,75	4
IB	C_{Pd}^2, L_{Pa}^1	29,3	0,36; 0,48	0,65	5
LE	C_{Pd}^1, L_{Bp}^1	51,3	0,89; -0,22	0,62	10
LJ	$C_{Md}^2, L_{Bp}^1, C_{Sc}^1$	25,4	0,34; 0,43; 0,17	0,72	3
MS	C_{Pd}^2	59,4	0,57	0,60	11
RA	C_{Ah}^2, L_{Pa}^1	5,3	0,60; 0,40	0,89	3

Pri španskem bezgu smo lahko tvorili modele za 6 postaj, modela za Maribor in Novo mesto pa sta imela koeficient determinacije 0,48, zato v preglednici nista predstavljena. Modeli za napoved cvetenja španskega bezga glede na ostale fenološke modele cvetenja pojasnijo relativno velik delež variabilnosti (60% do 89%), napovedi na različnih postajah pa so možne od 3 do 11 dni vnaprej. Modeli vključujejo kot pojasnjevalne spremenljivke fenološke faze šestih rastlin: jablane, češplje, ive, divjega kostanja, smreke ter breze.

Modele za napoved olistanja breze smo lahko tvorili na vseh postajah razen v Murski Soboti. V modele sta kot pojasnjevalni spremenljivki največkrat vključeni cvetenje breze in regrata. Cvetenje in olistanje breze sta fenofazi, ki se pojavita skoraj istočasno, zato je determinacijski koeficient v modelih, ki vsebujejo cvetenje breze sicer velik, vendar pa so napovedi možne le 2 do 3 dni vnaprej. Od ostalih spremenljivk vsebujejo modeli še cvetenje leske, pomladanskega žafrana, malega zvončka in ive. Če primerjamo fenofazi olistanja in cvetenja breze, lahko vidimo, da imamo več možnosti za oblikovanje modelov pri fenofazi olistanja, ki v povprečju nastopi dva do tri dni po pričetku cvetenja.

Tako kot za olistanje breze smo tudi za olistanje lipe lahko tvorili modele za 7 postaj. Modeli vključujejo eno ali največ dve spremenljivki, ki pojasnijo med 53% in 74% variabilnosti. Olistanje lipe lahko napovedujemo glede na olistanje breze, bukve ali divjega kostanja, uporabne pa so tudi fenofaze cvetenja breze, regrata in češplje. Nastop fenofaze

lahko napovemo na večini postaj 3 dni vnaprej, v Ilirski Bistrici 5 dni in v Celju 7 dni vnaprej.

Preglednica 26: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja breze (L_{Bp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo L_{Bp}^1

Table 26: Independent variables, which are included in regression models for predicting the first leaf unfolding of common silver birch (L_{Bp}^1), the last column shows, how many days ahead L_{Bp}^1 can be predicted

L_{Bp}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Bp}^1	22,2	0,82	0,87	2
IB	$C_{Bp}^1, C_{Ca}^2, C_{Gn}^1$	44,9	0,60; -0,25; 0,30	0,56	3
LE	C_{To}^1	39,9	0,66	0,51	3
LJ	$C_{To}^1, C_{Cn}^1, C_{Sc}^1$	35,3	0,60; -0,26; 0,37	0,63	4
MB	C_{Bp}^1, C_{Gn}^1	16,6	0,80; 0,11	0,90	2
NM	C_{To}^1	45,2	0,62	0,70	9
RA	C_{Bp}^1, C_{To}^1	23,7	0,59; 0,25	0,73	2

Preglednica 27: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja lipe (L_{Tp}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo L_{Tp}^1

Table 27: Independent variables, which are included in regression models for predicting the first leaf unfolding of large-leaved lime (L_{Tp}^1), the last column shows, how many days ahead L_{Tp}^1 can be predicted

L_{Tp}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	L_{Bp}^1	49,1	0,60	0,58	7
IB	L_{Bp}^1	33,9	0,73	0,74	5
LE	L_{Ah}^1, C_{Bp}^1	49,9	0,35; 0,25	0,53	3
LJ	L_{Bp}^1, C_{To}^1	29,0	0,38; 0,40	0,63	3
MS	L_{Ah}^1, C_{Bp}^1	27,2	0,51; 0,28	0,60	3
NM	C_{Pd}^1, C_{To}^1	49,1	0,38; 0,22	0,59	3
RA	L_{Fs}^1	0,72	1,00	0,71	3

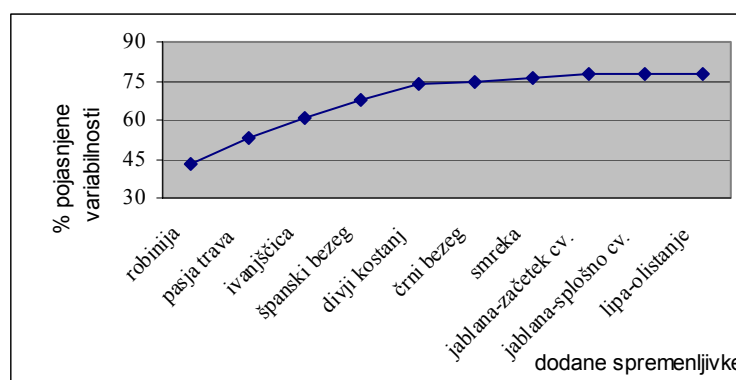
Za razliko od ostalih dveh fenofaz olistanja smo pri bukvi lahko tvorili samo dva regresijska modela, ki nam pojasnita več kot polovico variabilnosti nastopa te fenofaze, pojasnjevalni spremenljivki sta podobno kot pri olistanju breze in lipe cvetenje breze in regrata. Koeficienta determinacije sta relativno majhna, 0,51 v Ratečah in 0,62 v Celju, napoved pa lahko damo v Celju 4 dni, v Ratečah pa 2 dni vnaprej.

Preglednica 28: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja bukke (L_{Fs}^1), zadnji stolpec podaja, koliko dni vnaprej lahko napovemo L_{Fs}^1

Table 28: Independent variables, which are included in regression models for predicting the first leaf unfolding of beech (L_{Fs}^1), the last column shows, how many days ahead L_{Fs}^1 can be predicted

L_{Fs}^1	pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_n$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke ($b_1, b_2, \dots, b_n$)	r_p^2	število dni vnaprej
CE	C_{Bp}^1, C_{To}^1	44,6	0,24; 0,37	0,62	4
RA	C_{Bp}^1	54,4	0,58	0,51	2

Za izdelavo fenoloških modelov smo uporabili 10 rastlin, oziroma 14 fenofaz na osmih fenoloških postajah. Zastopanost opazovanih rastlin se po posameznih postajah razlikuje, tako da bi glede na fenološke podatke lahko tvorili največ 90 modelov. V resnici se je izkazalo, da le 61 fenoloških modelov pojasni vsaj polovico variabilnosti nastopa fenofaz. V posamezen fenološki model sta največkrat vključeni po dve ali po ena pojasnjevalna spremenljivka, največje število pojasnjevalnih spremenljivk v modelu je 5. Menimo, da je v fenološke modele smiselno vključiti največ tri neodvisne fenološke spremenljivke. Z dodatnim številom spremenljivk delež pojasnjene variabilnosti v predstavljenih modelih ni tako velik, da bi opravičeval bolj zapletene modele oziroma večje število potrebnih vhodnih podatkov. Slika 22 nam prikazuje primer modela za napoved cvetenja lipe v Ljubljani (preglednica 23). Največji delež variabilnosti modela pojasnjuje cvetenje robinije (43%). Z vključitvijo cvetenja pasje trave v model se ta delež poveča na 53%, dodatna spremenljivka cvetenje ivanjščice pomeni 61% pojasnjene variabilnosti, nadalje cvetenje španskega bezga 68% in cvetenje divjega kostanja 74% celotne variabilnosti. Ostalih pet spremenljivk nam pojasni le dodatne 4% variabilnosti, zato njihova vključitev v model ni smiselna, saj preveliko število vhodnih parametrov modela ni v skladu z načelom parsimoničnosti, ki smo ga v naših modelih upoštevali.



Slika 22: Vpliv dodanih neodvisnih spremenljivk na % pojasnjene variabilnosti modela za napoved cvetenja lipe (C_{Tp}^1) v Ljubljani, največji delež variabilnosti pojasnimo s cvetenjem robinije

Slika 22: Influence of additional independent variables on % of explained variability of model predicting large-leaved lime flowering in Ljubljana, the largest part of variability is explained with black locust flowering

Kot pojasnjevalne spremenljivke se v modelih pojavijo prav vse rastline, katerih fenološke podatke smo vključili v analizo. To kaže na močno koreliranost fenoloških faz različnih rastlin, kar lahko koristno uporabimo pri fenoloških napovedih gojenih rastlin ter pri interpolaciji manjkajočih podatkov. V modelih je največkrat zastopana breza (v več kot tretjini vseh modelov), sledita ji regrat in divji kostanj. Največ fenoloških modelov v naši nalogi smo lahko tvorili za cvetenje 'Domače češplje' ter olistanje lipe in breze, relativno malo pa za cvetenje pasje trave, breze ter olistanje bukke. Kot še sprejemljive modele smo vzeli tiste, s katerimi smo lahko pojasnili vsaj polovico variabilnosti v času nastopa fenofaz (Bergant in Kajfež-Bogataj, 1999). Daleč največ (več kot 90%) pojasnjene variabilnosti dajejo modeli za napoved polnega cvetenja 'Domače češplje' in 'Bobovca', kar je razumljivo, saj smo kot pojasnjevalne spremenljivke v modelih uporabili predhodne fenofaze istih rastlin. Za napovedi pojava fenofaz določene rastline na osnovi predhodnih fenofaz drugih rastlin je značilen precej manjši odstotek pojasnjene variabilnosti: med 70% in 79% za začetek cvetenja 'Domače češplje', polno cvetenje španskega bezga ter olistanje breze, med 60% in 69% za začetek cvetenja 'Bobovca', regrata in lipe, polno cvetenje leske ter olistanje lipe, med 50% in 59% variabilnosti v času nastopa fenofaz pa smo lahko pojasnili z modeli za napoved začetka cvetenja breze in pasje trave, polnega cvetenja robinije ter olistanja bukke.

4.8.2 Fenoklimatski modeli

V tem poglavju bomo predstavili regresijske modele za odvisnost nastopa fenofaz od fenoloških in nekaterih meteoroloških spremenljivk hkrati. Uporabili smo multiplo regresijo, ki v model vključi posamezno spremenljivko ob hkratnem upoštevanju vseh ostalih spremenljivk. Na osnovi povezanosti nastopa fenofaz ter meteoroloških spremenljivk, opisanih v poglavjih 4.2 do 4.7, smo v regresijske modele poleg fenoloških vključili tudi naslednje meteorološke spremenljivke:

- povprečne mesečne temperature zraka
- Glede na korelacijske koeficiente podane v preglednici 7 in prilogah F1 do F7, smo v regresijsko analizo vključili povprečne mesečne temperature zraka za mesec pred nastopom fenofaze (T_{jan} , T_{feb} , T_{mar} , ...), povprečne temperature zraka za dva zaporedna meseca pred nastopom fenofaze ($T_{jan-feb}$, $T_{feb-mar}$, ...) ali povprečne temperature zraka za tri zaporedne mesece pred nastopom fenofaze ($T_{jan-feb-mar}$, $T_{feb-mar-apr}$, ...)
- povprečne mesečne količine padavin (R_{jan} , R_{feb} , R_{mar} , ...)
 - vsote efektivnih temperatur (V_{ef}) nad temperaturo praga, ki smo jo izračunali za vsako fenofazo in lokacijo posebej s statistično metodo najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur
 - vsote aktivnih temperatur, izračunane iz povprečnih dnevni temperatur zraka (V_{akt}^{pov})
 - vsote aktivnih temperatur, izračunane iz minimalnih dnevni temperatur zraka (V_{akt}^{min})
- so vključene v modele za vse postaje razen Lesc, kjer ni meritev minimalnih temperatur zraka
- NAOI (indeks severno atlantskega nihanja) in sicer
 - $NAOI_{zim}$ - zimski NAOI (povprečje december-marec)
 - $NAOI_{sez}$ - sezonski NAOI (povprečje treh zaporednih mesecev) ($NAOI_{dec-jan-feb}$, $NAOI_{jan-feb-mar}$, $NAOI_{feb-mar-apr}$, ...)

- $NAOI_{mes}$ - mesečni NAOI ($NAOI_{jan}$, $NAOI_{feb}$, $NAOI_{mar}$, ...)
- fototermalni čas (P_t) smo izračunali in vključili samo v modele za Ljubljano

Prognoza nastopa fenofaze na osnovi vsot meteoroloških elementov (termalni čas, fototermalni čas) je tem boljša, čim bližje je tisti datum, do katerega računamo vsote, dejanskemu nastopu fenofaze za konkretno leto. Termalni in fototermalni čas smo izračunali za obdobje od 1. januarja do dneva 5 dni zgodnejšega od nastopa fenofaze v vsakem letu, zato so vse napovedi, ki vsebujejo V_{akt} , V_{ef} ali P_t možne 5 dni vnaprej, če seveda ni napoved omejena glede na fenološke spremenljivke (vrednosti so podane v poglavju 4.8.1 pri predstavitvi fenoloških modelov).

Od vseh modelov, ki so podani v tem poglavju, je 8 takšnih, pri katerih dodatne meteorološke spremenljivke niso pojasnile dovolj velikega deleža variabilnosti. Ti modeli torej vključujejo samo fenološke spremenljivke, zaradi boljšega pregleda, kateri modeli so to, pa smo ji podali tu še enkrat. V preglednicah 29 do 40 so podani multipli regresijski fenoklimatski modeli za napovedovanje 14 fenofaz pri 10 rastlinah. V prvi koloni preglednic imamo podane postaje, v drugi fenološke spremenljivke, v tretji koloni meteorološke spremenljivke. Regresijska konstanta in koeficienti so v četrtem in petem stolpcu, v zadnjem pa delež pojasnjene variabilnosti (r_p^2), izražen kot prilagojen koeficient determinacije glede na to, da v postopek multiple regresije vključujemo različno število pojasnjevalnih spremenljivk za posamezne lokacije.

Preglednica 29: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved (A) začetka cvetenja (C_{Pd}^1) in (B) polnega cvetenja (C_{Pd}^2) češplje, sorta 'Domača češplja'

Table 29: Independent variables, which are included in regression models for predicting (A) the beginning of flowering (C_{Pd}^1) and (B) the full flowering (C_{Pd}^2) of plum, cultivar 'Domača češplja'

A)

C_{Pd}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Ca}^2, C_{To}^1	V_{akt}^{pov}, T_{mar}	7,6	0,09; 0,71; 0,07; -1,54	0,88
IB	$L_{Bp}^1, L_{Ah}^1, C_{To}^1$		4,4	0,34; 0,37; 0,33	0,84
LE	$L_{Tp}^1, C_{Cn}^1, C_{To}^1$	V_{akt}^{pov}	0,37	0,43; 0,38; 0,16; 0,04	0,84
MB	L_{Bp}^1, C_{To}^1	$V_{akt}^{pov}, NAOI_{zim}$	-9,7	0,57; 0,37; 0,69; 0,05	0,84
MS	$L_{Ah}^1, C_{Bp}^1, C_{Ca}^2$	V_{akt}^{pov}	-16,6	0,43; 0,49; 0,19; 0,04	0,87
NM	L_{Bp}^1, C_{Ca}^2	V_{ef}, T_{mar}	23,3	0,52; 0,19; 0,02; -1,14	0,88
RA	L_{Ah}^1, C_{To}^1	V_{akt}^{pov}, T_{apr}	23,0	0,53; 0,29; 0,05; -1,91	0,93

B)

C_{Pd}^2	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Pd}^1		10,8	0,94	0,96
IB	C_{Pd}^1	V_{akt}^{pov}	5,8	0,91; 0,02	0,98
LE	C_{Pd}^1	V_{akt}^{pov}	7,5	0,93; 0,01	0,97
MB	C_{Pd}^1, L_{Fs}^1	$V_{akt}^{pov}, NAOI_{zim}$	15,4	0,96; -0,16; 0,49; 0,02	0,97
MS	C_{Pd}^1, C_{Sc}^1		9,4	0,98; -0,06	0,96
NM	C_{Pd}^1	V_{akt}^{pov}, T_{mar}	12,1	0,86; 0,02; -0,42	0,97
RA	C_{Pd}^1, C_{Bp}^1		8,3	0,81; 0,18	0,94

Pri fenoklimatskih modelih za napoved začetka cvetenja 'Domače češplje' se je delež pojasnjene variabilnosti glede na fenološke modele (preglednici 15 in 16) povečal v vseh primerih, razen na postaji Ilirska Bistrica, kjer meteorološke spremenljivke niso pojasnile dovolj velikega dela variabilnosti. Na vseh ostalih postajah se kot meteorološka spremenljivka pojavlja termalni čas, v petih modelih V_{akt}^{pov} in v enem V_{ef} , T_{mes} nastopa v treh modelih, v modelu za Maribor pa je vključen tudi $NAOI_{zim}$. Determinacijski koeficienti so med 0,84 in 0,93, napovedi pa so možne 5 dni vnaprej. Nobeden izmed modelov za začetek cvetenja ali polno cvetenje 'Domače češplje' ne vsebuje pojasnjevalne spremenljivke mesečna količina padavin.

Fenoklimatski modeli za napoved polnega cvetenja 'Domače češplje' vsebujejo meteorološke spremenljivke samo v štirih primerih, v treh so modeli 'ostali' fenološki. Delež pojasnjene variabilnosti se je v primeru vključitve meteoroloških spremenljivk v modele povečal minimalno, kar je glede na že tako velik r_p^2 v fenoloških modelih razumljivo. Fenološki modeli za napovedovanje polnega cvetenja 'Domače češplje' so povsem zadovoljivi, napovedi polnega cvetenja na osnovi samo meteoroloških spremenljivk pa so zaželenje v smislu nekoliko dolgoročnejših napovedi, saj so možne 5 dni pred nastopom fenofaze. Pojasnjevalne meteorološke spremenljivke v modelih za napoved polnega cvetenja so iste kot v modelih za napovedi začetka cvetenja 'Domače češplje'.

Z vključitvijo meteoroloških spremenljivk v model za napoved začetka cvetenja 'Bobovca' znaša r_p^2 za postajo Celje 0,81 in za Ljubljano 0,82. Vključene meteorološke spremenljivke so V_{akt}^{pov} in T_{mes} , model za Ljubljano pa vsebuje tudi P_t . Kot smo že omenili, fototermalni čas nastopa kot spremenljivka samo v modelih za postajo Ljubljana. Model za napoved polnega cvetenja 'Bobovca' za Ljubljano vsebuje poleg termalnega in fototermalnega časa tudi $NAOI_{zim}$, za postajo Celje pa v model nismo vključili nobene dodatne meteorološke spremenljivke.

Preglednica 30: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved (A) začetka cvetenja (C_{Md}^1) in (B) polnega cvetenja (C_{Md}^2) jablane, sorta 'Bobovec'

Table 30: Independent variables, which are included in regression models for predicting (A) the beginning of flowering (C_{Md}^1) and (B) the full flowering (C_{Md}^2) of apple, cultivar 'Bobovec'

A)

C_{Md}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Pd}^2, L_{Bp}^1	V_{akt}^{pov}	2,1	0,39; 0,48; 0,04	0,81
LJ	L_{Bp}^1	T_{mar}, P_t	33,6	0,55; -1,1; 0,09	0,82

B)

C_{Md}^2	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Md}^1		13,3	0,92	0,92
LJ	C_{Md}^1	$V_{akt}^{pov}, NAOI_{zim}, P_t$	20,0	0,03; -0,51; 0,08	0,95

Preglednica 31: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja breze (C_{Bp}^1)

Table 31: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of common silver birch (C_{Bp}^1)

C_{Bp}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{To}^1	V_{akt}^{pov}, T_{mar}	-0,91	0,82; 0,07; -1,23	0,82
IB	C_{To}^1	V_{ef}, T_{feb}, T_{mar}	62,9	0,23; 0,05; -1,53; -2,28	0,86
LE	C_{To}^1	V_{akt}^{pov}, R_{feb}	-3,1	0,89; 0,07; -0,03	0,73
LJ		$V_{ef}, T_{feb}, T_{mar}, P_t$	84,8	-0,06; -1,24; -1,86; 0,30	0,92
MB	C_{Sc}^1, C_{Ca}^2	V_{akt}^{pov}, T_{mar}	50,7	0,24; 0,19; 0,06; -1,9	0,86
MS	C_{Ca}^2	V_{ef}, T_{mar}	70,4	0,25; 0,14; -2,4	0,74
NM	C_{To}^1	$V_{akt}^{min}, T_{feb}, T_{mar}, R_{mar}$	61,5	0,41; -0,04; -0,94; -1,75; -0,04	0,88
RA	C_{To}^1, C_{Gn}^1	$V_{akt}^{pov}, T_{apr}, NAOI_{apr}$	58,2	0,48; -0,05; 0,11; -2,82; 0,88	0,92

Za napoved cvetenja breze smo lahko tvorili le dva fenološka modela z relativno majhnim r_p^2 , z vključitvijo meteoroloških spremenljivk pa je slika povsem spremenjena. Izdelani

modeli za vseh osem postaj vsebujejo od 2 do 5 meteoroloških spremenljivk, odstotek pojasnjene variabilnosti pa znaša med 73% in 92%. V vseh modelih nastopa termalni čas in sicer po ena izmed naslednjih vsot: V_{akt}^{pov} , V_{akt}^{min} in V_{ef} , največkrat V_{akt}^{pov} . V skoraj vseh modelih nastopa T_{mes} , v dveh pa tudi R_{mes} . Modela, ki pojasnita največji delež variabilnosti, vsebujeta tudi P_t (Ljubljana) in $NAOI_{mes}$ (Rateče).

Preglednica 32: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja leske (C_{Ca}^2)

Table 32: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of hazel (C_{Ca}^2)

C_{Ca}^2	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Gn}^1	$V_{akt}^{min}, V_{ef}, T_{jan}$	-3,05	0,67; -0,42; 0,32; -2,58	0,78
IB	C_{Gn}^1	$V_{ef}, T_{jan}, NAOI_{jan}$	3,96	0,14; 0,37; -2,62; -0,45	0,94
LE	C_{Gn}^1	V_{ef}, T_{jan}	-16,7	0,73; 0,04; -1,53	0,88
LJ	C_{Gn}^1	$V_{ef}, T_{jan}, T_{feb}, P_t$	12,3	0,21; 0,17; -3,04; -1,95; -0,27	0,98
MB	C_{Gn}^1	V_{akt}^{pov}, T_{jan}	-5,0	0,31; 0,06; -2,74	0,93
MS		$V_{ef}, T_{jan}, T_{feb}, NAOI_{dec-jan-feb}$	16,9	0,20; -2,49; -1,81; -0,85	0,94
NM		V_{ef}, T_{jan}, T_{feb}	16,7	0,04; -3,00; -1,90	0,97
RA		$V_{akt}^{pov}, T_{jan}, T_{feb}$	21,3	-0,21; 2,53; -3,66	0,84

Glede na to, da leska zacveti med prvimi rastlinami zgodaj spomladi, smo fenološke modele lahko tvorili le na osnovi cvetenja zvončka in še to le za polovico obravnavanih postaj. Z meteorološkimi spremenljivkami pa smo lahko pojasnili velik odstotek variabilnosti v času nastopa fenofaze cvetenja leske, od 78% do celo 98% za postajo Ljubljano, za katero model vsebuje P_t . Modele smo lahko tvorili za vse postaje. Od meteoroloških spremenljivk vsebujejo vsi modeli termalni čas (V_{akt}^{pov} , V_{akt}^{min} ali V_{ef}) ter T_{mes} , modela za Ilirsko Bistrico ter Mursko Soboto pa vsebujeta tudi $NAOI_{mes}$ oziroma $NAOI_{sez}$. Pri nobenem izmed modelov količina padavin ne pojasni dovolj velikega deleža variabilnosti, da bi jo lahko vključili v model.

Preglednica 33: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja pasje trave (C_{Dg}^1)

Table 33: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of cock's-foot (C_{Dg}^1)

C_{Dg}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Sv}^2	$V_{ef}, T_{\text{feb-mar-apr}}$	54,4	0,42; 0,07; -1,99	0,81
LJ	C_{Sv}^2	$V_{ef}, T_{\text{apr}}, P_t$	23,8	0,66; 0,05; -1,21; 0,30	0,95
MB	C_{Ah}^2, L_{Fs}^1	V_{ef}, T_{apr}	40,5	0,47; 0,33; 0,08; -2,43	0,85
MS	C_{Sv}^2, C_{Ca}^2	$V_{akt}^{pov}, T_{\text{mar}}, T_{\text{apr}}$	49,0	0,41; 0,18; 0,06; -0,71; -1,86	0,90
NM	C_{Ah}^2	$V_{ef}, T_{\text{apr}}, R_{\text{mar}}, NAOI_{\text{jan}}$	71,7	0,48; 0,09; -2,33; 0,05; -0,60	0,88
RA		$V_{akt}^{min}, T_{\text{mar}}, T_{\text{apr}}, T_{\text{maj}}$	159,2	0,09; -1,35; -2,29; -3,04	0,97

Za cvetenje pasje trave smo lahko tvorili le dva fenološka modela, s fenoklimatskimi modeli pa lahko na vseh postajah (z izjemo postaj Ilirska Bistrica in Lesce, na katerih ne opazujejo te fenofaze) pojasnimo velik odstotek variabilnosti (med 81% in 97%). Vsi modeli vključujejo termalni čas ($V_{akt}^{pov}, V_{akt}^{min}$ ali V_{ef}) ter T_{mes} . Edino model za Novo mesto vsebuje $NAOI_{\text{mes}}$ in R_{mes} , model za postajo Ljubljana pa vsebuje tudi P_t .

Preglednica 34: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja regrata (C_{To}^1)

Table 34: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of dandelion (C_{To}^1)

C_{To}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Gn}^1, C_{Sc}^1	$V_{akt}^{pov}, T_{\text{mar}}$	72,0	0,15; 0,26; 0,03; -1,83	0,83
IB	C_{Ca}^2	$V_{ef}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	63,5	0,16; 0,07; -1,61; -3,22	0,89
LE		$T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	118,3	-1,67; -2,75	0,69
LJ	C_{Sc}^1	$V_{akt}^{pov}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}, P_t$	65,1	0,17; -0,08; -0,80; -1,94; 0,28	0,92
MB	$C_{Gn}^1, C_{Sc}^1, C_{Bp}^1$	$V_{akt}^{pov}, T_{\text{mar}}$	23,3	0,15; 0,21; 0,35; 0,07; -1,17	0,84
NM	C_{Ca}^2	$V_{ef}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	67,3	0,15; 0,06; -1,11; -2,68	0,86
RA		$V_{akt}^{pov}, T_{\text{feb}}, T_{\text{mar}}$	95,5	0,16; -1,67; -3,07	0,72

Vsi modeli za napoved cvetenja regrata vsebujejo kot meteorološko pojasnjevalno spremenljivko T_{mes} . Model za Lesce vsebuje kot spremenljivki modela samo povprečno februarско in marčevsko temperaturo zraka, vse ostale postaje pa vsebujejo tudi termalni čas (V_{akt}^{pov} ali V_{ef}), model za Ljubljano pa še P_t . V noben model niso vključene padavine ali pa indeks severno atlantskega nihanja. Najmanjša koeficienta determinacije imata modela za Lesce (0,69) in Rateče (0,72), na ostalih postajah so koeficienti večji od 0,8.

Preglednica 35: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved začetka cvetenja lipe (C_{Tp}^1)

Table 35: Independent variables, which are included in regression models for predicting the beginning of flowering of large-leaved lime (C_{Tp}^1)

C_{Tp}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Md}^1, C_{Pd}^2	V_{akt}^{pov}, R_{maj}	91,8	0,24; 0,19; 0,05; -1,23; -1,51; 0,03	0,86
IB	L_{Pa}^1	V_{ef}	137,6	0,33; 0,03; -1,24; -1,88	0,71
LE	C_{Sn}^2	V_{ef}	29,1	0,77; 0,3	0,53
LJ	C_{Rp}^2, C_{Li}^1	V_{akt}^{pov}, P_t	11,1	0,30; 0,42; 0,03; 0,11	0,93
MB	C_{Rp}^2	V_{ef}	29,7	0,69; 0,05	0,78
MS	C_{Sn}^2, L_{Ah}^1	V_{akt}^{pov}	-5,4	0,62; 0,25; 0,04	0,74
NM	C_{Sn}^2, L_{Tp}^1	$V_{akt}^{min}, T_{apr}, T_{maj}$	79,4	0,31; 0,23; 0,07; -1,34; -1,17	0,87
RA	C_{Dg}^1	$V_{akt}^{min}, T_{apr}, T_{maj}, T_{jun}$	195,6	0,10; 0,06; -2,18; -2,39; -2,00	0,92

Napovedi za začetek cvetenja lipe smo lahko tvorili za vse postaje, pri čemer model za Lesce pojasni le nekaj več kot polovico variabilnosti. Na ostalih postajah znaša koeficient determinacije med 0,71 in 0,93. Vsi modeli vsebujejo termalni čas ($V_{akt}^{pov}, V_{akt}^{min}$ ali V_{ef}), poleg tega pa nastopata v modelih še T_{mes} in R_{mes} , za postajo Ljubljano tudi P_t .

Modele za polno cvetenje robinije smo izdelali za vse postaje, za katere razpolagamo s fenološkimi podatki. Od meteoroloških spremenljivk vsebujejo vse postaje termalni čas ($V_{akt}^{pov}, V_{akt}^{min}$ ali V_{ef}), trije modeli T_{mes} , model za Lesce $NAOI_{sez}$, za Ljubljano pa je vključen tako kot v vseh do sedaj omenjenih fenoklimatoloških modelih za Ljubljano tudi P_t , padavine niso vključene v nobenem modelu.

Preglednica 36: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja robinije (C_{Rp}^2)

Table 36: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of black locust (C_{Rp}^2)

C_{Rp}^2	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	$C_{Li}^1, C_{Dg}^1, C_{Sv}^2$	V_{akt}^{min}	18,1	0,24; 0,33; 0,30; 0,04	0,80
IB	L_{Bp}^1	$V_{ef}, T_{apr}, T_{maj}, NAOI_{mar-apr-maj}$	145,4	0,34; 0,09; -1,86; -3,26; -0,60	0,92
LJ	C_{Sv}^2	V_{akt}^{pov}, P_t	36,6	0,45; -0,08; 0,21	0,90
MB	C_{Ah}^2	$V_{akt}^{min}, T_{mar}, T_{apr}$	102,0	0,35; 0,06; -0,95; -2,33	0,73
NM	C_{Ah}^2	V_{ef}, T_{apr}	66,4	0,55; 0,06; -2,00	0,78

Preglednica 37: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved polnega cvetenja španskega bezga (C_{Sv}^2)

Table 37: Independent variables, which are included in regression models for predicting the full flowering of common lilac (C_{Sv}^2)

C_{Sv}^2	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Md}^1, C_{Pd}^1	V_{ef}, T_{mar}, T_{apr}	54,2	0,28; 0,24; 0,09; -0,83; -1,85	0,92
IB	C_{Pd}^2, L_{Pa}^1	V_{ef}, T_{apr}	41,8	0,41; 0,24; 0,11; -1,99	0,85
LE	$C_{Pd}^1, C_{To}^1, L_{Bp}^1$	V_{akt}^{pov}, T_{apr}	66,4	0,37; 0,45; -0,24; 0,03; -1,72	0,71
LJ	$C_{Md}^2, C_{Sc}^1, L_{Bp}^1$	$V_{akt}^{pov}, T_{apr}, P_t$	25,2	0,19; 0,29; 0,17; -0,04; -1,07; 0,18	0,94
MB	C_{Pd}^2, C_{Bp}^1	$V_{akt}^{pov}, R_{apr}, NAOI_{feb-mar-apr}$	1,82	0,64; 0,17; 0,05; 0,03; -0,82	0,87
MS	C_{Pd}^2	$V_{akt}^{pov}, T_{feb}, T_{mar}, T_{apr}, R_{feb}$	77,0	0,35; 0,05; -0,53; -1,22; -1,67; -0,04	0,89
NM	C_{Pd}^1	$V_{akt}^{pov}, NAOI_{zim}$	3,5	0,75; 0,06; -0,95	0,87
RA	L_{Pa}^1, C_{Ah}^2	V_{akt}^{pov}	2,89	0,37; 0,60; 0,04	0,89

Tako kot že pri nekaterih drugih rastlinah (breza, regrat, lipa) tudi med modeli za napoved cvetenja španskega bezga izstopa z majhnim r_p^2 model za Lesce, s katerim pojasnimo samo 71% variabilnosti, medtem ko znaša r_p^2 za ostale modele med 0,85 in 0,94. V vseh modelih nastopa termalni čas (V_{akt}^{pov} ali V_{ef}), v petih modelih pa T_{mes} . R_{mes} so vključene v model za napoved cvetenja v Mariboru in v Murski Soboti, model za Ljubljano vsebuje P_t .

NAOI_{sez} in NAOI_{zim} pa pojasnjujeta del variabilnosti v modelih za Novo mesto in Mursko Soboto.

Preglednica 38: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja breze (L_{Bp}^1)

Table 38: Independent variables, which are included in regression models for predicting the first leaf unfolding of common silver birch (L_{Bp}^1)

L_{Bp}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Bp}^1		22,2	0,82	0,87
IB	C_{Bp}^1	$V_{akt}^{min}, T_{feb}, T_{mar}$	61,3	0,24; 0,05; -1,58; -2,93	0,80
LE	C_{To}^1	$V_{akt}^{pov}, \text{NAOI}_{zim}$	8,45	0,79; 0,05; -0,90	0,69
LJ	C_{Sc}^1, C_{To}^1	$V_{akt}^{pov}, T_{mar}, P_t$	10,8	0,32; 0,32; -0,06; -1,02; 0,26	0,90
MB	C_{Bp}^1, C_{Gn}^1		16,6	0,80; 0,11	0,90
MS	C_{Bp}^1	$V_{akt}^{pov}, T_{feb}, T_{mar}, R_{mar}$	38,3	0,47; 0,09; -0,68; -2,14; -0,07	0,76
NM	C_{To}^1	$V_{akt}^{min}, T_{feb}, T_{mar}$	52,2	0,41; -0,09; -0,86; -1,45	0,86
RA	$C_{Bp}^1, C_{To}^1, C_{Gn}^1$	$V_{akt}^{pov}, T_{apr}, \text{NAOI}_{apr}$	54,6	0,20; 0,35; -0,04; 0,08; -2,50; -0,73	0,91

Izmed modelov za napoved olistanja breze najmanjši odstotek variabilnosti pojasni model za Lesce (69%), ostali modeli imajo koeficient determinacije od 0,76 do 0,91. Značilno je tudi, da v modela za Celje in Maribor nismo mogli vključiti nobene dodatne meteorološke spremenljivke, delež pojasnjene variabilnosti je bil velik tudi samo z vključitvijo fenoloških spremenljivk. Vsi fenoklimatski modeli vsebujejo termalni čas (V_{akt}^{pov} ali V_{akt}^{min}), večina tudi T_{mes} . Modeli za Lesce in Rateče dajejo napovedi za nastop fenofaze olistanja breze tudi na osnovi NAOI_{sez} in NAOI_{mes}. R_{mes} vsebuje model za Mursko Soboto, P_t pa model za Ljubljano.

Fenološkega modela za napoved olistanja lipe v Lescah nismo mogli izboljšati z nobeno dodatno meteorološko spremenljivko. Termalni ali fototermalni čas ($V_{akt}^{pov}, V_{akt}^{min}, V_{ef}$ ali P_t) pojasnjujeta nastop fenofaze na vseh postajah, T_{mes} vsebujejo modeli za Maribor, Mursko Soboto in Rateče. Trije modeli vsebujejo tudi NAOI_{zim} in NAOI_{mes}, nikjer pa niso vključene padavine.

Preglednica 39: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja lipe (L_{Tp}^1)

Table 39: Independent variables, which are included in regression models for predicting the first leaf unfolding of large-leaved lime (L_{Tp}^1)

L_{Tp}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	L_{Bp}^1, C_{To}^1	$V_{akt}^{min}, NAOI_{feb}$	-24,1	0,22; 0,41; 0,04; 0,44	0,86
IB	L_{Bp}^1	$V_{ef}, NAOI_{zim}$	15,7	0,74; 0,08; -0,82	0,86
LE	L_{Ah}^1, C_{Bp}^1		49,9	0,35; 0,25	0,53
LJ	L_{Bp}^1, C_{To}^1	P_t	-16,5	0,49; 0,44; 0,09	0,88
MB	L_{Ah}^1	V_{akt}^{min}, T_{mar}	78,0	0,39; 0,09; -2,17	0,78
MS	C_{Bp}^1, L_{Ah}^1	$V_{akt}^{pov}, T_{feb}, T_{mar}$	25,3	0,32; 0,29; 0,05; -0,78; -1,07	0,82
NM	C_{Pd}^1, C_{To}^1	V_{akt}^{pov}	-8,99	0,60; 0,27; 0,06	0,82
RA	L_{Ah}^1	$V_{akt}^{min}, T_{apr}, NAOI_{zim}$	68,5	0,43; 0,12; -2,80; -0,89	0,84

Preglednica 40: Pojasnjevalne spremenljivke, ki nastopajo v regresijskih modelih za napoved olistanja bukke (L_{Fs}^1)

Table 40: Independent variables, which are included in regression models for predicting the first leaf unfolding of beech (L_{Fs}^1)

L_{Fs}^1	fenološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$)	meteorološke pojasnjevalne spremenljivke modela ($x_n, x_{n+1}, \dots, x_k$)	regresijska konstanta (a)	regresijski koeficienti za pojasnjevalne spremenljivke modela ($b_1, b_2, \dots, b_k$)	r_p^2
CE	C_{Bp}^1, C_{To}^1	V_{akt}^{min}	-11,8	0,19; 0,76; -0,06	0,78
LE	C_{To}^1	$V_{akt}^{pov}, NAOI_{mar}$	28,5	0,60; 0,06; -0,91	0,51
LJ	L_{Bp}^1, C_{To}^1	V_{akt}^{pov}, P_t	8,8	0,30; 0,35; -0,06; -0,91; 0,21	0,86
MB	$L_{Bp}^1, C_{Sc}^1, C_{To}^1$	$V_{akt}^{min}, NAOI_{zim}$	-18,2	0,37; 0,17; 0,39; -0,04; -0,91	0,87
NM	C_{Pd}^1, C_{To}^1	$V_{akt}^{min}, T_{feb}, NAOI_{jan}$	16,3	0,36; 0,28; -0,05; -0,53; -0,36;	0,87
RA	C_{Bp}^1	$V_{akt}^{min}, T_{apr}, R_{mar}$	82,3	0,39; 0,11; -2,44; 0,02	0,79

Termalni čas vsebujejo vsi modeli za napoved olistanja bukke, v štirih primerih so to V_{akt}^{min} , v dveh V_{akt}^{pov} , vse ostale meteorološke spremenljivke se pojavljajo le v posameznih modelih (T_{mes} , R_{mes} , $NAOI_{sez}$ in $NAOI_{mes}$, P_t). Model za Lesce tudi v primeru olistanja bukke pojasni precej manj (51%) variabilnosti kot modeli za ostale postaje (78% do 87%).

Za izdelavo fenoklimatskih modelov smo uporabili 10 rastlin, oziroma 14 fenofaz na osmih fenoloških postajah. Glede na število opazovanih rastlin po posameznih postajah bi lahko izdelali največ 90 fenoklimatskih modelov. Izkazalo se je, da lahko tvorimo 82 fenoklimatskih modelov, ki nam pojasnijo vsaj polovico variabilnosti v času nastopa fenofaz. Ostalih 8 modelov pojasni dovolj velik delež variabilnosti samo s fenološkimi podatki, pri čemer polovica od teh modelov napoveduje čas polnega cvetenja pri 'Domači češplji' in 'Bobovcu' na osnovi predhodne fenofaze iste rastline (začetek cvetenja).

Kot pojasnjevalna spremenljivka se v vseh fenoklimatskih modelih pojavi termalni čas, razen v nekaterih modelih za Ljubljano, kjer nastopa fototermalni čas. Termalni čas smo kot spremenljivko vključili v modele v treh oblikah: kot vsoto aktivnih temperatur, izračunano iz povprečnih dnevni temperatur zraka (V_{akt}^{pov}) ali iz minimalnih temperatur zraka (V_{akt}^{min}) ter kot vsoto efektivnih temperatur zraka (V_{ef}). V modelih je termalni čas največkrat vključen kot spremenljivka V_{akt}^{pov} , sledita spremenljivki V_{ef} ali V_{akt}^{min} , pri čemer za postajo Lesce zadnje spremenljivke nimamo podane, ker tu ni meritev minimalne temperature zraka. Poleg termalnega časa je najpogostejše zastopana meteorološka spremenljivka T_{mes} , ki je vključena v tri četrtine modelov. V precej manj modelov je vključen NAOI, približno v 20% vseh modelov, značilno pa je, da ne izstopa nobena postaja oziroma rastlina, za katero bi bil NAOI pogostejše vključen v modele kot drugje. V minimalno število modelov smo lahko vključili kot pojasnjevalno spremenljivko R_{mes} , kar smo glede na majhne korelacijske koeficiente (poglavje 4.3) med količino padavin ter nastopom fenofaz tudi pričakovali. Rezultati naših modelov za 'Domačo češpljo' in 'Bobovec' se ujemajo z izsledki Kajfež-Bogatajeve in Berganta (1999), ki sta ugotovila, da povezave nastopa splošnega cvetenja s količino padavin v spomladanskem času pri omenjenih rastlinah v Ljubljani niso statistično značilne, kar sta razložila s tem, da v pomladanskem času količina padavin pri nas zadostuje potrebam rastlin. Modela za napoved polnega cvetenja 'Domače češplje' ter 'Bobovca' kot edina vključujeta kot fenološko spremenljivko predhodno fenofazo iste rastline (začetek cvetenja). Korelacija med tema zaporednima fenofazama iste rastline je razumljivo velika, sploh ker gre v bistvu za isto fenofazo, katere dolžina niha glede na vremenske razmere. Analiza koeficientov determinacije za vse ostale fenofaze (brez C_{Pd}^2 in C_{Md}^2) je pokazala, da največji delež variabilnosti v času nastopa fenofaz lahko pojasnimo z modeli za začetek cvetenja češplje in pasje trave ter modeli za polno cvetenje leske in španskega bezga. Po drugi strani je povprečen najmanjši koeficient determinacije značilen za modele olistanja buke ter lipe. Rezultati naših modelov se ujemajo s trditvami, da je predvsem začetek cvetenja pri mnogih rastlinskih vrstah zelo tesno povezan s temperaturnimi razmerami (Wielgolaski, 1996), medtem ko je značilno, da pri olistanju drevja razložimo s temperaturnimi razmerami precej manjši delež variabilnosti v času nastopa fenofaz (Šegula-Ilič, 1990; Veselič, 1990).

Zanimiva je tudi primerjava koeficientov determinacije med posameznimi postajami. Modeli za postajo Lesce izstopajo s koeficienti determinacije, ki so manjši kot za ostale postaje; tako ima kar 8 od skupno 10-tih fenoklimatskih modelov za Lesce najmanjši koeficient determinacije za določeno fenofazo. Izkazalo se je, da pa imajo nadpovprečno velike determinacijske koeficiente modeli za Ljubljano (od skupno dvanajstih modelov za Ljubljano jih ima devet največji koeficient determinacije za določeno fenofazo). V vseh

dvanajstih modelih za Ljubljano nastopa kot pojasnjevalna spremenljivka fototermalni čas (P_t), ki smo ga izračunali in vključili v postopek multiple regresije samo za to postajo. Zanimalo nas je, kakšna je razlika v odstotku pojasnjene variabilnosti glede na to, ali je fototermalni čas vključen v model ali ne.

Preglednica 41: Koeficienti determinacije (r_p^2 v %) za modele, ki vsebujejo fototermalni čas (P_t) in tiste, ki ga ne vsebujejo, v zadnji vrstici je podana razlika koeficientov determinacije (v %) za posamezen model

Table 41: Determination coefficients (r_p^2 in %) for models with or without included photothermal time (P_t), lower row gives us the difference between determination coefficients (in %) for particular model

Ljubljana	C_{Ma}^1	C_{Ma}^2	C_{Ca}^2	C_{Bp}^1	C_{Dg}^1	C_{To}^1	C_{Tp}^1	C_{Rp}^2	C_{Sv}^2	L_{Bp}^1	L_{Fs}^1	L_{Tp}^1
model vsebuje P_t	82	95	98	92	95	92	93	90	94	90	86	88
model NE vsebuje P_t	77	94	97	79	93	81	87	77	89	79	82	80
razlika	+5	+1	+1	+13	+2	+11	+6	+13	+5	+11	+4	+8

Iz rezultatov v preglednici 41 lahko vidimo, da je delež pojasnjene variabilnosti večji v vseh modelih, ki vključujejo fototermalni čas. Ponekod je razlika sicer minimalna, pri večini pa tolikšna, da je vključitev fototermalnega časa v postopek multiple regresije upravičena. Številni avtorji so dokazali, da s fototermalnim časom lahko opišemo fenološki razvoj rastlin bolje kot s termalnim časom (Masle in sod., 1989; Perry in sod., 1997).

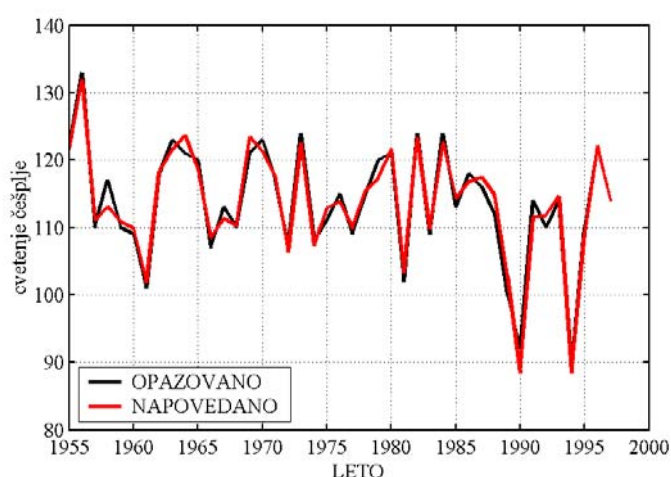
4.9 PREVERJANJE MODELOV

Rezultate modelov, predstavljene v poglavju 4.8, smo analizirali in ovrednotili, kako se z modeli izračunane vrednosti ujemajo z opazovanimi. Za preverjanje rezultatov (validacija) smo izvedli metodo navzkrižnega preverjanja rezultatov (cross validation) z uporabo programa MATLAB (verzija 5.2). Metoda je naslednja: izbran regresijski model smo uporabili v postopku multiple regresije tako, da smo posamezno leto izločili iz postopka in izračunali vrednost za to leto; to smo ponovili za vsa leta (in vsako posamezno postajo). Nato smo za vsako leto izračunali razliko med izmerjeno in izračunano vrednostjo (ostanek). Rezultati navzkrižnega preverjanja modelov so prikazani v preglednici 42. Povprečen koeficient korelacije znaša za posamezne postaje nad 0,90, kar kaže na to, da so modeli dobri. V Lescah so ti koeficienti nekoliko manjši, zlasti pri modelih za napoved cvetenja lipe ter olistanja bukve in lipe. Ker so po mnenju agrometeorološkega odelka Agencije za okolje in prostor, ki nadzorujejo fenološke meritve, fenološka opazovanja na tej postaji zelo kvalitetna, bi lahko bila dva izmed možnih vzrokov za slabše rezultate selitev postaje ali pa prevelika oddaljenost fenoloških objektov od meteorološke postaje, kar pomeni, da je lahko mikroklima tu nekoliko drugačna kot na mestu meteoroloških meritev.

Preglednica 42: Korelacijski koeficienti med opazovanimi in napovedanimi datumi nastopa fenofaz, izračunani z metodo navzkrižnega preverjanja modelov

Table 42: Correlation coefficients between observed and predicted dates of phenophases, calculated with cross validation method

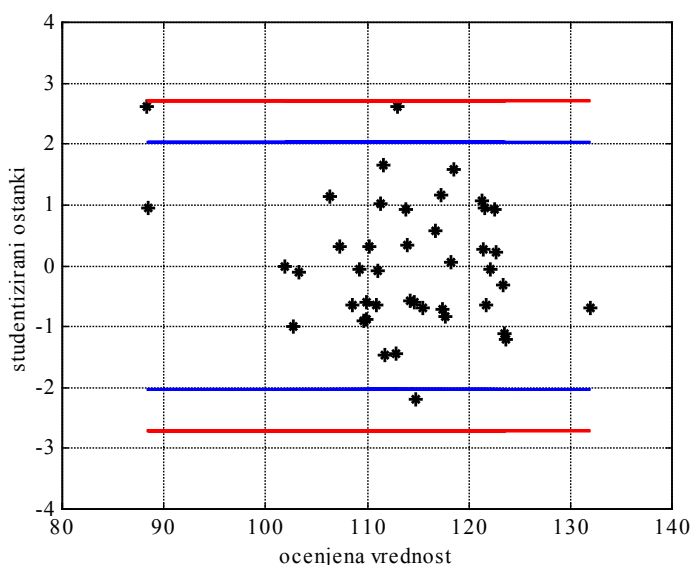
Rastlina	Oznaka fenofaze	CE	IB	LE	LJ	MB	MS	NM	RA
breza	C_{Bp}^1	0,89	0,90	0,83	0,93	0,91	0,85	0,91	0,94
breza	L_{Bp}^1	0,93	0,85	0,81	0,94	0,94	0,81	0,90	0,92
bukev	L_{Fs}^1	0,86		0,66	0,91	0,92		0,92	0,87
češplja	C_{Pd}^1	0,92	0,90	0,89		0,89	0,91	0,92	0,95
češplja	C_{Pd}^2	0,98	0,98	0,98		0,98	0,98	0,97	0,96
jablana	C_{Md}^1	0,87			0,89				
jablana	C_{Md}^2	0,96			0,97				
leska	C_{Ca}^2	0,86	0,96	0,90	0,99	0,96	0,93	0,98	0,91
lipa	C_{Tp}^1	0,91	0,84	0,70	0,95	0,87	0,90	0,91	0,94
lipa	L_{Tp}^1	0,91	0,91	0,68	0,92	0,83	0,83	0,89	0,89
pasja trava	C_{Dg}^1	0,88			0,97	0,92	0,94	0,92	0,98
regrat	C_{To}^1	0,89	0,93	0,81	0,95	0,89		0,91	0,82
robinija	C_{Rp}^2	0,87	0,94		0,94	0,81		0,88	
španski bezeg	C_{Sv}^2	0,95	0,91	0,80	0,96	0,92	0,92	0,80	0,94



Slika 23: Primerjava opazovanega in napovedanega časa nastopa polnega cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' v Mariboru

Figure 23: Comparison between observed and predicted values of full flowering dates for plum, cultivar 'Domača češplja' in Maribor

Na osnovi ostankov navzkrižnega preverjanja smo naredili analizo ostankov, in sicer studentiziranih ostankov, ki smo jih grafično prikazali. Kot primer smo na slikah 23 in 24 prikazali za postajo Maribor primerjavo dejanskih in izračunanih dnevvov nastopa polnega cvetenja pri 'Domači češplji' ter studentizirane ostanke navzkrižnega preverjanja modela. Korelacijski koeficient med opazovanimi in z modelom napovedanimi vrednostmi za polno cvetenje 'Domače češplje' je precej velik in znaša 0,98. Studentizirani ostanki so razporejeni v območju do $\pm 3\sigma$, torej je model sprejemljiv.



Slika 24: Studentizirani ostanki pri navzkrižnem preverjanju modela za napoved polnega cvetenja češplje, sorta 'Domača češplja' v Mariboru

Figure 24: Studentised residuals of cross validation method for prediction of full flowering of plum, cultivar 'Domača češplja' in Maribor

Analiza ostankov je pokazala, da so ostanki večji na vseh postajah v določenih letih in sicer v izrazito toplih letih (1961, 1966, 1989, 1990, 1994) ter v izrazito hladnih letih (1956, 1963, 1976, 1986, 1996). V teh ekstremnih letih so bile povprečne spomladanske temperature zelo visoke ali zelo nizke, kar se je odrazilo tudi na zgodnosti ali poznosti fenološke pomladi. Osamelcev iz analize nismo izključili, ker ekstremni datumi nastopa fenofaz odražajo dejanske vremenske razmere v določenem letu. Določene modele bi sicer z izključitvijo teh vrednosti lahko nekoliko izboljšali, vendar pa menimo, da je take razmere potrebno v modelih upoštevati, še posebej z vidika klimatskih sprememb, oziroma raziskav, ki kažejo, da bodo spremenjene vremenske razmere v prihodnosti vplivale predvsem na variabilnost časa pojavljanja fenofaz (Ahas in sod., 2000).

Poleg metode navzkrižnega preverjanja (niz 1955-1999) za vse postaje smo za postajo Celje (za to postajo razpolagamo s podatki za največ fenoloških objektov) preizkusili modele tudi na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000. Opazovane vrednosti za leto 2000 smo primerjali z napovedanimi vrednostmi regresijskih modelov, izdelanimi na osnovi podatkov za obdobje 1955-1999 (preglednica 43).

Preglednica 43: Primerjava z modeli napovedanih ter opazovanih datumov pojava obravnavanih fenofaz v Celju na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000

Table 43: Comparison of calculated and observed values of phenophases dates in Celje for independent data set for year 2000

Rastlina	Oznaka fenofaze	A	B	A-B
		napovedan datum (izražen kot julijanski dan)	opazovan datum (izražen kot julijanski dan)	razlika (število dni)
breza	C_{Bp}^1	96	99	-3
breza	L_{Bp}^1	103	103	0
bukev	L_{Fs}^1	102	104	-2
češplja	C_{Pd}^1	98	101	-3
češplja	C_{Pd}^2	106	104	+2
jablana	C_{Md}^1	114	110	+4
jablana	C_{Md}^2	115	115	0
leska	C_{Ca}^2	51	49	+2
lipa	C_{Tp}^1	143	139	+4
lipa	L_{Tp}^1	106	108	-2
pasja trava	C_{Dg}^1	128	128	0
regrat	C_{To}^1	92	94	-2
robinija	C_{Rp}^2	134	129	+5
španski bezeg	C_{Sv}^2	107	111	-4

Razlike med opazovanimi in napovedanimi vrednostmi za leto 2000 kažejo, da so napovedi za to leto pri vseh modelih dobre. Maksimalna razlika je pri modelu za robinijo, ki je napovedal čas cvetenja 5 dni kasneje kot pa je bil zabeležen dejanski dan nastopa fenofaze. Pri ostalih modelih so napovedi od štiri dni prezgodnje do štiri dni prekasne, v treh primerih pa se napovedani datumi ujemajo z dejanskimi. Pomlad leta 2000 je bila nadpovprečno topla, posledično je bil tudi fenološki razvoj znatno zgodnejši kot v povprečju, kljub temu pa so vsi modeli zelo dobro napovedali nastop fenofaz.

Na osnovi navzkrižnega preverjanja modelov za vse postaje ter preverjanja na neodvisnem setu podatkov za leto 2000 za postajo Celje lahko rečemo, da predstavljeni modeli dobro opisujejo dejansko pojavljanje fenofaz.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Proučevanje vpliva vremenskih razmer in drugih dejavnikov na rast in razvoj rastlin nam omogoča, da pri načrtovanju kmetijske proizvodnje v največji možni meri izkoristimo klimatske danosti in tako dosežemo optimalno kakovost in količino pridelka. Agrometeorološka dejavnost se z zbiranjem klimatskih in fenoloških podatkov neposredno vključuje v problematiko raziskovalnega dela na posameznih področjih kmetijstva, fenološki podatki pa poleg meteoroloških predstavljajo osnovo za proučevanje vpliva vremena in klime na razvoj rastlin. Napovedi razvoja rastlin, ki se na zunaj manifestira v fenoloških fazah, so lahko uporabne v kmetijstvu za ugotavljanje primernosti posameznega področja za gojenje določene kmetijske kulture oziroma sorte (predvsem z vidika toplotnih zahtev rastline), za načrtovanje setve in spravila pridelka, za aplikacijo gnojil ali fitofarmaceutskih sredstev. S pomočjo fenoklimatskih modelov lahko načrtujemo tudi rez, namakanje, zaščito pred pozebo, ugotavljamo nevarnost stresa zaradi suše, vročine, škodljivcev ali rastlinskih bolezni, proučujemo pa lahko tudi vpliv klimatskih sprememb na rastlinski svet. Napovedi fenološkega razvoja rastlin so lahko torej pomemben člen v sistemu za podporo odločanja v kmetijstvu.

Fenološki razvoj rastlin je odvisen od abiotskih in biotskih dejavnikov okolja. Med abiotskimi dejavniki okolja sta temperatura in dolžina dneva dva izmed najpomembnejših dejavnikov okolja, ki odločujoče vplivata na fenološki razvoj rastlin (Galan in sod., 2001; Huang in sod., 2001). Glowienka-Hense (1990) trdi, da lahko v lokalni skali severno atlantsko nihanje (NAO) pojasni do 60% variabilnosti temperature, posledično pa lahko z NAO indeksom pojasnimo tudi del variance v pojavu fenofaz (Post in Stenseth, 1999). Številne raziskave kažejo v zadnjih desetletjih trend zgodnejšega cvetenja rastlin in daljše vegetacijske dobe tako v Evropi kot tudi drugod po svetu (Ahas in sod., 2000; Beaubien in Freeland, 2000). Ugotovitev o vplivu agrometeoroloških dejavnikov na rast in razvoj rastlin ne moremo posplošiti, saj ista vrsta lahko različno reagira glede na področje gojitve oziroma v skladu s svojo genetsko variabilnostjo (Willits in Peet, 1988). Za področje Slovenije obsežnejše študije o vplivu različnih agrometeoroloških spremenljivk na fenologijo rastlin do sedaj še ni bilo narejene. Zato smo v naši nalogi želeli opredeliti kritične spremenljivke, ki najbolj vplivajo na variabilnost fenološkega razvoja v Sloveniji in na osnovi teh rezultatov izdelati modele, s katerimi bomo lahko napovedovali fenološki razvoj različnih rastlinskih vrst.

5.1.1 Analiza fenoloških podatkov

V analizo smo vključili 17 rastlin (31 različnih fenofaz) z osmih meteoroloških postaj, ki so hkrati tudi fenološke postaje, obravnavali pa smo obdobje 1955-2000. Preden smo uporabili fenološke podatke za izdelavo regresijskih modelov, smo naredili osnovno analizo le teh. Za vsako fenofazo na posamezni postaji smo izračunali povprečen dan nastopa fenofaze, najzgodnejši in najpoznejši dan nastopa fenofaze, razpon nastopa fenofaze, standardni odklon ter koeficient trenda. V skladu s pričakovanji so povprečni, prav tako pa tudi najzgodnejši in najpoznejši dnevi nastopov fenofaz vseh rastlin v Lescah in Ratečah kasnejši v primerjavi z ostalimi šestimi postajami, ki ležijo na manjših

nadmorskih višinah, isto je ugotovil za nekatere drevesne vrste tudi Šegula-Ilič (1990). Po podatkih iz literature je za vsakih 100 m večje nadmorske višine nastop fenofaze zakasnen v povprečju med 2 do 7 dni (Gorski in Jazurek, 1996; Walkovszky, 1998). Najzgodnejši in najpoznejši datumi nastopa fenofaz se pojavljajo na posameznih postajah v istih letih in sicer je analiza pokazala, da je fenološka pomlad nastopila zelo zgodaj v letih 1961, 1966, 1989, 1990 in 1994, v teh letih je bila temperatura spomladanskih mesecev nadpovprečno visoka. Zelo pozna pa je bila fenološka pomlad v letih 1956, 1963, 1976, 1986 in 1996, v katerih so bile temperature spomladanskih mesecev precej nižje od dolgoletnega povprečja. Glede na to, da se zimske in pomladne temperaturne razmere iz leta v leto precej razlikujejo, je razumljivo, da so tudi med najzgodnejšim ter najkasnejšim dnevom določene fenofaze velike razlike. Primerjava ekstremnih vrednosti datumov nastopa fenofaz olistanja breze, bukve, divjega kostanja, lipe ter smreke je pokazala, da povprečen variacijski razmik znaša od 29 do 39 dni. Podobne vrednosti smo dobili tudi za jesensko fenofazo rumenenja listja pri brezi, bukvi ter lipi, kjer je razpon med najzgodnejšim in najpoznejšim dnevom rumenenja v povprečju med 33 in 40 dni, standardni odklon tako za olistanje kot rumenenje pa je v povprečju znašal med 7 in 10 dni. Rezultati naše raziskave se ujemajo z izsledki Veseliča (1990) in Šegule-Iliča (1990), ki sta proučevala vpliv nekaterih meteoroloških spremenljivk na fenologijo gozdnega drevja. Za fenofaze cvetenja pri zgodaj cvetočih rastlinah (iva, leska, zvonček in pomladanski žafran) smo ugotovili zelo veliko variabilnost. Pri žafranu znaša povprečen razpon med najzgodnejšim in najkasnejšim dnevom cvetenja 50 dni, pri ivi in zvončku okrog 60 dni, največji pa je pri leski, kjer znaša kar 80 dni. Na veliko variabilnost časa cvetenja pri leski so opozorili tudi Ahas in sod. (2000). Zgodaj spomladi cvetoče rastline pričnejo z rastjo že pri temperaturah okrog 0°C, tako da že kratkotrajne otoplitve sredi zime lahko povzročijo cvetenje (Larcher, 1980). Pri rastlinah, ki zacvetijo kasneje, med minimalnimi in maksimalnimi vrednostmi ni tako velikega razpona, le-ta je istega velikostnega reda kot pri olistanju in rumenjenju listja in znaša v povprečju med 30 in 40 dni.

Za bukev, brezo in lipo smo izračunali tudi trajanje obdobja med olistanjem in rumenjenjem listja, ki ga številni avtorji uporabljajo kot kazalec za dolžino rastne dobe. Povprečno traja obdobje med olistanjem in rumenjenjem listja za omenjene tri drevesne vrste med 170 in 180 dni, med posameznimi vrstami pa ni bistvene razlike. V Ratečah je trajanje tega obdobja za približno mesec dni krajše, saj olistanje nastopi spomladi nekoliko kasneje, zaradi nižjih temperatur pa rumenenje listja v jeseni nastopi prej kot na ostalih postajah. Kljub temu, da v literaturi navajajo, da je razpršenost fenoloških podatkov okoli povprečne vrednosti za posamezno postajo večja od razpršenosti meteoroloških podatkov (Otorepec, 1995), je iz naše raziskave razvidno, da to drži le v primeru temperature zraka, ne pa tudi glede količine padavin. Glede na čas nastopa vsake posamezne fenofaze smo postaje razdelili v homogene skupine, posamezno skupino tvorijo postaje, pri katerih se datumi nastopa fenofaze statistično značilno ne razlikujejo. Pri večini fenofaz obstaja 4 do 5 homogenih skupin, postaja Rateče tvori v vseh primerih posebno homogeno skupino, v veliki večini primerov pa tudi postaja Lesce.

5.1.2 Časovna analiza pojavljanja fenofaz

Fenološka opazovanja nam dajejo možnost proučevanja odzivnosti rastlin na regionalne klimatske spremembe. Številne raziskave zadnjih let so pokazale, da višje temperature v

spomladanskem obdobju vplivajo na zgodnejši razvoj rastlin (Beaubien in Freeland, 2000; Menzel, 2000). Za vse izbrane fenofaze ter postaje smo za obravnavano obdobje izračunali časovne trende (linearni trend), ki smo jih v številu dni na deset let ovrednotili kot negativni trend, pozitivni trend ali pa primere, ko trenda ni bilo. Za fenofazo cvetenja (začetek oziroma polno cvetenje) ni nobenega primera, da bi se cvetenje pojavljalo kasneje, število primerov, ko je trend negativen (zgodnejše cvetenje) pa je približno enako kot število primerov, ko trend ne obstaja. Zgodnejše cvetenje kažeta iva in leska in sicer okrog 5 dni/dekado, cvetenje ostalih rastlin pa nastopi med 1,3 do 3,6 dni/dekado zgodneje kot na začetku obravnavanega obdobja. Tudi analiza trenda za olistanje drevesnih vrst kaže, da fenofaza olistanja nastopa zadnja leta zgodneje in sicer okrog 2 dni/dekado. Velikostni red sprememb je primerljiv z izsledki ostalih avtorjev, ki so delali analize za različna področja Evrope in Amerike. Beaubienova in Freeland (2000) sta za cvetenje topola v Alberti izračunala koeficient trenda $-2,7$ dni/dekado, Menzel-ova (2000) povprečen koeficient trenda $-2,1$ dni/dekado za fenofaze olistanja in cvetenja za 12 naravnih regij v Evropi, Ahas in sod. (2000) pa poročajo, da je nastop pomladanskih fenofaz v Estoniji v zadnjih osemdesetih letih zgodnejši v povprečju za 8 dni, spremembe pa so izrazitejšje v zadnjih štiridesetih letih. Sparks in sod. (2000) v svoji raziskavi o korelacijah med fenologijo in temperaturami zraka zaključujejo, da bo nastop pomladanskih in poletnih fenofaz postopoma vedno ranjši v skladu s klimatskimi otoplitvami, predvidevanja o najzgodnejših datumih cvetenja določene rastlinske vrste pa naj bi temeljila na proučevanju fenologije te vrste na najjužnejšem področju njene razširjenosti.

Za jesensko fenofazo rumenjenja listja prevladuje pozitiven trend, to pomeni, da listje zadnja leta rumeni kasneje, koeficient trenda pa znaša 2 do 3 dni/dekado, podobne rezultate so predstavili tudi Menzlova (2000), ki je za jesenske fenofaze ugotovila povprečen trend $+1,6$ dni na dekada, Chmielewski in Rötzer (2000) ter Ahas in sod. (2000). Na podaljšanje rastne sezone vplivajo višje temperature, ki rastlinam omogočajo podaljšano rast še v jesenskem času (Chmielewski in Rötzer, 2000). Med izračunanimi trendi izstopa postaja Murska Sobota, ki za fenofazi rumenjenja listja breze in lipe (bukve tu ne opazujejo) kaže kot edina postaja negativen trend. Glede na to, da je dolgoletni trend temperature za to postajo pozitiven tako kot na vseh ostalih postajah, domnevamo, da je vzrok sprememba lokacije postaje, ki deluje na novi lokaciji (srednja kmetijska šola Rakičan) od leta 1985 dalje. Postaja ima po podatkih agrometeorološkega oddelka precej visoko podtalnico, kar gotovo vpliva na temperaturo tal. Pogosto majhne razlike v vlažnosti tal zaradi drugačnega tipa tal pospešijo ali zavirajo cvetenje, olistanje ali odpadanje listja, pomembna pa je tudi mikrolokacija, na kateri opazovalec beleži pojav fenofaz.

Na osnovi podatkov o času olistanja ter rumenjenja listja pri brezi, bukvi ter lipi smo izračunali tudi trend v dolžini obdobja (število dni) med obema fenofazama. V več kot polovici primerov je ta trend pozitiven, kar pomeni, da se pri omenjenih drevesnih vrstah rastna doba podaljšuje. Koeficient trenda znaša okrog 2 dni/dekado, podobne vrednosti so ugotovili za podaljšanje rastne dobe v Evropi tudi drugi avtorji; povišanje povprečne temperature spomladanskih mesecev za 1°C pa je povezano s podaljšanjem rastne sezone za približno 5 dni (Menzel, 2000; Chmielewski in Rötzer, 2000). Tako kot pri fenofazah olistanja za brezo in lipo je tudi pri dolžini obdobja med olistanjem in rumenjenjem lipe

izjema postaja Murska Sobota, pri kateri je trend negativen, domnevne vzroke za to pa smo navedli že zgoraj.

Na osnovi analize časovnega trenda za obravnavane postaje (ki predstavljajo podnebno različne dele Slovenije) in fenofaze lahko trdimo, da s pozitivnim trendom temperature zraka lahko dobro pojasnimo negativne trende spomladanskih fenofaz. Jesenske fenofaze kažejo prevladujoč pozitiven trend, prav tako dolžina obdobja med olistanjem in rumenenjem treh drevesnih vrst. Rezultati so skladni z raziskavami drugih avtorjev, ki so za več kot polovico naravnih regij, ki predstavljajo vso Evropo, ugotovili trend podaljšanja rastne sezone, predvsem zaradi zgodnejših pomladi (Ahas in sod., 2000; Menzel, 2000; Koch, 2000).

Kakšne pa so morebitne posledice zgodnejšega cvetenja oziroma daljše rastne dobe rastlin? V zvezi s tem zaenkrat lahko le predvidevamo o raznih možnostih: pričakujemo lahko povečano produkcijo, razen v primerih, ko bi zgodnejše cvetenje ne sovpadalo s fenologijo opraševalnih žuželk. V zvezi z zgodnejšim cvetenjem in olistanjem so potrebne raziskave glede rastlinskih sestojev in njihove sposobnosti prilagoditve novim razmeram. Hitrejši razvoj rastlin lahko pomeni prednost glede odpornosti rastlinskim škodljivcem in boleznim, po drugi strani pa tople zime omogočajo preživetje večjemu številu škodljivcem ter eventualno pojav novih, do sedaj toplejšim razmeram prilagojenih bolezni ali škodljivcev. Prav tako zgodnejši razvoj pomeni večjo nevarnost glede spomladanskih pomez, poleg tega lahko pride do povečane ali zmanjšane nevarnosti vodnega stresa.

5.1.3 Korelacije med nastopi fenofaz in agrometeorološkimi spremenljivkami

Vsakoletni nastop določene fenofaze je v veliki meri temperaturno pogojen, datumi pojava fenofaz nam torej odražajo toplotne razmere obravnavane lokacije. S korelacijsko analizo smo proučevali povezanost med dnevi nastopa fenoloških faz in srednjimi mesečnimi, srednjimi dvomesečnimi in srednjimi tromesečnimi temperaturami. Korelacijski koeficienti so podani v preglednici 7 ter prilogah F1 do F7. Povprečna decembrska temperatura preteklega leta ni bila v nobenem primeru v korelaciji z nastopom spomladanskih fenoloških faz v naslednjem letu, v Ratečah pa velja to tudi za januarsko temperaturo tekočega leta.

V splošnem so koeficienti za mesece blizu povprečnega dneva cvetenja in olistanja negativni, kar nakazuje, da višje temperature pospešujejo zgodnejše cvetenje oziroma olistanje. Primerjava korelacij je pokazala, da so korelacije tesnejše, če uporabimo povprečja temperatur dveh ali treh zaporednih mesecev pred cvetenjem; takšne korelacije uporabljajo tudi v drugih fenoloških raziskavah (Ahas in sod., 2000; Sparks in sod., 2000). Vrednost povprečnega korelacijskega koeficienta med nastopom fenofaz cvetenja in povprečnimi temperaturami zraka znaša približno -0,7 do -0,8; le nekoliko manjše so vrednosti koeficientov za fenofaze olistanja. Chmielewski in Rötzer (2001), ki sta proučevala povezanost med olistanjem štirih drevesnih vrst in povprečno temperaturo zraka od februarja do aprila za 12 naravnih regij v Evropi, sta določila povprečno vrednost korelacijskega koeficienta -0,83, Ahas in sod. (2000) pa so podali nekoliko večji razpon za korelacijske koeficiente (-0,6 do -0,8) med nastopom večjega števila spomladanskih fenofaz ter povprečnimi temperaturami dva do tri mesece pred nastopom fenofaze.

Za nastop jesenskih fenofaz smo ugotovili manjše korelacije s temperaturo zraka, korelacija so pozitivne, kar pomeni, da višje temperature zakasniijo konec rastne sezone oziroma nakazujejo potrebo po vernalizaciji. Primerjave korelacij med temperaturo zraka in nastopom fenofaz so tudi pri drugih avtorjih pokazale, da so povezave šibkejšje pri jesenskih fenofazah v primerjavi s spomladanskimi (Chmielewski, 2001; Menzel, 2000). Rumenenje listja v jeseni je kompleksen proces, na katerega poleg temperature precej vpliva tudi dolžina dneva, prve jesenske slane. Vsi ti dejavniki okolja skupaj z gensko zasnovno rastline vplivajo na začetke procesa staranja, ki so povezani z nastankom in premeščanjem rastlinskih rastnih regulatorjev.

V severnih geografskih širinah določa klimatsko variabilnost v glavnem severno atlantsko nihanje, še posebej v zimskih mesecih. Pogosto ga opisujemo z indeksom severno atlantskega nihanja (NAOI), podaja pa nam standardizirano razliko zračnega pritiska na morskem nivoju med dvema postajama, ki predstavljata centra nizkega in visokega zračnega pritiska. Kot posledica razlik v pritisku nastanejo obsežna gibanja toplih in vlažnih zračnih mas iznad Atlantika proti Evropi, v letih s pozitivnim NAOI imamo pri nas bolj tople in suhe zime kot v letih z negativnim NAOI. NAOI je torej močno koreliran s temperaturo zraka ter padavinskimi razmerami in tako posredno seveda tudi s časom nastopa fenoloških faz. V naši nalogi smo analizirali vpliv severno atlantskega nihanja na pojav pomladanskih fenoloških faz v Sloveniji. Najprej smo s korelacijsko analizo določili povezanost zimskega NAOI ($NAOI_{zim}$) s povprečno zimsko temperaturo zraka (december-marec). Izkazalo se je, da je korelacija za vseh osem postaj statistično močno značilna, povprečna vrednost korelacijskega koeficienta pa je znašala +0,58. Rezultati naše analize se ujemajo z izsledki Berganta (2002) ter Skaar-a (1999), ki sta za področje Slovenije ugotavljala vpliv severno atlantskega nihanja na temperaturne in padavinske razmere v zimskem času, posredno pa tudi na rastlinsko fenologijo. S korelacijsko analizo smo ugotovili, da z variabilnostjo $NAOI_{zim}$ lahko pojasnimo največ variabilnosti v času nastopa fenofaz pri zgodaj cvetočih rastlinah kot so leska, iva in regrat (preglednica 8), kar je razumljivo, saj na čas cvetenja teh rastlin močno vplivajo že januarske in februarske temperature, ki so najmočnejše korelirane z $NAOI_{zim}$. Korelacije so manjše za fenofaze, ki nastopijo pozno spomladi. Za postajo Rateče je značilna relativno velika povezanost med $NAOI_{zim}$ ter temperaturo zimskih mesecev (+0,60), po drugi strani pa na čas nastopa spomladanskih fenofaz $NAOI_{zim}$ v večini primerov ne vpliva. V Ratečah, ki imajo ostrejšo klimo od ostalih postaj, obenem pa tudi višjo nadmorsko višino, nastopijo fenofaze v povprečju dva do tri tedne kasneje kot na ostalih postajah. Fenološki razvoj je tu koreliran bolj s temperaturami pozno spomladanskih mesecev, katerih pa $NAOI_{zim}$ ne odraža tako močno kot temperature zimskih mesecev. Vrednosti korelacijskih koeficientov med nastopom fenofaz ter $NAOI_{zim}$ so v vseh primerih negativne, velike pozitivne vrednosti $NAOI_{zim}$ se odražajo torej v zgodnejšem pojavu fenofaz in obratno. NAOI za zimske mesece v Sloveniji nam torej pojasni dovolj velik del variabilnosti v času nastopa spomladanskih fenofaz, da ga je smiselno vključiti kot neodvisno spremenljivko v postopek multiple regresije pri izdelavi fenoklimatskih modelov.

Tako kot za temperaturo smo tudi za padavine ugotavljali povezave z nastopom fenofaz. Vrednosti korelacijskih koeficientov, ki so podane v preglednici 8, so majhne (<0,44), nobena povezava pa ni statistično močno značilna. Korelacije so povsod razen pri dveh

jesenskih fazah pozitivne, večja količina padavin pomeni zakasnitev fenofaze, pri čemer je potrebno upoštevati, da so ob oblačnem in deževnem vremenu spomladi tudi temperature nižje in gre torej za interakcijo vpliva temperatur in padavin. Odvisnost fenološkega razvoja od padavin pride do izraza predvsem na področjih, kjer je v času vegetacije voda omejujoč dejavnik. Za področje Slovenije obstaja nekaj raziskav, ki vključujejo tudi proučevanje vpliva padavin na fenologijo gozdnega ter sadnega drevja. Veselič (1990) ter Šegula-Ilič (1990) sta ugotovila, da na čas olistanja breze, bukve, hrasta ter smreke v naših razmerah ne vpliva statistično značilno količina padavin, Bergant in sod. (2001) pa so isto ugotovili za sadno drevje v Ljubljani. Pri nas v spomladanskem času količina rastlinam dostopne vode ni problematična (razen seveda v posameznih izjemnih primerih oziroma letih), tako da količina padavin, tudi če bi le-ta v ekstremnih razmerah vplivala na čas pojava fenofaz, v danih razmerah na čas cvetenja in olistanja ne vpliva statistično značilno.

5.1.4 Določitev temperature praga

Za prehod iz ene v drugo fenološko fazo v svojem življenjskem krogu potrebujejo rastline določeno količino toplote, namesto koledarskega časa uporabljamo v fenologiji pogosto fiziološki ali termalni čas, ki temelji na akumuliranih toplotnih enotah, potrebnih za nastop določene fenofaze. Kritična vrednost za izračun akumulirane toplote je izbira pravilne spodnje temperature praga (TP), ki smo jo v naši raziskavi določili statistično, uporabili pa smo metodo najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur (enačba (1)) od 1. januarja v tekočem letu dalje. Pri določanju dneva prestopa dejanske spomladanske TP velja, da nastopi TP z dnem, v katerem se povprečna dnevna temperatura, ki je bila pred tem ves čas nižja od določene TP, dvigne nad TP. Pred nastopom TP povprečna dnevna temperatura niha okrog TP, kasneje pa se dvigne in le izjemoma pade pod TP. Preizkusili smo dve dolžini obdobja, ko mora biti povprečna dnevna temperatura zaporedoma višja od TP (5 dni in 10 dni). Izračuni so pokazali, da je primernejši kriterij za nastop dejanskega temperaturnega praga, kadar je povprečna dnevna temperatura zraka vsaj 5 dni zaporedoma višja od izbrane TP. Temperatura kasneje sicer za krajši čas še vedno lahko pade pod TP, vendar pa to ne vpliva na dejstvo, da so se fiziološki procesi v rastlini že pričeli, pride lahko do upočasnitve rasti ali začasnega zastoja zaradi nizkih temperatur. Preizkusili smo niz možnih temperatur v območju med -5°C ter $+10^{\circ}\text{C}$. V preglednici 9 so podane izračunane TP za spomladanske fenofaze na vseh obravnavanih postajah. Za rastline, pri katerih nastopi fenofaza cvetenja relativno zgodaj spomladi (iva, leska, mali zvonček, regrat, pomladanski žafran), je večina izračunanih TP negativnih: najnižje TP smo določili za fenofazo cvetenja leske (povprečje postaj okrog -3°C), za ostale rastline so TP med -3°C in $+2^{\circ}\text{C}$. Tudi nekatere druge raziskave potrjujejo naše izračune, da na zgodnejši pojav fenofaz na začetku pomladi statistično značilno vplivajo lahko že negativne povprečne dnevne temperature zraka. Wielgolaski (1999) je tako v svoji raziskavi izračunal TP za nastop cvetenja leske $-2,6^{\circ}\text{C}$, ive $-4,5^{\circ}\text{C}$ in čremse $-5,9^{\circ}\text{C}$. Larcher (1995) navaja, da lahko fotosinteza poteka pri zgodaj cvetočih geofitih ter alpskih rastlinah tudi pri negativnih temperaturah, oziroma, da se stomatalni transport ustavi med 0°C in -5°C . Obenem pa je potrebno opozoriti, da negativna povprečna dnevna temperatura zraka lahko pomeni, da je določen del dneva temperatura zraka morda celo pozitivna in takrat v rastlini procesi rasti in diferenciacije potekajo hitreje, dejanska temperatura rastlinskega tkiva pa je lahko višja od temperature zraka.

Za računanje termalnega časa za nastop olistanja pri brezi, bukvi in lipi je najprimernejša TP med 3°C in 4°C, izračunani pragovi so med posameznimi postajami precej izenačeni. Nekoliko višje TP smo določili za ostale fenofaze, ki nastopijo kasneje, TP pa v glavnem nihajo med 5°C in 7°C. Rezultate naših izračunov smo primerjali z izračuni drugih avtorjev za posamezne iste rastline (breza, bukev, smreka, leska, iva, robinija, jablana, češplja), primerjave kažejo, da se vrednosti naših izračunanih TP dobro ujemajo s podatki iz literature (Gorski in Jazurek, 1996; Snyder in sod., 1999; Wielgolaski, 1999). Poudariti moramo še enkrat, da so TP določene s statistično metodo, ker določitev temperature praga na osnovi fizioloških parametrov rastline zahteva dolgotrajne in obsežne poljske poskuse.

5.1.5 Termalni in fototermalni čas, potreben za nastop fenofaz

Na osnovi izračunanih TP smo izračunali vsote efektivnih temperatur (V_{ef}) in vsote aktivnih temperatur (V_{akt}) ($TP=0^{\circ}C$), potrebnih za nastop obravnavanih fenofaz na vseh postajah. Vsote aktivnih temperatur smo računali na dva načina: iz povprečnih dnevnihih temperatur zraka (V_{akt}^{pov}) ter iz minimalnih dnevnihih temperatur zraka (V_{akt}^{min}). Ker smo vsote računali z namenom, da bi jih uporabili za fenološke prognoze, smo za izračun uporabili obdobje od 1. januarja do datuma, ki je za pet dni bolj zgođen kot nastop fenofaze v posameznem letu. Vrednosti V_{akt}^{pov} , podane v preglednici 11, kažejo, da so V_{akt}^{pov} v Ratečah manjše kot na ostalih postajah, največje vsote V_{akt}^{pov} pa so največkrat dosežene v Ilirski Bistrici in Ljubljani. Rezultati naše raziskave se ujemajo z rezultati drugih raziskav, v katerih so dokazali, da ista rastlinska vrsta potrebuje v toplejših krajih za svoj razvoj večjo vsoto toplotnih enot kot v hladnejših predelih (Perry in sod., 1986; Šegula-Ilič, 1990). Na višje V_{akt}^{pov} vpliva seveda tudi datum prestopa $TP=0^{\circ}C$, ki nastopi v Ratečah v povprečju okrog mesec dni kasneje kot na ostalih postajah (Dečman, 1995). Variabilnost V_{akt}^{pov} je med leti precej velika (med 10% in 25%), večja je za zgodnejše fenofaze, medtem ko je pri kasnejših fenofazah (primer je rumenenje listja) precej manjša. Kljub trditvam, da naj bi bila vsota akumuliranihih toplotnih enot, potrebna za razvoj določene rastlinske vrste, konstantna (Zalom in sod., 1983), pa so tudi številni drugi avtorji v svojih raziskavah ugotovili veliko variabilnost temperaturnih vsot med leti (Spano in sod., 1999; Šegula-Ilič, 1990; Veselič, 1990). Eden izmed možnih vzrokov za takšna odstopanja med leti je ta, da smo termalni čas računali za vseh 45 let glede na isto TP, ki pa se lahko tudi med posameznimi leti razlikuje. Poleg tega je možno, da se iz leta v leto spreminja tudi začetni datum, s katerim pričenjamo seštevati toplotne enote (Wielgolaski, 1999). Pri trajnicah, npr. pri gozdnem ali sadnem drevju, so dodatni dejavniki, ki vplivajo na način odzivanja rastline na vremenske razmere v danem letu, vremenske razmere v preteklem letu pred olistanjem, hudi stresi (suša, vročinski stres, toča, pozeba) pa lahko vplivajo na rast in razvoj določene prizadete rastline celo več zaporednih let. Šegula-Ilič (1990) je ugotovil zaviralni vpliv višjih efektivnih temperatur zraka septembra in oktobra prejšnjega leta na olistanje nekaterih drevesnih vrst (bukve, hrasta in breze), enako tudi Veselič (1990) za bukev. To je v skladu z dejstvom, da je pri mnogih rastlinah potrebno določeno obdobje nizkih temperatur za prekinitev dormance (Larcher, 1995). Pri izračunu vsote aktivnih temperatur iz minimalnih dnevnihih temperatur zraka (V_{akt}^{min}) smo izpustili postajo Lesce, za katero teh podatkov ni. Primerjava je pokazala, da so V_{akt}^{min} v povprečju manjše od V_{akt}^{pov} za

60% do 80% v pomladanskem času, v jesenskem pa 40% do 45%. Ker je minimalna temperatura ekstremna vrednost, je razumljivo, da je bila variabilnost V_{akt}^{min} med leti še večja, kot če smo računali vsoto iz povprečnih dnevni temperatur.

Korelacijska analiza je pokazala, da so povprečne vrednosti korelacijskih koeficientov med vsotami aktivnih temperatur ter nastopi fenofaz relativno majhne ($<0,5$) in spremenljivih predznakov, zato posplošenega zaključka za vse rastline ne moremo narediti. Pozitivne korelacije pomenijo dejstvo: če nastopi fenofaza pozneje, bo vsota aktivnih temperatur večja zaradi višjih povprečnih temperatur zraka. Negativne korelacije pa nakazujejo, da na rast in razvoj rastlin vpliva tudi globalno obsevanje – če nastopi določena fenofaza kasneje, pomeni, da je v tem času energija globalnega obsevanja lahko že za 30% do 40% večja in tako delno 'nadomesti' manjše vsote aktivnih temperatur. Šegula-Ilič (1990) je ugotovil, da se vpliva povprečnih vrednosti aktivnih temperatur in energije globalnega obsevanja na dolžino razdobja do nastopa določene fenološke faze dopolnjujeta. Pri nekaterih zgodnjih fenofazah pa je pomemben proces, ki poteka v rastlinah, translokacija, razvoj na začetku je precej odvisen od zaloga, ki jih je nakopičila rastlina v prejšnjem letu, vsekakor pa je transport do določene mere temperaturno odvisen.

Poleg V_{akt}^{pov} in V_{akt}^{min} smo računali tudi vsote efektivnih temperatur (V_{ef}) na osnovi statistično določenih TP za vsako posamezno fenofazo oziroma posamezno postajo. Tudi tu je značilna velika variabilnost med leti in postajami, ki nam nakazuje, da je potrebno poleg vpliva temperature upoštevati tudi druge dejavnike fenološkega razvoja. Vzrok za veliko različnost temperaturnih vsot glede na rastlinske vrste in lokacije so individualne biološke razlike med rastlinami. Te se odražajo v različnih načinih reagiranja določene rastline na meteorološke razmere, ki so opisane tudi s številnimi parametri, ki jih v naši raziskavi nismo upoštevali. Vrednosti koeficientov variabilnosti (KV) za V_{ef} znašajo med 12% in 30%, povprečen KV za fenofaze cvetenja in olistanja pa je 18%. Razlike v variabilnosti vsot med posameznimi fenofazami oziroma rastlinami kažejo, da določene rastline bolj burno reagirajo na spremembe temperature v njihovem okolju. Takšne rastline nam lahko služijo kot indikatorji sprememb klime, še posebej so od temperature zraka odvisne fenofaze cvetenja. Primerjava korelacijskih koeficientov V_{ef} ter V_{akt}^{pov} in V_{akt}^{min} s časom pojava fenofaz je pokazala, da nam V_{ef} pojasni večji delež variabilnosti fenološkega razvoja. Tudi tu so vrednosti koeficientov spremenljivih predznakov, v povprečju med 0,50 do 0,65, največje vrednosti pa smo izračunali za lesko (0,75). Ker je poleg temperaturnih razmer dolžina dneva najpomembnejši dejavnik razvoja rastlin, smo za postajo Ljubljana izračunali tudi fototermalni čas (P_t) z uporabo enačbe (22), ki poleg temperature zraka upošteva tudi dolžino dneva. Pri tem smo upoštevali temperaturo samo svetlega dela dneva, ko v rastlini lahko poteka proces fotosinteze. Izračunan P_t za Ljubljano je manjši od vsote aktivnih temperatur sorazmerno glede na dolžino dneva. Koeficienti variabilnosti za izračunan P_t so veliki pri treh najzgodnejših fenofazah, to je cvetenju leske, pomladanskega žafrana ter malega zvončka, pri katerih je tudi nastop fenofaze zelo variabilen. Zgodnje cvetoče rastline potrebujejo za začetne fenofaze zelo majhne vsote akumulirane toplote, zacvetijo pa lahko že ob krajših otoplitvah sredi zime. Izračunan fototermalni čas za kasnejše fenofaze kaže manjšo variabilnost, vsote pa naraščajo sorazmerno z dolžino obdobja med 1. januarjem in dnevom nastopa fenofaze. Tako kot za termalni čas smo tudi za fototermalni čas naredili korelacijsko analizo s časom nastopa

fenofaz (priloga G2). Pri vseh fenofazah so bile vrednosti korelacijskih koeficientov večje kot v primeru uporabe termalnega časa, razen pri regratu, kjer imata isto vrednost. Uporaba fototermalnega časa je torej pokazala, da z njo lahko statistično značilno izboljšamo napoved fenološkega razvoja.

5.1.6 Regresijski modeli za napoved nastopa fenofaz

V podrobnejši obravnavi odvisnosti časa nastopa različnih fenofaz od meteoroloških dejavnikov okolja smo uporabili metodo multiple linearne regresije. Uporabili smo statistični program STATGRAPHICS Plus 4.0. V analizo smo vključili spremenljivke na osnovi predhodne korelacijske analize. Z metodo regresije po korakih (stepwise selection) smo ugotavljali, katere pojasnjevalne spremenljivke nam pojasnijo dovolj velik del variabilnosti odvisne spremenljivke (v našem primeru je to čas nastopa fenofaze), da jih je smiselno vključiti v regresijski model. Dostikrat se namreč zgodi, da kljub relativno tesni korelaciji med odvisno spremenljivko ter pojasnjevalno spremenljivko, (če upoštevamo le ti dve spremenljivki), ob upoštevanju tudi ostalih pojasnjevalnih spremenljivk, lahko takšna spremenljivka iz modela izpade. Za napoved fenološkega razvoja rastlin smo tvorili fenološke ter fenoklimatske modele. S posameznim fenološkim modelom smo poskušali napovedati nastop določene fenofaze za neko rastlino glede na datum nastopa predhodnih fenofaz iste rastline ali pa glede na datume predhodnih fenofaz drugih rastlin. Modele smo tvorili za 14 različnih fenofaz (oziroma 10 različnih rastlin), pri katerih napovedi časa pojava lahko uporabimo za določene ukrepe tako z vidika agrometeorologije, medicinske meteorologije, v farmacevtski industriji ali pa v raziskavah v zvezi s spremembami klime. Korelacijski koeficienti med posameznimi zaporednimi fenofazami iste rastline (začetek cvetenja-polno cvetenje, olistanje-cvetenje) ali med fenofazami različnih rastlin, ki si sledijo v kratkih časovnih presledkih, so v bili v nekaterih primerih precej veliki (priloge H1 do H8). Kot sprejemljive smo obravnavali tiste modele, s katerimi smo lahko pojasnili vsaj polovico variabilnosti v času nastopa fenofaze. V posamezen fenološki model sta največkrat vključeni ena ali dve pojasnjevalni spremenljivki, največje število pojasnjevalnih spremenljivk v modelu pa je bilo pet. Menimo, da uporaba modelov, ki vsebujejo več kot tri različne fenološke parametre, ni smiselna, saj nam dodatne spremenljivke ne pojasnijo bistveno večjega deleža variabilnosti. Analiza je pokazala, da kot pojasnjevalna spremenljivka nastopa v modelih največkrat breza, sledita ji regrat in divji kostanj. Za te tri rastline lahko trdimo, da so v naših razmerah fenološki indikatorji, to pomeni, da lahko na osnovi časa njihovega razvoja še posebej uspešno napovedujemo razvoj ostalih fenoloških faz. Tudi nekatere druge raziskave so pokazale, da lahko cvetenje sadnega drevja v Sloveniji napovedujemo na osnovi podatkov o fenofazah breze, divjega kostanja, pa tudi lipe in bukve (Kajfež-Bogataj in Bergant, 1999; Strajnar, 1997), uporaba fenoloških podatkov samoniklih rastlin za fenološke modele pa je splošno razširjena (Cenci in Ceschia, 2000). Za napovedovanje fenološkega razvoja so najprimernejše najzgodnejše fenofaze (npr. olistanje navadne breze, cvetenje regrata...). Faz, ki so kasnejše od napovedovane, v napovedih ne moremo uporabiti, lahko pa tak fenološki podatek za določeno rastlino uporabimo kot nadomestilo manjkajočega podatka primerjalne vrste, če obstaja med njima močna korelacija. Za vse fenološke modele smo podali poleg pojasnjevalnih spremenljivk ter njihovih regresijskih koeficientov tudi delež pojasnjene variabilnosti in število dni, v koliko naprej lahko z modelom napovemo nastop fenofaze. Glede na to, da smo v postopek multiple regresije vključili različno število

pojasnevalnih spremenljivk za posamezne postaje, smo računali prilagojen koeficient determinacije. Največ pojasnjene variabilnosti (preko 90%) so nam dali modeli za napoved polnega cvetenja 'Domače češplje' in 'Bobovca', ki kot pojasnjevalne spremenljivke vsebujejo tudi predhodne fenofaze istih rastlin. Zato so tudi napovedi možne le 3 do 4 dni vnaprej, kar pa menimo, da je z vidika priprave na določene agrometeorološke ukrepe še dovolj. Za napovedi fenološkega razvoja na osnovi predhodnih fenofaz drugih rastlin je delež pojasnjene variabilnosti precej manjši in znaša med 70% do 79% za začetek cvetenja 'Domače češplje', polno cvetenje španskega bezga ter olistanje breze, med 60% in 69% za začetek cvetenja 'Bobovca', regrata in lipe, polno cvetenje leske ter olistanje lipe, med 50% in 59% variabilnosti v času nastopa fenofaz pa smo lahko pojasnili z modeli za napoved začetka cvetenja breze in pasje trave, polnega cvetenja robinije ter olistanja buke. Multiple regresijske modele je z vključevanjem podatkov o fenofazah samoniklih rastlin možno oblikovati, modeli so s statističnega vidika ustrezni in primerni za uporabo, uporaba čistih fenoloških modelov pa je smiselna le v primerih, če za določeno fenološko postajo nimamo tudi podatkov o meteoroloških dejavnikih oziroma za interpolacijo fenoloških podatkov.

Obravnavane fenološke postaje smo izbrali tako, da so hkrati tudi meteorološke postaje, z namenom, da smo v posamezne fenoklimatske modele vključili poleg fenoloških podatkov tudi nekatere meteorološke spremenljivke. Na osnovi korelacijskih analiz, ki smo jih predstavili v poglavjih 4.2 do 4.6, smo v multiplo regresijsko analizo vključili povprečne mesečne, dvomesečne in tromesečne temperature zraka, povprečne mesečne količine padavin, termalni čas (vsote aktivnih in efektivnih temperatur), indeks severno atlantskega nihanja in fototermalni čas samo za postajo Ljubljana. Od 90.tih možnih fenoklimatskih modelov smo lahko tvorili 75 takšnih, s katerimi smo lahko pojasnili vsaj polovico variabilnosti v času nastopa fenofaz na osnovi fenoloških in meteoroloških podatkov. Osem modelov vključuje samo fenološke spremenljivke, to so v glavnem modeli za napovedi polnega cvetenja sadnega drevja, pri katerih smo kot pojasnjevalno spremenljivko uporabili fenofazo začetek cvetenja. Sedem modelov pa je čistih meteoroloških, le-ti napovedujejo nastop fenofaze samo na osnovi meteoroloških spremenljivk, v večini primerov so to povprečne mesečne temperature zraka ali termalni čas. Delež pojasnjene variabilnosti časa pojava fenofaz s fenoklimatskimi modeli znaša v povprečju nad 0,80, najmanjše deleže pojasnjene variabilnosti pa smo ugotovili pri olistanju breze in cvetenju lipe. V vseh fenoklimatskih modelih se kot pojasnjevalna spremenljivka pojavlja termalni čas oziroma za postajo Ljubljana fototermalni čas. Termalni čas, ki smo ga v modele vključili v treh različnih oblikah – kot vsoto aktivnih temperatur, izračunano iz povprečnih dnevni temperatur zraka (V_{akt}^{pov}) ali iz minimalnih temperatur zraka (V_{akt}^{min}) ter kot vsoto efektivnih temperatur zraka (V_{ef}) – je v modelih največkrat vključen kot spremenljivka V_{akt}^{pov} ali kot V_{ef} , kar kaže na to, da je primerna uporaba obeh metod za izračun termalnega časa. Vsote aktivnih temperatur, ki smo jih izračunali iz minimalnih dnevni temperatur, so bile statistično značilno povezane z nastopom fenofaz le v posameznih primerih, nismo pa mogli ugotoviti neke splošne značilnosti, da bi bile minimalne temperature pomembnejše pri določeni rastlini ali fenofazi. Fototermalni čas, ki smo ga izračunali samo za postajo Ljubljana, nastopa kot pojasnjevalna spremenljivka v vseh modelih za to postajo. Primerjava pojasnjene variabilnosti z modeli, v katere smo vključili termalni ali pa fototermalni čas, je pokazala,

da s fototermalni časom v vseh modelih lahko pojasnimo več variabilnosti. Razlika je bila ponekod sicer minimalna (samo 1% ali 2%), v večini modelov pa tolikšna, da je vključitev fototermalnega časa v obravnavane fenoklimatske modele upravičena.

Primerov, ko so bile povprečne mesečne padavine vključene v modele po metodi regresije po korakih v postopku multiple linearne regresije je le šest, gre pa za 5 različnih modelov na različnih postajah. Obravnavane fenofaze se pojavljajo v spomladanskem času, ko so pri nas zaloge vode za normalen razvoj rastlin na splošno zadostne, količina rastlinam dostopne vode torej ni omejitveni dejavnik rasti. Tudi ostale raziskave o vplivu padavin na fenološki razvoj v Sloveniji so potrdile, da količina padavin ne vpliva značilno na nastop spomladanskih fenofaz (Bergant in sod., 2001; Šegula-Ilič, 1990; Veselič, 1990). Precej drugačno sliko pa bi seveda lahko dobili, če bi obravnavali kasnejše fenofaze na območjih, ki imajo v poletnih mesecih negativno vodno bilanco. Pri proučevanju vpliva padavin pa je potrebno upoštevati tudi mesebojno interakcijo vpliva padavin in temperature, saj je razumljivo, da so ob deževnem, oblačnem vremenu spomladi temperature nižje, oziroma vpliva to na energijo globalnega obsevanja, del vpliva padavin je torej lahko posredno izražen tudi preko vpliva temperature na fenološki razvoj rastlin.

Na osnovi korelacijskih analiz smo poleg že omenjenih spremenljivk v postopek multiple regresije vključili tudi indeks severno atlantskega nihanja (NAOI). Nekaj manj kot četrtino vseh fenoklimatoloških modelov vsebuje kot eno izmed neodvisnih spremenljivk tudi NAOI. Izkazalo se je, da največ variabilnosti fenološkega razvoja lahko pojasnimo z zimskim NAOI, nekoliko manj z mesečnimi NAOI, le v treh modelih pa je vključen sezonski NAOI, vsi ti mesečni in sezonski indeksi pa veljajo za zimske oziroma zgodnje-spomladanske mesece. Glowienka-Hense (1990) je v svoji raziskavi podal, da severno atlantsko nihanje vpliva na klimo srednje Evrope predvsem v zimskih mesecih, poleti pa nima direktnega vpliva na centralni del Evrope, južneje od 50°. Naša raziskava je potrdila, da variabilnost NAO vpliva na variabilnost klime zimskih mesecev in klimatsko odvisnih spremenljivk tudi v Sloveniji; lahko torej trdimo, da je NAOI uporabna spremenljivka, s katero lahko pojasnimo določen del variabilnosti v času nastopa fenofaz. V zadnjih treh desetletjih prevladuje pozitivna NAO faza, obstaja možnost, da je takšen potek NAO pokazatelj klimatskih sprememb, v tem kontekstu je eno izmed potencialnih področij raziskav tudi povezanost fenoloških trendov s časovno spremenljivostjo severno atlantskega nihanja.

Rezultate predstavljenih modelov smo analizirali s programom MATLAB 5.2 in ovrednotili, kako se z modeli izmerjene vrednosti ujemajo z opazovanimi. Za vse postaje smo modele testirali z metodo navzkrižnega preverjanja (cross validation), samo za postajo Celje pa smo modele testirali tudi na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000. V preglednici 42 smo predstavili korelacijske koeficiente med opazovanimi in napovedanimi datumi fenofaz, povprečen korelacijski koeficient je znašal preko 0,90, kar kaže na to, da modeli dobro opišejo dejansko stanje. Nekoliko slabše rezultate smo dobili za modele cvetenja lipe ter olistanja bukke ter lipe v Lescah. Ker je uporabljena metodologija enaka v vseh modelih oziroma za vse postaje, bi lahko bil vzrok ali v manj kakovostnih fenoloških opazovanjih ali pa v napakah pri meteoroloških meritvah. Analiza obojih podatkov je pokazala, da so podatki kvalitetni in zanesljivi, zato menimo, da je eden izmed možnih

vzrokov za slabše rezultate v teh primerih menjava lokacije postaje, drug vzrok pa sama mikrolokacija, kjer opazujejo rastline. Možno je, da meteorološke meritve ne opišejo dovolj dobro lokacije, na kateri potekajo fenološka opazovanja.

Analiza ostankov pri navzkrižnem preverjanju vseh modelov je pokazala, da so največja odstopanja v ekstremno toplih, oziroma v ekstremno hladnih letih, pri čemer gre za podoben vzorec na vseh postajah. V obravnavanem obdobju so zgodnje fenološke pomladi nastopile na vseh postajah v letih 1961, 1966, 1989, 1990, 1994, isto velja za leto 2000, ki pa ni bilo vključeno pri izdelavi regresijskih modelov, ampak smo ga uporabili samo za preverjanje modelov na neodvisnem nizu podatkov. Druga skupina osamelcev, ki smo jih določili pri analizi ostankov, pripada ekstremno hladnim pomladim (1956, 1963, 1976, 1986, 1996), ki so imele za posledico pozen nastop fenoloških fenofaz. Iz modelov osamelcev nismo izključili, ker izboljšave niso bile bistvene, menimo pa, da so prav ekstremne razmere tiste, ki so v fenologiji še posebej pomembne tako z vidika kmetijskih napovedi kot tudi pri proučevanju vpliva klimatskih sprememb na rast in razvoj rastlin. Poleg metode navzkrižnega preverjanja smo za postajo Celje (ta postaja ima kot edina podatke za vse obravnavane fenofaze) vse modele preizkusili tudi na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000, v katerem je bila pomlad nadpovprečno topla. Vseh 14 modelov je dobro napovedalo datum nastopa posameznih fenofaz (preglednica 43). Maksimalno odstopanje je bilo 5 dni za napoved cvetenja robinije, sicer pa so bile vrednosti razlik tako pozitivne (model napove kasnejši datum od dejanskega) kot negativne (model napove zgodnejši datum od dejanskega).

Na osnovi rezultatov analiz lahko rečemo, da smo z zgoraj navedenimi spremenljivkami izdelali dokaj natančne in pravočasne napovedi nastopa fenoloških faz za obravnavane postaje. S historičnimi fenološkimi podatki, temperaturo zraka in njenimi izpeljankami ter indeksom severno atlantskega nihanja smo lahko pojasnili velik del variabilnosti fenološkega razvoja. Ker smo v naših modelih upoštevali načelo parsimoničnosti, ki bi naj na splošno veljalo za operativne agrometeorološke modele, nismo upoštevali vseh dejavnikov, s katerimi bi lahko pojasnili dodaten del nepojasnjene variance. Na rezultate vplivajo individualne biološke razlike med posameznimi rastlinami (starost drevesa, prizadetost zaradi bolezni ali škodljivcev, pri sadnem drevju različni agrotehnični ukrepi...). Te razlike se odražajo v različnem načinu reagiranja določene rastline na meteorološke razmere v okolju, le-te so opisane tudi s spremenljivkami, ki jih v naši poenostavljeni analizi nismo upoštevali (globalno obsevanje, veter, temperatura tal, temperatura rastline, nadmorska višina...). Modele bi lahko izboljšali, če bi upoštevali tudi sestavo in vodnost tal v določenem kraju, od katere so odvisni fiziološki procesi v koreninah, onesnaženost zraka ali ultravijolično sevanje. Na natančnost regresijske zveze pa seveda vplivajo tudi morebitne napake opazovalcev pri določitvi datuma fenofaze, saj smo že omenili, da beleženje fenofaz ne temelji na meritvah, temveč na opazovanjih. V modele smo kot pojasnjevalne spremenljivke vključili tudi nekatere izpeljanke, zato so izboljšave modelov možne tudi na samem področju uporabljenih metod. Temperature pragov (TP), ki smo jih določili s statistično metodo, bi bilo potrebno določiti tudi fiziološko, poleg tega pa tudi preizkusiti različne metode za izračun TP in termalnega časa. Ena izmed še nedorečenih stvari v fenologiji je tudi določitev začetnega datuma, po katerem začnemo seštevati akumulirane toplotne enote. V naši nalogi smo termalni čas seštevati od začetka koledarskega leta dalje, za morebitne boljše rezultate pa bi lahko

preizkusili niz različnih datumov, začeni z jesenjo preteklega leta. Druga možnost pa je, da bi nastop fenoloških faz pri trajnicah spomladi poskušali napovedati glede na dosežene vsote minimalnih temperatur, ki so potrebne za spomladansko prebujanje rastlin.

Vsi naštetí vzroki oziroma dejavniki okolja, ki jih v naši obravnavi nismo upoštevali, deloma zaradi pomanjkanja podatkov deloma pa zaradi načela preprostosti modelov, predstavljajo obenem spremenljivke, ki bi lahko za nastop posamezne fenofaze zmanjšale delež nepojasnjene variabilnosti.

5.2 SKLEPI

Rezultate proučevanja vpliva nekaterih agrometeoroloških spremenljivk na fenološki razvoj različnih rastlinskih vrst v Sloveniji lahko strnemo v nekaj glavnih spoznanj.

Analiza fenoloških podatkov je pokazala, da obstaja precejšna variabilnost v času nastopa obravnavanih fenofaz, za najzgodnejše obravnavane fenofaze (cvetenje ive, leske, zvončka in pomladanskega žafrana) znaša med 50 in 80 dni, za kasnejše fenofaze cvetenja in olistanja pa med 30 do 40 dni. Pri proučevanju časovnega trenda za obdobje 1955-1999 smo ugotovili, da približno polovica pomladanskih fenofaz v zadnjih letih nastopi zgodneje kot na začetku obravnavanega obdobja. Za fenofaze cvetenja nismo zasledili nobenega primera, da bi se cvetenje pojavljalo kasneje, število primerov, ko je trend negativen, pa je enako število primerov, ko trenda ni. Koeficient trenda znaša v povprečju od 1 do 3 dni na dekada, večji pa je za najzgodnejše fenofaze cvetenja. Fenofaza olistanja pri drevesnih vrstah nastopi zadnja leta zgodneje in sicer okrog 2 dni na dekada. Za jesensko fenofazo rumenjenja listja prevladuje pozitiven trend, fenofaza pa nastopi 2 do 3 dni na dekada kasneje kot na začetku obravnavanega obdobja. Posledično je prevladujoč tudi pozitiven trend v dolžini obdobja med olistanjem in rumenjenjem listja obravnavanih drevesnih vrst, ki znaša okrog 2 dni na dekada. Omenjene trende nastopa fenofaz lahko pojasnimo s pozitivnimi trendi temperature zraka na obravnavanih lokacijah.

Vrednosti korelacijskih koeficientov so največje med fenofazami cvetenja in povprečni temperatur zraka dveh ali treh zaporednih mesecev pred nastopom cvetenja, nekoliko so manjše vrednosti koeficientov za fenofaze olistanja. Korelacije so negativne, kar kaže, da višje temperature pospešujejo nastop pomladanskih fenofaz. Nasprotno pa je za nastop jesenskih fenofaz značilna majhna in pozitivna korelacija, kar pomeni, da višje temperature zakasni konec rastne dobe.

Korelacija med zimskim indeksom severno atlantskega nihanja ($NAOI_{zim}$) in povprečno temperaturo zraka od decembra do marca je na vseh osmih lokacijah močno statistično značilna. Z variabilnostjo $NAOI_{zim}$ smo lahko pojasnili največ variabilnosti v času nastopa fenofaz pri zgodaj cvetočih rastlinah kot so leska, iva in regrat, medtem ko so korelacije slabše za fenofaze, ki nastopijo v maju ali kasneje. Korelacije med nastopom fenofaz ter $NAOI_{zim}$ so v vseh primerih negativne, velike pozitivne vrednosti $NAOI_{zim}$ se odražajo na zgodnejšem fenološkem razvoju in obratno.

Ugotovili smo, da na čas pojava velike večine fenofaz količina padavin ne vpliva statistično značilno. Kjer značilne korelacije obstajajo, so majhne in pozitivne, večja

količina padavin pomeni torej zakasnitev fenofaze. Na obravnavanih postajah v spomladanskem času količina rastlinam dostopne vode na splošno ni problematična, tako da količina padavin, tudi če bi le-ta v sušnih razmerah vplivala na čas pojava fenofaze, v danih razmerah na čas cvetenja oziroma olistanja ne vpliva statistično značilno.

Za določitev temperature praga (TP) smo uporabili metodo najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur. Izračunane TP kažejo precejšno variabilnost med posameznimi postajami, razlike pa so jasno vidne tudi med rastlinskimi vrstami. Najnižje TP, ki imajo celo negativne vrednosti, smo izračunali za najzgodnejše fenofaze (cvetenje ive, leske, zvončka, regrata in pomladanskega žafrana), kasnejše fenofaze imajo izračunane TP med 3°C in 7°C.

Variabilnost izračunanih termalnih časov med posameznimi leti je veliko večja za pomladanske kot jesenske fenofaze. Potreben termalni čas za nastop fenofaz v Ratečah je krajši kot na ostalih postajah. Fenološki razvoj opišemo bolje z vsotami efektivnih kot aktivnih temperatur, primernejša pa je metoda, pri kateri smo računali termalni čas iz povprečnih dnevni in ne minimalnih temperatur zraka. Modificirana metoda za računanje termalnega časa, v katero smo vključili dolžino dneva, je za postajo Ljubljana pokazala, da so bile vrednosti korelacijskih koeficientov višje ob uporabi fototermalnega časa.

Z metodo multiple linearne regresije smo oblikovali fenološke in fenoklimatske modele za napoved fenofaz, pri katerih takšne napovedi lahko uporabimo za določene ukrepe. Za napovedovanje fenofaz tako gojenih kot samoniklih rastlin je najprimernejša uporaba podatkov najzgodnejših fenofaz, kot pojasnjevalne spremenljivke v fenoloških modelih so največkrat nastopile fenofaze cvetenja in olistanja breze, cvetenja regrata ter olistanja divjega kostanja. Za te tri rastline velja, da so v naših razmerah dobri fenološki indikatorji. Menimo, da je možno oblikovati multiple fenološke regresijske modele, ki so s statističnega vidika ustrezni in primerni za uporabo, tako v smislu napovedovanja fenološkega razvoja kot za morebitne interpolacije manjkajočih fenoloških podatkov. Delež pojasnjene variabilnosti nastopa fenofaz se je precej povečal, ko smo v fenološke modele vključili tudi meteorološke spremenljivke in njihove izpeljanke. V fenoklimatskih modelih so poleg fenoloških pojasnjevalnih spremenljivk največkrat vključene meteorološke pojasnjevalne spremenljivke termalni čas ter povprečne mesečne temperature zraka, za Ljubljano v vseh primerih fototermalni čas. Z mesečno količino padavin in indeksom severno atlantskega nihanja smo lahko pojasnili manjši del variabilnosti nastopa fenofaz.

Kljub številnim možnostim, ki nam jih daje proučevanje fenološkega razvoja rastlin, je pri nas izrabljenost fenološkega arhiva še vedno premajhna. Menimo, da bi bilo fenološke prognoze potrebno bolj dosledno upoštevati kot vir dodatnih informacij pri načrtovanju kmetijske proizvodnje in sprejemanju agotehničnih ukrepov, obenem z bolj dostopnimi fenološkimi informacijami za širši krog ljudi. Zaradi zmanjševanja stroškov so v preteklosti ukinili že številne fenološke postaje. Ker je za kvalitetne raziskave na področju fenologije potreben vsaj tridesetleten neprekinjen niz podatkov, pomeni ukinjanje postaj z dolgoletnimi fenološkimi opazovanji nepopravljivo škodo.

Na osnovi spoznanj naše raziskave lahko zaključimo, da smo z obravnavanimi spremenljivkami izdelali dokaj natančne in pravočasne napovedi časa pojava fenoloških faz različnih rastlin. S historičnimi fenološkimi podatki, podatki za temperaturo zraka in njenimi izpeljankami smo lahko pojasnili velik del variabilnosti časa nastopa fenofaz. Zastavljene cilje smo v nalogi v veliki meri dosegli, izdelani modeli dobro opišejo dejansko stanje in so operativno uporabni.

6 POVZETEK (SUMMARY)

6.1 POVZETEK

V nalogi smo proučevali vpliv nekaterih agrometeoroloških spremenljivk na fenološki razvoj različnih rastlinskih vrst v Sloveniji. Namen dela je bila izdelava fenoloških ter fenoklimatskih multiplih regresijskih modelov za napoved nastopa fenofaz z upoštevanjem načela parsimoničnosti. V analizo smo vključili fenološke in meteorološke podatke za obdobje 1955-2000, obravnavali pa smo osem lokacij, ki za omenjeno obdobje razpolagajo tako z meteorološkimi meritvami kot tudi s fenološkimi opazovanji: Celje, Ilirsko Bistrico, Lesce, Ljubljano, Maribor, Mursko Soboto, Novo Mesto in Rateče. V raziskavo smo vključili 6 različnih fenofaz (olistanje, začetek cvetenja, polno cvetenje, prvi zreli plodovi, začetek obiranja plodov, jesensko rumenenje listja) oziroma 17 rastlin, ki sodijo v štiri skupine fenoloških objektov: negojene zelnate rastline (navadna ivanjščica-*Leucanthemum ircutianum* Turcz., navadni mali zvonček-*Galanthus nivalis* L., navadni regrat-*Taraxacum officinale* Weber in Wiggers, pomladanski žafran-*Crocus napolitanus* Mordant&Loisel.), gozdno drevje in grmičevje (navadna breza-*Betula pendula* Roth, navadna bukev-*Fagus sylvatica* L., črni bezeg-*Sambucus nigra* L., navadni divji kostanj-*Aesculus hippocastanum* L., iva-*Salix caprea* L., navadna leska-*Corylus avellana* L., lipa-*Tilia platyphyllos* Scop., navadna robinija-*Robinia pseudacacia* L., navadna smreka-*Picea abies* (L.) Karsten in španski bezeg-*Syringa vulgaris* L.), trave (navadna pasja trava-*Dactylis glomerata* L.) in sadno drevje (češplja-*Prunus domestica* L., sorta 'Domača češplja' in jabolana-*Malus domestica* Borkh, sorta 'Bobovec'). Fenološke in meteorološke podatke smo dobili iz arhiva Agencije republike Slovenije za okolje.

Temperaturo spodnjega praga za nastop posamezne fenofaze smo določili z metodo najmanjšega standardnega odklona vsote efektivnih temperatur. Termalni čas smo računali z metodo pravokotnika na tri različne načine kot vsoto efektivnih temperatur nad izbranim temperaturnim pragom, vsoto aktivnih temperatur, izračunano iz povprečnih dnevnihih temperatur zraka ter vsoto aktivnih temperatur, izračunano iz minimalnih dnevnihih temperatur zraka. Za postajo Ljubljana smo poleg termalnega časa izračunali tudi fototermalni čas, to je modificiran termalni čas, v katerem smo upoštevali dolžino dneva. Za prikaz povprečnih vrednosti nastopa fenofaz smo uporabili osnovne opisne statistike ter analizo variance. Časovne spremembe v nastopu fenofaz smo opisali s trend komponento in sicer z modelom linearnega trenda. Za izdelavo modelov smo uporabili linearno multiplo regresijsko tehniko z načinom postopnega vključevanja pojasnjevalnih spremenljivk. Rezultate modelov smo ovrednotili z metodo navzkrižnega preverjanja, za postajo Celje pa tudi na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000. V nalogi smo uporabili računalniške programe Statgraphics Plus 4.0, Excell 5.0 in MATLAB 5.2.

Povprečni, najzgodnejši in najpoznejši dnevi nastopov fenofaz vseh rastlin v Lescah in Ratečah so kasnejši kot na ostalih šestih postajah, ki ležijo na manjših nadmorskih višinah. Primerjava ekstremnih vrednosti nastopa fenofaz olistanja breze, bukke, divjega kostanja, lipe ter smreke je pokazala, da povprečen variacijski razmik znaša od 29 do 39 dni. Podobne vrednosti smo dobili tudi za jesensko fenofazo rumenenja listja pri brezi, bukvi ter lipi in sicer v povprečju med 33 in 40 dni. Za fenofaze cvetenja pri zgodaj cvetočih rastlinah smo ugotovili zelo veliko variabilnost. Pri spomladanskem žafranu znaša

povprečen razpon med najzgodnejšim in najkasnejšim dnevom cvetenja 50 dni, pri ivi in malem zvončku okrog 60 dni, pri leski pa celo 80 dni. Pri rastlinah, ki zacvetijo kasneje, med ekstremnimi vrednostmi ni tako velikega razpona, le-ta je istega velikostnega reda kot pri olistanju in rumenjenju listja in znaša v povprečju med 30 in 40 dni. Trajanje obdobja med olistanjem in rumenjenjem listja za bukev, brezo in lipo znaša povprečno med 170 in 180 dni, v Ratečah pa je približno mesec dni krajše.

Za vse izbrane fenofaze smo izračunali linearni trend. Za fenofazo cvetenja je število primerov, ko je trend negativen (zgodnejše cvetenje) približno enako kot število primerov, ko trend ne obstaja. Največji koeficient trenda kažeta iva in leska in sicer okrog 5 dni na dekada, cvetenje ostalih rastlin pa nastopi med 1,3 do 3,6 dni na dekada zgodneje kot na začetku obravnavanega obdobja. Fenofaza olistanja je pokazala, da ta fenofaza nastopa zadnja leta zgodneje in sicer za okrog 2 dni na dekada. Za jesensko fenofazo rumenjenja listja prevladuje pozitiven trend, to pomeni, da listje zadnja leta rumeni kasneje, koeficient trenda pa znaša 2 do 3 dni na dekada. Izračunali smo tudi trend v dolžini obdobja med olistanjem in rumenjenjem listja pri brezi, bukvi ter lipi, trend je v več kot polovici primerov pozitiven in znaša 3 dni na dekada, v ostalih primerih trenda ni.

Povezanost med časom nastopa fenofaz in nekaterimi agrometeorološkimi spremenljivkami smo ugotavljali s korelacijsko analizo. Vrednost povprečnega korelacijskega koeficienta med nastopom fenofaz cvetenja in povprečnimi temperaturami zraka je znašala približno -0,7 do -0,8; le nekoliko manjše so bile vrednosti koeficientov za fenofaze olistanja. Za nastop jesenskih fenofaz je ta korelacija manjša in pozitivna, kar pomeni, da višje temperature zakasnijo konec rastne sezone. Analizirali smo tudi vpliv severno atlantskega nihanja na pojav pomladanskih fenofaz v Sloveniji. Korelacija med zimskim indeksom severno atlantskega nihanja ($NAOI_{zim}$) in povprečno zimsko temperaturo zraka (december-marec) je za vseh osem lokacij statistično močno značilna, povprečna vrednost korelacijskega koeficienta pa znaša +0,58. Z variabilnostjo $NAOI_{zim}$ lahko pojasnimo največ variabilnosti v času nastopa fenofaz pri zgodaj cvetočih rastlinah kot so leska, iva in regrat. Korelacije so manjše za fenofaze, ki nastopijo pozno spomladi. Vrednosti korelacijskih koeficientov med nastopom fenofaz ter $NAOI_{zim}$ so v vseh primerih negativne. Analiza povezanosti povprečne mesečne količine padavin z nastopom fenofaz kaže, da v naših razmerah v spomladanskem času količina rastlinam dostopne vode ni problematična, tako da količina padavin, tudi če bi le-ta v ekstremno sušnih razmerah vplivala na čas pojava fenofaz, v danih razmerah na čas cvetenja in olistanja ne vpliva statistično značilno.

Spodnjo temperaturo praga (TP) smo v naši raziskavi določili statistično, izbrani datum začetka seštevanja termalnega časa je bil 1. januar. Preizkusili smo dve dolžini obdobja, ko mora biti povprečna dnevna temperatura zaporedoma višja od TP (5 dni in 10 dni). Kot primernejši kriterij se je izkazala dolžina obdobja 5 dni. Za rastline, pri katerih nastopi fenofaza cvetenja relativno zgodaj spomladi, je bila večina izračunanih TP negativnih: najnižje TP smo določili za fenofazo cvetenja leske (povprečje postaj okrog -3°C), za ostale rastline so bile TP med -3°C in $+2^{\circ}\text{C}$. Za računanje termalnega časa za nastop olistanja pri brezi, bukvi in lipi je najprimernejša TP med 3°C in 4°C , izračunani pragovi so med posameznimi postajami precej izenačeni. Za ostale kasnejše faze smo določili nekoliko višje TP, ki nihajo v povprečju med 5°C in 7°C . Na osnovi izračunanih TP smo

izračunali vsote efektivnih temperatur (V_{ef}), nad enotnim $TP=0^{\circ}C$ pa vsote aktivnih temperatur (V_{akt}). V Ratečah so V_{akt} manjše kot na ostalih postajah, največje vsote pa so bile največkrat dosežene v Ilirski Bistrici in Ljubljani, kar potrjuje, da ista rastlinska vrsta potrebuje v toplejših krajih za svoj razvoj večjo vsoto toplotnih enot kot v hladnejših predelih. Variabilnost V_{akt} je bila med leti precej velika (med 10% in 25%) in sicer večja za zgodnejše fenofaze. Povprečne vrednosti korelacijskih koeficientov med V_{akt} ter nastopi fenofaz so relativno majhne ($<0,5$) in spremenljivih predznakov. Za vsote efektivnih temperatur (V_{ef}) na osnovi statistično določenih TP za vsako posamezno fenofazo je prav tako značilna velika variabilnost, vrednosti koeficientov variabilnosti pa znašajo med 12% in 30%. Korelacijski koeficienti so večji (med 0,5 do 0,65), če fenološki razvoj opišemo z V_{ef} namesto z V_{akt} , in prav tako spremenljivih predznakov. Za postajo Ljubljana smo izračunali tudi fototermalni čas, pri čemer smo upoštevali temperaturo samo svetlega dela dneva. Z uporabo fototermalnega časa smo v vseh primerih lahko opisali fenološki razvoj boljše kot s termalnim časom.

V podrobnejši obravnavi odvisnosti časa nastopa različnih fenofaz od meteoroloških dejavnikov okolja smo uporabili metodo multiple linearne regresije, tvorili smo fenološke in fenoklimatske modele. Modele smo tvorili za 14 različnih fenofaz oziroma 10 različnih rastlin, pri katerih napovedi časa pojava lahko uporabimo za določene ukrepe v agrometeorologiji, medicinski meteorologiji, v farmacevtski industriji ali pa v raziskavah o vplivu klimatskih sprememb na rastlinski svet. S posameznim fenološkim modelom smo napovedali nastop fenofaze za neko rastlino glede na datum nastopa predhodnih fenofaz iste rastline ali pa glede na datume predhodnih fenofaz drugih rastlin. Kot pojasnjevalna spremenljivka nastopa v modelih največkrat breza, sledita ji regrat in divji kostanj. Za te tri rastline lahko trdimo, da so v naših razmerah fenološki indikatorji. V fenološke modele sta največkrat vključeni ena ali dve pojasnjevalni spremenljivki, največje število pojasnjevalnih spremenljivk v modelu pa je bilo pet. Menimo, da uporaba modelov, ki vsebujejo več kot tri različne fenološke parametre, ni smiselna, saj nam dodatne spremenljivke ne pojasnijo bistveno večjega deleža variabilnosti. Največji delež pojasnjene variabilnosti (preko 90%) so nam dali modeli za napoved polnega cvetenja 'Domače češplje' in 'Bobovca', ki kot pojasnjevalne spremenljivke vsebujejo predhodne fenofaze istih rastlin. Zato so tudi napovedi možne le 3 do 4 dni vnaprej, kar pa menimo, da je z vidika priprave na določene agrometeorološke ukrepe še dovolj. Za napovedi fenološkega razvoja na osnovi predhodnih fenofaz drugih rastlin je delež pojasnjene variabilnosti precej manjši in je znašal med 50% in 79%. Multiple regresijske modele za napoved fenološkega razvoja je z vključevanjem samo fenoloških podatkov samoniklih ali gojenih rastlin možno oblikovati, modeli so s statističnega vidika ustrezni in primerni za uporabo, z njimi je možno interpolirati manjkajoče fenološke podatke.

Obravnavane fenološke postaje smo izbrali tako, da so hkrati tudi meteorološke postaje. Na osnovi korelacijskih analiz smo v multiplo regresijsko analizo vključili povprečne mesečne, dvomesečne in tromesečne temperature zraka, povprečne mesečne količine padavin, termalni čas (vsote aktivnih in efektivnih temperatur), indeks severno atlantskega nihanja in fototermalni čas samo za postajo Ljubljana. V vseh fenoklimatskih modelih se kot pojasnjevalna spremenljivka pojavlja termalni čas oziroma za postajo Ljubljana fototermalni čas. Termalni čas je v modelih največkrat vključen kot spremenljivka V_{akt} , izračunana iz povprečnih dnevnih temperatur zraka, ali kot V_{ef} , kar kaže na to, da je

primerna uporaba obeh metod za izračun termalnega časa. Vsote aktivnih temperatur, ki smo jih izračunali iz minimalnih dnevnih temperatur, so bile statistično značilno povezane z nastopom fenofaz le v posameznih primerih, nismo pa mogli ugotoviti neke splošne značilnosti, da bi bile minimalne temperature pomembnejše pri določeni rastlini ali fenofazi. Fototermalni čas, ki smo ga izračunali samo za postajo Ljubljana, nastopa kot pojasnjevalna spremenljivka v vseh modelih za to postajo, z njim pa smo v vseh modelih lahko pojasnili več variabilnosti kot s termalnim časom. Spremenljivki mesečna količina padavin in NAOI sta bili vključeni le v manjše število modelov, z njima smo lahko pojasnili relativno majhen del variabilnosti časa nastopa posamezne fenofaze.

Modele smo preverili z metodo navzkrižnega preverjanja, povprečen korelacijski koeficient med opazovanimi in napovedanimi datumi fenofaz je znašal preko 0,90, kar kaže na to, da modeli dobro opišejo dejansko stanje. Pri analizi ostankov pri navzkrižnem preverjanju modelov smo ugotovili največja odstopanja v ekstremno toplih in hladnih letih, pri čemer je bil vzorec podoben na vseh lokacijah. Poleg metode navzkrižnega preverjanja smo za lokacijo Celje, ki ima kot edina podatke za vse obravnavane fenofaze, vse modele preizkusili tudi na neodvisnem nizu podatkov za leto 2000. Napovedi vseh 14 modelov so bile dobre, največja razlika med opazovano in napovedano vrednostjo je bila 5 dni za cvetenje robinije, sicer pa so bile vrednosti razlik tako pozitivne (model napove kasnejši datum od dejanskega) kot negativne (model napove zgodnejši datum od dejanskega). Z obravnavanimi agrometeorološkimi spremenljivkami smo lahko izdelali dokaj natančne in pravočasne napovedi nastopa fenoloških faz za obravnavane lokacije.

6.2 SUMMARY

We have investigated influence of some agrometeorological variables on phenological development of different plant species in Slovenia. The purpose of our work was working out phenological and phenoclimatic multiple regression models for prediction of phenophase appearance considering principle of parsimonious. Phenological and meteorological data for the period 1955-2000 were used in our study, eight locations were selected: Celje, Ilirska Bistrica, Lesce, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota, Novo mesto and Rateče, which represented at the same time phenological and meteorological stations. 6 different phenophases (leaf unfolding, beginning of flowering, full flowering, first ripe fruits, maturity, autumnal leaf colouring) and 17 plants respectively were chosen to represent four groups of phenological objects: wild herbaceous plants (ox-eye daisy-*Leucanthemum ircutianum* Turcz., snowdrop-*Galanthus nivalis* L., dandelion-*Taraxacum officinale* Weber and Wiggers, spring-saffron-*Crocus napolitanus* Mordant&Loisel.), forest trees and shrubs (common silver birch-*Betula pendula* Roth, beech-*Fagus sylvatica* L., common elder-*Sambucus nigra* L., horse-chestnut-*Aesculus hippocastanum* L., goat willow-*Salix caprea* L., hazel-*Corylus avellana* L., large-leaved lime-*Tilia platyphyllos* Scop., black locust-*Robinia pseudacacia* L., Norway spruce-*Picea abies* (L.) Karsten and common lilac-*Syringa vulgaris* L.), grasses (cock's-foot-*Dactylis glomerata* L.) and fruit trees (plum tree-*Prunus domestica* L., cv. 'Domača češplja' and apple tree-*Malus domestica* Borkh, cv. 'Bobovec'). Environmental Agency of Republic of Slovenia provided phenological and meteorological data.

Lower threshold temperatures for particular phenophases appearance were determined with the least standard deviation in growing-degree days method. Thermal time was calculated with rectangular method in three different ways: as growing-degree days above defined lower threshold temperature, growing-degree days above zero, calculated from average daily air temperatures and growing degree days above zero, calculated from minimum daily air temperatures. For the Ljubljana location photothermal time was also calculated, this was modified thermal time, which takes into consideration day length as well. The statistical analysis of the data was carried out with the standard tools of Statgraphics Plus 4.0 and MS Excel 97; averages, standard deviations, minima and maxima were calculated. Analysis of variance was performed to test variation in phenological dates between stations and linear trend analysis was used to investigate time series of phenological data. On the base of preliminary correlation analysis multiple linear regression models (stepwise selection) were applied. Models were tested with cross validation method (with MATLAB 5.2 programme) and for the Celje station also on independent data set for year 2000.

The average, the earliest and the latest phenological dates for all plants observed in Lesce and Rateče were later compared to other six stations on lower altitudes. The extreme dates of phenophase appearance for leaf unfolding of common silver birch, beech, horse-chestnut, large-leaved lime and Norway spruce differed on the average from 29 to 39 days. Similar values were determined also for autumnal leaf colouring for common silver birch, beech and large-leaved lime, where the interval between the earliest and the latest date of leaf colouring was in average 33 to 40 days. The temporal variability of phenological data was very high in early spring. For spring-saffron the earliest and the latest dates of flowering differed for about 50 days, for goat willow and snowdrop about 60 days and for hazel even 80 days. For late-spring phases of flowering the interval between extreme dates was not so spacious, the magnitude was the same as for leaf unfolding and leaf colouring; it amounted from 30 to 40 days. The length of period between leaf unfolding and leaf colouring for common silver birch, beech and large-leaved lime was from 170 to 180 days on the average, this period was approximately one month longer in Rateče.

Linear trends of all selected phenological phases were calculated. For flowering phases approximate half of the records showed clear tendencies to an earlier onset of flowering, the other half of the records showed no trends and there was no one case of delayed flowering. The highest trend coefficients were characteristic for goat willow and hazel – about 5 days per decade, the flowering of the rest of the plants occurred between 1,3 and 3,6 days per decade earlier as at the beginning of the discussed period. Autumnal phases of leaf colouring tended to be delayed in the past four decades, average trend coefficient amounted to 2 to 3 days per decade. Linear trend of the length of period between leaf unfolding and leaf colouring for common silver birch, beech and large-leaved lime has lengthened on average by 3 days since 1955s, positive trend was characteristic for half of records, others showed no significant trend.

The correlation analyses were carried out to establish the relationships between phenophases appearance and some agrometeorological variables. The average defined correlation coefficients between flowering dates and mean monthly air temperatures were negative, from $-0,7$ to $-0,8$; values for leaf unfolding phases were a little lower. For autumnal phases this correlation was weaker and positive. We have analyzed also the

influence of North Atlantic Oscillation on spring phenology in Slovenia. The correlation between winter North Atlantic Oscillation Index ($NAOI_{zim}$) and temperature was highly significant for all stations for the months from December to March, the average correlation coefficient was +0,58. With $NAOI_{zim}$ variability we explained the large part of variation in flowering phases of early-spring plants like dandelion, goat willow and hazel. Correlations were weaker for late-spring phenophases. The values of all correlation coefficients were negative in all cases. The correlation analysis between monthly amount of precipitations and phenological dates has shown, that on average water availability was not a problem for plants in springtime in Slovenia. The amount of monthly precipitation in concrete conditions was not significantly correlated to date of flowering and leaf unfolding, although it could be of importance in extremely dry years.

Lower threshold temperature (TP) was determined statistically; selected starting date for thermal time accumulation was the 1st January. Two different periods (5 successive days and 10 successive days) with average daily air temperature above TP were tested, better results were obtained with period of 5 days. For plants flowering in early spring, most of calculated TP were negative: the lowest TP were defined for flowering of hazel (average on all stations was about -3°C), for the rest of the plants TP were between -3°C and $+2^{\circ}\text{C}$. TP between $+3^{\circ}\text{C}$ and $+4^{\circ}\text{C}$ were adequate to calculate thermal time for leaf unfolding of common silver birch, beech and large-leaved lime, calculated TP were quite uniform on all stations. For later phases determined TP were somewhat higher: between 5°C and 7°C on average.

Growing degree-days were calculated in the first place on the base of statistically determined TP (effective temperatures – V_{ef}) and after that above unified TP= 0°C (active temperatures - V_{akt}). Sums of active temperatures were lower in Rateče, compared to other stations, largest sums were mostly reached in Ilirska Bistrica and Ljubljana, which confirms that the same plant species needs larger amount of heat unit accumulation for its development on warm locations than in colder areas. Variability of V_{akt} among years was relatively high (from 10% to 25%), higher for earlier phases. Average correlation coefficients between V_{akt} and phenophase appearance were relatively low ($<0,5$) and had changeable signs. For sums of effective temperatures, calculated on the base of statistically determined TP for every single phenophase, variability was also high, values of coefficients of variability were between 12% and 30%. When we described phenological progress with V_{ef} instead with V_{akt} , correlation coefficients were higher (from 0,5 to 0,65), and again with changeable signs (+,-). We calculated also photothermal time for location Ljubljana, we took into the consideration the temperature for the light part of the day only. For all phases correlation coefficients were higher when we used photothermal instead of thermal time.

In detailed analysis of phenophases dependence on meteorological parameters we used multiple linear regression to make phenological and phenoclimatic models. We formed models for 10 different plants respectively for 14 phenophases, at which forecasts of their appearance can be useful for particular measures in agrometeorology, medical meteorology, pharmacy or in climate change researches. With single phenological model we have predicted individual phenological phenomenon for particular plant on the base of previous phenological data of the same plant or on the base of previous phenological date

of other plants. The most frequently included independent variable in models was common silver birch, the next were dandelion and horse-chestnut. We can state that these plants are phenological indicators in given conditions. Mainly one or two independent variables were included in particular phenological model, the largest number of independent variables in model were five. We are of the opinion that application of models with more than three independent phenological variables is not justified, because additional variables do not explain essentially higher part of variability. We obtained the biggest part of explained variability with models for predictions of full flowering of domestic plum and apple. These models contained as independent variables previous phenophases of the same plants. That is why the predictions were possible for only 3-4 days in advance but we think that from agrometeorological point of view this is sufficient. Phenological predictions on the base of previous phenological data of other plants have explained less variability – from 50% to 79%. By including only phenological data about wild or cultivated plants we can form multiple regression models; these models are statistically adequate and appropriate for use.

Discussed locations were chosen in such way that they are meteorological and phenological stations at the same time. On the base of correlation analysis we included in multiple linear regression analyses as independent variables monthly, two-monthly and three-monthly average air temperatures, monthly amount of precipitations, thermal time (active and effective temperatures), north atlantic oscillation index and photothermal time for the Ljubljana location only. In all phenoclimatic models thermal time respectively photothermal time for Ljubljana was presented as independent variable. In models thermal time was mostly expressed as active temperatures, calculated from average daily temperatures, or effective temperatures, which indicated that both methods are convenient for usage. Sums of active temperatures, calculated from minimum daily temperatures, were statistically significant correlated with appearance of phenophases in smaller number of models. We could not ascertain general principle that minimum temperatures were more significant for appointed phenophase or plant. Calculated photothermal time for Ljubljana was included in all phenoclimatic models for this location. Comparison between explained variability for Ljubljana with models, including thermal time and those with photothermal time, has shown that we could explain more variability in phenophase occurrences in all models with photothermal time. Variables of monthly amount of precipitation and north atlantic oscillation index were included in smaller number of models. Comparatively small part of the whole variability can be explained by those two independent variables.

We validated models with cross validation method, average correlation coefficient between observed and predicted phenophase data amounted above 0,90 which indicates that models represent actual conditions well. Analysis of residuals at cross validation has shown that maximal deviations from average values occurred during extremely warm and cold years, the same pattern appears on all locations. In addition to cross validation method we have tested all models for Celje (this was the only location with data for all treating phenophases) on independent data set for year 2000. Predictions of all models were good, maximal difference between observed and predicted values was 5 days for flowering of black locust, otherwise the differences had both positive values (model gives later date than the actual) and negative values (model gives earlier date than the actual). With discussed agrometeorological variables we managed to work up quite accurate predictions of phenological events with sufficiently long foresight period.

7 VIRI

7.1 CITIRANI VIRI

- Absec F. 2001. Primerjava nastopov temperaturnih pragov za pet krajev v Sloveniji, določenih iz povprečnih in ekstremnih temperaturnih vrednosti zraka. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 84 str.
- Aceituno P. 1979. Statistical formula to estimate heating or cooling degree-days. *Agricultural Meteorology*, 20, 3: 227-232.
- Acosta-Gallegos J.A., Vargas-Vazquez P., White J.W. 1996. Effect of sowing date on the growth and seed yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in highland environments. *Field Crops Research*, 49: 1-10.
- Ahas R. 1996. The seasonal dynamics of Estonian landscapes: Spatial and Temporal variability of early-spring blossoming dates. V: *Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology*, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 220-225.
- Ahas R. 1999. Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 42, 3: 119-123.
- Ahas R., Jaagus J., Aasa A. 2000. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *International Journal of Biometeorology*, 44, 4: 159-166.
- Aono Y., Omoto Y. 1990. A Simplified Method for Estimation of Blooming Date for the Cherry by means of DTS. *Journal of Agricultural Meteorology*, 46, 3: 147-151.
- Aono Y., Omoto Y. 1994. Estimation of Temperature at Kyoto since the 11th Century Using Flowering Data of Cherry Trees in Old Documents. *Journal of Agricultural Meteorology*, 49, 4: 263-272.
- Arhiv fenoloških podatkov Agencije republike Slovenije za okolje. Podatki za obdobje 1955-2000. 2000. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje (izpis iz baze podatkov).
- Arhiv meteoroloških podatkov Agencije republike Slovenije za okolje. Podatki za obdobje 1955-2000. 2000. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje (izpis iz baze podatkov).
- Arnold C.Y. 1959. The Determination and Significance of the Base Temperature in a Liner Heat Unit System. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 74: 430-445.
- Batič F. 1987. Ekologija fotosinteze pri bodiki (*Ilex aquifolium* L.). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Inštitut za gozdno in lesno gospodarstvo: 91 str.
- Baumgärtner J., Schilperoord P., Basett P., Baiocchi A., Jermini M. 1998. The Use of a Phenology Model and of Risk Analyses for Planning Buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) Sowing Dates in Alpine Areas. *Agricultural systems*, 57: 557-569.
- Beaubien E.G., Johnson D.L. 1994. Flowering plant phenology and weather in Alberta, Canada. *International Journal of Biometeorology*, 38: 23-27.
- Beaubien E.G. 1996. Relationships between plant phenology in continental western Canada and Pacific Ocean temperatures. V: *Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology*, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 150-160.

- Beaubien E.G., Freeland H.J. 2000. Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology*, 44, 2: 53-59.
- Bergant K. 2002. Severnoatlantsko nihanje in njegov vpliv na klimatske razmere. *Življenje in tehnika*: 40-45.
- Bergant K., Kajfež-Bogataj L. 1999. Spatial interpolation of phenological data-flowering of locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Slovenia. *Razprave-Papers, posebna številka*: 5-10.
- Bergant K., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. 2001. Flowering prediction of pear tree (*Pyrus communis* L.), apple tree (*Malus domestica* Borkh) and plum tree (*Prunus domestica* L.) – similarities and differences. *Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo*, 77-1: 3-10.
- Bergant K., Kajfež-Bogataj L., Črepinšek Z. 2002. Statistical downscaling of GCM simulated average monthly air temperature to the beginning of flowering of dandelion (*Taraxacum officinale*) in Slovenia. *International Journal of Biometeorology*, 46,1: 22-32.
- Bewick T.A., Binning L.K., Yandell B. 1988. A Degree Day Model for Predicting the Emergence of Swamp Dodder in Cranberry. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 113, 6: 839-841.
- Birch C.J., Vos J., Kiniry J., Bos H.J., Elings A. 1998. Phyllochron responds to acclimation to temperature and irradiance in maize. *Field Crops Research*, 59: 187-200.
- Black C., Ong C. 2000. Utilisation of light and water in tropical agriculture. *Agricultural and Forest meteorology*, 104, 1: 25-47.
- Bussay A. 1999. Evaluation of WMO RA VI. Agrometeorological Questionnaire related to Phenological observations and Networks. *Razprave-Papers, posebna številka*: 57-63.
- Carberry P.S., Ranganathan R., Reddy L.J. 2001. Predicting growth and development of pigeonpea: flowering response to photoperiod. *Field Crops Research*, 69: 151-162.
- Cenci C.A., Ceschia M. 2000. Forecasting of the flowering time for wild species observed at Guidonia, central Italy. *International Journal of Biometeorology*, 44, 2: 88-96.
- Cesaraccio C., Spano D., Duce P., Snyder R.L. 2001. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. *International Journal of Biometeorology*, 45, 4: 161-169.
- Chen X. 1996. Relationship between plant phenology, temperature growing season and frost-free period in the Taunus mountain area of central Germany. V: *Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology*, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočvar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 161-168.
- Chen X., Tan Z., Schwartz M.D., Xu C. 2000. Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in Northern China. *International Journal of Biometeorology*, 44, 2: 97-101.
- Chen X., Xu C., Tan Z. 2001. An analysis of relationships among plant community phenology and seasonal metrics of Normalized Difference Vegetation Index in the northern part of the monsoon region of China. *International Journal of Biometeorology*, 45, 4: 170-177.
- Chmielewski F.M., Köhn W. 2000. Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 4: 253-261.

- Chmielewski F.M., Rötzer T. 2000. Phenological trends in Europe in relation to climatic changes. Agrarmeteorologische Schriften. Heft 07. Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Agrarmeteorologie: 14 str.
- Chmielewski F.M., Rötzer T. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. Agricultural and Forest Meteorology, 108, 2: 101-112.
- Cicogna A., Gani M. 1999. Life cycle of the maize in Friuli-Venezia Giulia and Slovenia. Razprave-Papers, posebna številka: 64-69.
- Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. 2001. Določitev in pomen temperature praga pri računanju termalnega časa. Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo, 77-2: 319-327.
- Dečman M. 1995. Analiza temperaturnih vsot v Sloveniji z vidika klimatskih nihanj. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 67 str.
- Defila C. 1996. 45 Years Phytophenological observations in Switzerland, 1951-1995. V: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology, September 1-8, Ljubljana, 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 175-183.
- Defila C., Clot B. 2001. Phytophenological trends in Switzerland. International Journal of Biometeorology, 45, 4: 203-207.
- Degree-days and Phenology Models. 2001. University of California, Division of Agriculture and Natural resources (22. okt. 2001).
<http://www.ipm.uc.davis.edu/WEATHER/ddconcepts.html> (9. nov. 2001)
- Desclaux D., Roumet P. 1996. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. Field Crops Research, 46: 61-70.
- Esteves M.A., Manso-Orgaz M.D. 2001. The influence of climatic variability on the quality of wine. International Journal of Biometeorology, 45: 13-21.
- Fenologija in njen pomen za kmetijsko meteorologijo. 1998. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod republike Slovenije, Agrometeorologija: 10 str.
- Fernhout P.D., Kurtz C.F. 2001. Kurtz-fernhout Software (10. mar.1999).
<http://www.kurtz-fernhout.com/help100/00000254.htm> (8. nov. 2001)
- Galan C., Garcia-Mozo H., Carinanos P., Alcazar P., Dominnguez-Vilches E. 2001. The role of temperature in the onset of the *Olea europea* L. pollen season in southwestern Spain. International Journal of Biometeorology, 45: 8-12.
- Gams I. 1989. Zemeljske temperature v Sloveniji in njihovo odstopanje od zračnih. Ljubljana, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, razred za naravoslovne vede: 36 str.
- Glowienka-Hense R. 1990. The North Atlantic Oscillation in the Atlantic-European SLP. Tellus, 42A, 5: 497-507.
- Gorski T., Jazurek M. 1996. Fifty-year records of flowering dates of *Prunus padus* L. and *Robinia pseudacacia* L. in Pulawy, Poland. V: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology, September 1-8, Ljubljana, 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 195-200.
- Gray D.R., Ravlin F.W., Braine J.A. 2001. Diapause in the gipsy moth: a model of inhibition and development. Journal of Insect Physiology, 47, 2: 173-184.

- Guilford J.P. 1968. Osnovi psihološke i pedagoške statistike. Beograd, Savremena administracija: 544 str.
- Hakkinen R., Linkosalo T., Hari P. 1995. Methods for combining phenological time series: application to bud burst in birch (*Betula pendula* L.) in central Finland for the period 1896-1955. *Tree Physiology*, 15: 721-726.
- Hakkinen R. 1999. Statistical evaluation of bud development theories: application to bud burst of *Betula pendula* leaves. *Tree Physiology*, 19: 613-618.
- Harrison P.A., Porter J.R., Downing T.E. 2000. Scaling-up the AFRCWHEAT2 model to assess phenological development for wheat in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101, 2-3: 167-186.
- Hočevar A. 1964. Fenološke faze v odvisnosti od vremena. Dokt. disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani: 241 str.
- Hočevar A. 1990. Značilnosti fenološkega razvoja nekaterih listopadnih drevesnih vrst v Sloveniji. *Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo*, 55:15-31.
- Hočevar A., Kajfež-Bogataj L. 1991. Pomen poznavanja fenoloških faz rastlin za uspešno simulacijo njihovega razvoja, rasti in pridelka. *Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo*, 57: 17-33.
- Hodges T. 1991. Predicting Crop Phenology. Washington, Irrigated Agricultural Research and Extension Center, USDA-ARS, Prosser: 233 str.
- Hoogenboom G. 2000. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 1-2: 137-157.
- Huang J.Z., Shresta A., Tollenaar M. 2001. Effect of temperature and photoperiod on the phenological development of wild mustard (*Sinapis arvensis* L.). *Field Crops Research*, 70: 75-86.
- Hurrell J.W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269: 676-679.
- Hurrell J.W. 1996. Influence of Variations in Extratropical Wintertime Teleconnections on Northern Hemisphere Temperature. *Geophysical Research Letters*, 23, 6: 665-668.
- Hurrell J.W., Loon van H. 1997. Decadal Variations in Climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 36: 301-326.
- Hurrell J. 2001. North Atlantic Oscillation (NAO) Indices Information. (10. maj 2001). <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html> (07. jun. 2001)
- Innis G.S. 1978. Grassland simulation model. *Ecological studies* 26. V: Concepts of Ecosystem Ecology. Pomeroy L.R., Alberts J.J. (eds.). New York, Springer Verlag: 344 str.
- Jäger S. 2001. European Pollen Information. (11. jul. 2001). <http://www.cat.at/pollen/index.en.html> (19. nov. 2001)
- Jame Y.W., Cutforth H.W., Ritchie J.T. 1998. Interaction of temperature and daylight on leaf appearance rate in wheat and barley. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, 4: 241-250.
- Jarnjak M., Tretjak A. 1999. Satellite scanned data in the function of vegetation mapping. *Razprave-Papers, posebna številka*: 11-21.

- Jeanneret F. 1996. From spatial sensing to environmental monitoring: a topoclimatic and phenological network through Switzerland. V: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 201-207.
- Kajfež-Bogataj L. 1989. Modeliranje pridelka kot funkcije delovanja ekosistema. Dokt. disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 124 str.
- Kajfež-Bogataj L. 1997. Možnost napovedovanja fenofaze splošnega cvetenja domače češplje (*Prunus domestica* L.) na osnovi temperature zraka in fenoloških opazovanj samoniklih rastlin. Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo, 69: 33-40.
- Kajfež-Bogataj L. 2001. Response of Tree Phenology to Warming in Early Spring across Slovenia. V: 'The times they are a-changing': climate change, phenological responses and their consequences for biodiversity, agriculture, forestry, and human health. International conference, Wageningen, the Netherlands, 5-7 dec. 2001. Vliet A., Den Dulk J.A., De Groot R. (ur.). Wageningen, Environmental System Group: str. 28
- Kajfež-Bogataj L., Bergant K. 1998. Prediction of blossoming of apple tree (*Malus domestica* Borkh) by phenological models. Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo, 71: 83-89.
- Kajfež-Bogataj L., Bergant K. 1999. Comparison of predicting full flowering dates of apple tree (*Malus domestica* Borkh) and plum tree (*Prunus domestica* L.) in Ljubljana. Razprave-Papers, posebna številka: 32-39.
- Kajfež-Bogataj L., Šušteršič M. 1991. Analiza nastopa spomladanskih temperaturnih pragov v tleh na različnih globinah v Ljubljani. Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo, 57: 9-16.
- Kawakata T., Yajima M. 1993. Model predicting Heading of Rise using Daylength and Water Temperature. Journal of Agricultural Meteorology, 49, 1: 3-9.
- Keatinge J.D.H., Qi A., Wheeler T.R., Ellis R.H., Summerfield R.J. 1998. Effects of temperature and photoperiod on phenology as a guide to the selection of annual legume cover and green manure crops for hillside farming systems. Field Crops Research, 57: 139-152.
- Ketring D.L., Wheless T.G. 1989. Thermal Time Requirements for Phenological Development of Peanut. Agronomy Journal, 81: 910-917.
- Kirchgäßner A., Mayer H., Matzarakis A. 2000. Phenoclimatology of Beech (*Fagus sylvatica* L.) in South-Western Germany. V: Progress in Phenology, Monitoring, Data Analysis and Global Change Impacts. International Conference 'Progress in Phenology, Freising, 4-6 Oct. 2000. Menzel A. (ed.). Freising, Technical University of Munich: 31-33.
- Klein G.H. 1997. Tools for detection of hidden dynamics in seasonal development during phenologically opaque periods. International Journal of Biometeorology, 40, 3: 123-127.
- Koch E. 2000. Long term phenological trends in the Austrian Alps; The use of GIS in Phenology. V: New Contributions to phenology, Proceedings of the IV. Workshop on Phenology, Doksany, 12-13 Oct. 1999. Horakova P. (ur.). Praha, Czech Hydrometeorological Institute: 17-23.

- Kott I., Valter J. 2000. Phenological Data procesing using some new means. V: New Contributions to phenology, Proceedings of the IV. Workshop on Phenology, Doksany, 12-13 Oct. 1999. Horakova P. (ur.). Praha, Czech Hydrometeorological Institute: 43-53.
- Kramer K. 1997. Phenology and growth of European trees in relation to climate change. V: Phenology in Seasonal Climates I. Lieth H., Schwartz M. (eds.). Leiden, Backhuys Publishers: 143 str.
- Kramer K., Leinonen I., Loustau D. 2000. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forest ecosystems: an overview. International Journal of Biometeorology, 44, 2: 67-75.
- Laaidi M. 2001. Forecasting the start of the pollen season of Poaceae: evaluation of some methods based on meteorological factors. International Journal of Biometeorology, 45, 3: 1-7.
- Landau S., Mitchell R.A.C., Barnett V., Colls J.J., Craigon J., Payne R.W. 2000. A parsimonious, multiple-regression model of wheat yield response to environment. Agricultural and Forest Meteorology, 101, 2-3: 151-166.
- Larcher W. 1995. Physiological Plant Ecology. 3rd edition. Berlin, Springer-Verlag: 506 str.
- Lemos Filho J.P. de, Villa Nova N.A., Pinto H.S. 1997. A model including photoperiod in degree days for estimating *Hevea* bud growth. International Journal of Biometeorology, 41, 1: 1-4.
- Lieth H. 1997. Aims and Methods in Phenological Monitoring. V: Phenology in Seasonal Climates I. Lieth H., Schwartz M. (eds.). Leiden, Backhuys Publishers: 143 str.
- Lieth H. 1974. Purposes of a Phenology Book. V: Phenology and Seasonality Modeling, Ecological Studies 8. Lieth H. (ed.). New York, Springer-Verlag: 444 str.
- Lindblad M., Sigvald R. 1996. A degree-day model for regional prediction of first occurrence of frit flies in oats in Sweden. Crop Protection, 15, 6: 559-565.
- Lischke H., Löffler T. J., Fischlin A. 1997. Calculating temperature dependence over long time periods: a comparison and study of methods. Agricultural and Forest Meteorology, 86, 3-4: 169-181.
- Liu D.L., Kingston G., Bull T.A. 1998. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. Agricultural and Forest Meteorology, 90, 1-2: 119-139.
- Loss S.P., Siddique K.H.M., Martin L.D. 1997. Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L.) to dryland Mediterranean-type environments II. Phenology, canopy development, radiation absorbtion and biomass partitioning. Field Crops Research, 52: 29-41.
- Maak K., Storch H. 1997. Statistical downscaling of monthly mean air temperature to the beginning of flowering of *Galanthus nivalis* L. in Northern Germany. International Journal of Biometeorology, 41, 1: 5-12.
- Mahmood R. 1997. Impacts of air temperature variations on the boro rice phenology in Bangladesh: implications for irrigation requirements. Agricultural and Forest Meteorology, 84, 3-4: 233-247.
- Masle J., Doussinault G., Farquhar G.D., Sun B. 1989. Foliar stage in wheat correlates better to photothermal time than to thermal time. Plant, Cell and Environment, 12: 235-247.

- McMaster G.S. 1988. Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central great plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43: 1-18.
- McMaster G.S., Wilhelm W.W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 4: 291-300.
- Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. 1993. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. 2nd edition. London, Chapman&Hall: 415 str.
- Mechlia N.B., Carroll J.J. 1989a. Agroclimatic modeling for the simulation of phenology, yield and quality of crop production. I. Citrus response formulation. *International Journal of Biometeorology*, 33, 1: 36-51.
- Mechlia N.B., Carroll J.J. 1989b. Agroclimatic modeling for the simulation of phenology, yield and quality of crop production. II. Citrus model implementation and verification. *International Journal of Biometeorology*, 33, 1: 52-65.
- Menzel A. 1996. Results of the observations in the international phenological gardens in Europe and possibilities of modelling phenological data. V: *Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology*, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 214-219.
- Menzel A. 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 44, 2: 76-81.
- Meteorološki terminološki slovar. 1990. Petkovšek Z., Leder Z. (ur.). Slovenska akademija znanosti in umetnosti in Društvo meteorologov Slovenije: 125 str.
- Monteith J.L. 2000. *Agricultural Meteorology: evolution and application*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 1-2: 5-9.
- Mygdakos E., Gemtos, T.A. 1998. Relationship between "growing degree days" and phenological stages of cotton growth in Greece. V: *COST 77, 79, 711. International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, 24-26 April 1996. Dalezios N. R. (ur.). Volos, University of Thessaly : 425-430.
- Nejedlik P. 1999. Phenological Data Exchange of Cultural Plants of Central European countries. *Razprave-Papers, posebna številka*: 74-80.
- Nejedlik P. 2000. Phenological data utilization at the WOFOST crop growth simulation model (Spring barley). V: *New Contributions to phenology, Proceedings of the IV. Workshop on Phenology*, Doksany, 12-13 Oct. 1999. Horakova P. (ur.). Praha, Czech Hydrometeorological Institute: 25-29.
- O'Brien P.J., Allen E.J., Bean J.N., Griffith R.L., Jones S.A., Jones J.L. 1983. Accumulated day-degrees as a measure of physiological age and the relationships with growth and yield in early potato varieties. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 101: 613-631.
- Okorn D. 1994. Značilnosti dinamike fenološkega razvoja ozimne pšenice (*Triticum aestivum* L. var. *aestivum*) v odvisnosti od meteoroloških parametrov v Sloveniji. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 91 str.
- Otorepec S. 1980. *Agrometeorologija*. 2. izdaja. Beograd, Nolit: 231 str.
- Orlandini S., Bindi M., Mancini M., Moriondo M., Fibbi L. 1999. Spatialisation of grapevine phenological data at different scales by using an artificial neural network. *Razprave-Papers, posebna številka*: 22-31.

- Pangtey Y.P.S., Rawal R.S., Bankoti N.S., Samant S.S. 1990. Phenology of high-altitude plants of Kumaun in Central Himalaya. India. International Journal of Biometeorology, 34, 2: 122-127.
- Perry K.B., Wehner T.C. Johnson G.L. 1986. Comparison of 14 methods to Determine Heat Unit Requirements for Cucumber Harvest. Hort Science, 21, 3: 419-423.
- Perry K.B., Wu Y., Sanders D.C. 1997. Heat units to predict tomato harvest in the southwest USA. Agricultural and Forest Meteorology, 84, 3-4: 249-254.
- Piovesan G., Schirone B. 2000. Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). International Journal of Biometeorology, 44, 3: 121-127.
- Piper E.L., Smit M.A., Boote K.J., Jones J.W. 1996. The role of daily minimum temperature in modulating the development rate to flowering in soybean. Field Crops Research, 47: 211-220.
- Podolsky A.S. 1984. New phenology: Elements of Mathematical Forecasting in Ecology. New York, John Wiley&Sons: 504 str.
- Post E., Stenseth N.C. 1999. Climatic variability, plant phenology, and northern ungulates. Ecology, 80, 4: 1322-1339.
- Rijks D., Baradas M.W. 2000. The clients for agrometeorological information. Agricultural and Forest Meteorology, 103, 1-2: 27-42.
- Rötzer T. 2000. Net-management and research of the international phenological gardens. V: New Contributions to phenology, Proceedings of the IV. Workshop on Phenology, Doksany, 12-13 Oct. 1999. Horakova P. (ur.). Praha, Czech Hydrometeorological Institute: 31-42.
- Rötzer T., Wittenzeller M., Haeckel H., Nekovar J. 2000. Phenology in Central Europe - differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. International Journal of Biometeorology, 44, 2: 60-66.
- Rötzer T., Chmielewski F.M. 2000. Phenological maps of Europe. Agrarmeteorologische Schriften. Heft 06. Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, institut für Pflanzenbauwissenschaften, Agrarmeteorologie: 12 str.
- Ro T.H., Long G.E. 1999. GPA-Phenodynamics, a simulation model for the population dynamics and phenology of green peach aphid in potato: formulation, validation and, analysis. Ecological Modelling, 119, 2-3: 197-209.
- Roberts E.H., Summerfield R.J. 1987. Measurement and prediction of flowering in annual crops. V: Manipulation of flowering. Atherton J.G. (ed.). London, Butterworths: 438 str.
- Roltsch W.J., Zalom F.G., Strawn A.J., Strand S., Pitcairn M.J. 1999. Evaluation of several degree-day estimation methods in California climates. International Journal of Biometeorology, 42, 4: 169-176.
- Sachweh M. 1996. Climatic change effects on phenological phases in southern Germany. V: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočevár A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 226-233.
- Sanda M. 1999. Analiza slovenskih vinorodnih dežel glede fenološkega razvoja nekaterih sort vinske trte. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 85 str.

- Sanderson M.A., Wedin W.F. 1989. Phenological Stage and Herbage Quality Relationships in Temperate Grasses and Legumes. *Agronomy Journal*, 81: 864-869.
- Scharrer H., Schmidt U. 1998. Cost 79. Integration of data and methods in agroclimatology. Phenological observations and data for key agricultural crops in Germany. Luxembourg, European Communities, Office for Official Publications of the European Communities: 74 str.
- Schröder U., Söndgerath D. 1996. The concept of biological time for computing the switching points of a growth model for winter wheat. *Ecological Modelling*, 88: 1-8.
- Schwartz M.D., Marotz G.A. 1988. Synoptic events and spring phenology. *Physical Geography*, 9, 2: 151-161.
- Schwartz M.D., Karl T.R. 1990. Spring Phenology: Nature's Experiment to Detect the Effect of "Green-Up" on Surface Maximum Temperatures. *Monthly Weather Review*, 118, 4: 883-890.
- Schwartz M.D. 1992. Phenology and Springtime Surface-Layer Change. *Monthly Weather Review of American Meteorological Society*, 120: 2570-2578.
- Schwartz M.D. 1993. Assessing the onset of spring: a climatological perspective. *Physical Geography*, 14, 6: 536-550.
- Schwartz M.D. 1994. Monitoring global change with phenology: the case of the spring green wave. *International Journal of Biometeorology*, 38: 18-22.
- Schwartz M.D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 42, 3: 113-118.
- Sivakumar M.V.K., Gommers R., Baier W. 2000. Agrometeorology and sustainable agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 1-2: 11-26.
- Sivertsen T.H., Nejedlik P., Oger R., Sigvald R. 1998. The Phenology of Crops and the Development of Pests and Diseases. A report from a working group on phenology, pest and diseases on crops. Brussels, Cost 711: 90 str.
- Skaar E. 1999. Time variability of the meteorological parameters used in phenological modelling. V: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology. 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, Sydney, 8-12 nov. 1999. De Dear R.J., Potter J.C. (eds.). Sydney, Wesley Conference Centre, CD-ROM, ICB3.2: 1-5
- Smole J. 1979. Primerjave terminov nastopa fenofaz pri češnjah (*Prunus avium* L.) v obdobjih 1965-1970 in od 1970-1977 na Goriškem. Zbornik Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Kmetijstvo, 33: 117-131.
- Snyder R.L., Spano D., Cesaraccio C., Duce P. 1999. Determining degree-day thresholds from field observations. *International Journal of Biometeorology*, 42, 4: 177-182.
- Snyder R.L., Spano D., Duce P., Cesaraccio C. 2001. Temperature data for phenological models. *International Journal of Biometeorology*, 45, 4: 178-183.
- Song J. 1999. Phenological influences on the albedo of prairie grassland and crop fields. *International Journal of Biometeorology*, 42, 3: 153-157.
- Spano D., Cesaraccio C., Duce P., Snyder R.L., 1999. Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 42, 3: 124-133.
- Sparks T.H. 1999. Phenology and the changing pattern of bird migration in Britain. *International Journal of Biometeorology*, 42, 3: 134-138.

- Sparks T.H., Jeffree E.P., Jeffree C.E. 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology*, 44, 2: 82-87.
- Stewart D.W., Dwyer L.M. 1987. Analysis of phenological observations on barley (*Hordeum vulgare*) using the feekes scale. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39, 1: 37-48.
- Strajnar (por. Lajevec) K. 1997. Prostorska in časovna analiza pojava fenoloških faz nekaterih samoniklih in sadnih rastlinskih vrst v Sloveniji v odvisnosti od vremena. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 93 str.
- Sušnik A. 1990. Fenološki razvoj štirih jablan (cv. *Malus domestica* Borkh) glede na temperaturni prag v Sloveniji. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 81 str.
- Sušnik A. 1994. Uporabnost raznih metod prikaza fenološkega razvoja koruze (*Zea mays* L.) v Sloveniji. *Razprave-Papers*, 31: 27-39.
- Sušnik A., Kofol-Seliger A. 1999. Uporaba fenoloških podatkov pri določanju prašenja alergenih rastlin. *Razprave-Papers*, posebna številka: 41-56.
- Sušnik A. 2000. The changes and trends of the phenological phases for some autochthon plant species in Slovenia. V: *New Contributions to phenology, Proceedings of the IV. Workshop on Phenology*, Doksany, 12-13 Oct. 1999. Horakova P. (ur.). Praha, Czech Hydrometeorological Institute: 7-15.
- Šegula-Ilič A. 1990. Model ozelenitve nekaterih drevesnih vrst v Sloveniji glede na meteorološke parametre okolja. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za fiziko: 69 str.
- Škrjanec M. 1997. Značilnosti fenološkega razvoja treh sort hrušk (cv. *Pyrus communis* L.) v Sloveniji. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 90 str.
- Šošić I., Serdar V. 1992. Uvod u statistiku. 7. izdaja. Zagreb, Školska knjiga: 363 str.
- Tabernik D. 1990. Značilnosti fenološkega razvoja štirih sort jablan (cv. *Malus domestica* Borkh) v Sloveniji. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 92 str.
- Thomson B.D., Siddique K.H.M., Barr M.D., Wilson J.M. 1997. Grain legume species in low rainfall Mediterranean-type environments. I. Phenology and seed yield. *Field Crops Research*, 54: 173-187.
- Tucker C.J., Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Myneni R.B., Taylor M.G. 2001. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45, 4: 184-190.
- Valter J., Kott I. 1999. Monitoring of the Seasonal progress of vegetation by the normalised phenological data. *Razprave-Papers*, posebna številka: 70-73.
- Valentini N., Me G., Ferrero R., Spanna F. 2001. Use of bioclimatic indexes to characterize phenological phases of apple varieties in Northern Italy. *International Journal of Biometeorology*, 45, 4: 191-195.
- Veselič Ž. 1990. Olistenje bukve na snežniško-javorniškem masivu z razčlenbo splošnih zakonitosti olistenja bukve. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo: 64 str.
- Visbeck M. 2001. The North Atlantic Oscillation.
<http://www.ldeo.columbia.edu/~visbeck/nao/presentation/html/NAO.htm> (07.11.2001)

- Vučetić V. 1991. Analiza fenoloških prilika na področju Molva. Hrvatski meteorološki časopis, 26: 99-115.
- Vučetić V. 1994. Degree days in the Mountain Area of Croatia. Offenbach am Main. Annalen der Meteorologie 30, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes: 356-359.
- Vučetić M., Vučetić V. 1996. The phenological analysis of almond culture along the Adriatic coast. V: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 247-256.
- Walkovszky A. 1998. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L.) in Hungary. International Journal of Biometeorology, 41, 4: 155-160.
- White L.M. 1979. Relationship between meteorological measurements and flowering index species to flowering of 53 plant species. Agricultural Meteorology, 20, 3: 189-204.
- White M.A., Running S.W., Thornton P.E., 1999. The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. International Journal of Biometeorology, 42, 3: 139-145.
- Wielgolaski F.E., Klaveness D. 1996. Norwegian plant phenology - a brief review of historical data, and a comparison of some mean first flowering dates (mFFD) for this and last century. V: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology, Ljubljana, 1-8 sep. 1996. Hočevar A., Črepinšek Z., Kajfež-Bogataj L. (ur.). Ljubljana, Mednarodno biometeorološko društvo in Slovensko meteorološko društvo: 208-213.
- Wielgolaski F.E. 1999. Starting dates and basic temperatures in phenological observations of plants. International Journal of Biometeorology, 42, 3: 158-168.
- Wielgolaski F.E. 2001. Phenological modifications in plants by various edaphic factors. International Journal of Biometeorology, 45, 4: 196-202.
- Willits D.H., Peet M.M. 1988. The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climates. Agricultural and Forest Meteorology, 92, 3: 191-202.
- Yang S., Logan J., Coffey D.L. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. Agricultural and Forest Meteorology, 74, 1-2: 61-74.
- Yin X., Kropff M.J., Aggarwal P.K., Peng S., Horie T. 1997. Optimal preflowering phenology of irrigated rice for high yield potential in three Asian environments: a simulation study. Field Crops Research, 51: 19-27.
- Zalom F., Wilson T. 1982: Degree-days in relation to an integrated pest management program. University of California, Division of Agricultural Sciences: Leaflet 21301.
- Zalom F.G., Goodell P.B., Wilson L.T., Barnett W.W., Bentley W.J. 1983: Degree-days: the calculation and use of heat units in pest management. University of California, Division of Agricultural Sciences: Leaflet 21373.
- Zmrzлак M. 1991. Dinamika fenološkega razvoja hmelja (cv. Savinjski golding, aurora) v odvisnosti od temperature zraka v spodnji Savinjski dolini. Dipl. delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 82 str.
- Zrnec C. 1994. Značilnosti cvetenja nekaterih vrst rastlin in njihova uporabnost v agrometeorologiji. Razprave-Papers, 31: 51-60.
- Žust A. 1994. Zveze med dolžinami medfaznih obdobj vinske trte (*Vitis vinifera*) in vsotami temperatur nad izbranimi pragovi v Sloveniji. Razprave-Papers, 31: 41-49.
- Žust A. 1999. Phenological archive survey and the usage of phenological data in Slovenia. Razprave-Papers, posebna številka: 81-87.

7.2 DRUGI VIRI

- Anleitung zur phänologischen beobachtung in Österreich. 2000. Wien, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimatologie: 31 str.
- Clarke G.M., Cooke D.A. 1998. A basic course in Statistics. London, Arnold, Hodder Headline Group: 672 str.
- Crop Productivity. 1994. Oxford, Butterworth-Heinemann: 282 str.
- Penzar I., Penzar B. 1989. Agroklimatologija. 2. izdaja. Zagreb, Školska knjiga: 274 str.
- Radinović D. 1984. Klimatologija, opšta i regionalna. Beograd, Prirodno matematički fakultet Univerziteta u Beogradu: 236 str.

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem svoji mentorici prof. dr. Lučki Kajfež-Bogatajevi za vsestransko pomoč pri oblikovanju tega dela: za vse strokovne nasvete v zvezi s tematiko naloge, kritične pripombe in koristne napotke ob pregledu naloge ter za vso potrpežljivost.

Hvala tudi članoma komisije za oceno naloge prof. dr. Francu Batiču in prof. dr. Mitju Kaligariču za natančen pregled naloge ter vse pripombe in predloge glede obravnavane teme v nalogi.

Na agenciji republike Slovenije za okolje so mi prijazno omogočili dostop do meteoroloških in fenoloških podatkov, za kar se jim iskreno zahvaljujem. Zahvalo sem dolžna celotnemu oddelku za agrometeorologijo, ki vodi fenološka opazovanja, še posebej pa dipl. ing. Cirilu Zrncu za številne strokovne nasvete s področja rastlinske fenologije in kritičen pregled teksta.

Sodelavcu mag. Klemenu Bergantu hvala za pomoč pri programiranju v MATLABU, za vse predloge ob pregledu naloge, prav tako pa tudi za moralno podporo.