

Rezultati dvajsetletnega spremljanja fenoloških faz dreves na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji

Results of twenty years of monitoring phenological phases of trees in intensive forest ecosystem monitoring plots in Slovenia

Gal OBLIŠAR¹, Urša VILHAR²



Izvelek:

Fenološka opazovanja dreves v gozdovih so pomemben vir podatkov za ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb na gozdove in druge naravne ekosisteme. V naši raziskavi smo analizirali nastop fenoloških faz prvih listov in iglic ter splošnega rumenjenja listov za listavce ter dolžino vegetacijskega obdobja na osmih ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji. Obravnavali smo drevesne vrste bukev, dob, rdeči bor, črni bor in smreko v letih od 2004 do 2023. Ugotavljamo, da je nastop fenološke faze prvih listov na večini ploskev zgodnejši kot pred leti. Značilno zgodnejši nastop fenološke faze prvih iglic med leti smo ugotovili tudi za rdeči bor na ploskvi Brdo in črni bor na ploskvi Gropajski bori. Pri buki smo ugotovili značilne razlike med ploskvami. Nastop fenološke faze prvih listov bukke je bil najkasnejši na ploskvah Lontovž in Gorica, medtem ko je bil na ploskvah Fondek in Borovec v povprečju sočasen. Za fenološko fazo splošnega rumenjenja listov pri buki so razlike med ploskvami manjše kot pri fenološki fazi prvih listov. Naši rezultati na ploskvah Borovec, Fondek in Gorica nakazujejo daljšanje vegetacijskega obdobja, pri čemer je na ploskvi Gorica daljšanje dolžine vegetacijskega obdobja manj izrazito in ni statistično značilno.

Ključne besede: gozd, fenologija, drevesa, intenzivno spremljanje stanja gozdov, Slovenija

Abstract:

Phenological observations of trees in forests are an important source of information for determining the impact of climate change on forests and other natural ecosystems. In our study, we analyzed the onset of the phenological phases of first leaves and needles and general leaf yellowing for deciduous trees, as well as the length of the growing season in 8 intensive forest ecosystem monitoring plots in Slovenia. We looked at the tree species beech, oak, Scots pine, Austrian pine and spruce from 2004 to 2023. We find that the onset of the phenological phase of the first leaves is earlier in most plots than it was a few years ago. A typically earlier onset of the phenological phase of the first needles between years was also found for Scots pine in the Brdo plot and Austrian pine in the Gropajski pine plot. For beech, we found characteristic differences between the plots. The onset of the phenological phase of the first leaves of beech was the latest in the Lontovž and Gorica plots, while in the Fondek and Borovec plots it was on average simultaneous. For the general leaf yellowing phenological phase of beech, the differences between plots are smaller than for the first leaf phenological phase. Our results in the Borovec, Fondek and Gorica plots indicate a lengthening of the growing season, whereas in the Gorica plot the lengthening of the growing season is less pronounced and not statistically significant.

Key words: forest, phenology, trees, intensive monitoring of forest ecosystems, Slovenia

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Fenološka opazovanja rastlin so pomembna za ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb na naravne ekosisteme. V zadnjih desetletjih podnebne spremembe zelo vplivajo na fenologijo rastlin in živali (Menzel in sod., 2006; Parmesan, 2006; Thomas in sod., 2006). Življenjski cikli številnih rastlinskih in živalskih vrst so namreč usklajeni z okoljskimi dejavniki, kot sta na primer tempe-

ratura in svetloba (Donnelly in sod., 2004). Zato lahko vsaka sprememba temperature zraka vpliva na njihove fenološke faze (Tylianakis in sod., 2008). V zadnjih desetletjih se je povprečna temperatura zraka zvišala, več je tudi temperaturnih ekstremov (IPCC, 2023). Posledično so v številnih regijah opazili premik območij razširjenosti rastlinskih vrst proti severu in na višje nadmorske višine ter časovne premike v fenološkem razvoju (Menzel in sod., 2006; Bertin, 2008; Doi in Katano, 2008;

¹ G. O., Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno ekologijo. Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

² U. V., Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno ekologijo. Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Lenoir in sod., 2008; Chen in Xu, 2012). V fenologiji lahko ti premiki faz pomembno vplivajo na interakcije med vrstami in povzročajo motnje v odnosih med rastlinami ter živalmi (Bale in sod., 2002; Van Asch in Visser, 2007). Zato so v sklenjenih gozdnih ekosistemih fenološka opazovanja dreves izredno pomembna za proučevanje vpliva podnebnih sprememb na gozdove (Vilhar in sod., 2013a; Vilhar in sod., 2018).

Z raziskavo želimo predstaviti rezultate fenoloških opazovanj gozdnega drevja v sklenjenih gozdnih ekosistemih, ki potekajo v okviru Programa intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov (IMGE). V strnjenih gozdovih, oddaljenih od urbanih območij in toplotnih otokov v mestih, fenološka opazovanja dreves namreč redko potekajo, zato so še posebno pomemben podatek o vplivu podnebnih sprememb na gozdne ekosisteme (Vilhar in Kajfež-Bogataj, 2003). V prispevku obravnavamo nastop fenoloških faz prvih listov in iglic (BGS) za iglavce in listavce ter splošnega rumenjenja listov (EGS) za listavce na ploskvah IMGE v Sloveniji v letih od 2004 do 2023. Ugotavljamo tudi, ali se je med leti spreminjala dolžina vegetacijskega obdobja (LGS) za bukev in dob.

2 METODE

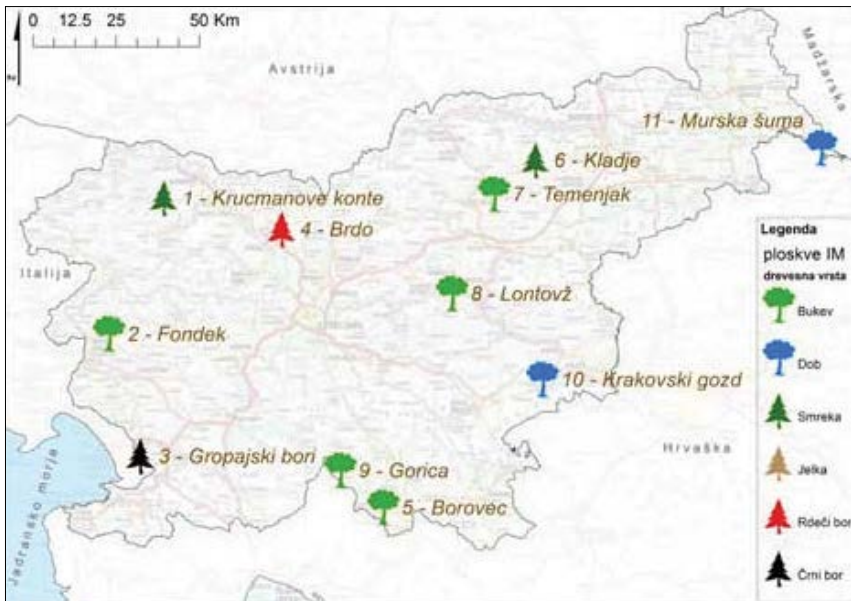
2 METHODS

2.1 FENOLOŠKA OPAZOVANJA DREVES

2.1 PHENOLOGICAL OBSERVATIONS OF TREES

V naši raziskavi smo analizirali nastop fenoloških faz prvih listov in iglic ter splošnega rumenjenja listov za listavce na osmih ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji (Slika 1.) v letih od 2004 do 2023. Na vsaki ploskvi so fenološka opazovanja potekala na dvajsetih različnih drevesih enkrat na teden ali na štirinajst dni. Opazovali smo zgornji del krošnje, če pa ni bil viden, pa osrednji del drevesne krošnje. Fenološka opazovanja so opravljali skrbniki ploskev, ki so hkrati gozdarji Zavoda za gozdove Slovenije. Na Gozdarskem inštitutu Slovenije smo opazovanja koordinirali, nadgrajevali obstoječe podatkovne baze, postopke prenosa, kontrole in hranjenja podatkov.

Začetni datum vegetacijskega obdobja (angl. *beginning of growing season* – BGS) smo zabeležili, ko so postale listne ploskve listov vidne na do 33 %



Slika 1: Ploskve intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov (IMGE), na katerih potekajo fenološka opazovanja.
Figure 1: Intensive Monitoring Plots of Forest Ecosystems (IMGE), where phenological observations are conducted.

opazovanega dela krošnje. Datum končanja vegetacijskega obdobja (angl. *end of growing season* – EGS) smo zabeležili, ko so jesensko obarvani listi postali vidni na več kot 66 % opazovanega dela krošnje. Metode so podrobneje opisane v Priročniku za fenološka opazovanja (Vilhar, 2010) in prispevkih (Vilhar in sod., 2013b; Vilhar in sod., 2014; Vilhar in sod., 2018). Fenološke faze za dob (*Quercus robur* L.) smo obravnavali na ploskvi Murska šuma; za bukev (*Fagus sylvatica* L.) na ploskvah Lontovž pod Kumom, Borovec v Kočevski Reki, Fondek v Trnovskem gozdu, Gorica v Loškem Potoku; za smreko (*Picea abies* (L.) Karst.) na ploskvi Krucmanove Konte na Pokljuki; za rdeči bor (*Pinus sylvestris* L.) na ploskvi Brdo pri Kranju; za črni bor (*Pinus nigra* Arnold) na ploskvi Gropajski bori pri Sežani.

2.2 STATISTIČNE ANALIZE

2.2 STATISTICAL ANALYSES

Na podlagi fenoloških opazovanj izbranih fenoloških faz (BGS, EGS) za opazovana drevesa na posamezni ploskvi smo izračunali povprečne letne nastope fenoloških faz prvih listov in iglic za listavce in iglavce (BGS) ter splošnega rumenjenja listov za listavce (EGS) na obravnavanih ploskvah. Opazovane datume pojava posamezne fenološke faze (BGS oz. EGS) smo pretvorili v julijanski dan oz. doy (0–365 – angl. »day of year«), tj. dan v posameznem letu, v katerem se je fenološka faza pojavila. Za obravnavana listavca, bukev in dob, smo iz razlike med BGS in EGS izračunali povprečno letno dolžino vegetacijskega obdobja (angl. *length of growing season* – LGS) v dnevih.

Preglednica 1: Povprečni julijanski dan (doy) nastopa fenološke faze prvih listov (BGS), splošnega rumenjenja (EGS) in dolžina vegetacijskega obdobja (LGS) na obravnavanih ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov (IMGE) v letih od 2004 do 2023

Table 1: Mean Julian day (doy) of the onset of the phenophase of the first leaves (BGS), the general yellowing (EGS), and the length of the growing season (LGS) in the intensive monitoring of forest ecosystems (IMGE) plots from 2004 to 2023

Ploskev (drevesna vrsta)	BGS (julijanski dan – doy)					EGS (julijanski dan – doy)					LGS (dan)				
	Pov.	Min	Maks	Std. dev	δ_{povpre}	Pov.	Min	Maks	Std. dev	δ_{povpre}	Pov.	Min	Maks	Std. dev	δ_{povpre}
Borovec (bukev)	117	103	126	7,4	-0,011	304	291	318	13,9	0,51***	198	175	224	12,0	0,180***
Fondek (bukev)	119	104	128	8,9	-0,288***	312	299	321	8,3	-0,152*	209	182	238	11,0	0,229***
Gorica (bukev)	126	112	138	7,8	-0,147**	303	281	321	10,9	-0,099*	192	168	223	13,5	0,029
Lontovž (bukev)	129	105	137	8,9	0,171***	298	279	308	8,7	0,166**	182	161	212	11,3	-0,06
Murska šuma (dob)	110	86	124	9,5	0,075	323	305	340	9,7	0,418***	226	196	252	13,9	0,242***
Brdo (rdeči bor)	118	101	153	12,1	-0,370***										
Gropajski bori (črni bor)	113	118	172	10,9	-0,675***										
Krucman. konte (smreka)	160	146	174	7,4	0,150**										

* p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001

Ugotavljali smo povprečne vrednosti in standardni odklon posameznih spremenljivk (BGS, EGS, LGS) po ploskvah za obdobje od leta 2004 do 2023. Za ugotavljanje povezav med pojavom fenoloških faz (povprečje za vsa opazovana drevesa na ploskvi) in leti smo uporabili Spearmanov koeficient korelacije (δ povp), ki prikazuje neparametrške stopnje povezanosti dveh spremenljivk oziroma meri jakost povezave med dvema spremenljivkama. Za statistične analize smo uporabili program R, različico 4.2.3 (R Core Team, 2024).

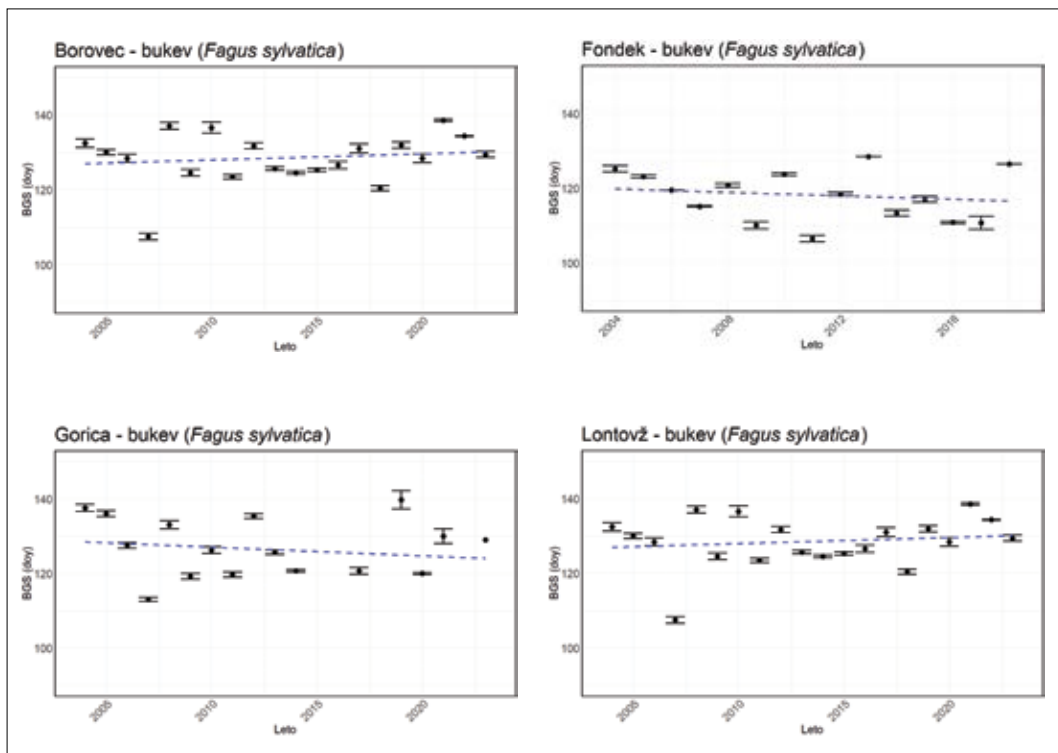
3 REZULTATI

3 RESULTS

3.1 FENOLOŠKA FAZA PRVIH LISTOV ZA LISTAVCE OZIROMA PRVIH IGLIC ZA IGLAVCE

3.1 FIRST LEAF UNFOLDING PHENOPHASE FOR DECIDUOUS AND CONIFERS TREES

Na obravnavanih ploskvah je bil v opazovanem obdobju povprečen nastop fenološke faze prvih listov (BGS) pri bukvi med 117. in 129. julijanskim dnevem. Povprečen nastop je bil najzgodnejši v letu 2016, in sicer na 103. julijanski dan na ploskvi Borovec, najkasnejši pa na 138. julijanski dan leta 2019 na ploskvi Gorica (Slika 2.). V obravnavanem obdobju je δ povp med BGS in leti na treh



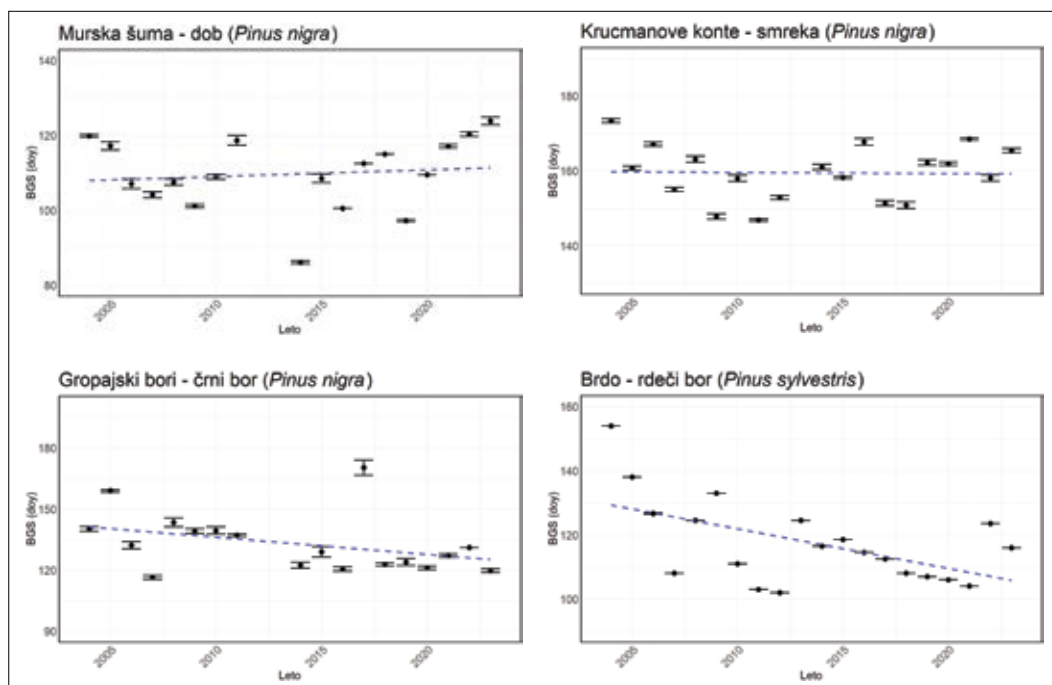
Slika 2: Povprečni letni nastop fenološke faze prvih listov (BGS) bukve na ploskvah Borovec (zgoraj levo), Fondek (zgoraj desno), Gorica (spodaj levo) in Lontovž (spodaj desno) v letih od 2004 do 2023. Ročaji označujejo 99 % interval zaupanja, modra črtkana črta pa regresijsko linijo

Figure 2: Mean annual onset of the first leaf phenophase (BGS) of beech in the Borovec (top left), Fondek (top right), Gorica (bottom left) and Lontovž (bottom right) plots from 2004 to 2023. The handles indicate the 99% confidence intervals and the blue dashed line indicates the regression line

ploskvah statistično značilen, le na postaji Borovec ni. Na ploskvi Fondek je δ povp med BGS in leti negativen in statistično značilen ($p < 0,001$), kar nakazuje na zgodnejši nastop fenološke faze BGS v obravnavanem obdobju. Na postaji Lontovž je δ povp pozitiven in statistično značilen ($p < 0,001$), kar nakazuje na kasnejši nastop fenološke faze prvih listov v obravnavanem obdobju (Preglednica 1). Povprečen nastop fenološke faze prvih listov (BGS) pri dobu na ploskvi Murska šuma v obravnavanem obdobju je 110. julijanski dan, najkasneje, povprečno 124. julijanski dan, pa je nastop te fenološke faze leta 2023.

Povprečni nastop fenološke faze prvih iglic (BGS) rdečega bora na ploskvi Brdo je bil v obravnavanem obdobju med 101. julijanskim dnevom v letu 2011 in 153. julijanskim dnevom v letu 2004.

V obravnavanem obdobju je δ povp med BGS in leti negativen statistično značilen ($p < 0,001$), kar nakazuje na zgodnejši nastop fenološke faze BGS. Povprečni nastop fenološke faze BGS smreke na ploskvi Krucmanove konte je bil v istem obdobju med 146. julijanskim dnevom v letu 2011 in 174. julijanskim dnevom v letu 2004. V obravnavanem obdobju je δ povp med BGS in leti statistično značilen ($p < 0,01$). Na ploskvi Gropajski bori z drevesno vrsto črni bor je bil povprečni nastop fenološke faze BGS v opazovanem obdobju med 118. julijanskim dnevom leta 2007 in 174. julijanskim dnevom v letu 2017 (slika 3.). V obravnavanem obdobju je δ povp med BGS in leti negativen statistično značilen ($p < 0,001$), kar nakazuje na zgodnejši nastop fenološke faze prvih iglic v obravnavanem obdobju (Preglednica 1).



Slika 3: Povprečni letni nastop fenološke faze prvih listov (BGS) na ploskvi Murska šuma (zgoraj levo), smreke na ploskvi Krucmanove konte (zgoraj desno), črnega bora na ploskvi Gropajski bori (spodaj levo) in rdečega bora na ploskvi Brdo (spodaj desno) v letih od 2004 do 2023. Ročaji označujejo 99 % interval zaupanja, modra črtkana črta pa regresijsko linijo

Figure 3: Mean annual onset of the first leaf phenophase (BGS) in the Murska šuma plot (top left), spruce in the Krucmanove konte plot (top right), black pine in the Gropajski bori plot (bottom left) and red pine in the Brdo plot (bottom right) from 2004 to 2023. The arms indicate the 99% confidence intervals and the blue dashed line indicates the regression line

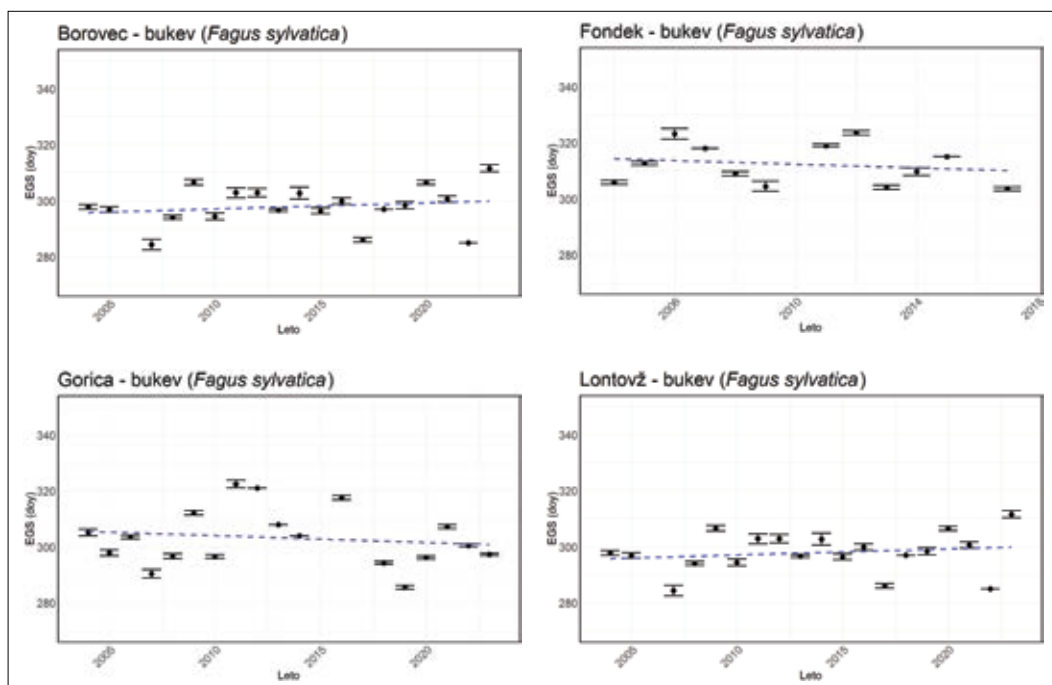
3.2 FENOLOŠKA FAZA SPLOŠNEGA RUMENENJA IN DOLŽINA VEGETACIJSKEGA OBDOBJA ZA LISTAVCE

3.2 AUTUMN LEAF COLOURING PHENOPHASE AND GROWING SEASON LENGTH FOR DECIDUOUS TREES

Na obravnavanih ploskvah se je v obravnavanem obdobju povprečen nastop fenološke faze splošnega rumenjenja listov (EGS) pri bukvi začel med 279 in 321 julijanskim dnevem. Najkasneje se je fenološka faza EGS pojavila na ploskvi Fondek leta 2006 in ploskvi Gorica leta 2011. V enakem obdobju se je pri dobu na ploskvi Murska šuma fenološka faza splošnega rumenjenja listov začela povprečno med 305 in 340 julijanskim dnevem. V

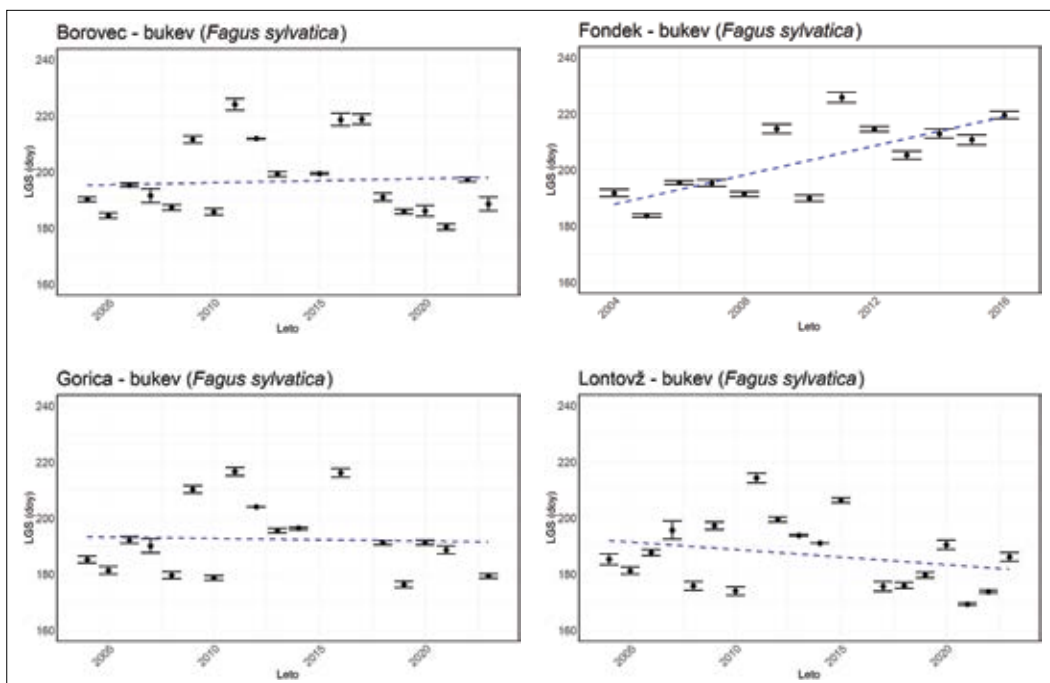
obravnavanem obdobju je δ povp med EGS in leti na vseh obravnavanih ploskvah statistično značilen. Na ploskvah Borovec, Lontovž in Murska šuma je δ povp med EGS in leti pozitiven in statistično značilen (Borovec in Murska šuma $p < 0,001$; Lontovž $p < 0,01$), kar nakazuje na poznejši nastop fenološke faze splošnega rumenjenja listov v obravnavanem obdobju.

V obravnavanem obdobju je bila na obravnavanih ploskvah dolžina vegetacijskega obdobja (LGS) pri bukvi povprečno dolga med 161. in 238. dnevi. V obravnavanem obdobju je bila najkrajša dolžina vegetacijske dobe na ploskvi Lontovž leta 2022, najdaljša pa na ploskvi Fondek leta 2011. Na ploskvah Borovec in Fondek je δ povp med LGS in leti pozitiven ter statistično značilen ($p < 0,001$), kar nakazuje na daljšanje vegetacijskega



Slika 4: Povprečni letni nastop fenološke faze splošnega rumenjenja (EGS) bukve na ploskvah Borovec (zgoraj levo), Fondek (zgoraj desno), Gorica (spodaj levo) in Lontovž (spodaj desno) v letih od 2004 do 2023. Ročaji označujejo 99 % interval zaupanja, modra črtkana črta pa regresijsko linijo

Figure 4: Mean annual onset of the general yellowing phenophase (EGS) of beech trees in the Borovec (top left), Fondek (top right), Gorica (bottom left) and Lontovž (bottom right) plots from 2004 to 2023. The handles indicate the 99% confidence intervals and the blue dashed line indicates the regression line



Slika 5: Povprečna letna dolžina vegetacijskega obdobja (LGS) buke na ploskvah Borovec (zgoraj levo), Fondek (zgoraj desno), Gorica (spodaj levo) in Lontovž (spodaj desno) v letih od 2004 do 2023. Ročaji označujejo 99 % interval zaupanja, modra črtkana črta pa regresijsko linijo
Figure 5: Mean annual length of the growing season (LGS) of beech trees in the plots Borovec (top left), Fondek (top right), Gorica (bottom left), and Lontovž (bottom right) from 2004 to 2023. The handles indicate the 99% confidence intervals and the blue dashed line indicates the regression line

obdobja. Na ploskvah Gorica in Lontovž δ povp ni statistično značilen. V obravnavanem obdobju je bila pri dobi na ploskvi Murska šuma dolžina vegetacijskega obdobja med 196. in 252. dnev (Slika 5). Spearmanov koeficient korelacije δ povp med LGS in leti je na omenjeni ploskvi pozitiven in statistično značilen ($p < 0,001$), kar nakazuje na daljšanje vegetacijskega obdobja. Spremenljivost dolžine vegetacijskega obdobja med leti je povprečno večja, kot je spremenljivost fenološke faze splošnega rumenjenja listov (EGS) in fenološke faze prvih listov (BGS).

4 ZAKLJUČKI 4 CONCLUSIONS

Trendi v nastopu obravnavanih fenoloških faz se razlikujejo zaradi raznolikih vplivov podnebja na posamezno razvojno fazo drevesa pa tudi zaradi različnih časovnih trendov vremenskih dejavnikov

v posameznem letu (Gordo in Sanz, 2009). V Evropi se je vegetacijsko obdobje drevesnih vrst podaljšalo za približno enajst dni od leta 1960 do konca 20. stoletja (Vitasse in sod., 2011) predvsem zaradi zgodnejšega začetka vegetacijskega obdobja in manj zaradi zamika konca vegetacijskega obdobja (Davi in sod., 2006). Začetek fenološke faze olistanja pri listavcih uravnavajo predvsem regionalne in lokalne temperaturne razmere (Davi in sod., 2011) ter dolžina dneva (Vitasse in Basler, 2012). Zato so odstopanja od povprečja začetka te fenološke faze v posameznih letih večja v zmernem pasu in na višjih nadmorskih višinah (Menzel in sod., 2007). Spremembe jesenskih fenoloških faz so bolj heterogene, manj izrazite v primerjavi s spomladanskimi (Menzel in sod., 2007) in niso neposredno povezane s podnebnimi dejavniki (Dragoni in Rahman, 2012). Rezultati naše raziskave kažejo, da je nastop fenološke faze

prvih listov na večini ploskev zgodnejši kot pred leti. Pri bukvi smo ugotovili značilne razlike med ploskvami, kar je pričakovano, saj so ploskve na različnih nadmorskih višinah med 700 in 1000 metri ter v različnih ekoloških regijah. Nastop fenološke faze prvih listov bukve je bil najkasnejši na ploskvah Lontovž in Gorica, medtem ko je bil na ploskvah Fondék in Borovec v povprečju sočasen. Značilno zgodnejši nastop fenološke faze prvih iglic med leti smo ugotovili tudi za rdeči bor na ploskvi Brdo in črni bor na ploskvi Gropajski bori. Za fenološko fazo splošnega rumenenja listov (EGS) pri bukvi so razlike med ploskvami manjše kot pri fenoloških fazah prvih listov, kar se ujema z ugotovitvami prejšnjih študij (Menzel in sod., 2007). Naši rezultati nakazujejo daljšanje vegetacijskega obdobja z leti na ploskvah Borovec, Fondék in Gorica, pri čemer je na ploskvi Gorica daljšanje LGS manj izrazito in ni statistično značilno.

5 ZAHVALA

5 ACKNOWLEDGEMENT

Raziskava je potekala v okviru Intenzivnega monitoringa stanja gozdov v Sloveniji, ki je del programa EU ICP Forests. Raziskavo je v okviru nalog Javne gozdarske službe GIS - JGS 1/3 (Intenzivno spremljanje vpliva onesnaženosti zraka na gozdove v skladu s Pravilnikom o varstvu gozdov in Konvencije UNECE CLRTAP) podprlo Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano RS. Raziskavo je finančno delno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije v okviru Raziskovalne/programske skupine za gozdno biologijo, ekologijo in tehnologijo (P0404-009). Raziskava je bila deloma izvedena v okviru pripravljalnega projekta eLTER faze (eLTER PPP), projekta eLTER Advanced Community Project (eLTER PLUS) in projekta Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost slovenskega RRI prostora - RI-SI-LifeWatch, ki ga financirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport, ter Evropska unija iz Evropskega regionalnega Evropskega sklada za regionalni razvoj.

6 VIRI IN LITERATURA

6 REFERENCES

- Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J. C., Farrar, J., Good, J. E. G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T. H., Lindroth, R. L., Press, M. C., Symrnioudis, I., Watt, A. D., Whittaker, J. B. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8, 1: 1–16.
- Bertin, R. I. 2008. Plant Phenology And Distribution In Relation To Recent Climate Change. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 135, 1: 126–146.
- Chen, X., Xu, L. 2012. Temperature controls on the spatial pattern of tree phenology in China's temperate zone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154–155, 0: 195–202.
- Davi, H., Dufrêne, E., Francois, C., Le Maire, G., Loustau, D., Bosc, A., Rambal, S., Granier, A., Moors, E. 2006. Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, 1: 35–56.
- Davi H., Gillmann M., Ibanez T., Cailleret M., Bontemps A. in sod. 2011. Diversity of leaf unfolding dynamics among tree species: New insights from a study along an altitudinal gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 12: 1504–1513
- Dragoni D., Rahman A. F. 2012. Trends in fall phenology across the deciduous forests of the Eastern USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 157, 0: 96–105
- Doi, H., Katano, I. 2008. Phenological timings of leaf budburst with climate change in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 3: 512–516.
- Donnelly, A., Jones, M., Sweeney, J. 2004. A review of indicators of climate change for use in Ireland. *International Journal of Biometeorology*, 49, 1: 1–12.
- Gordo O., Sanz J. J. 2009. Long-term temporal changes of plant phenology in the Western Mediterranean. *Global Change Biology*, 15, 8: 1930–1948
- IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, IPCC: str. 35–115.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., Brisse, H. 2008. A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*, 320, 5884: 1768–1771.
- Menzel, A., Estrella, N., Schleip, C. 2007. Impacts of Climate Variability, Trends and NAO on 20th Century European Plant Phenology. V: *Climate Variability and*

- Extremes during the Past 100 Years. S. Brönnimann, J. Luterbacher, T. Ewen, H. F. Diaz, R. S. Stolarski, U. Neu, Springer Netherlands: 33: 221–233.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O. G., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A. J. H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Züst, A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12, 10: 1969–1976.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 637–669.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Thomas, C. D., Franco, A. M. A., Hill, J. K. 2006. Range retractions and extinction in the face of climate warming. *Trends in Ecology & Evolution*, 21, 8: 415–416.
- Tylianakis, J. M., Didham, R. K., Bascompte, J., Wardle, D. A. 2008. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 12: 1351–1363.
- Van Asch, M., Visser, M. E. 2007. Phenology of forest caterpillars and their host trees: the importance of synchrony. *Annu Rev Entomol*, 52, 37–55.
- Vilhar, U. 2010. Priročnik za fenološka opazovanja v okviru Intenzivnega spremljanja stanja gozdnih ekosistemov (Raven II). Dopolnitve in prilagoditev za Slovenijo. Ljubljana, International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Expert Panel on Meteorology and Phenology. Gozdarski inštitut Slovenije: 17 str.
- Vilhar, U., Beuker, E., Mizunuma, T., Skudnik, M., Lebourgeois, F., Soudani, K., Wilkinson, M. 2013a. Chapter 9. Tree Phenology. V: *Forest Monitoring. Terrestrial Methods in Europe with Outlook to North America and Asia*. M. Ferretti, R. Fischer. (ur.). Amsterdam, Elsevier: 12: 169–182.
- Vilhar, U., De Groot, M., Züst, A., Skudnik, M., Simončič, P. 2018. Predicting phenology of European beech in forest habitats. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 11, 1: 41–47.
- Vilhar U., Kajfež-Bogataj L. 2003. Odvisnost med nastopom fenofaz pri bukvi in navadnem divjem kostanju v Kočevju ter povprečnimi mesečnimi temperaturami zraka v obdobju od leta 1961 do 1990. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 72, 63-68: 223–250.
- Vilhar, U., Skudnik, M., Ferlan, M., Simončič, P. 2014. Influence of meteorological conditions and crown defoliation on tree phenology in intensive forest monitoring plots in Slovenia. Vpliv vremenskih spremenljivk in osutosti krošenj na fenološke faze dreves na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji. *Acta Silvae et Ligni*, 105, 1–15.
- Vilhar, U., Skudnik, M., Simončič, P. 2013b. Fenološke faze dreves na ploskvah Intenzivnega monitoringa gozdov v Sloveniji. Phenological phases of trees on the Intensive monitoring plots in Slovenia. *Acta Silvae et Ligni*, 100, 5–17.
- Vitasse, Y., François, C., Delpierre, N., Dufrêne, E., Kremer, A., Chuine, I., Delzon, S. 2011. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 7: 969–980.
- Vitasse Y., Basler D. 2012. What role for photoperiod in the bud burst phenology of European beech. *European Journal of Forest research*, 1–8.