

Debelinska rast in odziv duglazije (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na podnebje na produktivnem rastišču Pečovnika pri Celju

*Radial Growth and Response of Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) and Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) to Climate on Productive Site of Pečovnik near Celje*

Tom LEVANIČ^{1,*}, Hana ŠTRAUS²

Izvilleček:

Analizirali smo rast duglazije (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na produktivnem rastišču na Pečovniku pri Celju. Analizirane duglazije so bile nekoliko mlajše od smrek (67 proti 71 let) in so nekoliko bolje prirastale (4,57 mm proti 3,26 mm na leto). Podnebni odziv duglazije na produktivnem rastišču je bil zelo izrazit. Na debelinski prirastek so statistično značilno vplivale nadpovprečne temperature v februarju in marcu, ter nadpovprečne padavine v juliju. V primerjavi s smreko je podnebni odziv duglazije časovno stabilen in bistveno izrazitejši. Analiza značilnih let je pokazala, da so negativna značilna leta pri duglaziji vedno povezana z zelo hladnim vremenom v februarju in marcu, pozitivna pa z nadpovprečnimi temperaturami v istih dveh mesecih. Poletne padavine imajo pomembnejšo vlogo pri duglaziji le v zadnjih treh desetletjih, pred tem pa ne. To nakazuje, da na sicer zelo produktivnem rastišču nastaja potencialno pomanjkanje vode, kar lahko na dolgi rok, ob trendih podnebnih sprememb, vodi v sušni stres in slabšo rast duglazije.

Glavne besede: podnebne spremembe, odziv na klimo, suša, debelinski prirastek, dendrokronologija

Abstract:

We analysed the growth of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) at a productive site in Pečovnik near Celje. The analysed Douglas firs were slightly younger than spruces (67 vs 71 years) and grew slightly better (4.57 mm vs 3.26 mm per year). The climatic response of Douglas fir on the productive site was very pronounced. The radial increment was statistically significantly influenced by above-average temperatures in February and March and above-average precipitation in July. Compared to spruce, the climatic response of Douglas-fir is temporally stable and significantly more pronounced. Analysis of pointer years has shown that negative pointer years in Douglas-fir are always associated with very cold weather in February and March and positive years with above-average temperatures in the same two months. Summer precipitation has played a more important role in Douglas-fir only in the last three decades, but not before that. This suggests a potential lack of water in an otherwise very productive site that could lead to drought stress and poorer growth of Douglas-fir in the long term, given climate change trends.

Key words: Climate change, climate response, drought, radial increment, dendrochronology

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Podnebne spremembe že več desetletij vplivajo na ekosisteme po vsem svetu. Gozdovi so zaradi dolgoživosti dreves specifični ekosistemi, ki se težko in počasi prilagajajo na spremembe v okolju. V Evropi se podnebne spremembe kažejo predvsem v višanju temperature, pogostejših sušah in več ekstremnih vremenskih dogodkih. Posledično smo v nekaterih gozdnih ekosistemih

že priča večji mortaliteti posameznih drevesnih vrst zaradi sušnega stresa in s tem povezanimi dejavniki (Eilmann in Rigling, 2012). Najbolj prizadeta je smreka, ki je ena izmed ekonomsko najpomembnejših drevesnih vrst v Evropi. Tudi v Sloveniji se v zadnjih letih soočamo z množičnim propadanjem smreke zaradi podnebnih sprememb, naravnih ujm in gradacij podlubnikov. Modeli kažejo, da se bo v prihodnosti zmanjševala površina potencialnih rastišč za smreko (Levanič

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija.

² Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Večna pot 83, 1000 Ljubljana, Slovenija.

* dopisni avtor: tom.levanic@gozdis.si

in sod., 2019). Napovedujejo tudi, da bo do leta 2070, po srednjem podnebnem scenariju, v večini slovenskih gozdov prišlo do znatnih sprememb vegetacijskih tipov, pri čemer bo upad deleža smrekovij in visokogorskih bukovij v alpskem in dinarskem območju znaten, povečal pa naj bi se delež termofilnejših vegetacijskih tipov (Kutnar in sod., 2009). Ugotovitve Kutnarja in sodelavcev se dobro vklaplja v ugotovitve Hanewinkla in sodelavcev (2012), kjer so scenariji spreminjanja arealov razširjenosti posameznih glavnih drevesnih vrst zaradi podnebnih sprememb, Slovenijo in območja južno od Alp, umestili v pretežno gozdove s prevladujočo bukvijo, gozdove v višjih legah pa v gozdove s primesjo iglavcev. V poročilu Zavoda za gozdove Slovenije za leto 2020 se vidi, da delež smreke v slovenskih gozdovih upada že od leta 1998, v tem času je upadel z 32,7 % na 30,2 %, kar je 2.5 odstotne točke (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2020, 2021). Glede na veliko navezanost slovenske lesne industrije na les iglavcev, je pričakovati, da bo prišlo do iskanja drevesnih vrst, ki bi lahko na dolgi rok, ob upoštevanju scenarijev podnebnih sprememb, nadomestile smreko. Da bi poleg lesno-proizvodne funkcije ohranili tudi ostale funkcije gozdov moramo med drugim identificirati drevesne vrste, ki bi bile odpornejše na ekstremne podnebne razmere in sušo, kajti voda bo v prihodnosti igrala pomembno vlogo (Allen in sod., 2010; Anderegg in sod., 2015; Eilmann in Rigling, 2012).

Ena od možnosti za blažitev negativnih posledic zaradi izgube smreke je tudi sajenje ameriške duglazije (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) (Brus in Kutnar, 2016). V mnogih evropskih državah je zaradi hitre rasti in kakovostnega lesa najpogostejša tujerodna drevesna vrsta (van Loo in Dobrowolska, 2019), v Sloveniji pa je sajenje duglazije prepovedano (Ur. L. RS, 96/04). Kljub temu so jo v preteklosti že sadili v naše gozdove in je je 0,5 % v lesni zalogi (Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2020, 2021). V sestojih se duglazija dobro naravno pomlajuje, ni invazivna in ima podoben ekološki vpliv kot smreka (Schmid in sod., 2014). Poleg tega duglazija, v tem trenutku, v Evropi še nima veliko škodljivcev, čeprav na njenih naravnih rastiščih

v Severni Ameriki spada med drevesne vrste s številnimi različnimi škodljivci, med njimi tudi takimi, ki jo zelo ogrožajo (npr. metulji iz rodu gobarjev *Orgyia pseudotsugata* McDunnough, podlubnik duglazije *Dendroctonus pseudotsugae* Hopkins ali listni zavijač *Choristoneura occidentalis* Freeman) (Möller in Heydeck, 2009). Glede na domneve je v primerjavi s smreko zaradi globljih korenin bolj odporna proti suši in negativnim vplivom podnebnih sprememb na splošno (da Ronch in sod., 2016).

Naravni areal duglazije se razteza po celotni pacifiški obali Severne Amerike od Britanske Kolumbije do Mehike. Ustrezajo ji rastišča z visoko zračno vlago in globokimi, zračnimi tlemi. Na apnencu in plitvih tleh raste slabše (Brus, 2012). V Evropi ji ustrezajo sredogorske lege od 500 do 1000 m n. v. in zmerno vlažno ali oceansko podnebje. Ker izvira iz okolja s toplimi, sušnimi poletji, se je fiziološko prilagodila v primerjavi z evropskimi iglavci na pomanjkanje vode v tleh. Majhne listne reže, zelo povoskane iglice in učinkovit mehanizem zapiranja listnih rež ji omogočajo ekonomično porabo vode in ohranjanje pozitivnega fotosintetskega razmerja (Lassoie in Salo, 1981). V primerjavi s smreko je koreninski sistem duglazije globlji, zaradi česar lažje prenaša suše in je bolj odporna proti vetrolomu (Nadezhdina in sod., 2014). Različni viri tudi ugotavljajo, da na rast duglazije vplivajo predvsem pozni zimski meseci, saj je občutljiva za pozebo (Castaldi in sod., 2020; Feliksik in Wilczynski, 2004; Vejpusťková in Čihák, 2019).

Ker o rasti duglazije v Sloveniji ni veliko znanega, vemo pa da je ravno duglazija najvišje drevo v Sloveniji (Kuralt, 2021), so nas v raziskavi zanimali njena debelinska rast, odziv na podnebje in primerjava odziva z odzivom smreke. V raziskavi smo si zadali cilje: (1) raziskati debelinsko rast duglazije na produktivnem rastišču, (2) analizirati podnebne dejavnike, ki pomembno vplivajo na rast duglazije, da bi določili potencialno kritične podnebne dejavnike za debelinsko rast, (3) primerjati odziv duglazije in smreke na podnebne dejavnike, (4) analizirati odziv duglazije v letih s poudarjeno suhimi in vročimi poletji in ga primerjati z odzivom smreke ter (5) ugotoviti, ali je duglazija lahko dobra zamenjava za smreko

na konkretnem rastišču in ali je zamenjava kot posledica zmanjšane vitalnosti smreke zaradi podnebnih sprememb sploh potrebna in smiselna.

2 METODE

2 METHODS

2.1 Lokacija

2.1 Location

Na Pečovniku pri Celju (v nadaljevanju CELJE) (Slika 1) smo vzorčili smreko in duglazijo, kjer po poročanju lokalnih gozdarjev obe izredno dobro uspevata. Sestoj je bil enomeren mešan sestoj smreke in duglazije, v katerem se obe vrsti tudi naravno pomlajujeta. Na tamkajšnjem območju so konec 19. stoletja sadili monokulture smreke in poskusne nasade duglazije. Sestoj duglazije v Pečovniku je eden izmed prvih sestojev te vrste v Sloveniji, ki so bili osnovani proti koncu 19. stoletja. Vendar analizirana drevesa niso spadala v to skupino dreves, saj so bila mlajša. Raziskovalni objekt spada v območno enoto Celje, GGE Celje. V GGE Celje prevladujeta rastiščnogojitvena razreda podgorski bukovi gozdovi in gorska-zgornjegorska bukovja z vložki jelovega bukovja. Naravno bi na

predelu, kjer smo vzorčili, prevladoval pretežno listnati gozd. Nadmorska višina je približno 450 m, teren razgiban. Tla so globoka distrična rjava na nekarbonatni podlagi. Podnebje je prehodno z močnim celinskim vplivom, povprečna januarska temperatura zraka je $-0,1^{\circ}\text{C}$, julijska pa 21°C . Največ padavin pade poleti in septembra. V povprečju beležijo 142 deževnih dni in od 1100 do 1200 mm padavin na leto (Gozdnogospodarski načrt gozdnogospodarske enote Celje (2019-2028), 2019).

2.2 Vzorčenje

2.2 Sampling

Na terenu smo odvzeli vzorce odraslih smrek in duglazij. V analizo smo izbrali samo drevesa, ki niso imela vidnih poškodb debla in krošnje in so sestavljala streho sestoja. Vsakemu od njih smo izmerili prsni premer ter ocenili vitalnost, socialni položaj in utesnjenost krošnje. Nato smo s 5 mm Presslerjevim svedrom odvzeli po dva izvrtka iz 20 dreves vsake drevesne vrste. Skupno je bilo 80 izvrtkov (40 izvrtkov smreke in 40 duglazije). Vsi so bili vzeti na prsni višini in pravokotno na smer



Slika 1: Lokacija vzorčenja na Pečovniku pri Celju (OE Celje, GGE Celje)

Figure 1: Sampling location on Pečovnik near Celje (OE Celje, GGE Celje)

padnice na terenu. Na tak način smo se izognili morebitnim rastnim anomalijam v branikah, ki bi bile posledica odziva drevesa na rast na pobočju (= reakcijski les). Zbrane vzorce smo shranili v slamice, jih označili in odnesli v dendrokronološki laboratorij Gozdarskega inštituta Slovenije.

V laboratoriju smo vzorce prestavili na karton, jih pokrili s papirjem, obtežili in pustili, da so se posušili. Posušene smo nalepili v nosilce z utorom in jih označili z identifikacijsko kodo. Nato smo jih zbrusili z brusnim papirjem štirih različnih zrnatosti (120, 180, 240 in 400) do visokega sijaja. Na vsak vzorec smo nalepili referenčno merilo v velikosti 5 x 5 mm (slika 2).

Pripravljene vzorce smo skenirali s sistemom za zajem slik ATRICS (Levanič, 2007). To je sistem, sestavljen iz mikroskopa s kamero, pomično ploščo in računalniškim vmesnikom, s katerim lahko nadziramo pomično ploščo, povečavo,

ločljivost in kontrast slike ter parametre lepljenja posameznih slik v končno sliko. Prednost takega sistema je predvsem uporaba optične povečave mikroskopa za razliko od običajnih skenerjev, ki uporabljajo digitalno povečavo. Slike, zajete z ATRICS-om imajo posledično visoko ločljivost, ki omogoča natančno izmero branik.

Digitalne slike vzorcev smo obdelali v programu CooRecorder. Slike smo najprej kalibrirali z merilom prilepljenim na fizičnem vzorcu (slika 2). Nato smo izmerili pravokotne razdalje med dvema zaporednima letnicama in tako določili širine branik. Če je bilo potrebno, smo označili in izmerili razpoke. S programom CDendro smo kontrolirali meritev in odpravili morebitne napake pri merjenju. Na koncu smo po dve meritvi na drevo združili v kronologijo drevesa in podatke izvozili v format, ki ga prepoznajo programi za nadaljnjo analizo širin branik.



Slika 2: Del slike izvrtka duglazije z merilom pripravljena za merjenje

Figure 2: Part of the Douglas fir core ready for measurements with a measuring scale

2.3 Obdelava podatkov

2.3 Data processing

2.3.1 Standardizacija in izračun kronologij

2.3.1 Standardisation and chronology development

Kronologije širin branik za duglazijo in smreko smo analizirali v programskem okolju R s pomočjo grafičnega vmesnika RStudio in knjižnic *dplR* (Bunn, 2008) in *treeclim* (Zang in Biondi, 2015). Za standardizacijo zaporedij širin branik in odstranitev starostnega trenda smo uporabili kubične zlepke s 76 % togostjo v programski knjižnici *dplR*. Rezultat standardizacije so standardizirane kronologije dreves, katerih indeksirane vrednosti širin branik nihajo okoli 1. Standardizirane kronologije

smo združili v kronologijo za drevesno vrsto na lokaciji. Kronologijo smo izračunali kot robustno aritmetično sredino standardiziranih zaporedij širin branik, kar pomeni, da smo pri izračunu upoštevali (in minimizirali) vpliv osamelcev. V obeh kronologijah smo z avtoregresivnim modeliranjem odstranili avtokorelacijo, da bi preprečili vpliv širine branike v predhodnem letu na širino branike v letu njenega nastanka.

2.3.2 Odvisnost debelinskega prirastka od podnebja

2.3.2 Climate-growth dependency

Korelacijo med širinami branik in podnebjem smo izračunali s funkcijami iz programske knjižnice *treeclim*. Podatke o povprečnih mesečnih tempe-

raturah zraka in vsotah mesečnih količin padavin za obdobje od leta 1901 do 2018 smo pridobili iz mreženih meteoroloških podatkov CRU TS 4.0 s spletne strani KNMI Climate Explorer (Trouet in Van Oldenborgh, 2013). Pri izračunu korelacij smo uporabili metodo naključnega izbora s ponavljanjem ali t.i. *bootstrap* metodo (tudi »kljukčeva metoda«). To pomeni, da je program *n*-krat (*n* je število let prekrivanja meteoroloških in dendrokronoloških podatkov) izbral toliko parov obeh spremenljivk (širina branike in mesečni podatek o klimi), kolikor je število let prekrivanja podatkov, pri čemer je bil isti par lahko izbran večkrat (naključna izbira s ponavljanjem). Za vsako tako kombinacijo podatkov smo izračunali Pearsonov korelacijski koeficient. Ta postopek je program ponovil 1000x, nato je izračunal aritmetično sredino in varianco za Pearsonov korelacijski koeficient. Izračunali smo tudi drseče korelacije v oknu širine 25 let, pri čemer smo uporabili enako metodo ponovnega vzorčenja kot pri izračunu korelacij za celotno obdobje.

2.3.3 Odziv dreves v ekstremnih letih

2.3.3 Tree response in extreme years

Odziv dreves v ekstremnih letih, to je tistih, ki so bila nadpovprečno suha in vroča oz. hladnejša in bolj namočena od povprečja, smo ugotavljali s pomočjo analize značilnih let. Po definiciji je značilno leto tisto, ko je pri 80 % analiziranih dreves od najmanj 13 dreves širina branike ožja (= negativno značilno leto) ali širša (= pozitivno značilno leto) od branike v predhodnem letu.

Analizo značilnih let smo naredili na nestandardiziranih kronologijah dreves s knjižnico *dplR* v R-u.

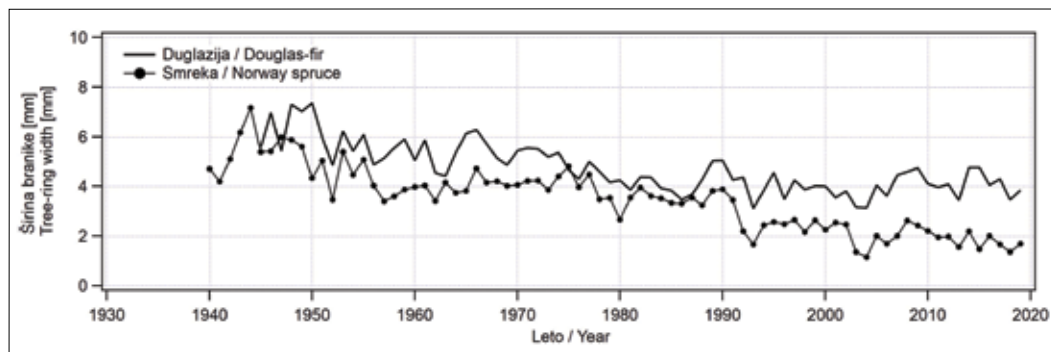
3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Debelinski prirastki v času

3.1 Temporal development of radial increment

Debelinska rast je dober pokazatelj proizvodne sposobnosti rastišča, čeprav še zdaleč ne edini (npr. dosežena višina drevesa pri določeni starosti, je celo boljši pokazatelj proizvodne sposobnosti rastišča kot debelinska rast), kaže pa tudi, kako dobro je neka drevesna vrsta prilagojena rastišču. Duglazije in smreke, ki so bile zajete v vzorec, so bile približno enako starosti – povprečna starost duglazij je bila 68, smrek pa 71 let (preglednica 1). Debelinska rast analiziranih duglazij je bila v celotni življenjski dobi boljša od rasti smreke, v povprečju je širina branike pri duglaziji merila $4,73 \pm 0,98$ mm, pri smreki pa $3,48 \pm 1,29$ mm. Če sta bili debelinski rasti v obdobju od 1940 do 1990 še približno primerljivi, pa je po letu 1990 debelinska rast smreke nekoliko popustila, medtem ko je pri duglaziji ostala bolj ali manj nespremenjena. Skoraj identičen trend opažajo tudi na rastiščih jelke, smreke in duglazije v JZ Nemčiji (Vitali in sod., 2017), kjer duglazija bolje prirašča od jelke in smreke in kaže večjo odpornost proti suši, še posebno v primerjavi s smreko na nižjih nadmorskih višinah, medtem ko je jelka po drugi strani bolj odporna od duglazije proti suši na višjih nadmorskih višinah (Vitali in sod., 2017).



Slika 3: Debelinska rast duglazije in smreke na zelo produktivnem rastišču Pečovnik pri Celju
Figure 3: Radial increment of Douglas fir and Norway spruce on a highly productive site Pečovnik near Celje

Preglednica 1: Osnovni podatki o analiziranih drevesih duglazije in smreke na rastišču Pečovnik pri Celju
Table 1: Basic data about the analysed Douglas fir and Norway spruce trees on Pečovnik near Celje (DBH = diameter at breast height, TRW = tree-ring width)

	Starost / Age	Povprečni prsni premer / Average diameter at breast height	Standardni odklon prsnega premera / Standard deviaton of the DBH	Povprečna širina branike / Average tree-ring width	Standardni odklon širine branike / Standard deviation of the TRW	Avtokorelacija prvega reda v širinah branik / First order autocorreal- tion in TRW
Duglazija <i>Douglas fir</i>	68	69,60	9,51	4,57	1,26	0,70
Smreka <i>Normay spruce</i>	71	52,20	4,89	3,26	1,37	0,74

3.2 Odziv na podnebne dejavnike

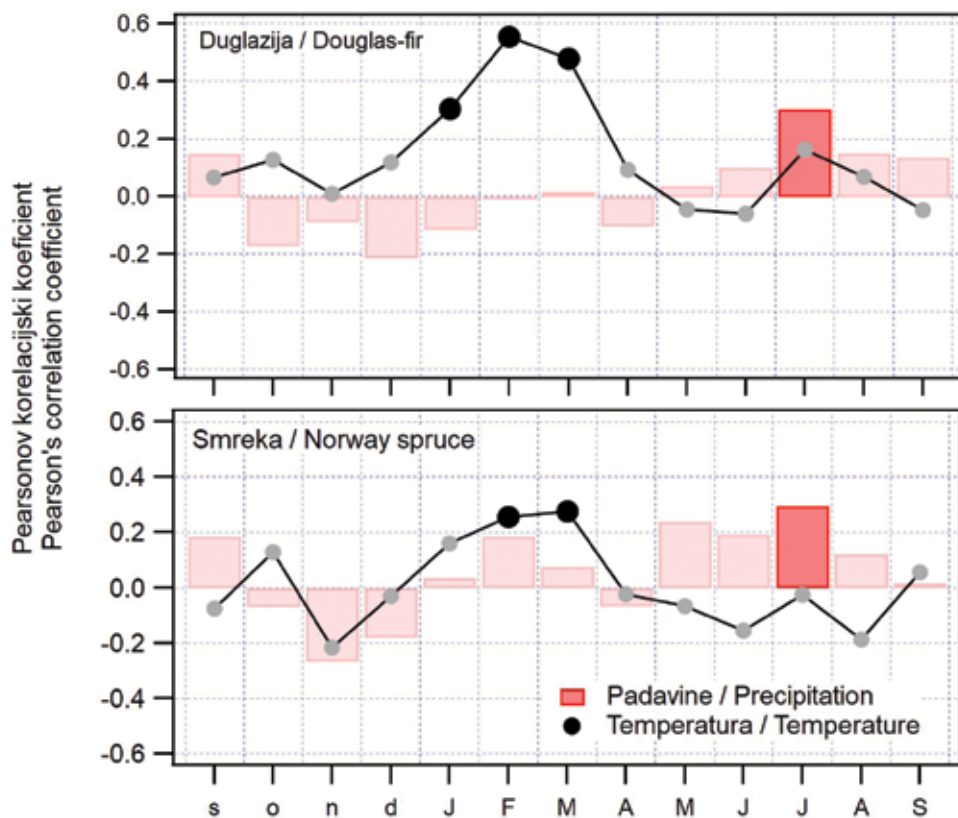
3.2 Climate – growth response

Širine branik duglazije in smreke smo primerjali s povprečnimi mesečnimi temperaturami in mesečno količino padavin za obdobje, ko smo imeli na voljo meritve širin branik in meteorološke podatke. To obdobje je bilo pri duglaziji od leta 1944 do 2018, pri smreki pa od leta 1940 do 2018. Pri tem smo se zavedali, da je med duglazijo in smreko kar nekaj razlik, mogoče je še najpomembnejša globina koreninskega sistema. Duglazija ima globok koreninski sistem, smreka pa relativno plitvega, ki le redko sega v večje globine (glej npr. Vitali in sod., 2017). Iz tega izhajajo tudi razlike v občutljivosti duglazije in smreke na podnebje. Pričakovali bi, da se smreka bolj občutljivo odziva na spreminjanje podnebja kot duglazija, pa temu ni tako: duglazija se bistveno bolj in bolje odziva na spremenljive podnebne razmere kot smreka.

Ključni meseci za dobro debelinsko rast duglazije na območju Pečovnika pri Celju niso poletni meseci, ampak pozni zimski – slika 4 (Duglazija). Duglaziji še posebno ustrezajo toplejše zime. Korelacijska koeficienta za februar ($r = 0,56$) in marec ($r = 0,48$) sta bila zelo visoka, kar pomeni, da duglaziji ustrezajo nadpovprečno tople zime, specifično nadpovprečno topla februar in marec. Na večjo širino branike pozitivno vplivajo tudi nadpovprečne padavine v juliju ($r = 0,31$). Padavine v juniju in avgustu nimajo večjega pomena,

čeprav niso nepomembne, saj prispevajo k skupni bilanci padavin in jih zato ne smemo preprosto izključiti. Podoben odziv duglazije na podnebne dejavnike sta ugotovila tudi Vejpustkova in Čihak (2019), ki sta poleg februarско-marčevskega signala ugotovila tudi nekoliko izrazitejšo odvisnost od julijskih padavin kot v Sloveniji. Ista avtorja tudi ugotavljata, da je odvisnost debelinske rasti od padavin manj izrazita pri duglaziji kot pri smreki. Podobne so tudi ugotovitve raziskovalcev duglazije na naravnih rastiščih v Kanadi – nadpovprečne zimske temperature pozitivno učinkujejo na širino branike, pri tem pa imajo pomembno vlogo tudi pomladanske padavine (Griesbauer in Scott Green, 2010).

Podobno sliko odziva kot pri duglaziji lahko opazujemo tudi pri smreki – slika 4 (Smreka). Kljub vsemu je med obema drevesnima vrstama nekaj ključnih razlik. Smreka se na istem rastišču veliko šibkeje odziva kot duglazija. Nadpovprečne temperature v februarju ($r = 0,25$) in marcu ($r = 0,27$) sicer vplivajo pozitivno in statistično značilno, vendar je vpliv v primerjavi z duglazijo bistveno šibkejši. Podobno kot na duglazijo tudi na debelinsko rast smreke ugodno vplivajo nadpovprečne padavine v juliju ($r = 0,30$). Pri primerjavi odziva na padavine pri smreki in duglaziji nismo opazili statistično značilnih razlik, obe sta imeli bolj ali manj enako vrednost korelacijskega koeficienta.



Slika 4: Odziv duglazije (zgoraj) in smreke (spodaj) na podnebne dejavnike na Pečovniku pri Celju. Z malimi črkami na x-osi so označeni meseci leta pred nastankom branike, z velikimi črkami pa meseci v letu nastanka branike. Povprečne mesečne temperature, ki so značilne za rast, so označene s črnim velikim krogom, za rast značilne mesečne količine padavin pa so prikazane v stolpcih s temnejšo rdečo barvo.

Figure 4: Response of Douglas fir (above) and Norway spruce (below) to climatic factors in Pečovnik near Celje. The lowercase letters on the x-axis indicate the months of the year before the formation of the tree-ring, months in the year of the formation of the tree-ring are marked with the capital letters. The average monthly temperatures with significant response are indicated by a large black circle, and monthly amounts of precipitation important for wider tree-ring formation are shown in columns with a darker red colour.

3.3 Stabilnost podnebne signala duglazije in smreke v času

3.3 Temporal stability of the douglas fir and Norway spruce climate-growth relationship

Odziv dreves na podnebje se v času spreminja skladno s spreminjanjem podnebja, zato je koristno, če proučimo tudi stabilnost odziva v času. Stabilnost korelacije med debelinskim prirastkom

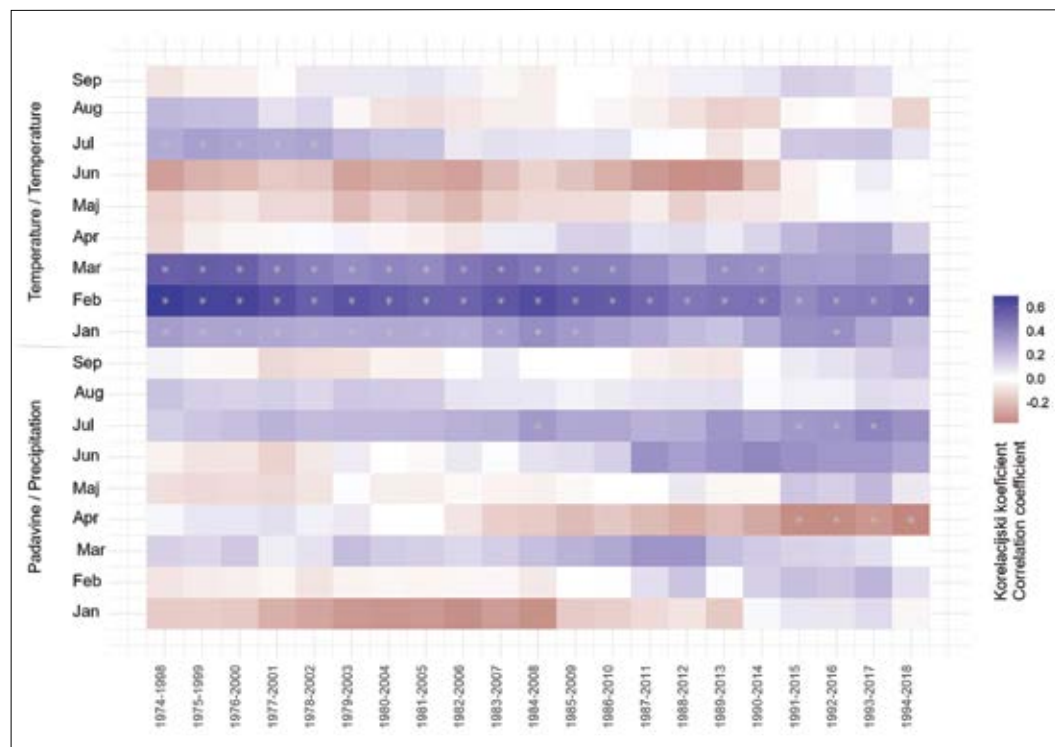
in podnebjem z analizo drsečih korelacij pokaže, ali so statistično značilne korelacije, dobljene za celotno obdobje (slika 4), realne ali ne in ali je ta povezava v času stabilna.

Z analizo drsečih korelacij z oknom 25 let (slika 5) smo ugotovili, da ima duglazija čez celotno proučevano obdobje stabilen signal v februarju in marcu, medtem ko je signal smreke nestabilen; podoben odziv na temperature kot pri duglaziji se

pojavi šele od leta 1988 naprej. Nekoliko drugačen časovni odziv so ugotovili raziskovalci v Kanadi – pozitivni učinek nadpovprečnih temperatur v poznih zimskih mesecih se je pokazal šele po letu 1975 (Griesbauer in Scott Green, 2010).

Pri duglaziji je zelo stabilen zlasti odziv na nadpovprečne temperature v februarju, nekoliko manj pa na temperature v marcu. Padavinski odziv duglazije je šibak, zaskrbljujoče pa je, da se šele v obdobju po letu 1991 pojavijo značilne drseče korelacije med debelinskim prirastkom in nadpovprečnimi padavinami v juniju. To kaže na spreminjanje odziva duglazije in morebiti celo nakazuje, da bodo zaradi podnebnih sprememb nastale spremembe v odzivu in da bodo padavine v poletnih mesecih začele igrati ključno vlogo. Z drugimi besedami: duglaziji bo na zelo produk-

tivnih rastiščih Pečovnika začelo primanjkovati vode, rastišče pa morda ne bo več tako ugodno za rast, kot je sedaj. Ugotovitev je skladna z raziskavami odziva duglazije na podnebje na njenih naravnih rastiščih v ZDA, kjer ugotavljajo, da se v zadnjem obdobju zmanjšuje debelinska rast in večja parni deficit (VPD) ter z njim povezan sušni stres (Restaino in sod., 2016). Poleg ugodnega vpliva padavin v juniju po letu 1991 se je v enakem obdobju pokazal tudi neugoden vpliv padavin v aprilu, ko nadpovprečne padavine negativno vplivajo na debelinski prirastek. To bi lahko povezali s kombinacijo neugodnih vremenskih razmer v aprilu (nizke temperature in obilne padavine, včasih tudi kot sneg in celo pozeba), ki neugodno vplivajo na debelinsko rast.



Slika 5: Drseče korelacije odvisnosti širine branike duglazije od povprečnih mesečnih temperatur in mesečne količine padavine za obdobje od leta 1974 do 2018 (širina drsečega okna 25 let, prekrivanje eno leto)

Figure 5: Moving correlations between Douglas fir tree-ring width and average monthly temperature and monthly precipitation totals for the period from year 1974 to 2018. The width of the moving window is 25 years with an overlap of one year

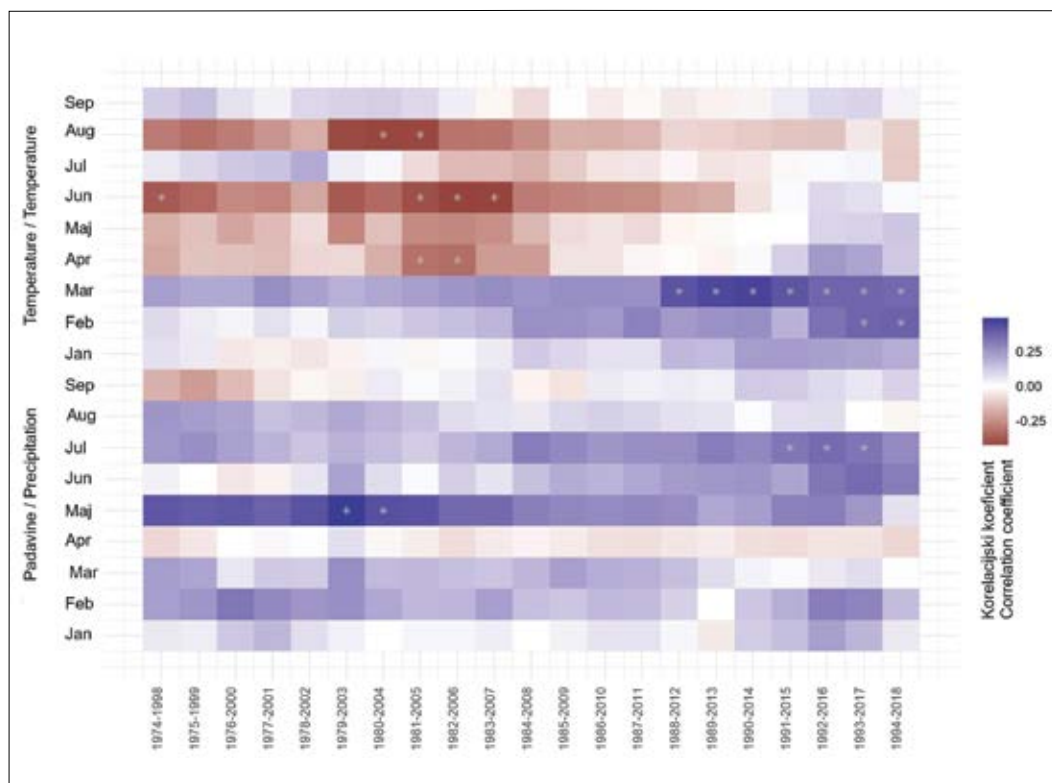
Smreka za razliko od duglazije ne daje tako enotnega niti stabilnega odziva med debelinskim prirastkom in podnebjem. Analiza drsečih korelacij je bila izvedena na enak način kot pri duglaziji, rezultati pa so precej drugačni. Smreka niti za en meteorološki parameter ne izkazuje stabilne korelacije v času. Še najbolj je stabilna slika odziva debelinskega prirastka na nadpovprečne marčevske temperature v obdobju po letu 1988 in na nadpovprečne februarске temperature po letu 1993. V obdobju med letoma 1979 in 2007 se kaže, da so nadpovprečne temperature v juniju in avgustu negativno vplivale na debelinski prirastek, vendar je le malo kombinacij zares statistično značilnih.

Padavine, ki v vseh drugih študijah izkazujejo statistično značilen vpliv na debelinski prirastek pri smreki na Pečovniku nimajo pomembne vloge, samo za kratek čas se kaže, da bi bile julijske in majske padavine lahko pomembne za debelinski prirastek.

3.4 Odziv v vremensko nad- in podpovprečnih letih

3.4 Response in climate extreme years

Odziv v ekstremnih letih, naj si bodo to ekstremno topla in sušna ali hladnejša in mokra, kaže na sposobnost oz. prilagodljivost drevesne vrste na podnebne ekstreme. Tudi če pri neki drevesni vrsti ne ugotovimo statistično značilnih povezav



Slika 6: Drseče korelacije odvisnosti širine branike smreke od povprečnih mesečnih temperatur in mesečne količine padavine za obdobje od leta 1974 do 2018 (širina drsečega okna 25 let, prekrivanje eno leto)

Figure 6: Moving correlations between Norway spruce tree-ring width and average monthly temperature and monthly precipitation totals for the period from 1974 to 2018. The width of the moving window is 25 years with an overlap of one year

s podnebnimi podatki, kar je pogosto pri dobih iz nižin (glej npr. Levanič in Čater, 2007; Levanič in sod., 2011), to še ne pomeni, da se neka drevesna vrsta ne odziva na podnebje. Kadar beležimo šibek klimatski odziv drevesne vrste ali kadar nas zanima, kako bi se lahko drevesna vrsta s prilagajanjem debelinskega prirastka odzivala v zaostrenih klimatskih razmerah, takrat je koristno preučiti odziv v ekstremnih klimatskih razmerah (npr. v letih s suhimi in vročimi poletji). Na rastišču Pečovnik smo analizirali značilna leta za obe drevesni vrsti, v prispevku pa podajamo samo analizo značilnih let za duglazijo in samo osnovne primerjave z odzivom smreke.

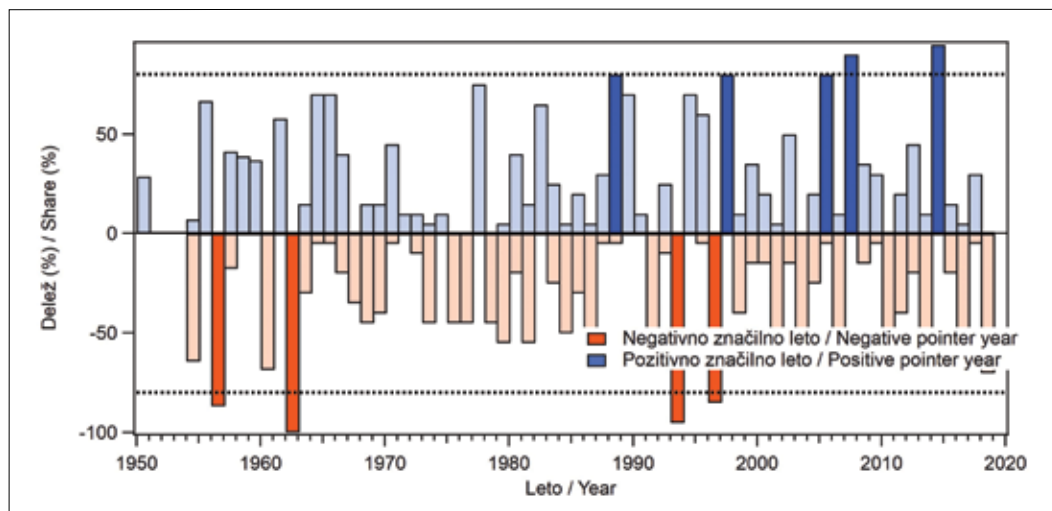
Duglazija ima v primerjavi s smreko manj negativnih značilnih let, torej je nekoliko bolj tolerantna na poletno pomanjkanje padavin, verjetno tudi zaradi globljega koreninskega sistema. Značilnih let, kot so bila 1976, 1980, 1992, 2003, 2013 in 2015, ki smo jih zaznali pri smreki na proučevanem rastišču, pri duglaziji sploh nismo zaznali. Po drugi strani smo pri duglaziji zaznali dve značilni leti, ki ju pri smreki nismo našli, to sta leti 1962 (100% dreves) in 1996 (85% dreves) – slika 7.

Pri duglaziji smo ugotovili naslednja negativna značilna leta: 1956, 1962, 1993 in 1996 (slika 7 in preglednica 2). Za vsa ta leta (razen za 1956, kjer nimamo lokalnih podatkov) velja, da so bile temperature v februarju in marcu precej podpovprečne, padavine pa precej variabilne in očitno njihova vloga ni bila ključna v debelinskem priraščanju.

Pri duglaziji smo ugotovili tudi pet pozitivnih značilnih let – 1988, 1997, 2005, 2007 in 2014 (slika 7 in preglednica 3). Skupna značilnost pozitivnih značilnih let je, da sta bila ključna meseca za rast, to sta februar in marec, vedno nadpovprečno topla, mesečna količina padavin pa v okviru dolgoletnega povprečja ali rahlo nad njim. Nobeno od pozitivnih značilnih let ni bilo zelo hladno v zimskih mesecih in zelo suho poleti.

Nekaj značilnih let je bilo skupnih duglaziji in smreki: 1956 (–), 1993 (–), 2005 (+) in 2014 (+). Pri skupnih značilnih letih se je pomembno vprašati, kakšne so bile vremenske razmere v značilnem letu, da je bil enak odziv pri dveh, fiziološko dokaj različnih drevesnih vrstah.

Za leto 1956 sicer nismo našli podatka v lokalnih meteoroloških arhivih, smo pa našli podatek, da je bil februar leta 1956 izrazito hladen mesec



Slika 7: Pozitivna in negativna značilna leta pri duglaziji med leti 1950 in 2019. Vodoravni črtkani črti prikazujeta mejo značilnosti za značilna leta, ki je 80% enakega odziva pri najmanj trinajstih drevesih. Temna barva predstavlja značilna leta, svetlejša barva pa neznailna značilna leta.

Figure 7: Positive and negative pointer years in Douglas fir between 1950 and 2019. Horizontal dashed lines indicate the characteristic limit for pointer years, which is 80% of the same response in at least 13 trees. Dark colour represents significant pointer years and lighter colour represents non-significant pointer years.

v vsej Evropi s temperaturami pod -24°C (Basel, Švica) in -12°C v Marseillu, Francija (Andrews, 1956; Dizerens in sod., 2017). Situacija je bila torej podobna, če ne celo bolj ekstremna, kot leta 1993. Za leto 1993 pa velja, da je bilo izrazito negativno značilno leto; suša se je vlekla vse do avgusta 1993, ko je mesečna količina padavin, prvič v letu 1993, dosegla dolgoletno povprečje. Na duglazijo so predvsem zelo vplivale podpovprečne temperature v februarju in marcu, torej dveh mesecih, ki ključno vplivata na rast duglazije v istem letu. Na smreko pa je negativno vplivalo pomanjkanje padavin v vsem letu, vključno z zelo suho zimo. Zato sta se obe drevesni vrsti enotno odzvali z

majhnim debelinskim prirastkom, pri čemer so bili razlogi za majhen debelinski prirastek različni (preglednica 2).

Podobno je bilo tudi v dveh skupnih pozitivnih značilnih letih: 2005 in 2014. Meseca, ključna za rast duglazije, februar in marec, sta bila nadpovprečno topla, kar zelo ustreza duglaziji, smreki pa nekoliko manj. Smreki pa, po drugi strani, zelo ustreza, če so poletja dobro oskrbljena z vodo, saj zato ne trpi pomanjkanja vode. Leti 2005 in 2014 sta bili zelo dobro oskrbljeni z vodo ravno v najbolj kritičnih poletnih mesecih (še posebno velja za leto 2005).

Preglednica 2: Negativna značilna leta za duglazijo na rastišču Pečovnik pri Celju; krepko so označena skupna značilna leta s smreko (vir <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive/>)

Table 2: Negative pointer years for Douglas fir on site Pečovnik near Celje. Pointer year common with spruce are marked with bold numbers (source <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive/>)

Leto	Temperature / Temperature	Padavine / Precipitation
1956	Februar zelo hladen v vsej Evropi, podobno marec <i>February and partially March extremely cold in the entire Europe</i>	Ni podatka <i>No data available</i>
1962	Marec zelo hladen, blizu dolgoletnega rekorda, do vključno julija je bilo podpovprečno toplo <i>Very cold March, close to long-term low record, first half of the year (including July) was below average cold</i>	Od januarja do julija je bila nadpovprečna količina padavin <i>Above average amount of precipitation between January and July</i>
1993	Februar in marec zelo blizu najnižjih povprečnih temperatur, leto glede temperatur v povprečju <i>February and March very cold, close to long-term low, other months close to long-term average</i>	Padavine od januarja do julija so bile zelo podpovprečne, tisto leto sploh ni bilo snega <i>Below average amount of precipitation between January and July; year was without snow</i>
1996	Februar in marec zelo hladna, blizu dolgoletnega spodnjega minimuma <i>February and March very cold, close to long-term low</i>	Padavine vse leto v okviru dolgoletnega padavinskega povprečja <i>Precipitation in this year within long-term average</i>

Preglednica 3: Pozitivna značilna leta za duglazijo na rastišču Pečovnik pri Celju; krepko so označena skupna značilna leta s smreko (vir <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive/>)

Table 3: Positive pointer years for Douglas fir on site Pečovnik near Celje. Pointer year common with spruce are marked with bold numbers (source <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive/>)

Leto	Temperature / Temperature	Padavine / Precipitation
1988	Temperature v januarju in februarju so bile nadpovprečne <i>Temperature in January and February above average</i>	Padavine v vsem letu v okviru dolgoletnega padavinskega povprečja <i>Precipitation for the entire year within long-term average</i>
1997	Februar in marec sta bila nadpovprečno topla <i>February and March above average warm</i>	Mesečna količina padavin v obdobju od februarja do aprila podpovprečna, nato pa v zgornji polovici dolgoletnega povprečja <i>Amount of precipitation in the period February-April above average, later within long-term average</i>
2005	Februar je bil nadpovprečno tople, preostali meseci pa so bili v mejah dolgoletnega temperaturnega povprečja <i>February above average warm, other months within long-term average</i>	Mesečna količina padavine od januarja do marca rahlo pod dolgoletnim povprečjem, nato pa krepko nad dolgoletnim povprečjem v juliju in avgustu <i>Monthly sum of precipitation between January and March slightly below long-term average and in July and August heavily above long-term average</i>
2007	Rahlo nadpovprečno toplo obdobje od januarja do julija, nato pa krepko nad povprečjem in zelo blizu rekordnim vrednostim <i>Slightly above average warm period between January and July, then extremely warm and close to long-term temperature records</i>	Padavine v vsem letu v okviru dolgoletnega padavinskega povprečja <i>Precipitation in the entire year within long-term average</i>
2014	Povprečne mesečne temperature od januarja do aprila so bile zelo nad povprečjem, poletne (maj – avgust) pa v okviru dolgoletnega povprečja <i>Average monthly temperature between January and April heavily above average; average temperature in May – August well within long-term average</i>	Povprečna mesečna količina padavin povprečna do nadpovprečna, leto je bilo na splošno dobro oskrbljeno s padavinami <i>Year with sum of precipitation close or slightly above the long-term sum of precipitation</i>

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Rast duglazije je na zelo produktivnem rastišču Pečovnika pri Celju boljša od smreke. Razen dokaj podobne dinamike rasti v začetnem obdobju, smreka na proučevani lokaciji nikoli ni dosegala tako širokih debelinskih prirastkov kot duglazija.

Debelinski prirastek duglazije je zelo odvisen od razmer v poznih zimskih mesecih (februar, marec); če so nadpovprečno topli, bo debelinski

prirastek večji. Podobno velja za smreko, vendar je podnebni signal manj izrazit in je zato za smreko težko narediti nek posplošen zaključek.

Duglazija je nekoliko manj občutljiva za pomanjkanje padavin v poletnih mesecih, čeprav je odziv na padavine v juliju pozitiven in značilen. Na osnovi drsečih korelacij, kjer ugotavljamo, da se je pojavila značilna odvisnost med širino branike in padavinami v juliju po letu 1991, sklepamo, da imajo pri tem pomembno vlogo

podnebne spremembe, katerim pa je, vsaj trenutno tako kaže, duglazija bolje prilagojena kot smreka, verjetno predvsem zaradi globljega koreninskega sistema.

Odziv v značilnih letih, to je nadpovprečno suhih in vročih oz. podpovprečno toplih in vlažnih, je pri smreki izrazitejši – našteli smo več negativnih značilnih let kot pri duglaziji. Pri duglaziji smo ugotovili manj negativnih značilnih let, jih je pa veliko pozitivnih, kar pomeni, da podnebne spremembe na optimalnih rastiščih (še) nimajo pomembnejšega vpliva na debelinsko rast duglazije.

Lahko zamenjamo duglazijo s smreko? Z vidika debelinske rasti sta si drevesni vrsti zelo podobni, še več, duglazija bolje prirašča v debelino (in višino) kot smreka, še posebno na zelo produktivnih rastiščih sredogorja. Za razliko od smreke duglazija bolje prenaša poletne suše, ne prija jo pa ji zelo nizke zimske temperature, še posebno ne v februarju in marcu. Zamenjava smreke z duglazijo je zato, v nekem omejenem obsegu, na ustreznih rastiščih in ob upoštevanju morebitnih drugih omejitev, mogoča.

5 POVZETEK

Analizirali smo rast duglazije (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na produktivnem rastišču na Pečovniku pri Celju. Analizirane duglazije so bile nekoliko mlajše od smrek (67 proti 71 let) in so nekoliko bolje priraščale (4,57 mm proti 3,26 mm na leto). Podnebni odziv duglazije na produktivnem rastišču je bil zelo izrazit. Na debelinski prirastek so statistično značilno vplivale nadpovprečne temperature v februarju in marcu, ter nadpovprečne padavine v juliju. V primerjavi s smreko je podnebni odziv duglazije časovno stabilen in bistveno izrazitejši. Analiza značilnih let je pokazala, da so negativna značilna leta pri duglaziji vedno povezana z zelo hladnim vremenom v februarju in marcu, pozitivna pa z nadpovprečnimi temperaturami v istih dveh mesecih. Poletne padavine imajo pomembnejšo vlogo pri duglaziji le v zadnjih treh desetletjih, pred tem pa ne. To nakazuje, da na sicer zelo produktivnem rastišču nastaja potencialno pomanjkanje vode, kar lahko na dolgi rok, ob trendih podnebnih sprememb, vodi v sušni stres in slabšo rast duglazije.

5 SUMMARY

We analysed the growth of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) at a productive site in Pečovnik near Celje. The analysed Douglas firs were slightly younger than spruces (67 vs 71 years) and grew slightly better (4.57 mm vs 3.26 mm per year). The climatic response of Douglas fir on the productive site was very pronounced. The radial increment was statistically significantly influenced by above-average temperatures in February and March and above-average precipitation in July. Compared to spruce, the climatic response of Douglas-fir is temporally stable and significantly more pronounced. Analysis of pointer years has shown that negative pointer years in Douglas-fir are always associated with very cold weather in February and March and positive years with above-average temperatures in the same two months. Summer precipitation has played a more important role in Douglas-fir only in the last three decades, but not before that. This suggests a potential lack of water in an otherwise very productive site that could lead to drought stress and poorer growth of Douglas-fir in the long term, given climate change trends.

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGMENT

Raziskava je bila izvedena v okviru Ciljnega raziskovalnega projekta V4-1614 Obvladovanje tveganj pri gospodarjenju s smreko v gozdovih Slovenije in programske skupine ARRS P4-107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija. Dovoljenje za delo na terenu nam je dala Mestna občina Celje (ga. Valentina Glinšek), na terenu pa so nam pomagali gozdarji Zavoda za gozdove Slovenije, OE Celje mag. Robert Hostnik in inž. Robert Hedl. H. Š. se zahvaljuje Pahernikovi ustanovi za štipendiranje v drugem letniku magistrskega študija Gozdarstva in upravljanja gozdnih ekosistemov. Hvala tudi Robertu Krajncu in Samu Stoparju za pomoč pri terenskem in laboratorijskem delu.

7 VIRI

7 REFERENCES

- Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N. in sod. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 4: 660-684
- Anderegg W. R. L., Hicke J. A., Fisher R. A., Allen C. D., Aukema J. in sod. 2015. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208, 3: 674-683
- Andrews F. J. 1956. The weather circulation of February 1956 (Including a discussion of persistent blocking and severe weather in Europe). *Monthly Weather Review*, 66-74
- Brus R. 2012. Drevesne vrste na Slovenskem (2. izdaja). (ur.) Ljubljana, samozaložba: 406 str.
- Drevesne vrste za obnovo gozdov po naravnih motnjah v Sloveniji. 2016. Železnik P. (ur.) Ljubljana, Silva Slovenica: str.
- Bunn A. G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26, 2: 115-124
- Castaldi C., Marchi M., Vacchiano G., Corona P. 2020. Douglas-fir climate sensitivity at two contrasting sites along the southern limit of the European planting range. *Journal of Forestry Research*, 31, 6: 2193-2204
- da Ronch F., Caudullo G., de Rigo D. 2016. *Pseudotsuga menziesii* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. V: *European Atlas of Forest Tree Species*. San-Miguel-Ayaz J. in sod. (ur.). (European Atlas of Forest Tree Species, Luxembourg, Publ. Off. EU: 146-147
- Dizerens C., Lenggenhager S., Schwander M., Buck A., Foffa S. 2017. The 1956 Cold Wave in Western Europe. V: *Historical Weather Extremes in Reanalyses*. Brönnimann S. (ur.). (Historical Weather Extremes in Reanalyses., 92). 101-111
- Eilmann B., Rigling A. 2012. Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiology*, 32, 2: 178-187
- Feliksik E., Wilczynski S. 2004. Dendroclimatic regions of Douglas fir *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in western and northern Poland. *Dendrobiology*, 52, 9-15
- Griesbauer H. P., Scott Green D. 2010. Assessing the climatic sensitivity of Douglas-fir at its northern range margins in British Columbia, Canada. *Trees*, 24, 2: 375-389
- Hanewinkel M., Cullmann D. A., Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Zimmermann N. E. 2012. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*, 3, 3: 203-207
- Kutnar L., Kobler A., Bergant K. 2009. Vpliv podnebnih sprememb na pričakovano prostorsko preražporeditev tipov gozdne vegetacije. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 89: 33-42
- Lassoie J. P., Salo D. J. 1981. Physiological response of large Douglas-fir to natural and induced soil water deficits. *Canadian Journal of Forest Research*, 11, 1: 139-144
- Levanič T. 2007. ATRICS - A new system for image acquisition in dendrochronology. *Tree-Ring Research*, 63, 2: 117-122
- Povezave med klimatskimi dejavniki, osutostjo krošnje in debelinskim prirastkom pri dobu (*Quercus robur* L.) v vzhodni Sloveniji. 2007. Jurc M. (ur.) Ljubljana, Slovenija, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 429-443 str.
- Levanič T., Čater M., McDowell N. G. 2011. Associations between growth, wood anatomy, carbon isotope discrimination and mortality in a *Quercus robur* forest. *Tree Physiology*, 31, 3: 298-308
- Möller K., Heydeck P. 2009. Risikopotenzial und akute Gefährdung der Douglasie - biotische und abiotische Faktoren. V: *Die Douglasie im nordostdeutschen Tiefland - Chancen und Risiken im Klimawandel*. (ur.). (Die Douglasie im nordostdeutschen Tiefland - Chancen und Risiken im Klimawandel, Eberswalde, Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg: 49-58
- Nadezhkina N., Urban J., Čermák J., Nadezhdin V., Kantor P. 2014. Comparative study of long-term water uptake of Norway spruce and Douglas-fir in Moravian upland. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62, 1: 1-6
- Restaino C. M., Peterson D. L., Littell J. 2016. Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 113, 34: 9557-62
- Schmid M., Pautasso M., Holdenrieder O. 2014. Ecological consequences of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) cultivation in Europe. *European Journal of Forest Research*, 133, 1: 13-29
- Trouet V., Van Oldenborgh G. J. 2013. KNMI Climate Explorer: A web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research*, 69, 1: 3-14
- van Loo M., Dobrowolska D. 2019. History of introducing Douglas-fir to Europe. V: *Douglas-fir - an option for Europe*. Spiecker H. in sod. (ur.). (Douglas-fir - an option for Europe, Joensuu, European Forest Institute: 21-25
- Vejpustková M., Čihák T. 2019. Climate Response of Douglas Fir Reveals Recently Increased Sensitivity to Drought Stress in Central Europe. *Forests*, 10, 2: 97
- Vitali V., Büntgen U., Bauhus J. 2017. Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology*, 23, 12: 5108-5119
- Zang C., Biondi F. 2015. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38, 4: 431-436