



GOZDARSKI INŠTITUT SLOVENIJE
SLOVENIAN FORESTRY INSTITUTE

Bolezni, škodljivci in sušni stres pri navadni bukvi v različnih scenarijih podnebnih sprememb (V4-2026)

Končno poročilo

Vodja projekta:

dr. Nikica Ogris

Financerja:

Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano,
Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije

Projekt V4-2026, izbran na podlagi Javnega razpisa za izbiro raziskovalnih projektov Ciljnega raziskovalnega programa »Zagotovimo.si hrano za jutri« v letu 2020 z obvestilom direktorja agencije o rezultatih izbora prijav na Javni razpis št. 6316-6/2020-136, z dne 15. 10. 2020 za obdobje 36 mesecev od 1. 11. 2020 do 31. 10. 2023.

Sodelujoče organizacije:

Gozdarski inštitut Slovenije, Kmetijski inštitut Slovenije, Zavod za gozdove Slovenije

Ljubljana, 2023

Kazalo vsebine

Kazalo vsebine	3
Povzetek.....	6
1 Vzroki hiranja navadne bukve v Sloveniji (Aktivnost 2.1).....	7
Nikica Ogris, Andreja Kavčič, Janja Zajc, Ana Brglez, Maarten de Groot, Barbara Piškur	
1.1 Uvod	7
1.2 Metode dela	7
1.2.1 Vzorčne ploskve in vzorčenje	7
1.2.2 Izolacija gliv v čiste kulture	8
1.2.3 Identifikacija vrst gliv	9
1.2.4 Identifikacija vrst žuželk	9
1.2.5 Identifikacija vrst fitoftor	10
1.2.6 Obdelava podatkov	10
1.3 Rezultati.....	11
1.3.1 Osutost in poškodovanost bukve	11
1.3.2 Povzročitelji poškodb na bukvi	12
1.4 Razprava	19
1.5 Zaključki	22
1.6 Zahvala	23
1.7 Priloge.....	23
1.7.1 Priloga 1. Identificirani taksoni gliv in njihova frekvenca pojavljanja glede na del rastline	23
1.7.2 Priloga 2. Identificirani taksoni gliv in njihova frekvenca pojavljanja glede na mesto izolacije	25
1.7.3 Priloga 3. Identificirani taksoni žuželk, njihova frekvenca pojavljanja glede na del drevesa in razred poškodovano/zdravo drevo.....	28
1.8 Viri	31
2 Vpliv suše na hiranje bukve (Aktivnost 3.1).....	35
Nikica Ogris	
2.1 Uvod	35
2.2 Metode.....	35
2.2.1 Osutost bukove krošnje.....	35
2.2.2 Meteorološki kazalniki suše	36
2.2.3 Tla	38
2.2.4 Razvoj modelov	38
2.2.5 Validacija modelov	38

2.2.6	Napoved osutost krošnje navadne bukve v Sloveniji zaradi vpliva suše do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb	39
2.3	Rezultati in razprava	39
2.3.1	Modeli	39
2.3.2	Napoved osutosti krošnje navadne bukve v Sloveniji zaradi vpliva suše do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb	41
2.4	Zaključki	43
2.5	Priloge.....	45
2.5.1	Priloga 1. Seznam meteoroloških spremenljivk	45
2.6	Viri	51
3	Vpliv bolezni in škodljivcev na hiranje bukve (Aktivnost 3.2)	53
	Nikica Ogris	
3.1	Uvod	53
3.2	Metode.....	55
3.2.1	Priprava podatkov	55
3.2.2	Razvoj modelov	58
3.2.3	Validacija modelov	59
3.2.4	Napoved hiranja navadne bukve v Sloveniji zaradi bolezni in žuželk do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb	59
3.3	Rezultati in razprava	60
3.3.1	Poškodovanost krošnje bukve zaradi bolezni.....	60
3.3.2	Poškodovanost krošnje bukve zaradi žuželk	62
3.3.3	Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni.....	65
3.3.4	Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk	68
3.4	Zaključki	72
3.5	Viri	74
4	Potencialna razširjenost navadne bukve glede na različne scenarije podnebnih sprememb (Aktivnost 3.3).....	76
	Nikica Ogris	
4.1	Uvod	76
4.2	Metode.....	76
4.2.1	Priprava podatkov	76
4.2.2	Razvoj modelov	78
4.2.3	Validacija modelov	78
4.2.4	Napoved potencialne razširjenosti navadne bukve do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb.....	79
4.3	Rezultati in razprava	79
4.3.1	Zanesljivost modelov in relativna pomembnost spremenljivk.....	79

4.3.2	Potencialna razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju	80
4.3.3	Sprememba temperature zraka in količine padavin glede na različne scenarije podnebnih sprememb	82
4.3.4	Potencialna razširjenost navadne bukve v prihodnosti	84
4.3.5	Lesna zaloga, prirastek, varstveno-sanitarni posek bukve	90
4.4	Zaključki	93
4.5	Viri	95
5	Priporočila in usmeritve za dolgoročno gospodarjenje z navadno bukvijo z vidika njenega zdravja (Aktivnost 4.1).....	97
	<small>Nikica Ogris, Maarten de Groot, Barbara Piškur, Marija Kolšek</small>	
5.1	Uvod	97
5.2	Strokovne podlage za usmeritve	97
5.3	Strategije, priporočila in usmeritve za dolgoročno gospodarjenje z navadno bukvijo v Sloveniji z vidika njenega zdravja	98
5.4	Viri	99
6	Seznam rezultatov	102
7	Naslov spletne strani.....	102

Povzetek

V okviru predlaganega projekta smo uresničili naslednje cilje:

1. Določili smo vzroke hiranja navadne bukve.
2. Ugotovili smo vpliv suše na zdravstveno stanje navadne bukve.
3. Ocenili smo potencialno ogroženost navadne bukve v Sloveniji zaradi bolezni, škodljivcev in vpliva suše do konca 21. stoletja glede na tri scenarije podnebnih sprememb (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5).
4. Razvili smo model naravne razširjenosti bukve v Sloveniji in na njegovi podlagi naredili projekcijo potencialne razširjenosti navadne bukve do 2100 glede na tri scenarije podnebnih sprememb (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5) ter rezultate modela integrirali v obstoječi elektronski informacijski sistem za varstvo gozdov.
5. Izdelali smo priporočila in usmeritve za dolgoročno gospodarjenje z navadno bukvijo z vidika njenega zdravja.

Delo je bilo organizirano v štiri delovne sklope:

Delovni sklop	Aktivnost
DS1	1.1 Koordinacija
DS2	2.1 Vzroki hiranja bukve
DS3	3.1: Vpliv suše na hiranje bukve
DS3	3.2: Vpliv bolezni in škodljivcev na hiranje bukve
DS3	3.3: Potencialna razširjenost navadne bukve glede na tri scenarije podnebnih sprememb
DS4	4.1 Prenos znanja

1 Vzroki hiranja navadne bukve v Sloveniji (Aktivnost 2.1)

Nikica Ogris, Andreja Kavčič, Janja Zajc, Ana Brglez, Maarten de Groot, Barbara Piškur

1.1 Uvod

Cilj aktivnosti 2.1. je bil določiti vzroke hiranja navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) v Sloveniji.

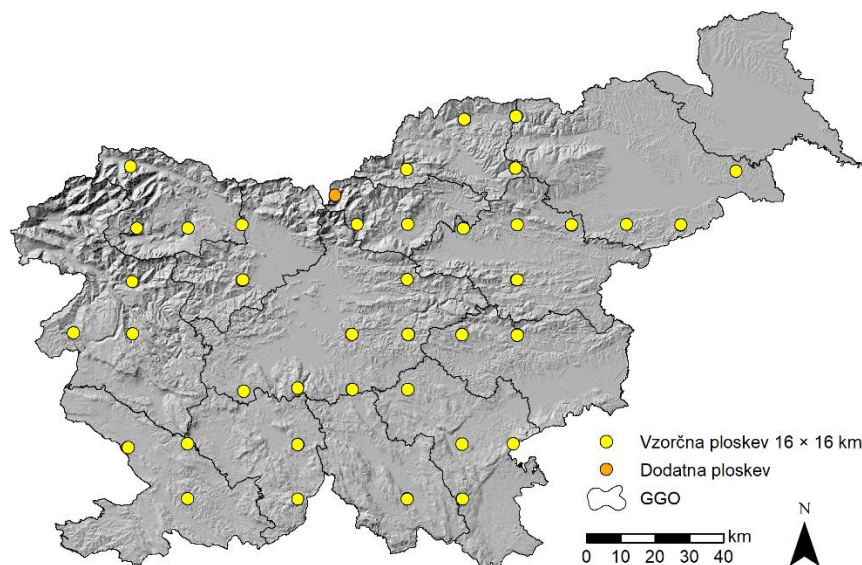
Preskušali smo naslednje hipoteze:

1. V proces hiranja navadne bukve v Sloveniji je vpletenih večje število škodljivih dejavnikov, ki skupaj povzročajo kompleksno bolezen¹.
2. Bolezni povzročijo v povprečju večjo poškodovanost navadne bukve v Sloveniji kot žuželke in drugi škodljivi dejavniki.
3. Fitoftore se pojavljajo v zemlji na več kot polovici poškodovanih vzorčenih navadnih bukvah in so zato pomemben škodljiv dejavnik hiranja navadne bukve.

1.2 Metode dela

1.2.1 Vzorčne ploskve in vzorčenje

Izbranih je bilo 40 vzorčnih ploskev, od tega 39 ploskev v bližini stalnih vzorčnih ploskev na sistematični mreži 16 × 16 km in ena dodatna ploskev v Kamniško-Savinjskih Alpah (**Slika 1**). V primeru, da na ploskvi ni bilo bukve ali vzorčenje ni bilo mogoče, je bila izbrana naslednja najbližja možna lokacija. Vzorčne ploskve so bile povprečno 459 m oddaljene od prvotne točke sistematične mreže 16 × 16 km in največ 1744 m.



Slika 1. Lokacije vzorčnih ploskev (N = 40)

Na vsaki vzorčni ploskvi sta bili posekani dve drevesi, skupaj 80 dreves: eno zdravo ali manj poškodovano in eno poškodovano (osutost krošnje vsaj 20 %). Obe drevesi sta morali biti vladajoči ali vsaj sovladajoči glede na socialni položaj v sestoji, da bi se izognili vplivu konkurence okoliških dreves na oceno osutosti in poškodovanosti. Razdalja med zdravim in poškodovanim drevesom je bila v povprečju 42 m z razponom 6–144 m. Za vsako od 80 dreves smo izmerili prsni obseg, višino drevesa in koordinate dreves ter ovrednotili osutost (**Preglednica 1**). Prsni premer je bil izračunan iz obsega v višini prsi z uporabo enačbe $d = c/\pi$, kjer je c obseg. Višina drevesa je bila izmerjena z napravo Vertex III (Haglöf, Švedska). Koordinate so bile izmerjene z ročnim GPS GPSMAP 64s (Garmin, ZDA). Osutost

¹ Bolezen, ki jo povzroči več škodljivih dejavnikov; mnogofaktorsko obolenje.

je opredeljena kot izguba listov v krošnji, ki jo je mogoče oceniti, v primerjavi z referenčnim drevesom (Eichhorn in sod., 2016; Kovač, 2014). Osutost je bila ocenjena na 5 % natančno. Za referenčno drevo je bilo izbrano lokalno referenčno drevo, ki je bilo opredeljeno kot najboljšo drevo s polnim listjem, ki bi lahko raslo na določenem mestu, ob upoštevanju dejavnikov, kot so nadmorska višina, zemljepisna širina, starost drevesa, pogoji rastišča in socialni položaj.

Preglednica 1. Prsni premer, višina in osutost vzorčnih dreves

Razred	Št.	Prsni premer (cm)			Višina (m)		
		Avg	Min	Max	Avg	Min	Max
poškodovano	40	40,5	19,1	59,8	27,2	15,8	35
zdravo	40	39,3	24,8	67,5	25,5	15,3	39,5

Za namen ugotavljanja prisotnosti fitoftor v tleh in njihovega vpliva na poškodovanost dreves, smo vzorčili zemljo na treh do štirih točkah okoli vsakega vzorčenega drevesa v razdalji do 1 m od debla. Odstranili smo zgornjo plast humusa in organske snovi ter vzeli vzorec zemlje iz globine 10–20 cm. Za en vzorec smo zbrali najmanj 1 kg zemlje. Orodje smo med posameznimi vzorci razkuževali. Vzorec zemlje smo shranili v hladilni torbi in ga dostavili v uradni laboratorij RS za določevanje oomicet, tj. na Kmetijski inštitut Slovenije v roku 24 ur.

Vzorčno drevo smo posekali in skrbno pregledali glede morebitnih znakov bolezni, žuželk ali drugih vrst poškodb. Vizualna ocena stanja krošenj in poškodb je bila ovrednotena po metodah in merilih za usklajeno vzorčenje, ocenjevanje, spremljanje in analizo vplivov onesnaženosti zraka na gozdove, ki je rezultat Konvencije o onesnaževanju zraka na velike razdalje preko meja (CLRTAP) in Mednarodnega sodelovanja - operativni program ocenjevanja in spremljanja vplivov onesnaženosti zraka na gozdove (ICP Forests) (Eichhorn in sod., 2016; Jurc Dušan in Jurc, 2014; Kovač, 2014). Zabeleženi so bili naslednji podatki: prizadeti del drevesa, prizadeti del drevesa podrobneje, lokacija v krošnji, starost poškodbe, glavna kategorija povzročitelja ali dejavnika, znanstveno ime povzročitelja, obseg poškodbe (%).

Za namen identifikacije vrst gliv smo vzorčili pet delov drevesa: listi, vejice (premera do 20 mm; **Preglednica 2**), veje (premera nad 20 mm), deblo, površinske korenine in korenčnik (do 25 cm od tal). Z vsakega dela drevesa so bili zbrani vsaj štirje vzorci. Primarno smo se osredotočili na vzorčenje poškodovanih delov. Če poškodovanih delov nismo opazili, smo namesto tega vzorčili zdravo tkivo. Na koncu je bilo zbranih 20 vzorcev na drevo in 40 vzorcev na vzorčno ploskev. Skupaj je bilo zbranih 1600 vzorcev.

Preglednica 2. Premer vejic in vej (cm)

Del dreves	Avg	Min	Max
vejice (≤ 2 cm)	10,7	3,4	20,0
veje (> 2 cm)	31,6	20,1	101,5

Poleg tega smo na vsakem od petih delov drevesa iskali znake prisotnosti žuželk. Vzorčenje smo izvedli v primeru najdbe osebkov različnih razvojnih stadijev ali sledi njihovega hranjenja (npr. rovi v lesu, izjedine v listih, zoocecidiji).

1.2.2 Izolacija gliv v čiste kulture

Vsi vzorci za analizo na prisotnost gliv so bili označeni, na lokaciji shranjeni v hladilno torbo ter transportirani v laboratorij, kjer so bili do nadaljnjih analiz shranjeni v hladilniku pri 4–8 °C. Vsi vzorci so bili obdelani v 24 urah. Vzorce smo površinsko sterilizirali po naslednjem postopku: epifite smo odstranili s čisto kuhinjsko gobico in vodo iz pipe (pribl. 1 min), vzorec smo potopili v 70 % etanol za 60 sekund, 1 % komercialno belilo za 30 sekund, 70 % etanol za 60 sekund, ga oprali v destilirani vodi

in posušili na čistih papirnatih brisačah. Iz vsakega vzorca smo iz roba razbarvanega lesa ali roba nekroze v skorji/listu izrezali koščke tkiva velikosti 2 mm × 10 mm, koščki so predstavljali podvzorce. Če poškodovanega dela (tj. nekroz) ni bilo, smo podvzorec vzeli iz zdravega tkiva (les, skorja, list). Iz enega vzorca smo zbrali štiri podvzorce, skupaj 6.400 podvzorcev oz. koščkov tkiva (**Preglednica 3**). Štiri koščke na eno petrijevko smo prenesli na gojišče PDA (3,9 % krompirjev dekstrozni agar), ki je bil dopolnjen z antibiotikom streptomycin. Gojišča z vstavljenimi koščki smo prenesli v inkubator Kambič I-190 CK in jih inkubirali pri $21,1 \pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Gojišča smo redno preverjali in vse izrasle kulture prenesli na sveža gojišča, s čimer smo pridobili čiste kulture gliv oziroma izolate glive. Izolate smo združili po morfoloških glede na morfološke značilnosti kultur. Reprezentativne kulture so bile deponirane v Zbirko živih kultur Laboratorija za varstvo gozdov na Gozdarskem inštitutu Slovenije (ZLVG).

Preglednica 3. Število vzorcev na razred drevesa, del drevesa in mesto izolacije

Razred	Del drevesa	Obarvan les	Zdrav les	Zunanji del skorje	Notranji del skorje	Zdrava skorja	Poškodovan list	Zdrav list
poškodovano	listi	0					159	1
	vejice (< 2 cm)	14			146			
	veje (> 2 cm)	75		1	84			
	deblo	68		78	2	12		
	korenine in koreničnik (≤ 25 cm)	108	1	48		3		
skupaj poškodovano		265	1	127	232	15	159	1
zdravo	listi	0					151	9
	vejice (< 2 cm)	18		1	137	4		
	veje (> 2 cm)	74		2	84			
	deblo	69	1	76	5	9		
	korenine in koreničnik (≤ 25 cm)	99		50	3	8		
skupaj zdravo		260	1	129	229	21	151	9
skupaj vse		525	2	256	461	36	310	10

1.2.3 Identifikacija vrst gliv

Identifikacija gliv je bila izvedena v Laboratoriju za varstvo gozdov na Gozdarskem inštitutu Slovenije. Identifikacijo izbranih reprezentativnih izolatov gliv smo izvedli s primerjavo nukleotidnih zaporedij dela regije ITS-rDNA, v primeru, da primarno izbrana regija ni bila dovolj informativna za določitev vrstnega nivoja, pa smo izbrali dodatne regije DNA. Ekstrakcija DNA iz čistih kultur gliv je potekala po protokolu LVG POS 005, in sicer smo DNA iz vzorca izolirali s komercialnim ekstrakcijskim kitom Nucleospin Plant II (Macherey Nagel, Nemčija) ter z uporabo homogenizacijskih tubic Lysing Matrix A (MP Biomedicals). Pogoji PCR za regijo ITS-rDNA so sledili standardnim postopkom v laboratoriju (LVG POS 005), pogoji pri ostalih regijah pa so bili optimizirani glede na predhodno identificirano taksonomsko skupino glive.

Dobljene produkte PCR smo očistili s komercialnim kitom za čiščenje Wizard® SV Gel and PCR Clean-Up System (Promega) ter jih pripravili za določevanje nukleotidnega zaporedja (ti. sekvenciranje) po postopku LVG NA 030 in LVG NA 032. Izvedbo sekvenciranja je izvedel zunanji izvajalec Eurofins (Köln, Nemčija), in sicer v »forward« in »reverse« reakciji. Pridobljene surove kromatograme smo ročno pregledali in uredili z uporabo programske opreme Geneious Prime. Dobljena konsenzna zaporedja smo uporabili za iskanje podobnosti z referenčnimi oziroma javno dostopnimi zaporedji, ki so dostopna v različnih podatkovnih zbirkah (GenBank, BOLD, Q-Bank, Fusarioid in druge). Postopek je sledil standardnemu protokolu LVG NA 031.

1.2.4 Identifikacija vrst žuželk

Identifikacijo žuželk smo izvedli v Laboratoriju za varstvo gozdov Gozdarskega inštituta Slovenije na podlagi morfoloških značilnosti osebkov in z uporabo določevalnih ključev za posamezne skupine

žuželk. Odrasle osebkje najdenih žuželk smo določili do vrste. Juvenilne osebkje smo določili do sistematske kategorije, ki jo je morfologija dopuščala (npr. družine ali rodu). Na podlagi sledi hranjenja določitev vrste večinoma ni mogoča, zato smo v teh primerih navedli višjo sistematsko kategorijo (npr. Cerambycidae – kozlički).

1.2.5 Identifikacija vrst fitoftor

Identifikacija vrst fitoftor je bila izvedena v uradnem laboratoriju za oomicete na Kmetijskem inštitut Slovenije. Postopki izolacij fitoftor iz zemlje s pomočjo vab so bili izvedeni takoj po prejemu vzorca zemlje v skladu s postopkom, opisanim v Corcobado in sod. (2020) z naslednjimi spremembami. Približno 1 kg vsakega vzorca zemlje smo previdno premešali in zalili z destilirano vodo, tako da je bila zemlja prekrita z 2–3 cm vode. Listi za vabe so bili: *Rhododendrom catawbiense* cv. "Cunninghams White" (mladi in starejši listi), bukev (klični listi, mladi listi), hrast (*Quercus rubra*, *Q. petraea*), kostanj (*Castanea sativa*), beli gaber (*Carpinus betulus*), borovnica (*Vaccinium myrtillus*). Listi so bili sveže nabrani, temeljito oprani in posušeni v mikrobiološki komori.

Ko je bila zemlja popolnoma namočena in se je voda zbirala, smo liste različnih vrst rastlin previdno položili na vodno gladino in pustili plavati 3–7 dni pri 20–22 °C in sobni svetlobi. Liste, na katerih so se razvile nekroze, smo pregledali pod svetlobnim mikroskopom pri povečavi 60× in jih nato precepili na selektivni agar P₅ARPH (EPPO, 2006) ter gojili pri 21 °C v temi (Corcobado in sod., 2020).

Po 24 urah inkubacije smo petrijevke z lističi redno preverjali (Jung in sod., 2015). Vse kulture smo prenesli na agar s koščki korenčka (CPA) (Werres in sod., 2001). Po 3 tednih rasti pri 21 °C smo izolate inokulirali na poševnice CPA in shranili v sterilni vodi pri 8 °C do nadaljnje analize.

DNA smo ekstrahirali iz ok. 100 mg 14 dni starega micelija z uporabo DNeasy® Plant Mini Kit (Qiagen) po navodilih proizvajalca. Do tri črtne kode so bile pomnožene in analizirane za identifikacijo vrst fitoftor, in sicer regija ITS z uporabo začetnih nukleotidov ITS5 in ITS4 (White in sod., 1990), regija *cox1* s začetnimi nukleotidi OomCoxI- Levup in OomCoxI-Levlo (Robideau in sod., 2011) in regija β -tub z začetnimi nukleotidi TUBUF2 in TUBUR1 (Kroon in sod., 2004).

Sekvenciranje pribl. 1000 bp (ITS in β -tub) in 800 bp (*cox1*) amplikone treh lokusov je izvedlo komercialno podjetje za sekvenciranje. Zaporedja so bila obdelana in analizirana v skladu z EPPO PM7/129 (EPPO, 2021).

1.2.6 Obdelava podatkov

Statistična analiza je bila izvedena v programski opremi R (R Core Team, 2022). Razlike v strukturi združb organizmov med različnimi drevesnimi razredi in deli dreves so bile preizkušene z analizo podobnosti (ANOSIM) s knjižnico "vegan" (Clarke, 1993; Oksanen in sod., 2022) na podlagi Jaccardovega indeksa podobnosti (Magurran, 2004) in vizualizirane s pomočjo funkcije NMDS (ang. Nonmetric Multidimensional Scaling). Za iskanje statističnih razlik med različnimi skupinami smo uporabili Dunnov test mnogoterih primerjav v knjižnici DescTools, pri čemer smo uporabili Bonferronijevo korekcijo (Signorell in sod., 2022).

1.3 Rezultati

1.3.1 Osutost in poškodovanost bukve

Na vzorčnih ploskvah nismo opazili nobene popolnoma zdrave bukve, ki bi imela osutost krošnje 0 %. Povprečna osutost za drevesa, izbrana kot zdrava, je bila 12,3 % (**Preglednica 4**). Poškodovana drevesa so imela značilno večjo povprečno osutost kot zdrava, v povprečju 37,5 % ($p < 0,001$).

Preglednica 4. Osutost bukovih dreves glede na razred ($n = 40$, $N = 80$)

Razred	Osutost (%)		
	Avg	Min	Max
poškodovano	37,5	20	65
zdravo	12,3	5	30

Največjo povprečno poškodovanost bukve so povzročile glive (5,3 %, **Preglednica 5**). Na drugem mestu so bili dejavniki nežive narave (3,2 %), na tretjem pa žuželke (2,1 %). Povprečna poškodovanost zaradi gliv je bila značilno večja kot povprečna poškodovanost zaradi žuželk in neposrednega delovanja človeka ($p < 0,001$). Dejavniki nežive narave (npr. veter, sneg, žled) so povzročili v povprečju višjo poškodovanost bukve kot žuželke ($p < 0,05$) in neposredni vplivi človeka (npr. opravlila povezana s sečnjo in spravilom dreves) ($p < 0,001$).

Preglednica 5. Poškodovanost bukve glede na kategorijo škodljivega dejavnika

Kategorija škodljivega dejavnika	Poškodovanost (%)		Št. zapisov
	Avg	Max	
divjad in objedanje	0,8	2	4
žuželke	2,1	24	137
glive	5,3	50	252
dejavniki nežive narave*	3,2	15	35
neposredni vplivi človeka*	1,2	10	50
drugo*	0,3	1	4

*dejavniki nežive narave: npr. veter, sneg, žled; neposredni vplivi človeka: npr. mehanske poškodbe dreves zaradi sečnje in spravila dreves; drugo: npr. kompeticija.

Od 48 do 100 % osutosti, v povprečju 91 %, je bilo pojasnjeno z različnimi škodljivimi dejavniki (**Preglednica 6**). Glive so bile najpogosteje zabeležena skupina povzročiteljev poškodb bukve v obeh razredih dreves, tj. poškodovanih in zdravih. Poleg tega so glive povzročile največjo poškodovanost v obeh drevesnih razredih med vsemi kategorijami škodljivih dejavnikov. Dejavniki nežive narave so bili na drugem mestu po obsegu poškodb, žuželke pa na tretjem mestu. Divjad in objedanje ter drugi dejavniki so imeli najmanjšo pogostnost in najmanjši vpliv na poškodovanost.

Preglednica 6. Poškodovanost bukve glede na razred drevesa in kategorijo škodljivega dejavnika

Razred	Kategorija škodljivega dejavnika	Poškodovanost (%)		Št. zapisov
		Avg	Max	
poškodovano	divjad in objedanje	0,0	0	1
	žuželke	2,9	24	72
	glive	7,9	50	129
	dejavniki nežive narave	4,8	15	15
	neposredni vplivi človeka	1,9	10	25
	drugo	0,3	1	4
zdravo	divjad in objedanje	1,0	2	3
	žuželke	1,2	5	65
	glive	2,6	20	123
	dejavniki nežive narave	2,1	5	20
	neposredni vplivi človeka	0,5	4	25
	drugo	0,3	1	4

Glive so bile najpomembnejši škodljiv dejavnik vejic in vej tako v razredu poškodovanih kot tudi zdravih dreves (**Preglednica 7**). Prav tako so bile glive najpomembnejši škodljiv dejavnik debla in koreninika zdravih dreves. Dejavniki nežive narave so bili najpomembnejši škodljiv dejavnik debla in koreninika poškodovanih dreves vendar skupaj samo na treh drevesih; na drugem mestu pa so povzročili poškodbe vej in vejic ter debla in koreninika zdravih dreves. Žuželke so bile najpomembnejša skupina povzročiteljev poškodb na bukvi le na listih, kjer so povzročile večjo poškodovanost kot glive ali drugi povzročitelji. Poleg tega so bile žuželke na tretjem mestu po povprečni poškodovanosti na vejicah in vejah.

Preglednica 7. Poškodovanost bukve glede na razred drevesa, del drevesa in kategorijo škodljivih dejavnikov

Razred	Del drevesa	Kategorija škodljivega dejavnika	Poškodovanost		Št. zap.
			Avg	Max	
poškodovano	listi	žuželke	1,9	6	41
		glive	0,3	2	34
		divjad in objedanje	0,0	0	1
	veje, vejice	žuželke	5,9	24	21
		glive	12,3	50	80
		dejavniki nežive narave	4,3	10	12
		neposredni vplivi človeka	10,0	10	2
		žuželke	1,0	5	10
		glive	2,0	5	15
	deblo in koreninik	dejavniki nežive narave	6,7	15	3
		neposredni vplivi človeka	1,2	10	23
		žuželke	1,2	5	41
zdravo	listi	glive	0,2	2	33
		dejavniki nežive narave	1,0	1	1
		divjad in objedanje	1,0	2	3
	veje, vejice	žuželke	1,8	5	17
		glive	3,9	20	76
		dejavniki nežive narave	2,3	5	16
		neposredni vplivi človeka	1,0	1	1
		žuželke	0,0	0	7
		glive	1,1	3	14
	deblo in koreninik	dejavniki nežive narave	1,0	3	3
		neposredni vplivi človeka	0,5	4	24
		drugo	0,3	1	4

Potrdili smo 1. hipotezo, da je v proces hiranja navadne bukve v Sloveniji vpletenih večje število škodljivih dejavnikov, ki skupaj povzročajo kompleksno bolezen.

Potrdili smo 2. hipotezo, da bolezniki povzročijo v povprečju večjo poškodovanost navadne bukve v Sloveniji kot žuželke in drugi škodljivi dejavniki.

1.3.2 Povzročitelji poškodb na bukvi

1.3.2.1 Glive

Iz 1.600 vzorcev smo pridobil 5.828 kultur, ki smo jih razvrstili v 251 morfotipov.

Iz poškodovanih bukev smo pridobili 219 morfotipov in 2.920 izolatov, iz zdravih bukev pa 224 morfotipov in 2.908 izolatov. Iz ene vzorčne ploskve smo pridobili 22–55 morfotipov (povprečno 42) in 98–202 izolatov (povprečno 145).

Največja pestrost morfotipov je bila na deblu in koreniniku, ki sta imela podobno pestrost gliv, tj. 152 oz. 153 (**Preglednica 8**). Na drugem mestu po pestrosti gliv so bile veje in vejice. Najmanjše število morfotipov smo izolirali iz listov, vendar še vedno veliko število, tj. 119.

Preglednica 8. Število morfotipov in št. izolatov glede na del drevesa

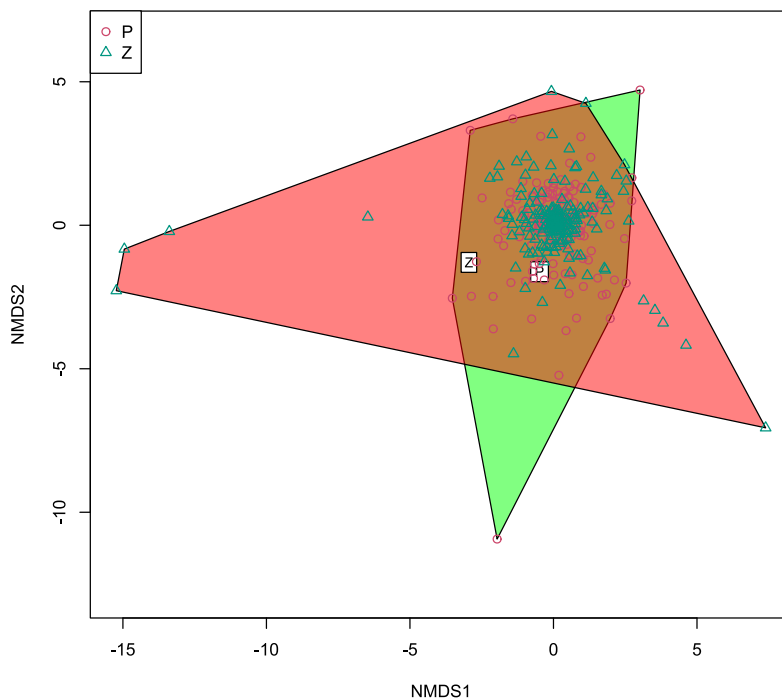
Del drevesa	Št. morfotipov	Št. izolatov
deblo	153	999
koreničnik	152	875
list	119	1412
vejica	132	1365
veja	138	1177

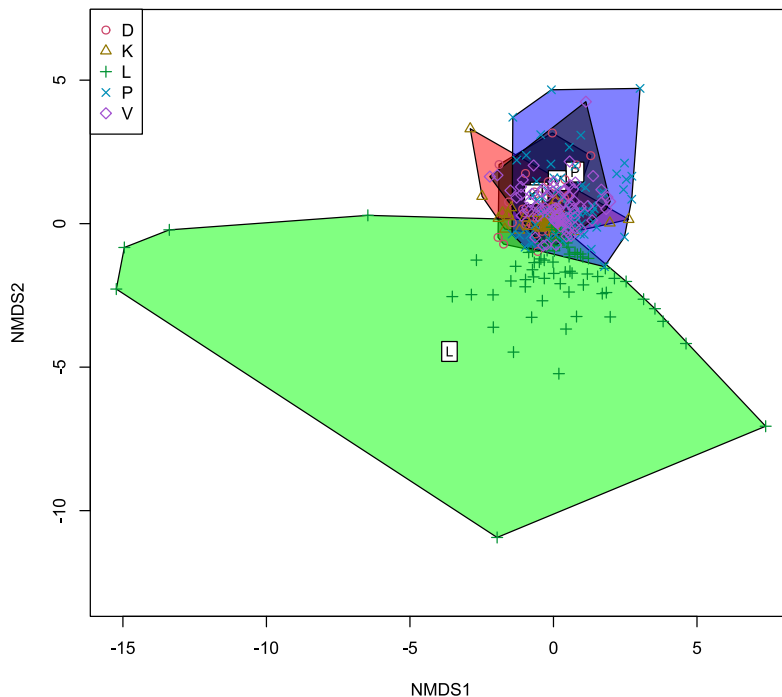
Glede na mesto izolacije je bila največja pestrost morfotipov gliv izolirana iz zunanjega dela skorje (**Preglednica 9**). Na drugem mestu so bile izolacije iz roba nekroze iz notranjega dela skorje. Na tretjem mestu so bile izolacije iz roba obarvanega lesa. Iz na videz zdravih listov in zdrave skorje smo pridobili manjše število morfotipov in izolatov zaradi manjšega števila vzorčkov (**Preglednica 3**).

Preglednica 9. Število morfotipov in št. izolatov glede na mesto izolacije

Mesto izolacije	Št. morfotipov	Št. izolatov
zdrava skorja	2	2
notranji del skorje	161	2013
zunANJI del skorje	164	1113
poškodovan list	118	1394
zdrav list	14	18
obarvan les	151	1288

Na podlagi rezultatov ANOSIM so se združbe gliv (morfotipov) izrazito razlikovale med deli drevesa ($p = 0,001$; **Slika 3**), ne pa tudi med razredi dreves poškodovano/zdravo ($p = 0,536$; **Slika 2**). Listi so se značilno razlikovali od drugih delov dreves po glivnih združbah (**Slika 3**). Vejice, veje, deblo in koreničnik pa so imele podobne združbe gliv (**Slika 3**).

**Slika 2.** NMDS analiza podobnosti združb gliv med različnimi razredi dreves glede na razvrstitev v morfotipe (P – poškodovano, Z – zdravo)



Slika 3. NMDS analiza podobnosti združb gliv med različnimi deli dreves glede na razvrstitev v morfotipe (D – deblo, K – koreničnik, L – list, P – poganjek oz. vejica, V – veja)

Za nadaljnjo analizo določitve vrst gliv smo iz vsakega dela drevesa izbrali 20 najpogostejših morfortipov, tj. 100 oz. 107, ker je bila pri nekaterih morfortipih frekvenca pojavljanja enaka. Ker pa so se določeni morfortipi ponavljali med različnimi deli drevesa, smo končno izbrali 72 morfortipov za nadaljnjo analizo, tj. identifikacijo vrst gliv po metodi črtnih kod. Izbrani morfortipi so zajemali 3.830 izolatov (65,7 % vseh izolatov). Izmed teh 72 najpogostejših morfortipov smo naknadno izbrali 10 najpogostejših za dodatno kontrolo pravilnosti določitve morfortipov (ponovitev identifikacije vrste glede na morfortip).

Iz 72 morfortipov smo določili 44 taksonov gliv, kar pomeni, da se je 28 morfortipov (39 %) uvrščalo v isti takson. Izmed 10 morfortipov za dodatno kontrolo določitve morfortipov se je devet identifikacij ujemalo z drugim izolatom istega morfortipa, ena identifikacija pa ne. Zaključimo lahko, da so bili morfortipi načeloma ustrezno določeni oz. v večini primerov še preveč podrobno klasificirani, v določenih primerih, ko so si bili morfortipi izjemno podobni, pa ja lahko prišlo do napačne razvrstitve (do 10 %).

Najpogostejša vrsta na koreničniku je bila gliva *Cadophora spadicis* (Priloga 1). Ostale določene vrste gliv na koreničniku so imele tri krat manjšo frekvenco pojavljanja kot *C. spadicis*, med pogostejšimi s frekvenco večjo od 20 so bile *Neonectria coccinea*, *Clypeosphaeria* sp. in *Cosmospora* sp.

Najpogostejše tri vrste gliv na deblu so bile *Neonectria coccinea*, *Cytospora hippophaicola* in *Neocosmospora quercicola* (Priloga 1). Glive na deblu s frekvenco izolatov nad 20 so bile še: *Cadophora spadicis*, *Pezicula* sp., *Aureobasidium pullulans*, *Clonostachys* sp., *Neohendersonia kickxii*.

Na vejicah sta izrazito prevladovali dve vrsti, tj. *Neohendersonia kickxii* in *Neonectria coccinea* (Priloga 1). Vse ostale vrste oz. taksoni so imeli več kot tri krat manjšo frekvenco pojavljanja.

Na vejah sta podobno kot na vejicah prevladovali *Neonectria coccinea* in *Neohendersonia kickxii* vendar v obratnem vrstnem redu (Priloga 1). Ostale določene vrste gliv na vejah so imele vsaj za dva krat manjšo frekvenco pojavljanja.

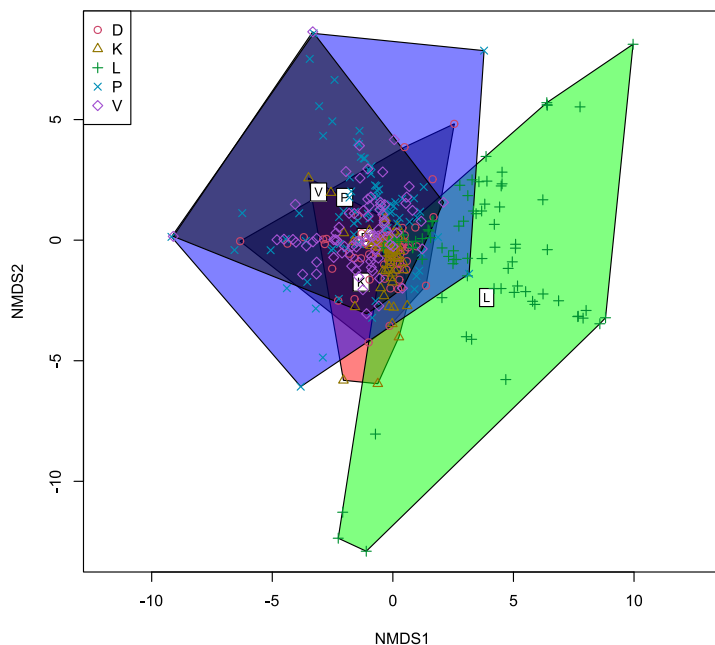
Tri najpogostejše vrste gliv na listih so bile *Apiognomonium errabunda*, *Aureobasidium pullulans* in *Didymosphaeria* sp. (Priloga 1). S frekvenco izolatov nad 20 so bile prisotne še *Petrakia liobae*, *Alternaria* sp. in *Cladosporium pseudocladosporioides*.

Izdelali smo tudi frekvenčno analizo glede na mesto izolacije (Priloga 2). Najpogostejši vrsti v notranjem delu skorje sta bili *Neohendersonia kickxii* in *Neonectria coccinea*. Ostali taksoni so bili vsaj štirikrat manj pogosti. V zunanjem delu skorje sta bili najpogostejši glivi *Cytospora hippophaicola* in *Neonectria coccinea*. Iz zdrave skorje smo določili samo en takson, tj. rod *Clypeosphaeria*.

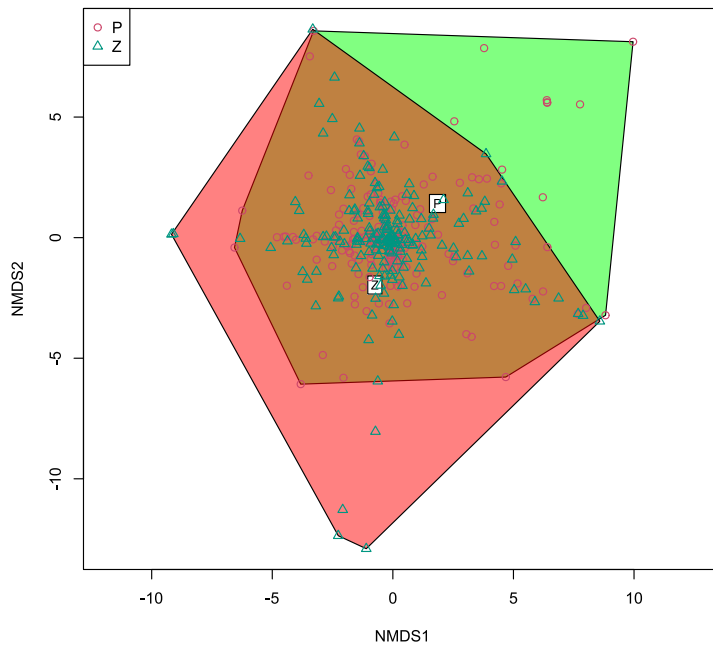
Iz obarvanega lesa smo najpogosteje izolirali tri vrste gliv, tj. *Neonectria coccinea*, *Cadophora spadicis* in *Neohendersonia kickxii* (Priloga 2). Ostali taksoni so imeli bistveno nižjo frekvenco pojavljanja (tri krat in več).

Iz obolelih listov smo najpogosteje izolirali glive *Apiognomonium errabunda*, *Aureobasidium pullulans* in *Didymosphaeria* sp. (Priloga 2). Med pogostejšimi vrstami so bile identificirane še *Petrakia liobae*, *Alternaria* sp. in *Cladosporium pseudocladosporioides*. Iz zdravih listov smo najpogosteje izolirali glivo *Apiognomonium errabunda*.

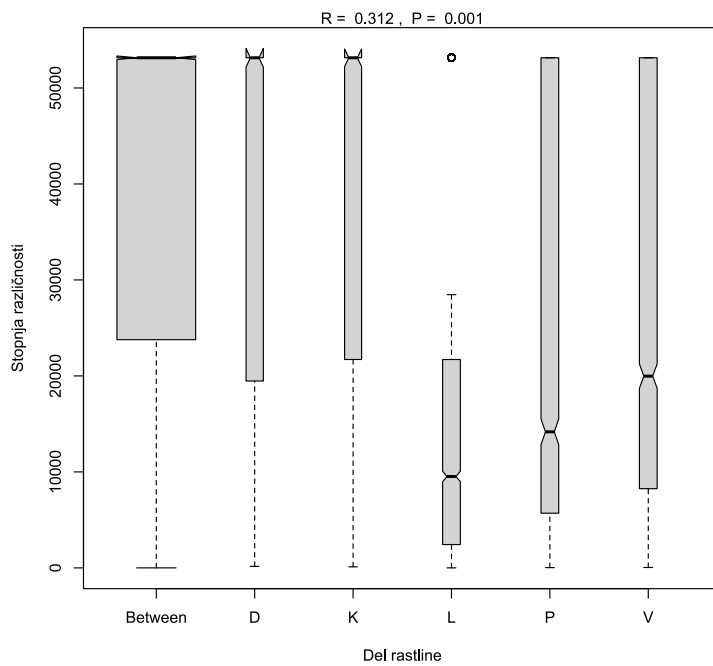
Na podlagi rezultatov analize podobnosti ANOSIM so se združbe določenih taksonov gliv izrazito razlikovale med deli drevesa ($p = 0,001$; **Slika 4**), ne pa tudi med razredi dreves poškodovano/zdravo ($p = 0,942$; **Slika 5**). Med vsemi deli drevesa so obstajale statistično različne združbe gliv. Deblo in koreničnik sta imela na videz podobne združbe gliv (**Slika 6**). Vejice in veje so imele podobne združbe gliv, kakor tudi listi in vejice (**Preglednica 10**).



Slika 4. NMDS analiza podobnosti združb identificiranih taksonov gliv med različnimi deli dreves (D – deblo, K – koreničnik, L – list, P – poganjek oz. vejica, V – veja)



Slika 5. NMDS analiza podobnosti združb identificiranih taksonov gliv med različnimi razredi dreves (P – poškodovano, Z – zdravo)



Slika 6. Stopnja različnosti združb identificiranih taksonov gliv med različnimi deli dreves glede na NMDS analizo podobnosti (D – deblo, K – koreničnik, L – list, P – poganjek oz. vejica, V – veja)

Preglednica 10. Dunnov test mnogoterih primerjav z Bonferronijevo korekcijo za podobnost med glivnimi združbami med različnimi deli drevesa (D – deblo, L – list, P – poganjek oz. vejica, V – veja)

Primerjava	Povp. rang	p
D-Between	-3.278	< 2e-16
K-Between	597	1
L-Between	-25.157	< 2e-16
P-Between	-17.745	< 2e-16
V-Between	-13.701	< 2e-16
K-D	3.875	2,10E-13
L-D	-21.878	< 2e-16
P-D	-14.467	< 2e-16
V-D	-10.423	< 2e-16
L-K	-25.754	< 2e-16
P-K	-18.343	< 2e-16
V-K	-14.298	< 2e-16
P-L	7.411	< 2e-16
V-L	11.456	< 2e-16
V-P	4.045	1,70E-15

1.3.2.2 Fitoftore

Od 80 vzorcev tal so bile fitoftore izolirane iz treh (3,8 %) vzorcev. Iz treh vzorcev so bile izolirane tri vrste fitofter: *P. gonapodyides* (drevo 154P), *P. hedraïandra* (drevo 2512P) in *P. cactorum* (drevo 537Z). Fitoftore so bile izolirane iz zemlje, ki smo jo odvzeli iz okolice dveh poškodovanih bukev in ene zdrave bukke.

S tem zavrnamo 3. hipotezo, da se fitoftore pojavljajo v zemlji na več kot polovici poškodovanih vzorčenih navadnih bukvah in so zato pomemben škodljiv dejavnik hiranja navadne bukke, saj smo fitoftore pridobili le iz dveh od 40 odvzetih vzorcev zemlje, ki smo jih odvzeli iz neposredne bližine poškodovanih bukev.

1.3.2.3 Žuželke

Skupaj smo določili 71 taksonov žuželk. Določili smo od 3 do 15 vrst žuželk na drevo (povprečno 7). Znotraj ploskve smo določili od 8 do 25 vrst žuželk (povprečno 15). Najpogosteje opažene žuželke so bile *Mikiola fagi*, *Orchestes fagi* in *Phyllonorycter maestingella* (**Preglednica 11**). Najbolj škodljive žuželke s pogostnostjo večjo od desetih zapisov so bile *Orchestes fagi*, *Phyllaphis fagi*, *Psilocorsis reflexella* in *Phyllonorycter maestingella* (enako za razred poškodovanih in zdravih dreves). Vendar je bil njihov prispevek k obsegu poškodovanosti majhen, npr. za *Orchestes fagi* v povprečju 1,6 % v razredu poškodovanih in 0,9 % v razredu zdravih dreves. Med desetimi najpogosteje zabeleženimi žuželkami so bili le defoliatorji.

Preglednica 11. Deset najpogostejših vrst žuželk (n > 10)*

Razred	Žuželka	Poškodovanost (%)		Št. zap.
		Avg	Max	
poškodovano	<i>Orchestes fagi</i>	1,6	10	37
	<i>Phyllaphis fagi</i>	1,1	5	19
	<i>Psilocorsis reflexella</i>	0,5	2	23
	<i>Phyllonorycter maestingella</i>	0,5	1	23
	<i>Mikiola fagi</i>	0,3	1	37
	<i>Hartigiola annulipes</i>	0,2	1	14
	<i>Phyllonorycter sp.</i>	0,0	0	13
	<i>Orchestes fagi</i>	0,9	10	34
zdravo	<i>Phyllaphis fagi</i>	0,5	2	21
	<i>Psilocorsis reflexella</i>	0,5	3	18
	<i>Phyllonorycter maestingella</i>	0,4	2	19
	<i>Mikiola fagi</i>	0,3	3	39

<i>Hartigola annulipes</i>	0,3	1	16
<i>Phyllonorycter</i> sp.	0,0	0	11
<i>Lepidoptera</i>	0,0	0	12

*Popoln seznam določenih žuželk je na voljo v Prilogi 3.

Med manj pogosto določenimi žuželkami so bile najbolj škodljive *Xyleborus* sp. in *Anisandrus dispar* (**Preglednica 12**).

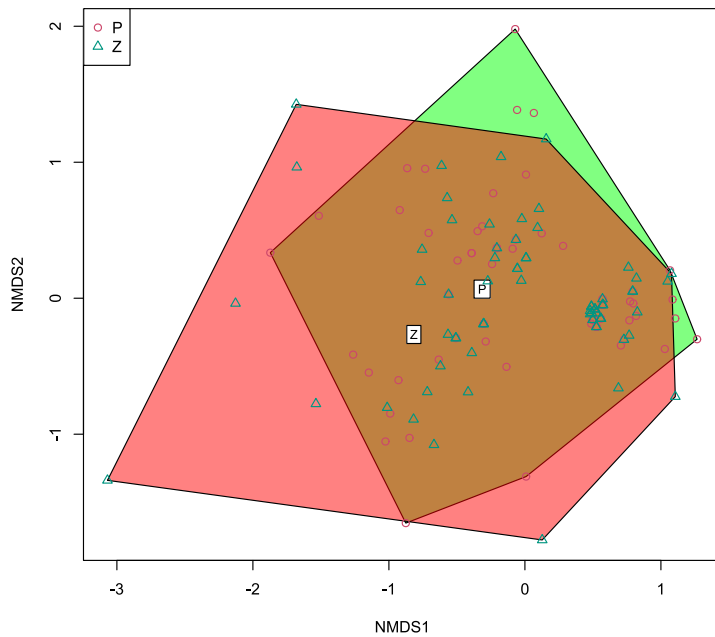
Preglednica 12. Manj pogosto zabeležene žuželke z večjim obsegom poškodovanosti ($n \leq 10$)

Žuželka	Poškodovanost (%)		Št. zap.
	Avg	Max	
<i>Xyleborus</i> sp.	3,0	10	4
<i>Anisandrus dispar</i>	2,4	10	7
<i>Phyllonorycter messaniella</i>	1,0	1	3
kobilica	1,0	1	2
<i>Cercopoidea</i>	1,0	1	2
<i>Tortricidae</i>	1,0	1	1
<i>Chrysomellidae</i>	1,0	1	1
<i>Elateridae</i>	1,0	1	1
<i>Membracidae</i>	1,0	1	1
<i>Cicadellidae</i>	0,9	5	10
<i>Incurvaria koernerella</i>	0,9	1	8
<i>Parornix fagivora</i>	0,6	1	7
<i>Pentatoma rufipes</i>	0,5	1	10
<i>Miramella irena</i>	0,5	1	2
<i>Sessidae</i>	0,5	1	2
<i>Agrilus</i> sp.	0,3	1	3
<i>Orgyia antiqua</i>	0,2	1	5

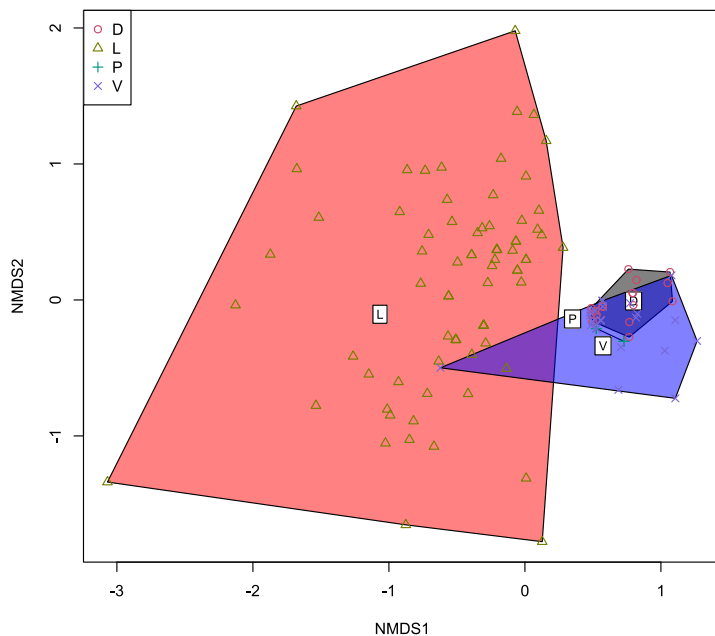
Povprečni Jaccardov indeks podobnosti za združbe žuželk med vzorčnimi ploskvami je bil 0,28 in je dosegel največ 0,47. Jaccardov indeks podobnosti je bil najvišji med vejami in deblom ter vejicami in vejami, najnižji pa med listi in vejicami ter listi in deblom (**Preglednica 13**). Na podlagi rezultatov ANOSIM so se združbe žuželk izrazito razlikovale med deli drevesa ($p = 0,001$; **Slika 8**), ne pa tudi med razredi dreves poškodovano/zdravo ($p = 0,744$; **Slika 7**). Listi so izstopali od drugih delov drevesa glede na združbe žuželk (**Slika 8**). Pri vejicah, vejah in deblu pa se je del združbe žuželk prekrival.

Preglednica 13. Jaccardov indeks podobnosti za združbe žuželk med različnimi deli drevesa

Del drevesa	listi	vejice	veje
vejice	0		
veje	0,35	0,41	
deblo	0,05	0,08	0,49



Slika 7. NMDS analiza podobnosti združb žuželk med različnimi razredi dreves (P – poškodovano, Z – zdravo)



Slika 8. NMDS analiza podobnosti združb žuželk med različnimi deli dreves (D – deblo, L – list, P – poganjek oz. vejica, V – veja)

1.4 Razprava

Največjo povprečno poškodovanost bukve so povzročile glive (5,3 %). Na drugem mestu so bili dejavniki nežive narave (3,2 %), na tretjem pa žuželke (2,1 %). Ugotovili smo, da je v proces hiranja navadne bukve v Sloveniji vpletenih večje število škodljivih dejavnikov, ki skupaj povzročajo kompleksno bolezen. Potrdili smo, da so bolezni najpomembnejši škodljiv dejavnik, kar se sklada s

popisom poškodovanosti drevja na stalnih vzorčnih ploskvah na mreži 16 × 16 km (Ogris in Skudnik, 2021, 2022). Tudi pomembnost dejavnikov nežive narave, ki zasedajo drugo mesto, se sklada med rezultatom aktivnosti 2.1 in vsakoletnim popisom poškodovanosti dreves. V našem popisu povzročiteljev poškodb bukve smo žuželkam pripisali večji pomen in sicer tretje mesto po pomembnosti, medtem ko jim vsakoletni popis poškodovanosti na stalnih vzorčnih ploskvah pripisuje najmanjši pomen pri povzročanju poškodb na bukvi od vseh kategorij škodljivih dejavnikov. To je lahko tudi posledica manjšega števila vzorčnih dreves v našem primeru.

Združbe gliv in žuželk se niso razlikovale med razredi dreves poškodovano/zdravo. To pomeni, da se v zdravih drevesih pojavlja podobna združba gliv in žuželk kot v poškodovanih. Dejstvo je, da na ploskvah nismo našli popolnoma zdravega drevesa bukve; povprečna osutost izbranih zdravih dreves je bila 12,3 %. Domnevamo, da se bodo tudi v razredu zdravih dreves povečevale poškodbe zaradi škodljivih organizmov v prihodnosti, glede na to, da se v njih pojavlja podobna združba organizmov in da so se zdrava drevesa nahajala blizu poškodovanih dreves (povprečno 42 m vstran).

Pričakovali smo, da bodo fitoftore pogosto prisotne v vzorčni zemlji predvsem v okolici poškodovanih dreves bukve. Vendar smo uspeli izolirati fitoftore samo iz treh vzorcev zemlje od skupaj 80. Dejavnik, ki je morda vplival na manjšo uspešnost izolacij fitoftor, je čas vzorčenja. Kajti večino vzorcev smo odvzeli v poletnih mesecih (junij–september), ki je neugoden čas za določevanje fitoftor. Domnevamo, da bi bil izplen vzorčenja fitoftor večji, če bi zemljo vzorčili spomladi (marec–april) in jeseni (oktober–november), v času, ko je zemlja hladnejša in bolj namočena, ker gre pretežno za vodne organizme. Vendar to v okviru tega projekta ni bilo izvedljivo zaradi omejenosti projektnih sredstev.

V naši raziskavi smo določili najpogostejše vrste gliv, ki se pojavljajo v različnih delih dreves hirajočih bukev. Da bi dobili vpogled v pomen posameznih vrst v proces hiranja navadne bukve v Sloveniji, bi morali izvesti še teste patogenosti v različnih okoljskih razmerah in z različnimi proveniencami bukve. Brez testov patogenosti oz. izvedbe Kochovih postulatov ne moremo trditi za izolirane vrste gliv v naši raziskavi, da so povzročiteljice poškodb bukve. Trdimo lahko zgolj, da so bile prisotne v poškodovanih delih drevesa, iz katerih smo odvzeli koščke tkiva za izolacijo gliv v čisto kulturo. Predlagamo, da se teste patogenosti izvede v drugi raziskavi.

Izolirane vrste gliv uvrščamo med patogene, endofite, saprofite in fakultativne patogene. Nekatere najbolj pogoste vrste, kot so npr. *Neohendersonia kickxii* v vejicah, *Neonectria coccinea* v lesu in *Apiognomonium errabunda* v listih, so znani endofiti, ki se pojavljajo v popolnoma zdravih tkivih. V primeru delovanja stresnih dejavnikov na gostitelja pa se endofiti preobrazijo v patogene, zato jim pravimo tudi fakultativni patogeni. Tako je npr. za *Apiognomonium errabunda* znano, da spodbudijo njeno patogeno delovanje žuželke kot so *Mikiola fagi* in *Hartigiola annulipes* ali pa pozna zmrzal. Iz tega dejstva lahko domnevamo, da imajo fakultativni patogeni pomembno vlogo pri hiranju bukve, ki delujejo kot nekakšen speči mehanizem, ki se aktivira ob prisotnosti ustreznega stresnega dejavnika ali dejavnikov.

V bukovih gozdovih se pojavlja 198 vrst žuželk (Jurc M., 2012). V naši raziskavi smo določili 71 taksonov žuželk, kar predstavlja 35,9 % vseh vrst žuželk, ki se pojavljajo na bukvi. Žuželke so bile šele na tretjem mestu glede na povprečno poškodovanost bukve. Žuželke so bile najpomembnejša skupina povzročiteljev poškodb na bukvi le na listih, kjer so povzročile večjo poškodovanost kot glive ali drugi povzročitelji. V določenih primerih lahko žuželke povzročijo popolno ali zgodnjo defoliacijo bukve, kar pomeni za drevo zmanjšanje vitalnosti in stres. Zato imajo žuželke lahko pomembno posredno vlogo pri pojavu fakultativnih patogenov in sekundarnih škodljivcev, ki poškodujejo le predhodno oslabela drevesa.

Najpogostejši žuželki sta bili *Orchestes fagi* (bukov rilčkar skakač) in *Phyllaphis fagi* (bukova listna uš). Obe žuželki sta bili v letu 2022 v fazi gradacije na območju cele države (Kavčič, 2022). Če žuželki ne bi bili v gradaciji, domnevamo, da bi ocena poškodovanosti bukve zaradi žuželk bila nižja.

Determiniranim boleznim in škodljivcem smo poskušali določiti njihovo vlogo pri hiranju bukve, tako da smo jih razdelili v tri skupine (Jurc D., 1999; Manion, 1981): dejavniki predispozicije, sprožilni dejavniki in dodatni dejavniki. Dejavniki predispozicije so stalno prisotni negativni dejavniki in predstavljajo neprestani stres za rastlino. To so dejavniki, ki na splošno slabijo rastlino skozi daljši čas oz. čez celo življenjsko obdobje rastline: npr. neustrezen izvor semena, neustrezna tla, podnebje, genetski potencial drevesa, starost drevesa, onesnaženi zrak. Sprožilni dejavniki so tisti, ki trajajo kratek čas in močno prizadenejo drevo, tj. povzročijo akutne poškodbe rastline, to so npr. defoliatorji, pozeba, suša. Drevo skuša poškodbe zaradi sprožilnih dejavnikov pozdraviti, vendar ima težave zaradi stalno prisotnega stresa dejavnikov predispozicije. Zato se na njem uspejo razviti dodatni škodljivi dejavniki, npr. podlubniki, trohnozne glive, glive modrivke in drugi fakultativni patogeni ter sekundarni škodljivci. Na propadajočem drevesu so ti dodatni škodljivi dejavniki najočitnejši in jih pogosto napačno identificiramo kot glavne povzročitelje propada drevesa. Življenje drevesa poteka v stalnem pritisku različnih škodljivih dejavnikov, ki si jih lahko zamislimo razvrščene v trojno spiralo (Jurc D., 1999): dejavniki predispozicije predstavljajo stalni pritisk in včasih prestavijo stanje drevesa v naslednjo stopnjo spirale. V kolikor je drevo nenadoma močno prizadeto, se sproži proces, ko dodatni dejavniki oslabiljeno drevo dokončno uničijo.

Dejavniki predispozicije:

- podnebne spremembe (dvig temperature zraka),
- onesnažen zrak,
- neustrezno rastišče in neustrezen izvor semena (v določenih primerih),
- fitoftore (*Phytophthora* sp.) in druge oomicete, ki povzročajo odmiranje korenin in korenin,
- stalno prisotni škodljivci: *Phyllonorycter maestingella*, *Mikiola fagi*, *Hartigola annulipes*.

Sprožilni dejavniki:

- suša,
- pozeba,
- defoliatorji: npr. *Orchestes fagi*, *Phyllaphis fagi*.

Dodatni dejavniki (npr.):

- bolezni vejic in vej oz. fakultativni patogeni: *Neohendersonia kickxii*, *Neonectria coccinea*, *Apiognomonina errabunda*,
- bolezni debla in koreninika: *Cytospora hippophaicola*, *Neocosmospora quercicola*, *Cadophora spadicea*,
- bolezni listja: *Apiognomonina errabunda*, *Aureobasidium pullulans*, *Didymosphaeria* sp., *Petrakia liobae*, *Alternaria* sp., *Cladosporium pseudocladosporioides*,
- trohnozne glive: *Armillaria* sp.,
- podlubniki in druge žuželke: *Xyleborus* sp., *Anisandrus dispar*, *Agrilus* sp.

Hiranje bukve so zabeležili tudi drugod v Evropi (Brück-Dyckhoff in sod., 2019; Rohner in sod., 2021). Raziskovalci so ugotovili, da so v proces hiranja bukve vpletene fitoftore (*Phytophthora* spp.), daljša obdobja z obilnim deževjem in suše (Jankowiak in sod.; Jung, 2009). Podobno ugotavljajo tudi v Italiji (Vettraino in sod., 2008). K hiranju bukve prispevajo tudi drugi škodljivi dejavniki, npr. pooglenitev bukve, ki jo povzroča sicer endofitna gliva *Biscogniauxia nummularia* ob sušnem stresu (Granata in

Sidotj, 2004). Tudi na Madžarskem so zabeležili hiranje bukve zaradi sušnega stresa, pojava pooglenitve bukve in še nekaterih drugih škodljivcev (Lakatos in Molnár, 2009). Vse kaže, da bukev postaja ranljivejša zaradi suše in toplejšega podnebja (Chakraborty in sod., 2021), kar se ujema z rezultati naše raziskave. V nasprotju s prej omenjenimi raziskavami v Evropi pa v naši raziskavi nismo ugotovili bistvenega vpliva fitoftor in pooglenitve bukve. Glede na to, da je eden od sprožilnih dejavnikov hiranja bukve suša in eden od dejavnikov predispozicije toplejše podnebje, smo pričakovali pogostejše pojavljanje pooglenitve bukve, gliv iz družine Botryosphaeriaceae, krasnikov in podlubnikov. Vendar se slednja pričakovanja niso izpolnila. Izstopale so glive *Neohendersonia kickxii*, *Neonectria coccinea* in *Apiognomonina errabunda*. Vse tri glive so znani in zelo pogosti endofiti navadne bukve (Danti in sod., 2002; Langer in Bußkamp, 2023; Sieber, 2007). V raziskavi smo ugotovili, da se združbe gliv in žuželk med zdravimi in poškodovanimi bukvami niso razlikovale. Kar nakazuje, da so v zdravih bukvah prisotni že vsi škodljivi organizmi, ki so tudi v poškodovanih. Zato so izjemnega pomena zunanji sprožilni dejavniki, ki spodbudijo patogeno delovanje teh vrst. Ta ugotovitev je pomembna zaradi usmeritev gospodarjenja z bukvijo. Poškodovanost bukve bi lahko zmanjšali, če bi ji nudili okolje s čim manj stresnih oz. sprožilnih dejavnikov, kot so suša, pozeba in drugi sprožilni dejavniki fakultativnih patogenov. V tem kontekstu postane prilagajanje podnebnim spremembam in ustrezna prilagoditev gozdnogospodarskih načrtov nadvse relevantna.

1.5 Zaključki

Potrdili smo 1. hipotezo: V proces hiranja navadne bukve v Sloveniji je vpletenih večje število škodljivih dejavnikov, ki skupaj povzročajo kompleksno bolezen.

Potrdili smo 2. hipotezo: Bolezni povzročijo v povprečju večjo poškodovanost navadne bukve v Sloveniji kot žuželke in drugi škodljivi dejavniki.

Ovrgli smo 3. hipotezo: Fitoftore se pojavljajo v zemlji na več kot polovici poškodovanih vzorčenih navadnih bukvah in so zato pomemben škodljiv dejavnik hiranja navadne bukve.

Največjo povprečno poškodovanost bukve so povzročile glive (5,3 %). Na drugem mestu so bili dejavniki nežive narave (3,2 %), na tretjem pa žuželke (2,1 %). Glive so bile najpomembnejši škodljiv dejavnik vejic in vej ter debela in koreničnika zdravih dreves. Dejavniki nežive narave so bili najpomembnejši škodljiv dejavnik debela in koreničnika poškodovanih dreves; na drugem mestu pa so povzročili poškodbe vej in vejic ter debela in koreničnika zdravih dreves. Žuželke so bile najpomembnejša skupina povzročiteljev poškodb na bukvi le na listih, kjer so povzročile večjo poškodovanost kot glive ali drugi povzročitelji.

Iz 1.600 vzorcev smo pridobil 5.828 kultur, ki smo jih razvrstili v 251 morfotipov. Iz poškodovanih bukev smo pridobili podobno število morfotipov kot iz zdravih. Največja pestrost morfotipov je bila na deblu in koreničniku, ki sta imela podobno pestrost gliv. Na drugem mestu po pestrosti gliv so bile veje in vejice. Najmanjše število morfotipov smo izolirali iz listov. Glede na mesto izolacije je bila največja pestrost morfotipov gliv izolirana iz zunanjega dela skorje. Na drugem mestu so bile izolacije iz roba nekroze iz notranjega dela skorje. Na tretjem mestu so bile izolacije iz roba obarvanega lesa.

Združbe gliv in združbe žuželk so se značilno razlikovale med deli drevesa, ne pa tudi med razredi dreves poškodovano/zdravo.

V bolezni vej in vejic sta najpogosteje vpleteni dve vrsti gliv *Neonectria coccinea* in *Neohendersonia kickxii*. V poškodovanih listih so bile najpogosteje prisotne tri vrste gliv *Apiognomonina errabunda*, *Aureobasidium pullulans* in *Didymosphaeria* sp.

V proces hiranja navadna bukve so vpleteni predvsem endofiti, ki se v stresnih razmerah aktivirajo in povzročajo poškodbe in jih zato obravnavamo kot fakultativne patogene. Med najpogostejšimi fakultativnimi patogeni smo identificirali glive *Neohendersonia kickxii*, *Neonectria coccinea* in *Apiognomonium errabunda*.

Najbolj škodljive žuželke s pogostnostjo večjo od desetih zapisov so bile *Orchestes fagi*, *Phyllaphis fagi*, *Psilocorsis reflexella* in *Phyllonorycter maestingella*; vendar je bil njihov prispevek k obsegu poškodovanosti majhen. Med manj pogosto določenimi žuželkami so bile najbolj škodljive *Xyleborus* sp. in *Anisandrus dispar*.

Vzrok hiranja navadne bukve v Sloveniji je kompleksna bolezen. Dejavniki predispozicije so: podnebne spremembe, onesnažen zrak, neustrezno rastišče in neustrezen izvor semena, fitoftore, stalno prisotni škodljivci. Sprožilni dejavniki so: suša, pozeba, defoliatorji (*Orchestes fagi*, *Phyllaphis fagi*). Dodatni dejavniki so: boleznij vejic in vej oz. fakultativni patogeni (*Neohendersonia kickxii*, *Neonectria coccinea*, *Apiognomonium errabunda*), boleznij debla in koreničnika (*Cytospora hippophaicola*, *Neocosmospora quercicola*, *Cadophora spadicis*), boleznij listja (*Apiognomonium errabunda*, *Aureobasidium pullulans*, *Didymosphaeria* sp., *Petrakia liobae*, *Alternaria* sp., *Cladosporium pseudocladosporioides*), trohnozne glive: *Armillaria* sp., podlubniki in druge žuželke (*Xyleborus* sp., *Anisandrus dispar*, *Agrilus* sp.).

1.6 Zahvala

Zahvaljujemo se lastnikom gozdov, ki so dovolili in sodelovali pri projektu. Zahvaljujemo se Zavodu za gozdove Slovenije, ki je pomagal pri izboru vzorčnih ploskev, iskanju primernih dreves in skrbel za komunikacijo z lastniki gozdov. Zahvaljujemo se sekačem Petru Smolnikarju, Marku Franku, Juretu Žlogarju, Tadeju Slugi, Robertu Krajncu in Iztoku Sinjurju. Za pomoč na terenu se zahvaljujemo Evi Groznik in Simonu Zidarju. Za laboratorijsko pomoč se zahvaljujemo Maši Zagorac, Tašji Cvelbar, Nuši Avguštinčič, Špeli Jagodic, Špeli Hočevar in Zini Devetak.

1.7 Priloge

1.7.1 Priloga 1. Identificirani taksoni gliv in njihova frekvenca pojavljanja glede na del rastline

Koreničnik		Deblo	
Takson	Št. izolatov	Takson	Št. izolatov
<i>Cadophora spadicis</i>	94	<i>Neonectria coccinea</i>	97
<i>Neonectria coccinea</i>	35	<i>Cytospora hippophaicola</i>	60
<i>Clypeosphaeria</i> sp.	27	<i>Neocosmospora quercicola</i>	45
<i>Cosmospora</i> sp.	22	<i>Cadophora spadicis</i>	39
<i>Cytospora hippophaicola</i>	19	<i>Pezicula</i> sp.	32
<i>Lopadostoma fagi</i>	19	<i>Aureobasidium pullulans</i>	26
<i>Phialocephala</i> sp.	17	<i>Clonostachys</i> sp.	25
<i>Armillaria gallica</i>	15	<i>Neohendersonia kickxii</i>	23
<i>Diaporthe eres</i>	15	<i>Neonectria</i> sp.	19
<i>Mycena</i> sp.	13	<i>Phialemonium</i> sp.	19
<i>Pezicula</i> sp.	13	<i>Parafenestella</i> sp.	17
<i>Neohendersonia kickxii</i>	13	<i>Trichoderma</i> sp.	16
<i>Pezicula cinnamomea</i>	13	<i>Neocucurbitaria</i> sp.	14
<i>Nectria dematiota</i>	12	<i>Apiognomonium errabunda</i>	14
<i>Neonectria</i> sp.	11	<i>Mortierella</i> sp.	13
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	10	<i>Clypeosphaeria</i> sp.	12
<i>Parafenestella</i> sp.	10	<i>Coniochaeta velutina</i>	10
<i>Fusarium paeoniae</i>	10	<i>Beauveria</i> sp.	10

<i>Coprinellus micaceus</i>	10	<i>Botryosphaeria dothidea</i>	10
<i>Phialemonium</i> sp.	10	<i>Coprinellus micaceus</i>	9
<i>Xylaria longipes</i>	10	<i>Jackrogersella</i> sp.	9
<i>Trichoderma</i> sp.	8	<i>Petrakia liobae</i>	9
<i>Jackrogersella</i> sp.	8	<i>Xylaria longipes</i>	9
<i>Petrakia liobae</i>	7	<i>Diaporthe eres</i>	8
<i>Neocosmospora quercicola</i>	6	<i>Epicoccum layuense</i>	8
<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	6	<i>Biscognauxia nummularia</i>	7
<i>Aureobasidium pullulans</i>	6	<i>Lopadostoma fagi</i>	7
<i>Botryosphaeria dothidea</i>	5	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	6
<i>Hypoxylon fragiforme</i>	4	<i>Cosmospora</i> sp.	5
<i>Neocucurbitaria</i> sp.	4	<i>Fusarium paeoniae</i>	5
<i>Mortierella</i> sp.	3	<i>Phialocephala</i> sp.	5
<i>Epicoccum layuense</i>	3	<i>Hypoxylon fragiforme</i>	4
<i>Tolypocladium</i> sp.	3	<i>Alternaria</i> sp.	4
<i>Clonostachys</i> sp.	2	<i>Didymella macrostoma</i>	4
<i>Apiognomonina errabunda</i>	2	<i>Diatrypella</i> sp.	4
<i>Biscognauxia nummularia</i>	2	<i>Epicoccum mezzettii</i>	3
<i>Beauveria</i> sp.	2	<i>Phaeoacremonium</i> sp.	3
<i>Diatrypella</i> sp.	1	<i>Tolypocladium</i> sp.	2
		<i>Pezicula cinnamomea</i>	1
		<i>Mycetinis alliaceus</i>	1
		<i>Nectria dematiosa</i>	1

Vejica		Veja	
Takson	Št. izolatov	Takson	Št. izolatov
<i>Neohendersonia kickxii</i>	296	<i>Neonectria coccinea</i>	202
<i>Neonectria coccinea</i>	160	<i>Neohendersonia kickxii</i>	133
<i>Diatrypella</i> sp.	47	<i>Phialemonium</i> sp.	71
<i>Apiognomonina errabunda</i>	46	<i>Neonectria</i> sp.	36
<i>Neonectria</i> sp.	38	<i>Diatrypella</i> sp.	29
<i>Aureobasidium pullulans</i>	34	<i>Aureobasidium pullulans</i>	29
<i>Cytospora hippophaicola</i>	34	<i>Pezicula</i> sp.	26
<i>Phialemonium</i> sp.	34	<i>Tolypocladium</i> sp.	19
<i>Parafenestella</i> sp.	28	<i>Jackrogersella</i> sp.	18
<i>Phialocephala</i> sp.	27	<i>Cytospora hippophaicola</i>	18
<i>Mycetinis alliaceus</i>	22	<i>Biscognauxia nummularia</i>	16
<i>Tolypocladium</i> sp.	15	<i>Hypoxylon fragiforme</i>	16
<i>Pezicula</i> sp.	14	<i>Neocosmospora quercicola</i>	13
<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	14	<i>Apiognomonina errabunda</i>	13
<i>Clonostachys</i> sp.	11	<i>Epicoccum layuense</i>	11
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	11	<i>Beauveria</i> sp.	10
<i>Neocucurbitaria</i> sp.	9	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	9
<i>Mortierella</i> sp.	7	<i>Mycetinis alliaceus</i>	9
<i>Biscognauxia nummularia</i>	6	<i>Phialocephala</i> sp.	9
<i>Cadophora spadicis</i>	5	<i>Neocucurbitaria</i> sp.	7
<i>Nectria dematiosa</i>	5	<i>Mortierella</i> sp.	6
<i>Neocosmospora quercicola</i>	5	<i>Nectria dematiosa</i>	5
<i>Jackrogersella</i> sp.	5	<i>Phaeoacremonium</i> sp.	5
<i>Xylaria longipes</i>	3	<i>Cadophora spadicis</i>	5
<i>Lopadostoma fagi</i>	1	<i>Diaporthe eres</i>	5
<i>Beauveria</i> sp.	1	<i>Coprinellus micaceus</i>	5
<i>Coniochaeta velutina</i>	1	<i>Clypeosphaeria</i> sp.	3
<i>Diaporthe eres</i>	1	<i>Cosmospora</i> sp.	3

<i>Didymosphaeria</i> sp.	1	<i>Botryosphaeria dothidea</i>	3
		<i>Parafenestella</i> sp.	3
		<i>Epicoccum mezzettii</i>	3
		<i>Trichoderma</i> sp.	3
		<i>Clonostachys</i> sp.	2
		<i>Didymella macrostoma</i>	2
		<i>Didymosphaeria</i> sp.	1
		<i>Alternaria</i> sp.	1
		<i>Lopadostoma fagi</i>	1

List	
Takson	Št. izolatov
<i>Apiognomonium errabunda</i>	379
<i>Aureobasidium pullulans</i>	299
<i>Didymosphaeria</i> sp.	114
<i>Petrakia liobae</i>	78
<i>Alternaria</i> sp.	50
<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	48
<i>Didymella macrostoma</i>	19
<i>Epicoccum layuense</i>	19
<i>Fusarium paeoniae</i>	19
<i>Diaporthe eres</i>	15
<i>Epicoccum mezzettii</i>	12
<i>Jackrogersella</i> sp.	9
<i>Cytospora hippophaicola</i>	9
<i>Biscognauxia nummularia</i>	8
<i>Phialocephala</i> sp.	7
<i>Phialemonium</i> sp.	5
<i>Mortierella</i> sp.	5
<i>Hypoxyton fragiforme</i>	4
<i>Parafenestella</i> sp.	4
<i>Cadophora spadicis</i>	3
<i>Botryosphaeria dothidea</i>	2
<i>Clonostachys</i> sp.	1
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	1
<i>Pezicula</i> sp.	1
<i>Neonectria coccinea</i>	1
<i>Mycetinis alliaceus</i>	1
<i>Nectria dematiosa</i>	1

1.7.2 Priloga 2. Identificirani taksoni gliv in njihova frekvenca pojavljanja glede na mesto izolacije

Zdrava skorja	
Takson	Št. izolatov
<i>Clypeosphaeria</i> sp.	1

Notranji del skorje		Zunanji del skorje	
Takson	Št. izolatov	Takson	Št. izolatov
<i>Neohendersonia kickxii</i>	343	<i>Cytospora hippophaicola</i>	74

<i>Neonectria coccinea</i>	297	<i>Neonectria coccinea</i>	49
<i>Phialemonium</i> sp.	80	<i>Pezicula</i> sp.	39
<i>Aureobasidium pullulans</i>	61	<i>Neocosmospora quercicola</i>	38
<i>Neonectria</i> sp.	60	<i>Clypeosphaeria</i> sp.	33
<i>Apiognomonina errabunda</i>	54	<i>Aureobasidium pullulans</i>	32
<i>Diatrypella</i> sp.	51	<i>Phialemonium</i> sp.	30
<i>Cytospora hippophaicola</i>	49	<i>Cadophora spadici</i>	27
<i>Phialocephala</i> sp.	29	<i>Parafenestella</i> sp.	24
<i>Parafenestella</i> sp.	28	<i>Trichoderma</i> sp.	21
<i>Pezicula</i> sp.	28	<i>Neonectria</i> sp.	18
<i>Mycetinis alliaceus</i>	27	<i>Mortierella</i> sp.	16
<i>Tolyposcladium</i> sp.	22	<i>Diaporthe eres</i>	16
<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	19	<i>Clonostachys</i> sp.	15
<i>Biscognauxia nummularia</i>	14	<i>Fusarium paeoniae</i>	15
<i>Neocosmospora quercicola</i>	14	<i>Neohendersonia kickxii</i>	15
<i>Mortierella</i> sp.	13	<i>Neocucurbitaria</i> sp.	14
<i>Clonostachys</i> sp.	13	<i>Apiognomonina errabunda</i>	14
<i>Neocucurbitaria</i> sp.	12	<i>Mycena</i> sp.	13
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	12	<i>Pezicula cinnamomea</i>	13
<i>Nectria dematiosa</i>	10	<i>Petrakia liobae</i>	12
<i>Epicoccum layuense</i>	10	<i>Nectria dematiosa</i>	10
<i>Beauveria</i> sp.	7	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	10
<i>Botryosphaeria dothidea</i>	6	<i>Coprinellus micaceus</i>	9
<i>Diaporthe eres</i>	6	<i>Botryosphaeria dothidea</i>	8
<i>Jackrogersella</i> sp.	5	<i>Beauveria</i> sp.	8
<i>Xylaria longipes</i>	3	<i>Cosmospora</i> sp.	7
<i>Cosmospora</i> sp.	3	<i>Hypoxyton fragiforme</i>	6
<i>Cadophora spadici</i>	3	<i>Xylaria longipes</i>	6
<i>Epicoccum mezzettii</i>	2	<i>Epicoccum layuense</i>	5
<i>Clypeosphaeria</i> sp.	2	<i>Alternaria</i> sp.	4
<i>Hypoxyton fragiforme</i>	2	<i>Biscognauxia nummularia</i>	3
<i>Lopadostoma fagi</i>	1	<i>Didymella macrostoma</i>	3
<i>Coniochaeta velutina</i>	1	<i>Coniochaeta velutina</i>	3
<i>Didymosphaeria</i> sp.	1	<i>Phialocephala</i> sp.	3
<i>Alternaria</i> sp.	1	<i>Tolyposcladium</i> sp.	2
		<i>Phaeoacremonium</i> sp.	2
		<i>Jackrogersella</i> sp.	1
		<i>Epicoccum mezzettii</i>	1

Obarvan les	
Takson	Št. izolatov
<i>Neonectria coccinea</i>	148
<i>Cadophora spadici</i>	113
<i>Neohendersonia kickxii</i>	107

<i>Jackrogersella</i> sp.	34
<i>Diatrypella</i> sp.	30
<i>Lopadostoma fagi</i>	27
<i>Phialocephala</i> sp.	26
<i>Neonectria</i> sp.	26
<i>Phialemonium</i> sp.	24
<i>Cosmospora</i> sp.	20
<i>Pezicula</i> sp.	18
<i>Neocosmospora quercicola</i>	17
<i>Hypoxylon fragiforme</i>	16
<i>Armillaria gallica</i>	15
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	15
<i>Tolypocladium</i> sp.	15
<i>Coprinellus micaceus</i>	15
<i>Biscognauxia nummularia</i>	14
<i>Xylaria longipes</i>	13
<i>Clonostachys</i> sp.	12
<i>Beauveria</i> sp.	8
<i>Cytospora hippophaicola</i>	8
<i>Neocucurbitaria</i> sp.	8
<i>Diaporthe eres</i>	7
<i>Coniochaeta velutina</i>	7
<i>Epicoccum layuense</i>	7
<i>Apiognomonium errabunda</i>	7
<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	6
<i>Clypeosphaeria</i> sp.	6
<i>Trichoderma</i> sp.	6
<i>Parafenestella</i> sp.	6
<i>Mycetinis alliaceus</i>	5
<i>Petrakia liobae</i>	4
<i>Botryosphaeria dothidea</i>	4
<i>Epicoccum mezzettii</i>	3
<i>Didymella macrostoma</i>	3
<i>Nectria dematiosa</i>	3
<i>Aureobasidium pullulans</i>	2
<i>Didymosphaeria</i> sp.	1
<i>Pezicula cinnamomea</i>	1

Poškodovan list		Zdrav list	
Takson	Št. izolatov	Takson	Št. izolatov
<i>Apiognomonium errabunda</i>	377	<i>Apiognomonium errabunda</i>	2
<i>Aureobasidium pullulans</i>	299	<i>Biscognauxia nummularia</i>	1
<i>Didymosphaeria</i> sp.	114	<i>Cytospora hippophaicola</i>	1
<i>Petrakia liobae</i>	78	<i>Jackrogersella</i> sp.	1

<i>Alternaria</i> sp.	50	<i>Phialocephala</i> sp.	1
<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>	48		
<i>Didymella macrostoma</i>	19		
<i>Epicoccum layuense</i>	19		
<i>Fusarium paeoniae</i>	19		
<i>Diaporthe eres</i>	15		
<i>Epicoccum mezzettii</i>	12		
<i>Cytospora hippophaicola</i>	8		
<i>Jackrogersella</i> sp.	8		
<i>Biscognauxia nummularia</i>	7		
<i>Phialocephala</i> sp.	6		
<i>Phialemonium</i> sp.	5		
<i>Mortierella</i> sp.	5		
<i>Hypoxylon fragiforme</i>	4		
<i>Parafenestella</i> sp.	4		
<i>Cadophora spadicis</i>	3		
<i>Botryosphaeria dothidea</i>	2		
<i>Clonostachys</i> sp.	1		
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	1		
<i>Pezicula</i> sp.	1		
<i>Nectria dematiosa</i>	1		
<i>Mycetinis alliaceus</i>	1		
<i>Neonectria coccinea</i>	1		

1.7.3 Priloga 3. Identificirani taksoni žuželk, njihova frekvenca pojavljanja glede na del drevesa in razred poškodovano/zdravo drevo

Razred	Del drevesa	Takson	Poškodovanost		Št. zap
			Avg	Max	
Poškodovano	Deblo	<i>Anisandrus dispar</i>	1	1	1
		<i>Calliteara pudibunda</i>	0	0	1
		<i>Cerambycidae</i>	0,5	1	2
		<i>Formicidae</i>	1	1	1
		<i>Furcula</i> sp.	0	0	1
		<i>Pentatoma rufipes</i>	0	0	2
		<i>Taphrorychus bicolor</i>	0,7	1	7
		<i>Xyleborus</i> sp.	1	1	1
		<i>Xyloterus domesticus</i>	0	0	1
	<i>Zeuzera pyrina</i>	0	0	1	
	Veja	<i>Agrilus</i> sp.	0,3	1	3
		<i>Anisandrus dispar</i>	1,7	5	3
		<i>Cerambycidae</i>	0,8	1	5
		<i>Formicidae</i>	0	0	4
		<i>Pentatoma</i> sp.	0	0	1
		<i>Scolytinae</i>	1	2	4
		<i>Sessidae</i>	0,5	1	2

		<i>Taphrorychus bicolor</i>	0	0	2	
		kobilica	1	1	1	
		<i>Xyleborus</i> sp.	10	10	1	
		<i>Zeuzera pyrina</i>	0	0	1	
Vejica		Formicidae	0	0	1	
		Scolytinae	1,7	3	3	
		<i>Aceria nervisequa</i>	0,2	1	9	
		<i>Aceria</i> sp.	0	0	1	
		<i>Aceria stenaspis</i>	0	0	1	
		<i>Apoda limacodes</i>	0	0	2	
		<i>Calliteara pudibunda</i>	0	0	1	
		<i>Caloptilia</i> sp.	0	0	1	
		Cerambycidae	0	0	1	
		<i>Chlorophorus figuratus</i>	0	0	1	
		Cicadellidae	1,4	5	5	
		<i>Cicadomorpha</i>	0	0	5	
		Cicindellidae	0	0	4	
		<i>Colocasia coryli</i>	0	0	1	
		Curculionidae	0	0	1	
		<i>Diurnea fagella</i>	0	0	1	
		Geometridae	0	0	4	
		<i>Hartigiola annulipes</i>	0,2	1	14	
		Heteroptera	0	0	1	
	<i>Incurvaria koeneriella</i>	1	1	3		
	listni zavijač	0	0	2		
	Lepidoptera	0	0	7		
List		<i>Mikiola fagi</i>	0,3	1	37	
		<i>Miramella irena</i>	0,5	1	2	
		Neuroptera	0	0	1	
		Noctuidae	0	0	1	
		<i>Operophtera brumata</i>	0	0	1	
		<i>Orchestes fagi</i>	1,6	10	37	
		<i>Orgyia antiqua</i>	0,5	1	2	
		<i>Parornix fagivora</i>	0,7	1	3	
		<i>Pentatoma rufipes</i>	1	1	1	
		Pentatomidae	0	0	1	
		<i>Phyllaphis fagi</i>	1,1	5	19	
		<i>Phyllonorycter maestingella</i>	0,5	1	23	
		<i>Phyllonorycter messaniella</i>	1	1	1	
		<i>Phyllonorycter</i> sp.	0	0	13	
		<i>Polydrosus cervinus</i>	0	0	2	
		<i>Polydrosus</i> sp.	0	0	1	
		<i>Psilocorsis cryptolechiella</i>	0	0	2	
		<i>Psilocorsis reflexella</i>	0,5	2	23	
		<i>Stigmella hemargyrella</i>	0,6	1	5	
		<i>Stigmella</i> sp.	0	0	3	
		<i>Stigmella tityrella</i>	0,2	1	6	
		Tortricidae	1	1	1	
	Zdravo	Deblo	<i>Aglia tau</i>	0	0	2
			<i>Anisandrus dispar</i>	1	1	1

	<i>Cercopoidea</i>	1	1	1
	<i>Cossidae</i>	0	0	1
	<i>Formicidae</i>	1	1	1
	<i>Membracidae</i>	1	1	1
	<i>Orgyia antiqua</i>	0	0	1
	<i>Pentatoma rufipes</i>	0,5	1	4
	<i>Sternorrhyncha</i>	0	0	1
	<i>Taphrorychus bicolor</i>	1,3	5	7
	<i>Xyloterus domesticus</i>	0	0	1
	<i>Zeuzera pyrina</i>	0	0	1
	<i>Anisandrus dispar</i>	5	10	2
	<i>Buprestidae</i>	0	0	1
	<i>Cerambycidae</i>	0,7	1	3
	<i>Cercopoidea</i>	1	1	1
	<i>Chrysobothris</i> sp.	0	0	1
	<i>Cicindellidae</i>	0	0	1
	<i>Elateridae</i>	1	1	1
	<i>Ernoporicus fagi</i>	0	0	1
	<i>Formicidae</i>	0	0	3
	<i>Hartigiola annulipes</i>	0	0	1
Veja	<i>Lepidoptera</i>	0	0	2
	<i>Lithosia quadra</i>	0	0	1
	<i>Lymantria dispar</i>	0	0	1
	<i>Mikiola fagi</i>	0	0	1
	<i>Orchestes fagi</i>	0	0	1
	<i>Pentatoma rufipes</i>	1	1	1
	<i>Phyllaphis fagi</i>	0	0	1
	<i>Phyllonorycter</i> sp.	0	0	1
	<i>Scolytinae</i>	0	0	2
	<i>Taphrorychus bicolor</i>	0	0	1
	<i>Xyleborus</i> sp.	0,5	1	2
Vejica	<i>Formicidae</i>	0	0	1
	<i>Scolytinae</i>	0	0	2
	<i>Acalitus stenaspis</i>	0	0	1
	<i>Aceria nervisequa</i>	0,1	1	8
	<i>Aceria stenaspis</i>	0	0	2
	<i>Apoda limacodes</i>	0	0	3
	<i>Chrysomellidae</i>	1	1	1
	<i>Cicadellidae</i>	0,4	1	5
	<i>Cicadomorpha</i>	0	0	4
	<i>Cicindellidae</i>	0	0	5
List	<i>Curculionidae</i>	0	0	1
	<i>Diurnea</i> sp.	0	0	1
	<i>Geometridae</i>	0	0	1
	<i>Hartigiola annulipes</i>	0,3	1	15
	<i>Heteroptera</i>	0	0	1
	<i>Incurvaria koeneriella</i>	0,8	1	5
	<i>Lepidoptera</i>	0	0	10
	<i>Meconema thalassinum</i>	0	0	1
	<i>Mikiola fagi</i>	0,3	3	38

<i>Neuroptera</i>	0	0	1
<i>Orchestes fagi</i>	0,9	10	33
<i>Orgyia antiqua</i>	0	0	2
<i>Orthoptera</i>	0	0	1
<i>Parornix fagivora</i>	0,5	1	4
<i>Pentatoma rufipes</i>	0,5	1	2
<i>Phyllaphis fagi</i>	0,5	2	20
<i>Phyllonorycter maestingella</i>	0,4	2	19
<i>Phyllonorycter messaniella</i>	1	1	2
<i>Phyllonorycter</i> sp.	0	0	10
<i>Polydrosus cervinus</i>	0	0	2
<i>Polydrosus</i> sp.	0	0	1
<i>Pseudoips prasinana</i>	0	0	1
<i>Psilocorsis cryptolechiella</i>	0	0	3
<i>Psilocorsis reflexella</i>	0,5	3	18
<i>Stigmella hemargyrella</i>	0,3	1	7
<i>Stigmella</i> sp.	0	0	1
<i>Stigmella tityrella</i>	0,4	1	5
kobilica	1	1	1

1.8 Viri

- Brück-Dyckhoff C., Petercord R., Schopf R. 2019. Vitality loss of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and infestation by the European beech splendour beetle (*Agrilus viridis* L., Buprestidae, Coleoptera). *Forest Ecology and Management*, 432: 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.001>
- Chakraborty T., Reif A., Matzarakis A., Saha S. 2021. How Does Radial Growth of Water-Stressed Populations of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Trees Vary under Multiple Drought Events? *Forests*, 12, 2: 129. <https://doi.org/10.3390/f12020129>
- Clarke K.R. 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18, 1: 117-143. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>
- Corcobado T., Cech T.L., Brandstetter M., Daxer A., Hüttler C., Kudláček T., Horta Jung M., Jung T. 2020. Decline of European Beech in Austria: Involvement of Phytophthora spp. and Contributing Biotic and Abiotic Factors. *Forests*, 11, 8: 895
- Danti R., Sieber T.N., Sanguineti G. 2002. Endophytic mycobiota in bark of European beech (*Fagus sylvatica*) in the Apennines. *Mycological Research*, 106, 11: 1343-1348. <https://doi.org/10.1017/S0953756202006779>
- Eichhorn J., Roskams P., Potočić N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletković I., Schroeck H.W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wulff S. 2016. Part IV: Visual assessment of crown condition and damaging agents. V: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Centre U.I.F.P.C. (ed.). Eberswalde, Germany, Thünen Institute of Forest Ecosystems: 49 <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>
- EPPO. 2006. Diagnostic Standard PM 7/66 (1). Diagnostic protocols for regulated pests: *Phytophthora ramorum*. EPPO Bulletin, 36: 145-155

- EPPO. 2021. PM 7/129 (2) DNA barcoding as an identification tool for a number of regulated pests. EPPO Bulletin, 51, 1: 100-143. <https://doi.org/10.1111/epp.12724>
- Granata G., Sidoti A. 2004. *Biscogniauxia nummularia*: pathogenic agent of a beech decline. Forest Pathology, 34, 6: 363-367. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0329.2004.00377.x>
- Jankowiak R., Stępniewska H., Bilański P., Taerum S.J. *Phytophthora* species cause sudden and severe decline of naturally regenerated European beech (*Fagus sylvatica*) seedlings. Plant Pathology, 72, 4: 774-785. <https://doi.org/10.1111/ppa.13698>
- Jung T. 2009. Beech decline in Central Europe driven by the interaction between *Phytophthora* infections and climatic extremes. Forest Pathology, 39, 2: 73-94
- Jung T., Orlikowski L., Henricot B., Abad-Campos P., Aday A.G., Aguín Casal O., Bakonyi J., Cacciola S.O., Cech T., Chavarriaga D., Corcobado T., Cravador A., Decourcelle T., Denton G., Diamandis S., Doğmuş-Lehtijärvi H.T., Franceschini A., Ginetti B., Green S., Glavendekić M., Hantula J., Hartmann G., Herrero M., Ivic D., Horta Jung M., Lilja A., Keca N., Kramarets V., Lyubenova A., Machado H., Magnano di San Lio G., Mansilla Vázquez P.J., Marçais B., Matsiakh I., Milenkovic I., Moricca S., Nagy Z.Á., Nechwatal J., Olsson C., Oszako T., Pane A., Paplomatas E.J., Pintos Varela C., Prospero S., Rial Martínez C., Rigling D., Robin C., Rytönen A., Sánchez M.E., Sanz Ros A.V., Scanu B., Schlenzig A., Schumacher J., Slavov S., Solla A., Sousa E., Stenlid J., Talgø V., Tomic Z., Tsopeles P., Vannini A., Vettraino A.M., Weneker M., Woodward S., Pérez-Sierra A. 2015. Widespread *Phytophthora* infestations in European nurseries put forest, semi-natural and horticultural ecosystems at high risk of *Phytophthora* diseases. Forest Pathology, 46: 134-463. 10.1111/efp.12239
- Jurc D. 1999. Bolezni in sušenje hrastov v Evropi in pri nas. V: Raziskave nižinskih hrastovih gozdov: III. delavnica Javne gozdarske službe z mednarodno udeležbo: Murska Sobota, 12.-13. oktober 1999. Smolej I., Grecs Z. (eds.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 37-40
- Jurc D., Jurc M. 2014. Popis povzročiteljev poškodb drevja. V: Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov: Priročnik za terensko snemanje podatkov. Kovač M. (ed.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 143-177
- Jurc M. 2012. Fitofagna entomofavna bukovih gozdov Slovenije. V: Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje. Bončina A. (ed.). Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani: 141-165
- Kavčič A. 2022. Močan napad bukovega rilčkarja skakača v Sloveniji v 2022. Novice iz varstva gozdov, 15: 6-7. <http://dx.doi.org/10.20315/NVG.15.2>
- Kovač M. (ed.) 2014. Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov: Priročnik za terensko snemanje podatkov. Studia Forestalia Slovenica. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 228 str.
- Kroon L.P.N.M., Bakker F.T., van den Bosch G.B.M., Bonants P.J.M., Flier W.G. 2004. Phylogenetic analysis of *Phytophthora* species based on mitochondrial and nuclear DNA sequences. Fungal Genetics and Biology, 41, 8: 766-782. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2004.03.007>
- Lakatos F., Molnár M. 2009. Mass mortality of beech (*Fagus sylvatica* L.) in South-West Hungary. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 5: 75-82

- Langer G.J., Bußkamp J. 2023. Vitality loss of beech: a serious threat to *Fagus sylvatica* in Germany in the context of global warming. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 130: 1101-1115. [10.1007/s41348-023-00743-7](https://doi.org/10.1007/s41348-023-00743-7)
- Magurran A.E. 2004. *Measuring Biological Diversity*. Oxford, Blackwell Publishing: 256 str.
- Manion P.D. 1981. *Tree disease concepts*. Englewood Cliffs, Prentice-hall: 399 str.
- Ogris N., Skudnik M. 2021. V Sloveniji se povečuje osutost bukove krošnje. *Gozdarski vestnik*, 79, 5-6: 226-237
- Ogris N., Skudnik M. 2022. Poročilo o popisu povzročiteljev poškodb drevja. V: Poročilo o spremljanju stanja gozdov za leto 2021. Planinšek Š., Žlindra D. (eds.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 13-17
- Oksanen J., Simpson G., Blanchet F., Kindt R., Legendre P., Minchin P., O'Hara R., Solymos P., Stevens M., Szoecs E., Wagner H., Barbour M., Bedward M., Bolker B., Borcard D., Carvalho G., Chirico M., De Caceres M., Durand S., Evangelista H., FitzJohn R., Friendly M., Furneaux B., Hannigan G., Hill M., Lahti L., McGlenn D., Ouellette M., Ribeiro Cunha E., Smith T., Stier A., Ter Braak C., Weedon J. 2022. *vegan: Community Ecology Package*, R package version 2.6-4. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (12. 12. 2022)
- Robideau G.P., De Cock A.W.A.M., Coffey M.D., Voglmayr H., Brouwer H., Bala K., Chitty D.W., Désaulniers N., Eggertson Q.A., Gachon C.M.M., Hu C.-H., Küpper F.C., Rintoul T.L., Sarhan E., Verstappen E.C.P., Zhang Y., Bonants P.J.M., Ristaino J.B., André Lévesque C. 2011. DNA barcoding of oomycetes with cytochrome c oxidase subunit I and internal transcribed spacer. *Molecular Ecology Resources*, 11, 6: 1002-1011. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2011.03041.x>
- Rohner B., Kumar S., Liechti K., Gessler A., Ferretti M. 2021. Tree vitality indicators revealed a rapid response of beech forests to the 2018 drought. *Ecological Indicators*, 120: 106903. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106903>
- Sieber T.N. 2007. Endophytic fungi in forest trees: Are they mutualists? *Fungal Biology Reviews*, 21, 2: 75–89. [10.1016/j.fbr.2007.05.004](https://doi.org/10.1016/j.fbr.2007.05.004)
- Signorell A., Aho K., Alfons A., Anderegg N., Aragon T., Arachchige C., Arppe A., Baddeley A., Barton K., Bolker B., Borchers H.W., Caeiro F., Champely S., Chessel D., Chhay L., Cooper N., Cummins C., Dewey M., Doran H.C., Dray S., Dupont C., Edelbuettel D., Ekstrom C., Elff M., Enos J., Farebrother R.W., Fox J., Francois R., Friendly M., Galili T., Gamer M., Gastwirth J.L., Gegzna V., Gel Y.R., Graber S., Gross J., Grothendieck G., Jr F.E.H., Heiberger R., Hoehle M., Hoffmann C.W., Hojsgaard S., Hothorn T., Huerzeler M., Hui W.W., Hurd P., Hyndman R.J., Jackson C., Kohl M., Korpela M., Kuhn M., Labes D., Leisch F., Lemon J., Li D., Maechler M., Magnusson A., Mainwaring B., Malter D., Marsaglia G., Marsaglia J., Matei A., Meyer D., Miao W., Millo G., Min Y., Mitchell D., Mueller F., Naepflin M., Navarro D., Nilsson H., Nordhausen K., Ogle D., Ooi H., Parsons N., Pavoine S., Plate T., Prendergast L., Rapold R., Revelle W., Rinker T., Ripley B.D., Rodriguez C., Russell N., Sabbe N., Scherer R., Seshan V.E., Smithson M., Snow G., Soetaert K., Stahel W.A., Stephenson A., Stevenson M., Stubner R., Templ M., Lang D.T., Therneau T., Tille Y., Torgo L., Trapletti A., Ulrich J., Ushey K., VanDerWal J., Venables B., Verzani J., Iglesias P.J.V., Warnes G.R., Wellek S., Wickham H., Wilcox R.R., Wolf P., Wollschlaeger D., Wood J., Wu Y., Yee T., Zeileis A. 2022. *DescTools: Tools for descriptive statistics*. R package version 0.99.45. URL: <https://cran.r-project.org/package=DescTools>.

- Team R.C. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Vettraino A.M., Jung T., Vannini A. 2008. First report of *Phytophthora cactorum* associated with beech decline in Italy. *Plant Disease*, 92, 12: 1708
- Werres S., Marwitz R., Man In't veld W.A., De Cock A.W.A.M., Bonants P.J.M., De Weerd M., Themann K., Ilieva E., Baayen R.P. 2001. *Phytophthora ramorum* sp. nov., a new pathogen on *Rhododendron* and *Viburnum*. *Mycological Research*, 105, 10: 1155-1165. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(08\)61986-3](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(08)61986-3)
- White T.J., Bruns T., Lee S., Taylor J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetic. V: *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications*. Innis M.A., Gelfand D.H., Sninsky J.J., White T.J. (eds.). San Diego, CA, USA, Academic Press: 315–322

2 Vpliv suše na hiranje bukve (Aktivnost 3.1)

Nikica Ogris

2.1 Uvod

Stanje gozdov spremljamo vsako leto na sistematični mreži 16 × 16 km, tj. na 44 traktih.

Poškodovanost dreves se ocenjuje na M6 ploskvah. Vsak trakt ima štiri M6 ploskev. Na vsaki M6 ploskvi je 6 dreves (M6 = metoda 6 dreves). Tako se na vsakem traktu oceni osutost in poškodovanost 24 dreves, na ravni države skupaj 1.056 dreves.

Osutost drevesnih krošenj je eden izmed ključnih mednarodno uveljavljenih kazalnikov za ocenjevanje življenjske moči dreves oz. njihove vitalnosti. Kazalnik so razvili znotraj delovne skupine International Cooperative Programme of Forests (ICP Forest) in je mednarodno primerljiv ter ga kot pokazatelja za ohranjanje zdravja in vitalnosti gozdnih ekosistemov navajajo številna mednarodna (Europe, 2020; OECD, 2021) in tudi domača poročila (MKGP, 2016; Skudnik in Planinšek, 2020). V Sloveniji spremljamo vitalnost gozdnih ekosistemov od leta 1986 in leta 2000 je bilo spremljanje sistemsko urejeno s Pravilnikom o varstvu gozdov (RS, 2009).

Osutost je okularno ocenjen delež (%) manjkajočih asimilacijskih organov (listov, iglic) v primerjavi z namišljenim normalnim drevesom istega socialnega položaja, iste drevesne vrste in z enakega rastišča. Ocenjuje se na 5 % natančno (Kovač, 2014).

Povprečna osutost bukove krošnje od leta 1993 do 2020 povečala iz 13,9 % na 32,2 %. Dolgoročen linearen trend je pokazal, da se je povprečna osutost bukove krošnje povečala za 0,63 % na leto. Za trend povprečne osutosti bukve je bilo prelomno izjemno sušno leto 2003, ko se je trend osutosti povečal iz 0,61 % na 0,94 % na leto (Ogris in Skudnik, 2021).

Cilj aktivnosti 3.1 je bil: (1) ugotoviti vpliv suše na zdravstveno stanje navadne bukve (*Fagus sylvatica*) na podlagi obstoječih meteoroloških podatkov in podatkov iz stalnih vzorčnih ploskev Gozdarskega inštituta Slovenije; (2) napovedati osutost navadne bukve v Sloveniji zaradi vpliva suše do leta 2100 glede na tri scenarije podnebnih sprememb. Iskali smo korelacijo med različnimi kazalniki sušnega stresa in osutostjo krošnje navadne bukve. Razvili smo več modelov in naredili napoved osutosti krošnje bukve za različne scenarije podnebnih sprememb z najboljšim modelom.

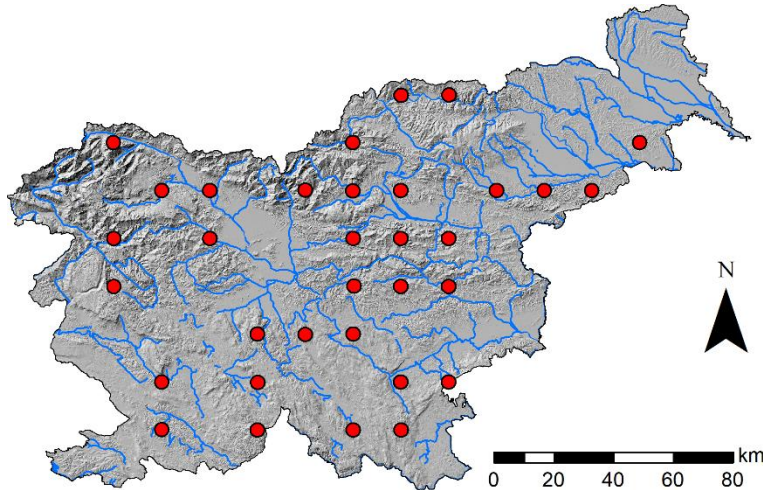
2.2 Metode

2.2.1 Osutost bukove krošnje

Uporabili smo podatkovno zbirko Popisa razvrednotenja in poškodovanosti gozdov v Sloveniji, ki jo vzdržuje Gozdarski inštitut Slovenije. Podatke o osutosti zbiramo letno na sistematični vzorčni mreži traktov (16 × 16 km; Nivo I ploskve), ki so sestavljeni iz štirih ploskev M6 (metoda šestih najbližjih dreves), kjer vsakemu drevesu na podlagi kazalnika osutosti in popisa poškodb ocenimo vitalnost (Kovač in sod., 2014). Na sistematičen in primerljiv način podatke zbiramo od leta 1991. Podatki, uporabljeni v analizi, se nanašajo na obdobje 1993–2021 (GIS, 2022). Statistični koncept popisa temelji na naključnem sistematičnem vzorčenju v grozdih (angl. cluster sampling), kjer je vsak grozd sestavljen iz štirih ploskev po šest dreves. Drevesa ostajajo v vzorcu, dokler ne odmrejo ali pa jih posekamo. V takem primeru jih nadomestimo z novimi. Postopek ocenjevanja osutosti tako poteka v dveh delovnih fazah. V prvi v skladu s protokolom statističnega izbora določimo vzorčna drevesa, v drugi pa se vsakemu izbranemu drevesu ocenimo osutost vsako leto od junija do avgusta. Da je kazalnik osutosti mednarodno primerljiv, vsako drugo leto poteka vseevropsko umerjanje terenskih popisovalcev na primeru okoli 200 fotografij dreves. Pri vseh sodelujočih državah je metodologija enotna in tako med seboj primerljiva.

Upoštevali smo samo drevesa, ki so bila nadvladujoča, vladujoča in sovladujoča, tj. drevesa, ki tvorijo streho gozdnega sestoja in zato tekmovanje ali zasenčenost bistveno nista vplivala na oceno osutosti.

V obdobju 1993–2021 se je bukev pojavljala na 21 do 31 traktih od skupaj 44-ih, skupaj na 33 različnih traktih (Slika 9). Med leti se je število dreves v vzorcu spreminjalo, in sicer se je gibalo od 271 do 394, povprečno 338 na leto. Skupno število dreves, ki jim vsako leto ocenimo osutost, je 1.056. Zaradi prej navedenega pogoja o socialnem položaju dreves je bilo v končno analizo vključenih manj dreves bukve, in sicer od 195 do 357, povprečno 295 dreves bukve na leto.



Slika 9. Razporeditev traktov na sistematični mreži 16 × 16 km, kjer se je pojavljala bukev na M6 ploskvah 1993–2021

Čeprav popis razvrednotenja in poškodovanosti gozdov poteka na sistematičen in primerljiv način že od leta 1991, smo v analizo vključili samo podatke od leta 1993 naprej, ker je bila v letu 1991 osutost bukve popisana na značilno manjšem vzorcu (133), leta 1992 pa je potekala nacionalna inventura na sistematični mreži 4 × 4 km.

2.2.2 Meteorološki kazalniki suše

Za kazalnike suše smo izbrali: vodni primanjkljaj, standardizirani padavinski indeks (SPI) in standardizirani padavinsko-evapotranspiracijski indeks (SPEI).

Vodni primanjkljaj je opredeljen kot razlika med 60-dnevno drsečo referenčno evapotranspiracijo in višino padavin v tem obdobju (Bertalanich in sod., 2018). Vodni primanjkljaj običajno uporabljamo za negativno meteorološko oziroma površinsko vodno bilanco, torej takrat, ko je referenčna evapotranspiracija večja od višine padavin v nekem obdobju. Vodna bilanca (oziroma v sušnih obdobjih vodni primanjkljaj) je koristen kazalnik, s katerim na dokaj enostaven način, pa vendar objektivno, določamo trajanje in intenzivnost suhega obdobja in je primerna osnova za prvo oceno pojava kmetijske suše.

Standardizirani padavinski indeks (SPI- n) je statistični indikator, ki primerja skupno količino padavin, prejetih na določeni lokaciji v obdobju n mesecev, z dolgoročno porazdelitvijo padavin za isto časovno obdobje na tej lokaciji. SPI se izračuna na mesečni osnovi za premikajoče se okno n mesecev, kjer n označuje obdobje vsote padavin, ki je običajno 1, 3, 6, 9, 12, 24 ali 48 mesecev. Ustrezni SPI so označeni kot SPI-1, SPI-3, SPI-6 itd. Da bi omogočili statistično primerjavo bolj vlažnih in bolj suhih podnebij, SPI temelji na transformaciji akumuliranih padavin v standardizirano/normalno spremenljivko s povprečjem nič in varianco enako ena. Rezultati SPI so podani v enotah standardnega odklona od dolgoročne sredine standardizirane porazdelitve. V našem primeru smo za referenčno obdobje izbrali obdobje 1981–2010. Za parameter n smo vzeli tri vrednosti: 1, 3 in 6 mesecev. SPI smo

izračunali za obdobje 1981–2100 s pomočjo knjižnice SPEI (Beguería in Vicente-Serrano, 2017; Vicente-Serrano in sod., 2010) v statističnem programu R (R Core Team, 2022). Mesečno količino padavin smo črpali iz podatkovne zbirke OPS21 (Bertalanič in sod., 2018). Podatki so bili v rasterskem formatu netCDF. Za branje tega formata smo uporabili knjižnico "ncdf4" (Pierce, 2021).

SPEI uporablja mesečno razliko med padavinami in potencialno evapotranspiracijo. To predstavlja preprosto vodno bilanco, ki se izračuna v različnih časovnih skalah. Postopek izračuna SPEI je identičen izračunu SPI; razlika je le v vhodnih podatkih: SPI uporablja mesečne padavine, SPEI pa mesečno razliko med padavinami in potencialno evapotranspiracijo.

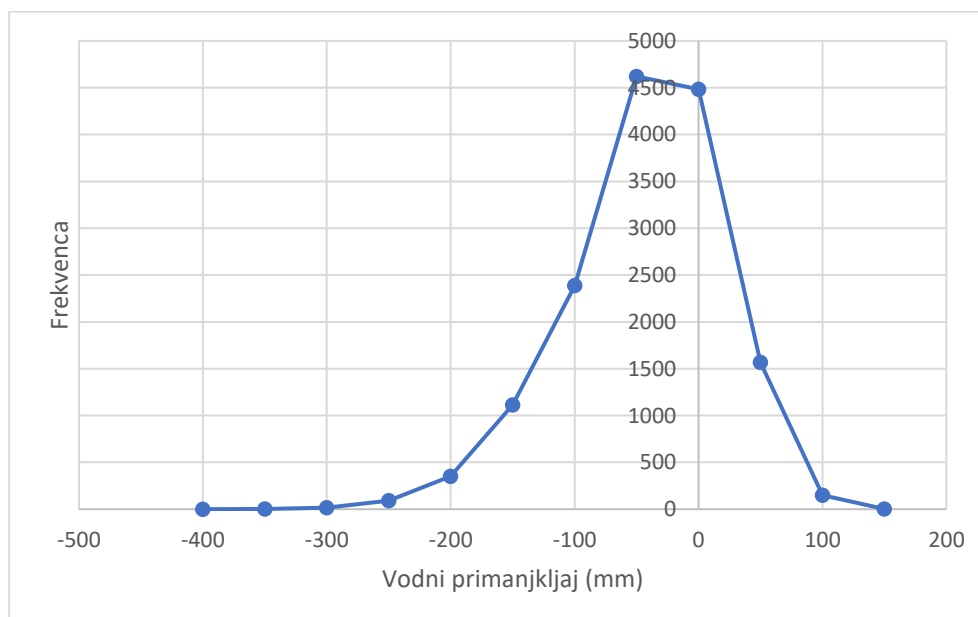
Ker so vrednosti SPI in SPEI podane v enotah standardnega odklona od standardiziranega povprečja, negativne vrednosti ustrezajo bolj sušnim obdobjem kot običajno, pozitivne vrednosti pa ustrezajo bolj vlažnim obdobjem kot običajno. Po klasifikaciji McKee in sod. (1993) vrednosti SPI izražajo naslednje stopnje sušnega stresa:

- $-1,0 < \text{SPI} \leq +1,0$: območje normalnosti
- $-1,5 < \text{SPI} \leq -1,0$: srednje suho
- $-2,0 < \text{SPI} \leq -1,5$: zelo suho
- $\text{SPI} \leq -2,0$: izjemno suho

SPEI-3 in SPEI-6 vrednosti 1981–2100 smo pridobili iz projekta "Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja" (Bertalanič in sod., 2018). Vrednosti smo iz rastrov prebrali s pomočjo knjižnice "raster" (Hijmans, 2022).

Preskusili smo različne kombinacije kazalnikov suše v smislu različnih obravnavanj, kot so povprečje, kumulativna vsota, število dogodkov z različnimi mejnimi pragovi in izračun samo za vegetacijsko obdobje. Na takšen način smo pridobili 241 spremenljivk na osnovi vodnega primanjkljaja, SPI in SPEI. Celoten seznam meteoroloških kazalnikov suše, ki smo jih preskusili, je na voljo v Prilogi 1.

Pri izbiri pragov vodnega primanjkljaja smo upoštevali frekvenčno porazdelitev (**Slika 10**).



Slika 10. Histogram vodnega primanjkljaja za 33 traktov v obdobju 1990–2021

2.2.3 Tla

V analizo smo vključili sedem talnih spremenljivk, ki lahko imajo velik potencialni vpliv na nastanek sušnega stresa pri rastlinah (**Preglednica 14**).

Preglednica 14. Talne spremenljivke

Spremenljivka	Opis	Vir
LITOL	vrsta matične kamnine oz. sedimenta (po šifrantu litološke karte)	Novak in sod. (2014)
FC	vodna kapaciteta tal [cm/cm]	podatki iz PEDKRS (1999);
BR15	točka venenja [pri 1500 kPa cm/cm]	izračun po (Knisel in Davis, 2000; Ogris, 2007)
GLOBINA	povprečna globina tal [cm]	PEDKRS (1999)
MAT_PODLAGA	matična podlaga (po šifrantu ZGS), ki je površinsko najobsežnejša v celici modela	ZGS (2021)
HWSD_DRAINAGE	prepustnost tal [razred]	FAO in sod. (2009)
HWSD_AWC	Razpoložljiva vodna kapaciteta tal [razred]	

2.2.4 Razvoj modelov

Za razvoj modelov smo uporabili posplošene linearne mešane modele (GLMM) s knjižnico "lme4" (Bates in sod., 2015).

Odvisna spremenljivka je bila povprečna ocenjena osutost dreves bukve v določenem letu na določenem traktu.

Trakt in leto smo vključili v model kot naključen učinek (ang. random effect).

Neodvisne spremenljivke smo vključili tako posamezno, kot v kombinaciji interakcij med njimi, vse do tretjega nivoja.

Ker so bili izvorni meteorološki podatki izračunani za različne globalne modele splošne cirkulacije (GCM), regionalne modele (RCM) in scenarije izpustov toplogrednih plinov (RCP) (**Preglednica 15**), smo razvili več modelov za vsako kombinacijo GCM-RCM in RCP.

Preglednica 15. Seznam simulacij, katerih izračune smo uporabili v analizi. Podana so imena globalnega (GCM) in regionalnega (RCM) modela. Če smo simulacijo za določeni scenarij RCP uporabili pri analizi, je v ustreznem polju križec (Bertalanich in sod., 2018).

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5-LR	CCLM4-8-17		x	x
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17		x	x
EC-EARTH	HIRHAM5	x	x	x
IPSL-CM5A-MR	WRF331F		x	x
HadGEM2-ES	RACMO22E	x	x	x
MPI-ESM-LR	RCA4		x	x

2.2.5 Validacija modelov

Učinkovitost modelov smo preverjali z naslednjimi kazalniki: REML (ang. restricted maximum likelihood), AIC (ang. Akaike information criterion), MAE (srednja absolutna napaka), RMSE (koren srednje kvadratne napake).

2.2.6 Napoved osutost krošnje navadne buke v Sloveniji zaradi vpliva suše do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb

Izbrali smo najboljše modele in na njihovi osnovi napovedali osutost navadne buke v Sloveniji zaradi vpliva suše do leta 2100 glede na tri scenarije RCP in šest GCM (**Preglednica 15**).

2.3 Rezultati in razprava

2.3.1 Modeli

Najboljša skupina modelov je bila na osnovi vodnega primanjkljaja, ki so imeli v povprečju najmanjši REML in AIC. Ostale skupine modelov na osnovi SPI in SPEI so imele podobno učinkovitost; med njimi je bila najboljša skupina na osnovi SPI-1 (**Preglednica 16**).

Preglednica 16. Kakovost modelov glede na skupino meteorološkega kazalnika suše

Skupina	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
DEFICIT	5.829,7	49,9	5.837,8	52,4	5,38	0,08	7,54	0,13	490
SPI-1	5.841,8	19,8	5.855,1	21,0	5,41	0,04	7,59	0,06	480
SPEI-3	5.843,3	22,1	5.856,9	22,9	5,41	0,03	7,59	0,08	480
SPI-3	5.844,4	18,5	5.857,6	19,3	5,41	0,03	7,59	0,06	480
SPEI-6	5.845,6	13,8	5.858,9	14,5	5,41	0,03	7,59	0,06	480
SPI-6	5.846,5	13,4	5.859,5	14,1	5,41	0,03	7,60	0,06	480
DEFICITO	5.847,7	10,5	5.856,1	11,7	5,36	0,07	7,52	0,11	84

Glede na število vključenih interakcij v model, so se bolje odrezali modeli z višjim številom interakcij med spremenljivkami (**Preglednica 17**).

Preglednica 17. Kakovost modelov glede na število vključenih interakcij

Št. interakcij	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
3	5.789,6	59,9	5.856,0	42,2	5,35	0,10	7,50	0,14	123.908
2	5.812,9	48,5	5.853,6	36,8	5,37	0,08	7,54	0,11	20.818
1	5.842,0	26,5	5.854,3	28,1	5,41	0,05	7,58	0,08	2.974

Če upoštevamo interakcije med spremenljivkami, so bili najboljši modeli, ki so vključevali interakcijo med vodnim primanjkljajem s pragom pod -200 mm skupaj kumulativno do tekočega leta (število dogodkov) in talnimi spremenljivkami, tj. matično podlago in razpoložljivo vodno kapaciteto tal (**Preglednica 18**).

Modele smo razvili samo za 33 traktov. Zato kategorične talne spremenljivke niso pokrile vseh možnih vrednosti, kjer se lahko bukev pojavlja. Zato so modeli, ki vključujejo kategorične spremenljivke, uporabni samo za napovedovanje na nivoju trakta in jih ni mogoče uporabiti za ekstrapolacijo na območje cele Slovenije. Spremenljivki FC in BR15 temeljita na tabelarnih vrednostih (Knisel in Davis, 2000), zato sta verjetno precej nezanesljivi.

Preglednica 18. Kakovost modelov glede na interakcijo med spremenljivkami. Prikazanih je 10 najboljših modelov.

Interakcija	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
DEFICIT_ST200_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × HWSD_AWC	5.558,2	17,1	5.647,2	20,9	4,72	0,04	6,67	0,04	14
DEFICIT_ST200_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × LITOL	5.577,0	19,9	5.664,7	23,4	4,89	0,05	6,84	0,06	14
DEFICIT_ST150_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × HWSD_AWC	5.578,2	12,7	5.647,0	13,2	4,81	0,05	6,74	0,05	14
SPI1_AVG_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × HWSD_AWC	5.596,5	42,1	5.812,9	48,5	5,15	0,09	7,25	0,13	12
SPI1_AVG_KUM × TLA_BR15 × TLA_MAT_POPLAGA	5.597,6	46,8	5.810,8	52,0	5,17	0,10	7,26	0,16	12
DEFICIT_ST200_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × HWSD_AWC	5.558,2	17,1	5.647,2	20,9	4,72	0,04	6,67	0,04	14
DEFICIT_ST200_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × TLA_FC	5.597,8	21,0	5.692,3	24,1	4,94	0,04	6,86	0,06	14
SPI1_AVG_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × LITOL	5.599,0	39,4	5.816,7	46,3	5,14	0,10	7,26	0,12	12
SPI1_AVG_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × HWSD_DRAINAGE	5.600,2	40,2	5.819,0	46,2	5,16	0,09	7,27	0,13	12
DEFICIT_ST150_KUM × TLA_MAT_POPLAGA × HWSD_DRAINAGE	5.601,9	11,3	5.673,5	12,5	4,90	0,02	6,89	0,04	14

Pri modelih z eno neodvisno spremenljivko je povprečno osutost krošnje bukve najboljše pojasnjevalo kumulativno število dogodkov vodnega primanjkljaja pod pragom –150, –100 in –200 mm (**Preglednica 19**). Prednost modelov, ki vključujejo samo eno spremenljivko, tj. meteorološki kazalnik suše, je možnost aplikacije na območje celotne Slovenije.

Preglednica 19. Kakovost modelov z eno pojasnjevalno spremenljivko, tj. meteorološkim kazalnikom suše. Prikazanih je 10 najboljših modelov.

Interakcija	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
DEFICIT_ST150_KUM	5.707,1	10,1	5.712,5	10,3	5,17	0,02	7,20	0,03	14
DEFICIT_ST100_KUM	5.708,9	5,7	5.713,4	5,9	5,17	0,02	7,24	0,03	14
DEFICIT_ST200_KUM	5.715,9	15,0	5.722,2	15,3	5,19	0,03	7,18	0,03	14
DEFICIT_KUM	5.721,8	9,0	5.715,6	9,3	5,15	0,02	7,18	0,02	14
DEFICIT_ST50_KUM	5.734,6	6,5	5.738,5	6,5	5,24	0,03	7,36	0,04	14
DEFICIT_ST0_KUM	5.763,7	5,3	5.767,0	5,2	5,32	0,02	7,50	0,03	14
DEFICIT_ST50P_KUM	5.785,0	4,2	5.788,1	4,2	5,38	0,01	7,60	0,02	14
SPI1_VEG_1_ST_KUM	5.792,6	28,6	5.800,7	29,5	5,41	0,07	7,62	0,14	12
SPI1_1_ST_KUM	5.798,6	25,5	5.805,1	25,7	5,43	0,05	7,69	0,09	12
SPI1_2_ST_KUM	5.800,8	38,2	5.810,4	38,8	5,45	0,10	7,66	0,16	12

V povprečju je bila korelacija med povprečno letno osutostjo bukove krošnje po traktih in meteorološkimi kazalniki suše pozitivna, razen za kumulativno vsoto vodnega primanjkljaja, ki je bila negativna (**Preglednica 20**). Vendar korelacija ni bila statistično značilna.

Preglednica 20. Povprečni regresijski koeficienti za 10 najboljših modelov z eno spremenljivko

Spremenljivka	d	Koeficient	Standardna napaka	t vrednost	Št. modelov
DEFICIT_ST150_KUM	konstanta	11,454	1,391	8,245	14
	spremenljivka	0,209	0,012	17,379	14
DEFICIT_ST100_KUM	konstanta	9,730	1,359	7,173	14
	spremenljivka	0,148	0,008	17,525	14
DEFICIT_ST200_KUM	konstanta	13,427	1,423	9,440	14
	spremenljivka	0,284	0,019	15,553	14
DEFICIT_KUM	konstanta	11,895	1,417	8,402	14
	spremenljivka	-0,001	0,000	-16,517	14
DEFICIT_ST50_KUM	konstanta	8,950	1,372	6,533	14
	spremenljivka	0,103	0,006	16,463	14
DEFICIT_ST0_KUM	konstanta	8,984	1,413	6,363	14
	spremenljivka	0,076	0,005	15,550	14
DEFICIT_ST50P_KUM	konstanta	9,425	1,443	6,534	14
	spremenljivka	0,062	0,004	15,042	14
SPI1_VEG_1_ST_KUM	konstanta	13,594	1,660	7,950	14
	spremenljivka	0,501	0,053	13,684	12
SPI1_1_ST_KUM	konstanta	11,682	1,508	7,730	14
	spremenljivka	0,328	0,023	14,910	12
SPI1_2_ST_KUM	konstanta	14,892	1,541	9,607	14
	spremenljivka	1,024	0,099	13,026	12

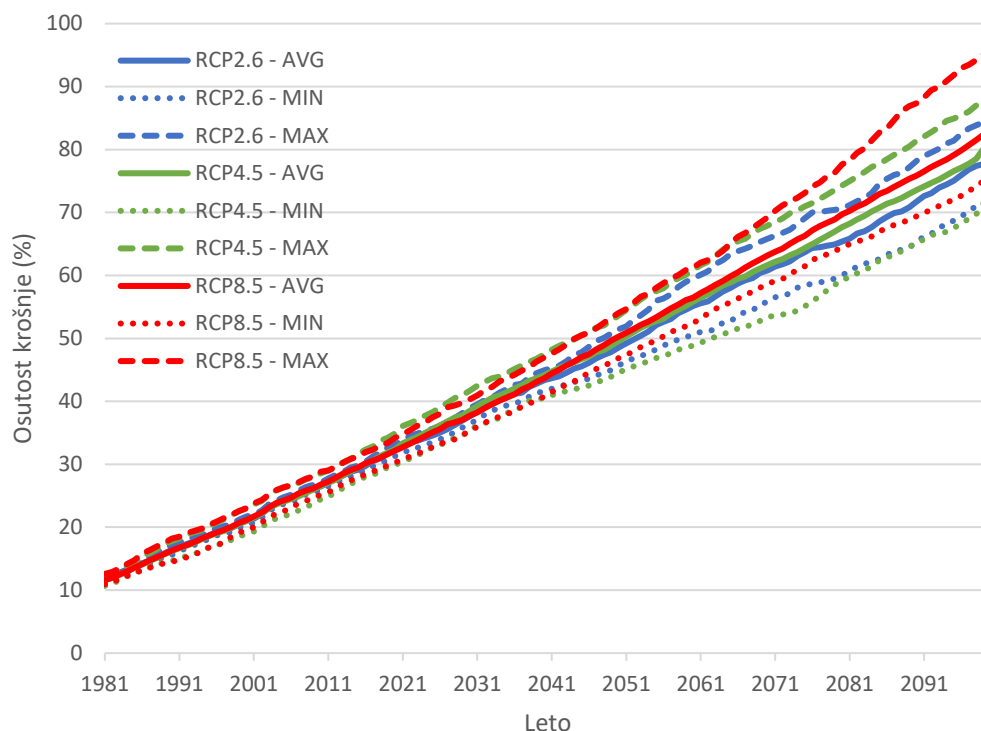
2.3.2 Napoved osutosti krošnje navadne bukve v Sloveniji zaradi vpliva suše do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb

Oceno osutosti navadne bukve v Sloveniji zaradi vpliva suše do konca 21. stoletja glede na tri RCP in šest GCM smo naredili z najboljšimi modeli, tj. s spremenljivko DEFICIT_ST150_KUM (**Preglednica 21**).

Preglednica 21. Modeli za vpliv suše (DEFICIT_ST150_KUM) na osutost bukve za tri scenarije izpustov toplogrednih plinov (RCP) in šest GCM-RCM

GCM-RCM	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Konstanta	Spr.	Konstanta	Spr.	Konstanta	Spr.
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4			11,64798	0,19116	11,23305	0,20669
ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	12,10890	0,20972	11,43825	0,23111	11,70272	0,23180
IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS			11,89349	0,21954	12,22109	0,21863
MOHC-HadGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	11,07950	0,20891	11,72970	0,17867	11,34316	0,19458
MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4			10,64897	0,21539	10,92397	0,20831
MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4			11,17542	0,20554	11,21424	0,20728

Napoved povprečne osutosti bukove krošnje glede na šest GCM in tri RCP za leto 2020 je znašala 32,2 % (**Slika 11**), kakor je bila tudi dejanska povprečna osutost bukve v Sloveniji v tem letu (Ogris in Skudnik, 2021). Zato domnevamo, da povprečna napoved daje zanesljivo oceno povprečne osutosti krošnje navadne bukve za območje cele Slovenije.

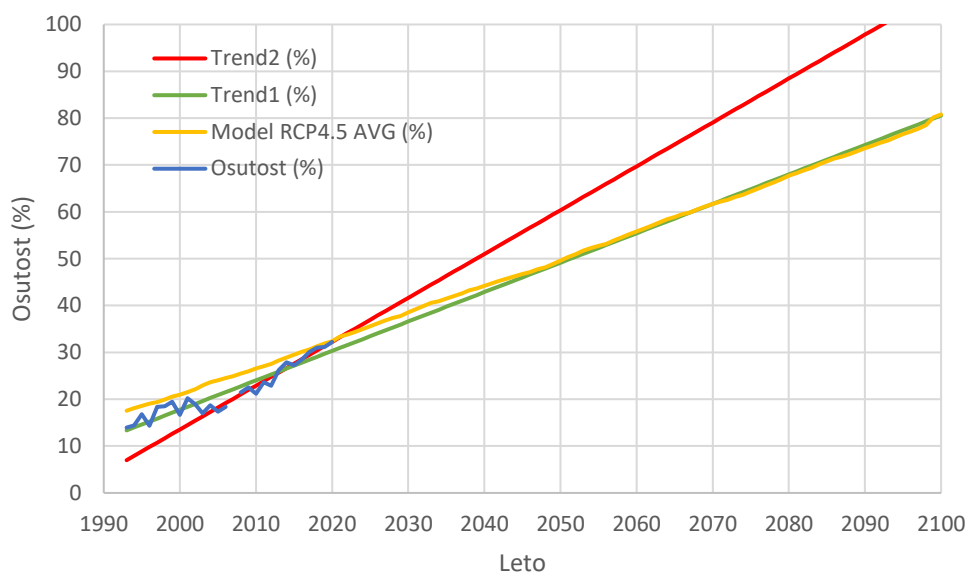


Slika 11. Napoved povprečne osutosti bukove krošnje glede na šest GCM in tri RCP za obdobje 1981–2100

Napoved povprečne osutosti bukove krošnje glede na šest GCM za leto 2050 je znašala 48,6–50,3 %, pri čemer je bila razlika med RCP relativno majhna (**Slika 11**). Razlike med GCM so bile nekoliko večje, kar se odraža v večjem razponu napovedanih vrednosti. Tako je bil za leto 2050 razpon povprečnih napovedi osutosti 44,6–54,1 %.

Na koncu 21. stoletja so modeli predvideli povprečno osutost bukove krošnje 77,7–82,4 % glede na različne RCP2.6, kjer je RCP8.5 napovedal višjo osutost, RCP2.6 pa nižjo. Povprečna maksimalna osutost za leto 2100 je znašala 84,4–96,1 % glede na različne RCP. Povprečna minimalna osutost za leto 2100 je znašala 71,5–76,6 % glede na različne RCP. Trend povečevanja osutosti bukove krošnje je linearen, kar je posledica linearnega modela (**Slika 11**).

Primerjava trendov na podlagi dejanskih podatkov o povprečni osutosti bukove krošnje (Ogris in Skudnik, 2021; Trend 1) in modelske napovedi RCP4.5 je pokazala, da sta trenda zelo podobna (**Slika 12**). Linearni trend izračunan na podlagi časovne vrste 2003–2020 pa daje višje vrednosti (Trend 2). Če bo trend nelinearen, npr. bo eksponentialen ali bo sledil kvadratni funkciji, potem bo verjetno povprečna osutost bukve bolj podobna Trendu 2.



Slika 12. Primerjava trendov na podlagi dejanskih podatkov o povprečni osutosti bukove krošnje in modelske napovedi RCP4.5. Modra črta (Osutost) prikazuje dejansko povprečno osutost bukove krošnje; zelena črta (Trend 1) je linearni trend izračunan na podlagi celotne časovne vrste 1993–2020 s formulo $0,6281 \cdot x + 13,351$; rdeča črta (Trend 2) je linearni trend izračunan na podlagi časovne vrste 2003–2020 s formulo $0,9364 \cdot x + 6,9852$. Vir podatkov Ogris in Skudnik (2021).

Po vseh napovedih bo povprečna osutost bukove krošnje leta 2100 znašala več kot 70 % na območju celotne Slovenije. Zato domnevamo, da bo do konca 21. stoletja v povprečju prišlo do močnega poškodovanja bukove krošnje in zelo verjetno do množičnega sušenja bukve. Zavedati se moramo, da so te napovedi narejene zgolj na podlagi ene spremenljivke, tj. kazalnika sušnega stresa (DEFICIT_ST150_KUM). V realnosti na osutost bukove krošnje vpliva množica dejavnikov, ki se med seboj prepletajo. Zato bo dejanska osutost bukove krošnje verjetno drugačna od napovedane. Jasen pa je trend: kumulativno število dogodkov vodnega primanjkljaja pod 150 mm je v pozitivni korelaciji s povprečno osutostjo bukove krošnje.

Modele ne moremo uporabiti za izračun napovedi za določeno točko oz. trakt, kajti razviti so bili za območje cele Slovenije. Če bi želeli narediti napovedi za določeno točko oz. trakt, bi morali razviti samostojne modele za vsako točko posebej. To pa je bilo izven ciljev te študije.

2.4 Zaključki

Povprečno osutost bukve na traktih skozi časovno vrsto je najbolje pojasnjevalo kumulativno število dogodkov vodnega primanjkljaja na traktu. Pri modelih z eno spremenljivko, je bil najboljši model s pragom -150 mm. Pri modelih z interakcijami je bil najboljši model s pragom -200 mm. Med talnimi spremenljivkami je izstopala vrsta matične podlage in razpoložljiva vodna kapaciteta tal. Zato predlagamo, da se v razvoj modela naravne razširjenosti bukve v Sloveniji vključijo spremenljivke DEFICIT_ST200_KUM, MAT_PODLAGA in HWSD_AWC.

Napoved povprečne osutosti bukove krošnje glede na šest GCM za leto 2050 je znašala 48,6–50,3 %, pri čemer je bila razlika med RCP relativno majhna. Na koncu 21. stoletja so modeli predvideli povprečno osutost bukove krošnje 77,7–82,4 % glede na različne RCP, kjer je RCP8.5 napovedal višjo osutost, RCP2.6 pa nižjo.

Trend je jasen: kumulativno število dogodkov vodnega primanjkljaja pod 150 mm je v pozitivni korelaciji s povprečno osutostjo bukove krošnje.

Po vseh napovedih bo povprečna osutost bukove krošnje leta 2100 znašala več kot 70 % na območju celotne Slovenije. Zato domnevamo, da bo do konca 21. stoletja v povprečju prišlo do močnega poškodovanja bukove krošnje in zelo verjetno do množičnega sušenja bukve. Zavedati se moramo, da so napovedi narejene zgolj na podlagi ene spremenljivke. Zato bo dejanska povprečna osutost bukove krošnje verjetno drugačna od napovedane.

2.5 Priloge

2.5.1 Priloga 1. Seznam meteoroloških spremenljivk

Spremenljivka	Opis
DEFICIT	vodni primanjkljaj v tekočem letu
DEFICIT1	vodni primanjkljaj v zadnjih dveh letih
DEFICIT2	vodni primanjkljaj v zadnjih treh letih
DEFICIT3	vodni primanjkljaj v zadnjih štirih letih
DEFICIT_KUM	vodni primanjkljaj skupaj kumulativno do tekočega leta
DEFICIT_ST50P	vodni primanjkljaj s pragom pod +50 mm v tekočem letu: število dogodkov
DEFICIT_ST50P_1	vodni primanjkljaj s pragom pod +50 mm v zadnjih dveh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST50P_2	vodni primanjkljaj s pragom pod +50 mm v zadnjih treh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST50P_3	vodni primanjkljaj s pragom pod +50 mm v zadnjih štirih letih: število dogodkov
DEFICIT_ST50P_KUM	vodni primanjkljaj s pragom pod +50 mm skupaj kumulativno do tekočega leta: število dogodkov
DEFICIT_ST0	vodni primanjkljaj s pragom pod 0 mm v tekočem letu: število dogodkov
DEFICIT_ST0_1	vodni primanjkljaj s pragom pod 0 mm v zadnjih dveh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST0_2	vodni primanjkljaj s pragom pod 0 mm v zadnjih treh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST0_3	vodni primanjkljaj s pragom pod 0 mm v zadnjih štirih letih: število dogodkov
DEFICIT_ST0_KUM	vodni primanjkljaj s pragom pod 0 mm skupaj kumulativno do tekočega leta: število dogodkov
DEFICIT_ST50	vodni primanjkljaj s pragom pod –50 mm v tekočem letu: število dogodkov
DEFICIT_ST50_1	vodni primanjkljaj s pragom pod –50 mm v zadnjih dveh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST50_2	vodni primanjkljaj s pragom pod –50 mm v zadnjih treh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST50_3	vodni primanjkljaj s pragom pod –50 mm v zadnjih štirih letih: število dogodkov
DEFICIT_ST50_KUM	vodni primanjkljaj s pragom pod –50 mm skupaj kumulativno do tekočega leta: število dogodkov
DEFICIT_ST100	vodni primanjkljaj s pragom pod –100 mm v tekočem letu: število dogodkov
DEFICIT_ST100_1	vodni primanjkljaj s pragom pod –100 mm v zadnjih dveh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST100_2	vodni primanjkljaj s pragom pod –100 mm v zadnjih treh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST100_3	vodni primanjkljaj s pragom pod –100 mm v zadnjih štirih letih: število dogodkov
DEFICIT_ST100_KUM	vodni primanjkljaj s pragom pod –100 mm skupaj kumulativno do tekočega leta: število dogodkov
DEFICIT_ST150	vodni primanjkljaj s pragom pod –150 mm v tekočem letu: število dogodkov
DEFICIT_ST150_1	vodni primanjkljaj s pragom pod –150 mm v zadnjih dveh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST150_2	vodni primanjkljaj s pragom pod –150 mm v zadnjih treh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST150_3	vodni primanjkljaj s pragom pod –150 mm v zadnjih štirih letih: število dogodkov
DEFICIT_ST150_KUM	vodni primanjkljaj s pragom pod –150 mm skupaj kumulativno do tekočega leta: število dogodkov
DEFICIT_ST200	vodni primanjkljaj s pragom pod –200 mm v tekočem letu: število dogodkov
DEFICIT_ST200_1	vodni primanjkljaj s pragom pod –200 mm v zadnjih dveh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST200_2	vodni primanjkljaj s pragom pod –200 mm v zadnjih treh letih: število dogodkov
DEFICIT_ST200_3	vodni primanjkljaj s pragom pod –200 mm v zadnjih štirih letih: število dogodkov
DEFICIT_ST200_KUM	vodni primanjkljaj s pragom pod –200 mm skupaj kumulativno do tekočega leta: število dogodkov
DEFICITO_KUM	vsota vodnega primanjkljaja s pragom nad 0 mm
DEFICITO_ST0	vodni primanjkljaj s pragom nad 0 mm v tekočem letu: število dogodkov
DEFICITO_ST0_1	vodni primanjkljaj s pragom nad 0 mm v zadnjih dveh letih: število dogodkov
DEFICITO_ST0_2	vodni primanjkljaj s pragom nad 0 mm v zadnjih treh letih: število dogodkov
DEFICITO_ST0_3	vodni primanjkljaj s pragom nad 0 mm v zadnjih štirih letih: število dogodkov
DEFICITO_ST0_KUM	vodni primanjkljaj s pragom nad 0 mm skupaj kumulativno do tekočega leta: število dogodkov
SPEI3_1_ST	SPEI-3 s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPEI3_1_ST1	SPEI-3 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPEI3_1_ST2	SPEI-3 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih

Spremenljivka	Opis
SPEI3_1_ST3	SPEI-3 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPEI3_1_ST_KUM	SPEI-3 s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI3_2_ST	SPEI-3 s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPEI3_2_ST1	SPEI-3 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPEI3_2_ST2	SPEI-3 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPEI3_2_ST3	SPEI-3 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPEI3_2_ST_KUM	SPEI-3 s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI3_AVG	povprečen SPEI-3 v tekočem letu
SPEI3_AVG1	najmanjši povprečen SPEI-3 v zadnjih dveh letih
SPEI3_AVG2	najmanjši povprečen SPEI-3 v zadnjih treh letih
SPEI3_AVG3	najmanjši povprečen SPEI-3 v zadnjih štirih letih
SPEI3_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPEI-3 do tekočega leta
SPEI3_MIN	minimalni SPEI-3 v tekočem letu
SPEI3_MIN1	najmanjši minimalni SPEI-3 v zadnjih dveh letih
SPEI3_MIN2	najmanjši minimalni SPEI-3 v zadnjih treh letih
SPEI3_MIN3	najmanjši minimalni SPEI-3 v zadnjih štirih letih
SPEI3_MIN_KUM	najmanjši minimalni SPEI-3 do tekočega leta
SPEI3_VEG_1_ST	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPEI3_VEG_1_ST1	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPEI3_VEG_1_ST2	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPEI3_VEG_1_ST3	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPEI3_VEG_1_ST_KUM	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI3_VEG_2_ST	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPEI3_VEG_2_ST1	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPEI3_VEG_2_ST2	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPEI3_VEG_2_ST3	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPEI3_VEG_2_ST_KUM	SPEI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI3_VEG_AVG	povprečen SPEI-3 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPEI3_VEG_AVG1	najmanjši povprečen SPEI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPEI3_VEG_AVG2	najmanjši povprečen SPEI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPEI3_VEG_AVG3	najmanjši povprečen SPEI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPEI3_VEG_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPEI-3 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPEI3_VEG_MIN	minimalen SPEI-3 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPEI3_VEG_MIN1	najmanjši minimalen SPEI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPEI3_VEG_MIN2	najmanjši minimalen SPEI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPEI3_VEG_MIN3	najmanjši minimalen SPEI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPEI3_VEG_MIN_KUM	najmanjši minimalen SPEI-3 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPEI6_1_ST	SPEI-6 s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPEI6_1_ST1	SPEI-6 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih letu
SPEI6_1_ST2	SPEI-6 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih letu
SPEI6_1_ST3	SPEI-6 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih letu
SPEI6_1_ST_KUM	SPEI-6 s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI6_2_ST	SPEI-6 s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPEI6_2_ST1	SPEI-6 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih letu
SPEI6_2_ST2	SPEI-6 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih letu
SPEI6_2_ST3	SPEI-6 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih letu

Spremenljivka	Opis
SPEI6_2_ST_KUM	SPEI-6 s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI6_AVG	povprečen SPEI-6 v tekočem letu
SPEI6_AVG1	najmanjši povprečen SPEI-6 v zadnjih dveh letih
SPEI6_AVG2	najmanjši povprečen SPEI-6 v zadnjih treh letih
SPEI6_AVG3	najmanjši povprečen SPEI-6 v zadnjih štirih letih
SPEI6_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPEI-6 do tekočega leta
SPEI6_MIN	minimalni SPEI-6 v tekočem letu
SPEI6_MIN1	najmanjši minimalni SPEI-6 v zadnjih dveh letih
SPEI6_MIN2	najmanjši minimalni SPEI-6 v zadnjih treh letih
SPEI6_MIN3	najmanjši minimalni SPEI-6 v zadnjih štirih letih
SPEI6_MIN_KUM	najmanjši minimalni SPEI-6 do tekočega leta
SPEI6_VEG_1_ST	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPEI6_VEG_1_ST1	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPEI6_VEG_1_ST2	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPEI6_VEG_1_ST3	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPEI6_VEG_1_ST_KUM	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI6_VEG_2_ST	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPEI6_VEG_2_ST1	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPEI6_VEG_2_ST2	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPEI6_VEG_2_ST3	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPEI6_VEG_2_ST_KUM	SPEI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPEI6_VEG_AVG	povprečen SPEI-6 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPEI6_VEG_AVG1	najmanjši povprečen SPEI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPEI6_VEG_AVG2	najmanjši povprečen SPEI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPEI6_VEG_AVG3	najmanjši povprečen SPEI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPEI6_VEG_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPEI-6 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPEI6_VEG_MIN	minimalen SPEI-6 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPEI6_VEG_MIN1	najmanjši minimalen SPEI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPEI6_VEG_MIN2	najmanjši minimalen SPEI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPEI6_VEG_MIN3	najmanjši minimalen SPEI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPEI6_VEG_MIN_KUM	najmanjši minimalen SPEI-6 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPI1_1_ST	SPI-1 s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPI1_1_ST1	SPI-1 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI1_1_ST2	SPI-1 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI1_1_ST3	SPI-1 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI1_1_ST_KUM	SPI-1 s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI1_2_ST	SPI-1 s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPI1_2_ST1	SPI-1 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI1_2_ST2	SPI-1 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI1_2_ST3	SPI-1 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI1_2_ST_KUM	SPI-1 s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI1_AVG	povprečen SPI-1 v tekočem letu
SPI1_AVG1	najmanjši povprečen SPI-1 v zadnjih dveh letih
SPI1_AVG2	najmanjši povprečen SPI-1 v zadnjih treh letih
SPI1_AVG3	najmanjši povprečen SPI-1 v zadnjih štirih letih
SPI1_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPI-1 do tekočega leta

Spremenljivka	Opis
SPI1_MIN	minimalni SPI-1 v tekočem letu
SPI1_MIN1	najmanjši minimalni SPI-1 v zadnjih dveh letih
SPI1_MIN2	najmanjši minimalni SPI-1 v zadnjih treh letih
SPI1_MIN3	najmanjši minimalni SPI-1 v zadnjih štirih letih
SPI1_MIN_KUM	najmanjši minimalni SPI-1 do tekočega leta
SPI1_VEG_1_ST	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPI1_VEG_1_ST1	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI1_VEG_1_ST2	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI1_VEG_1_ST3	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI1_VEG_1_ST_KUM	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI1_VEG_2_ST	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPI1_VEG_2_ST1	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI1_VEG_2_ST2	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI1_VEG_2_ST3	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI1_VEG_2_ST_KUM	SPI-1 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI1_VEG_AVG	povprečen SPI-1 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPI1_VEG_AVG1	najmanjši povprečen SPI-1 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPI1_VEG_AVG2	najmanjši povprečen SPI-1 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPI1_VEG_AVG3	najmanjši povprečen SPI-1 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPI1_VEG_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPI-1 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPI1_VEG_MIN	minimalen SPI-1 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPI1_VEG_MIN1	najmanjši minimalen SPI-1 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPI1_VEG_MIN2	najmanjši minimalen SPI-1 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPI1_VEG_MIN3	najmanjši minimalen SPI-1 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPI1_VEG_MIN_KUM	najmanjši minimalen SPI-1 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPI3_1_ST	SPI-3 s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPI3_1_ST1	SPI-3 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI3_1_ST2	SPI-3 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI3_1_ST3	SPI-3 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI3_1_ST_KUM	SPI-3 s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI3_2_ST	SPI-3 s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPI3_2_ST1	SPI-3 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI3_2_ST2	SPI-3 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI3_2_ST3	SPI-3 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI3_2_ST_KUM	SPI-3 s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI3_AVG	povprečen SPI-3 v tekočem letu
SPI3_AVG1	najmanjši povprečen SPI-3 v zadnjih dveh letih
SPI3_AVG2	najmanjši povprečen SPI-3 v zadnjih treh letih
SPI3_AVG3	najmanjši povprečen SPI-3 v zadnjih štirih letih
SPI3_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPI-3 do tekočega leta
SPI3_MIN	minimalni SPI-3 v tekočem letu
SPI3_MIN1	najmanjši minimalni SPI-3 v zadnjih dveh letih
SPI3_MIN2	najmanjši minimalni SPI-3 v zadnjih treh letih
SPI3_MIN3	najmanjši minimalni SPI-3 v zadnjih štirih letih
SPI3_MIN_KUM	najmanjši minimalni SPI-3 do tekočega leta
SPI3_VEG_1_ST	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu

Spremenljivka	Opis
SPI3_VEG_1_ST1	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI3_VEG_1_ST2	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI3_VEG_1_ST3	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI3_VEG_1_ST_KUM	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI3_VEG_2_ST	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPI3_VEG_2_ST1	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI3_VEG_2_ST2	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI3_VEG_2_ST3	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI3_VEG_2_ST_KUM	SPI-3 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI3_VEG_AVG	povprečen SPI-3 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPI3_VEG_AVG1	najmanjši povprečen SPI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPI3_VEG_AVG2	najmanjši povprečen SPI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPI3_VEG_AVG3	najmanjši povprečen SPI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPI3_VEG_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPI-3 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPI3_VEG_MIN	minimalen SPI-3 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPI3_VEG_MIN1	najmanjši minimalen SPI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPI3_VEG_MIN2	najmanjši minimalen SPI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPI3_VEG_MIN3	najmanjši minimalen SPI-3 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPI3_VEG_MIN_KUM	najmanjši minimalen SPI-3 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPI6_1_ST	SPI-6 s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPI6_1_ST1	SPI-6 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI6_1_ST2	SPI-6 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI6_1_ST3	SPI-6 s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI6_1_ST_KUM	SPI-6 s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI6_2_ST	SPI-6 s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPI6_2_ST1	SPI-6 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI6_2_ST2	SPI-6 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI6_2_ST3	SPI-6 s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI6_2_ST_KUM	SPI-6 s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI6_AVG	povprečen SPI-6 v tekočem letu
SPI6_AVG1	najmanjši povprečen SPI-6 v zadnjih dveh letih
SPI6_AVG2	najmanjši povprečen SPI-6 v zadnjih treh letih
SPI6_AVG3	najmanjši povprečen SPI-6 v zadnjih štirih letih
SPI6_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPI-6 do tekočega leta
SPI6_MIN	minimalni SPI-6 v tekočem letu
SPI6_MIN1	najmanjši minimalni SPI-6 v zadnjih dveh letih
SPI6_MIN2	najmanjši minimalni SPI-6 v zadnjih treh letih
SPI6_MIN3	najmanjši minimalni SPI-6 v zadnjih štirih letih
SPI6_MIN_KUM	najmanjši minimalni SPI-6 do tekočega leta
SPI6_VEG_1_ST	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v tekočem letu
SPI6_VEG_1_ST1	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI6_VEG_1_ST2	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI6_VEG_1_ST3	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov v zadnjih štirih letih

Spremenljivka	Opis
SPI6_VEG_1_ST_KUM	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –1: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI6_VEG_2_ST	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v tekočem letu
SPI6_VEG_2_ST1	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih dveh letih
SPI6_VEG_2_ST2	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih treh letih
SPI6_VEG_2_ST3	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov v zadnjih štirih letih
SPI6_VEG_2_ST_KUM	SPI-6 med aprilom in septembrom s pragom –2: število dogodkov kumulativno do tekočega leta
SPI6_VEG_AVG	povprečen SPI-6 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPI6_VEG_AVG1	najmanjši povprečen SPI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPI6_VEG_AVG2	najmanjši povprečen SPI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPI6_VEG_AVG3	najmanjši povprečen SPI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPI6_VEG_AVG_KUM	najmanjši povprečen SPI-6 med aprilom in septembrom do tekočega leta
SPI6_VEG_MIN	minimalen SPI-6 med aprilom in septembrom v tekočem letu
SPI6_VEG_MIN1	najmanjši minimalen SPI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih dveh letih
SPI6_VEG_MIN2	najmanjši minimalen SPI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih treh letih
SPI6_VEG_MIN3	najmanjši minimalen SPI-6 med aprilom in septembrom v zadnjih štirih letih
SPI6_VEG_MIN_KUM	najmanjši minimalen SPI-6 med aprilom in septembrom do tekočega leta

2.6 Viri

- Bates D., Mächler M., Bolker B., Walker S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1: 1 - 48. [10.18637/jss.v067.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01)
- Beguería S., Vicente-Serrano S.M. 2017. SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, R package version 1.7. <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>
- Bertalanč R., Dolinar M., Draksler A., Honzak L., Kobold M., Kozjek K., Lokošek N., Medved A., Vertačnik G., Vlahovič Ž., Žust A. 2018. Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja: sintezno poročilo. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 156 str.
- Europe F. 2020. State of Europe's Forests 2020. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe: 394 str. <https://foresteurope.org/>
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC. 2009. Harmonized world soil database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/> (15.8.2022)
- GIS. 2022. Podatkovna zbirka o spremljanju stanja gozdov v Sloveniji na sistematični mreži 16 × 16 km. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije
- Hijmans R.J. 2022. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.5-21. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Knisel W.G., Davis F.M. 2000. GLEAMS: ground loading effects of agricultural management systems. Version 3.0. User manual. Southeast Watershed Research Laboratory, SEWRL-WGK/FMD-050199: 194 str.
- Kovač M. (ed.) 2014. Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov: Priročnik za terensko snemanje podatkov. Studia Forestalia Slovenica. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 228 str.
- Kovač M., Skudnik M., Japelj A., Planinšek Š., Vochl S. 2014. Gozdna inventura. V: Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov: Priročnik za terensko snemanje podatkov. Kovač M. (ed.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 7-111
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California. American Meteorological Society: 179-184 str.
- MKGP. 2016. Poročilo o izvajanju Nacionalnega gozdnega programa do 2014. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano: 97 str.
- Novak M., Bavec M., Trajanova M. 2014. Litološka karta Slovenije. Geološki zavod Slovenije. <https://egeologija.si/geonetwork/srv/slv/catalog.search#/metadata/8c21f080-854a-4df5-8d1a-86abb01af919> (23.1.2023)
- OECD. 2021. Forest resources (indicator). Organisation for Economic Co-operation and Development. <http://doi.org/10.1787/2546ca0a-en> (23.5.2021)
- Ogris N. 2007. Model zdravja gozdov v Sloveniji: doktorska disertacija. Ljubljana, [N. Ogris]: 138 str.
- Ogris N., Skudnik M. 2021. V Sloveniji se povečuje osutost bukove krošnje. *Gozdarski vestnik*, 79, 5-6: 226-237
- PEDKRS. 1999. Pedološko rekartiranje in digitalizacija pedoloških kart Republike Slovenije v merilu 1:25.000 kot osnove za določitev talnega potenciala: digitalna pedološka karta, pedološki profili. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Center za pedologijo in varstvo okolja: 20 str.

- Pierce D. 2021. ncd4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>
- RS. 2009. Pravilnik o varstvu gozdov. Uradni list RS, 114/2009, 31/2016 in 52/2022
- Skudnik M., Planinšek Š. 2020. Spremljanje gozdov v letu 2019, Raven I. V: Poročilo o spremljanju stanja gozdov za leto 2019. Planinšek Š., Žlindra D. (eds.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 9-18
- Team R.C. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, 7: 1696-1718. 10.1175/2009jcli2909.1
- ZGS. 2021. Gozdni fondi. Podatkovna zbirka. Zavod za gozdove Slovenije

3 Vpliv bolezni in škodljivcev na hiranje bukve (Aktivnost 3.2)

Nikica Ogris

3.1 Uvod

Cilj aktivnosti 3.2 je bil: (1) razviti modele o vplivu bolezni in škodljivcev na hiranje navadne bukve (*Fagus sylvatica*); (2) napovedati vpliv bolezni in škodljivcev na hiranje bukve v Sloveniji do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb.

Za oceno vpliva bolezni in škodljivcev na hiranje bukve smo izbrali dva kazalca: (1) obseg poškodb dreves; (2) varstveno-sanitarni posek.

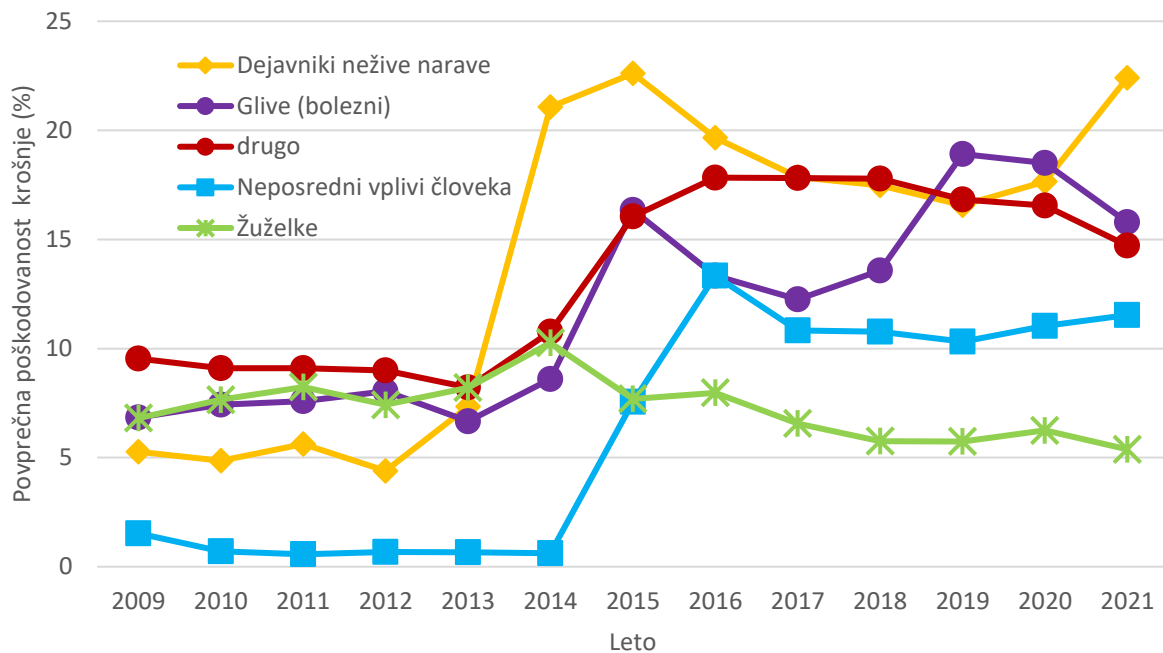
Vir podatkov o obsegu poškodb dreves je bilo spremljanje stanje gozdov na sistematični mreži 16 × 16 km, tj. na 44 traktih. Poškodovanost dreves se ocenjuje na M6 ploskvah. Vsak trakt ima štiri M6 ploskev. Na vsaki M6 ploskvi je 6 dreves (M6 = metoda 6 dreves). Tako se na vsakem traktu oceni osutost in poškodovanost 24 dreves, na ravni države skupaj 1.056 dreves (Kovač, 2014). Obseg poškodb prikazuje velikost – obseg, količino (v %) prizadetega dela drevesa, ki ga je prizadel škodljivi dejavnik (Jurc in Jurc, 2014). Skupni obseg krošnje se izraža z deležem (%) površine listnega aparata krošnje in predstavlja tisti del skupne osutosti, ki jo je mogoče nedvoumno pripisati znanim povzročiteljem. Poškodbe vej so izražene kot % vseh vej, poškodbe debla so izražene kot % obsega debla. Obseg poškodb se ocenjuje na 5 % natančno. Delež poškodb se glede na osutost drevesa ocenjuje odštevalno in je zato ne more presežati.

Vir podatkov o varstveno-sanitarnem poseku je bila podatkovna zbirka o označbi drevja za posek (xTi, Zavod za gozdove Slovenije). Upoštevali smo tako sanitarno sečnjo kot tudi sečnjo oslabelega drevja zaradi žuželk (vrsta sečnje 301, 901, 991) in bolezni (vrsta sečnje 302 in 902). Podatki o označbi drevja za posek obstajajo od leta 1995 naprej in sicer na nivoju gozdnega odseka in se zbirajo na enak način na območju cele Slovenije.

Od leta 2009 do 2013 se povprečna poškodovanost krošnje bukve zaradi različnih kategorij povzročiteljev poškodb ni bistveno spreminjala (**Slika 13**). V tem obdobju so največjo poškodovanost krošnje povzročali drugi dejavniki (povprečno 9,0 %), na drugem mestu so bile žuželke (povprečno 7,7 %), takoj za njimi glive (povprečno 7,3 %), na četrtem mestu so bili škodljivi abiotični dejavniki (povprečno 5,5 %), neposredni človekovi vplivi na poškodovanost krošnje pa so bili zanemarljivi (povprečno 0,8 %) (Ogris in Skudnik, 2021).

Leta 2014 je bil katastrofalni žledolom (Veselič in sod., 2015), kar se je odrazilo tudi pri popisu povzročiteljev poškodb na ploskvah M6 (**Slika 13**). V letu 2014 se je povprečna poškodovanost bukove krošnje zaradi škodljivih abiotičnih dejavnikov povečala iz 7,3 % na 21,1 % (Ogris in Skudnik, 2021). V letu 2015 se je povprečna poškodovanost bukove krošnje zaradi škodljivih abiotičnih dejavnikov še nekoliko povečala, v naslednjih letih pa se je začela zmanjševati.

Po žledolomu leta 2014 so se začele povečevati poškodbe krošnje bukve zaradi kategorije drugih škodljivih dejavnikov. Poškodbe zaradi drugih škodljivih dejavnikov so dosegle višek v obdobju od 2016 do 2018, ko so znašale povprečno 17,8 %, potem pa so se počasi začele zmanjševati (**Slika 13**).



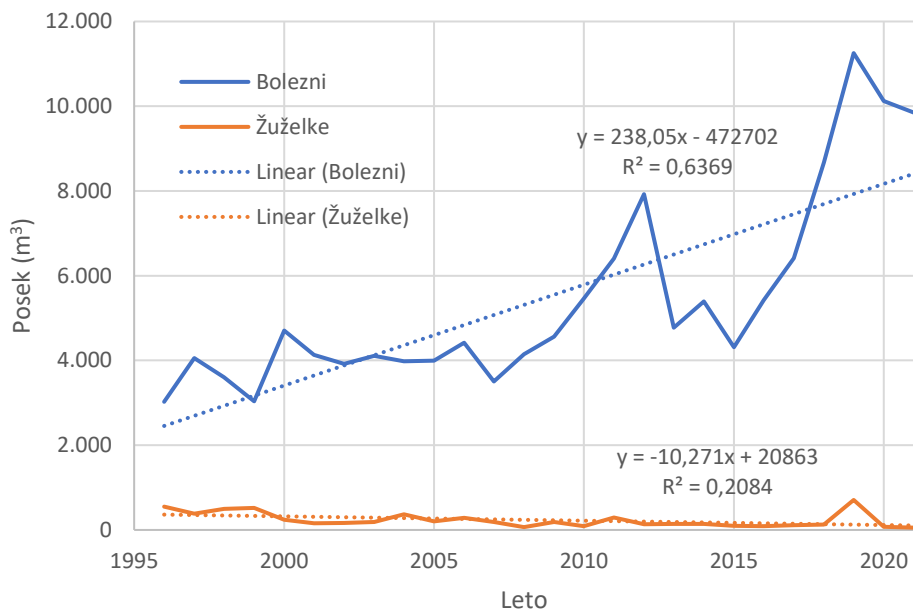
Slika 13. Povprečna poškodovanost bukove krošnje zaradi različnih kategorij škodljivih dejavnikov na ploskvah M6 v obdobju 2009–2021

Glive, ki povzročajo bolezni gozdnega drevja, so postale eno leto po žledolomu 2014 drugi najpomembnejši škodljiv dejavnik bukve, takoj za škodljivimi abiotičnimi dejavniki, in so povzročile povprečno 16,3 % poškodovanost krošnje (**Slika 13**). V naslednji dveh letih, 2016 in 2017, smo zabeležili nekoliko manjšo poškodovanost bukve zaradi gliv, ki pa se je zatem ponovno povečala in v dveh letih, 2019 in 2020, so glive bile najpomembnejši povzročitelj poškodb bukve, v letu 2021 pa so vodstvo ponovno prevzeli abiotični dejavniki.

V obdobju 2009–2014 so žuželke kazale rahel trend povečanja poškodb bukove krošnje (od 6,8 % na 10,3 %). Po letu 2014 se je poškodovanost bukve zaradi žuželk začela zmanjševati in leta 2019 je povprečna poškodovanost krošnje zaradi žuželk znašala 5,7 %. V letu 2020 smo zaznali ponovno rahlo povečanje na 6,3 % (**Slika 13**). V obdobju 2016–2021 so žuželke povzročile najmanjšo povprečno poškodovanost krošnje bukve izmed vseh kategorij škodljivih dejavnikov.

Varstvo-sanitarni posek bukve zaradi bolezni v obdobju 1996-2021 je obsegal 3.024–11.254 m³/leto (**Slika 14**). V deležu lesne zaloge bukve je to zelo malo (0,005–0,009 % na leto). V deležu celotne sečnje bukve je tudi zelo malo (v povprečju 0,005 % na leto). V deležu celotne varstveno-sanitarne sečnje bukve je to predstavljalo v povprečju 5,6 % na leto. Od leta 2009 naprej je viden trend višanja varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni.

Varstvo-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v obdobju 1996-2021 je obsegal 54–707 m³/leto (**Slika 14**). V deležu lesne zaloge bukve je to izjemno malo (v povprečju 0,0002 % na leto). V deležu celotne sečnje bukve je tudi zelo malo (v povprečju 0,0002 % na leto). V deležu celotne varstveno-sanitarne sečnje bukve je to predstavljalo v povprečju 0,3 % na leto. Poleg majhne količine varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk je tudi trend v upadanju.



Slika 14. Sanitarni posek in posek oslabilih dreves bukve zaradi bolezni in žuželk v obdobju 1996–2021

Z različnimi statističnimi metodami in modelskimi pristopi smo iskali pravila in vzorce o vplivu bolezni in škodljivcev na obseg poškodovanosti bukve. Pri tem smo uporabili tudi druge dejavnike oz. podatke, kot so meteorološki podatki, podatki o tleh, reliefu in gozdovih.

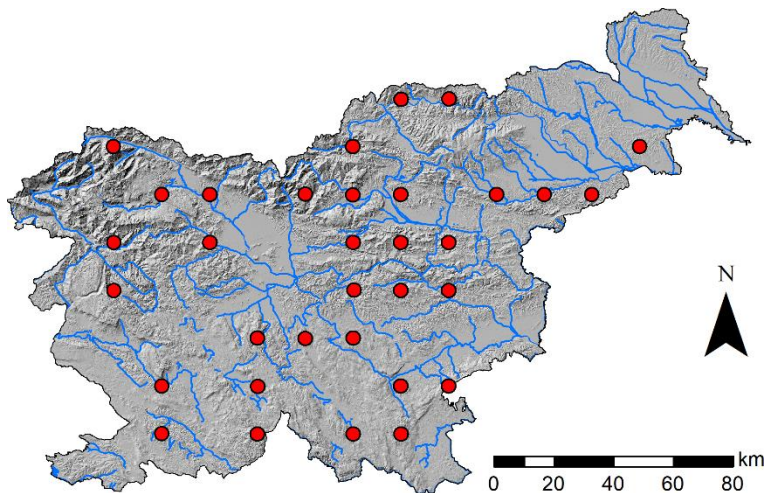
3.2 Metode

3.2.1 Priprava podatkov

3.2.1.1 Poškodovanost bukove krošnje

Uporabili smo podatkovno zbirko Popisa razvrednotenja in poškodovanosti gozdov v Sloveniji, ki jo vzdržuje Gozdarski inštitut Slovenije. Podatke o osutosti in poškodovanosti zbiramo letno na sistematični vzorčni mreži traktov (16 × 16 km; Nivo I ploskve), ki so sestavljeni iz štirih ploskev M6 (metoda šestih najbližjih dreves), kjer vsakemu drevesu na podlagi kazalnika osutosti in popisa poškodb ocenimo vitalnost (Kovač in sod., 2014). Na sistematičen in primerljiv način podatke zbiramo od leta 1991. Podatki, uporabljeni v analizi, se nanašajo na obdobje 2009–2021 (GIS, 2022). Statistični koncept popisa temelji na naključnem sistematičnem vzorčenju v grozdih (angl. cluster sampling), kjer je vsak grozd sestavljen iz štirih ploskev po šest dreves. Drevesa ostajajo v vzorcu, dokler ne odmrejo ali pa jih posekamo. V takem primeru jih nadomestimo z novimi. Postopek ocenjevanja osutosti tako poteka v dveh delovnih fazah. V prvi v skladu s protokolom statističnega izbora določimo vzorčna drevesa, v drugi pa se vsakemu izbranemu drevesu ocenimo osutost vsako leto od junija do avgusta. Da je kazalnik osutosti mednarodno primerljiv, vsako drugo leto poteka vseevropsko umerjanje terenskih popisovalcev na primeru okoli 200 fotografij dreves. Pri vseh sodelujočih državah je metodologija enotna in tako med seboj primerljiva.

V obdobju 1993–2021 se je bukev pojavljala na 21 do 31 traktih od skupaj 44-ih, skupaj na 33 različnih traktih (**Slika 15**). Med leti se je število dreves v vzorcu spreminjalo, in sicer se je gibalo od 271 do 394, povprečno 338 na leto. Skupno število dreves, ki jim vsako leto ocenimo osutost, je 1.056. Zaradi prej navedenega pogoja o socialnem položaju dreves je bilo v končno analizo vključenih manj dreves bukve, in sicer od 195 do 357, povprečno 295 dreves bukve na leto.



Slika 15. Razporeditev traktov na sistematični mreži 16×16 km, kjer se je pojavljala bukev na M6 ploskvah 1993–2021

Čeprav popis razvrednotenja in poškodovanosti gozdov poteka na sistematičen in primerljiv način že od leta 1991, smo v analizo vključili samo podatke od leta 2009 naprej, kajti ocena poškodovanosti in popis povzročiteljev poškodb drevja se je prvič izvedel leta 2009 in od takrat naprej se izvaja vsako leto.

3.2.1.2 Varstveno-sanitarni posek bukve

Vir podatkov o varstveno-sanitarnem poseku bukve je bila podatkovna zbirka o označbi drevja za posek (ZGS, 2022b). Upoštevali smo tako sanitarno sečnjo kot tudi sečnjo oslabelega drevja zaradi žuželk (vrsta sečnje 301, 901, 991) in bolezni (vrsta sečnje 302 in 902) v obdobju 1996–2021. Izračunali smo kakšen je bil posek bukve zaradi bolezni in žuželk po gozdnih odsekih v obravnavanem obdobju ($n = 59.611$). Vsak gozdni odsek je definiran s poligonom. Vendar 4.969 gozdnih odsekov ni imelo definirane poligona – za te smo poligon določili kot krog, ki ustreza površini gozda v gozdnem odseku. Lesno zalogo bukve smo pridobili iz podatkovne zbirke Gozdni fondit, tj. iz popisov gozdnih sestojev, ki se izvajajo za namen gozdnogospodarskih načrtov (ZGS, 2022a). Podatke smo prilagodili modelski mreži z modelsko celico velikosti 1×1 km. Modelsko mrežo so gradila vsa območja v Sloveniji, kjer se pojavlja gozd (vsaj en gozdni sestoj). Ciljno spremenljivko je predstavljal varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni in žuželk v deležu lesne zaloge bukve v modelski celici.

3.2.1.3 Meteorološke spremenljivke

Za kazalnike suše smo izbrali tri najboljše kazalnike glede na rezultate aktivnosti 3.1, to so:

- število dogodkov vodnega primanjkljaja s pragom pod -150 mm skupaj kumulativno do tekočega leta (DEFICIT_ST150_KUM),
- vodni primanjkljaj skupaj kumulativno do tekočega leta (DEFICIT_KUM),
- SPI-1 s pragom -1 : število dogodkov kumulativno do tekočega leta (SPI1_1_ST_KUM).

Vodni primanjkljaj je opredeljen kot razlika med 60-dnevno drsečo referenčno evapotranspiracijo in višino padavin v tem obdobju (Bertalanč in sod., 2018). Vodni primanjkljaj običajno uporabljamo za negativno meteorološko oziroma površinsko vodno bilanco, torej takrat, ko je referenčna evapotranspiracija večja od višine padavin v nekem obdobju. Vodna bilanca (oziroma v sušnih obdobjih vodni primanjkljaj) je koristen kazalnik, s katerim na dokaj enostaven način, pa vendar objektivno, določamo trajanje in intenzivnost suhega obdobja in je primerna osnova za prvo oceno pojavnosti kmetijske suše.

Standardizirani padavinski indeks (SPI- n) je statistični indikator, ki primerja skupno količino padavin, prejetih na določeni lokaciji v obdobju n mesecev, z dolgoročno porazdelitvijo padavin za isto časovno obdobje na tej lokaciji. SPI se izračuna na mesečni osnovi za premikajoče se okno n mesecev, kjer n označuje obdobje vsote padavin, ki je običajno 1, 3, 6, 9, 12, 24 ali 48 mesecev. Ustrezni SPI so označeni kot SPI-1, SPI-3, SPI-6 itd. Da bi omogočili statistično primerjavo bolj vlažnih in bolj suhih podnebij, SPI temelji na transformaciji akumuliranih padavin v standardizirano/normalno spremenljivko s povprečjem nič in varianco enako ena. Rezultati SPI so podani v enotah standardnega odklona od dolgoročne sredine standardizirane porazdelitve. V našem primeru smo za referenčno obdobje izbrali obdobje 1981–2010. Za parameter n smo vzeli tri vrednosti: 1, 3 in 6 mesecev. SPI smo izračunali za obdobje 1981–2100 s pomočjo knjižnice SPEI (Beguería in Vicente-Serrano, 2017; Vicente-Serrano in sod., 2010) v statističnem programu R (R Core Team, 2022). Mesečno količino padavin smo črpali iz podatkovne zbirke OPS21 (Bertalanič in sod., 2018). Podatki so bili v rasterskem formatu netCDF. Za branje tega formata smo uporabili knjižnico "ncdf4" (Pierce, 2021).

Ker so vrednosti SPI podane v enotah standardnega odklona od standardiziranega povprečja, negativne vrednosti ustrezajo bolj sušnim obdobjem kot običajno, pozitivne vrednosti pa ustrezajo bolj vlažnim obdobjem kot običajno. Po klasifikaciji McKee in sod. (1993) vrednosti SPI izražajo naslednje stopnje sušnega stresa:

- $-1,0 < \text{SPI} \leq +1,0$: območje normalnosti
- $-1,5 < \text{SPI} \leq -1,0$: srednje suho
- $-2,0 < \text{SPI} \leq -1,5$: zelo suho
- $\text{SPI} \leq -2,0$: izjemno suho

Poleg kazalnikov suše smo vključili še naslednje meteorološke spremenljivke:

- povprečno mesečno relativno zračno vlažnost (%)
- povprečno mesečno specifično zračno vlažnost
- kumulativno letno vsoto padavin (mm)
- povprečno mesečno kratkovalovno sončno obsevanje (W/m^2)
- povprečno mesečno hitrost vetra (km/h)
- povprečno največjo mesečno hitrost vetra (km/h)
- povprečno največjo mesečno temperaturo zraka ($^{\circ}\text{C}$)
- povprečno največjo mesečno temperaturo zraka ($^{\circ}\text{C}$)
- povprečno mesečno temperaturo zraka ($^{\circ}\text{C}$)
- kumulativno potencialno evapotranspiracijo (mm)

Vrednosti meteoroloških spremenljivk 1981–2100 smo pridobili iz projekta "Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja" (Bertalanič in sod., 2018). Vrednosti smo iz rastrov prebrali s pomočjo knjižnice "raster" (Hijmans, 2022).

3.2.1.4 Tla

V analizo smo vključili 14 talnih spremenljivk (**Preglednica 22**).

Preglednica 22. Talne spremenljivke

Spremenljivka	Opis	Vir
LITOL	vrsta matične kamnine oz. sedimenta (po šifrantu litološke karte)	Novak in sod. (2014)
FC	vodna kapaciteta tal [cm/cm]	podatki iz PEDKRS (1999); izračun po (Knisel in Davis, 2000; Ogris, 2007)
BR15	točka venenja [pri 1500 kPa cm/cm]	

Spremenljivka	Opis	Vir
GLOBINA	povprečna globina tal [cm]	PEDKRS (1999)
MAT_PODLAGA	matična podlaga (po šifrantu ZGS), ki je površinsko najboljšejejša v celici modela	ZGS (2022a)
HWSD_DRAINAGE	prepustnost tal [razred]	FAO in sod. (2009)
HWSD_AWC	razpoložljiva vodna kapaciteta tal [razred]	
pH	povprečen pH zgornjega horizonta	Ogris (2007); PEDKRS (1999)
DUŠIK	celokupni dušik [%]	
FOSFOR	izmenljivi fosfor [mg/100g]	
KALIJ	izmenljivi kalij [mg/100g]	
H	izmenljivi H [mmolc/100g]	
K	izmenljivi K [mmolc/100g]	ZGS (2022a)
SKALNAT	povprečna skalovitost površja [%]	

3.2.1.5 Ostale spremenljivke

V razvoj modelov smo vključili še nekatere druge spremenljivke:

- povprečni naklon terena (%),
- povprečna ekspozicija terena (°),
- delež bukve v lesni zalogi (%) (ZGS, 2022a),
- delež gozdnih površin v celici modela (%) (ZGS, 2022a),
- stopnja ohranjenosti drevesne sestave (ZGS, 2022a).

3.2.2 Razvoj modelov

3.2.2.1 Poškodovanost krošnje zaradi bolezni in žuželk

Za razvoj modelov smo uporabili posplošene linearne mešane modele (GLMM) s knjižnico "lme4" (Bates in sod., 2015).

Odvisna spremenljivka je bila povprečna poškodovanost dreves bukve zaradi bolezni in škodljivcev v določenem letu na določenem traktu. Razvili smo dva sklopa modelov: posebej za bolezni in posebej za škodljivce (žuželke).

Trakt in leto smo vključili v model kot naključen učinek (ang. random effect).

Razvili smo več modelov glede na vključenost in kombinacijo neodvisnih spremenljivk (**Preglednica 23**).

Preglednica 23. Skupine modelov glede na vključenost spremenljivk

Oznaka skupine	Spremenljivke
SUŠA	samo kazalnik suše (eden od treh)
METEO	vse podnebne spremenljivke
MULTI	vse spremenljivke
BREZ_FAKTOR	vse spremenljivke brez faktorskih spremenljivk (MAT_PODLAGA, LITOL, HWSD_DRAINAGE, HWSD_AWC, stopnja ohranjenosti drevesne sestave)
INTERAKCIJE	vse spremenljivke brez faktorskih spremenljivk z nekaterimi interakcijami: SUŠA*BR15*FC*GLOBINA*NAKLON*EKSPOZICIJA, DUŠIK*FOSFOR*KALIJ

Ker so bili izvorni meteorološki podatki izračunani za različne globalne modele splošne cirkulacije (GCM), regionalne modele (RCM) in scenarije izpustov toplogrednih plinov (RCP) (**Preglednica 24**), smo razvili več modelov za vsako kombinacijo GCM-RCM in RCP.

Preglednica 24. Seznam simulacij, katerih izračune smo uporabili v analizi. Podana so imena globalnega (GCM) in regionalnega (RCM) modela. Če smo simulacijo za določeni scenarij RCP uporabili pri analizi, je v ustreznem polju križec (Bertalančić in sod., 2018).

GCM	RCM	RCP2.6*	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5-LR	CCLM4-8-17		x	x
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17		x	x
EC-EARTH	HIRHAM5	x	x	x
IPSL-CM5A-MR	WRF331F		x	x
HadGEM2-ES	RACMO22E	x	x	x
MPI-ESM-LR	RCA4		x	x

*Opomba: za RCP2.6 so manjkali podatki o padavinah, specifični vlažnosti zraka, minimalni in maksimalni temperaturi zraka.

Preverili smo avtokorelacijo med spremenljivkami s funkcijo FindCorr iz paketa DescTools (Signorell, 2022) v statistični programski opremi R (R Core Team, 2022). Iz analize smo odstranili spremenljivke, ki so bile v avtokorelaciji večji od 0,90, to so: povprečna mesečna temperatura zraka in povprečna največja mesečna hitrost vetra.

3.2.2.2 Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni in žuželk

Preverili smo avtokorelacijo med spremenljivkami s funkcijo FindCorr iz paketa DescTools (Signorell, 2022) v statistični programski opremi R (R Core Team, 2022). Iz analize smo odstranili spremenljivke, ki so bile v avtokorelaciji večji od 0,90, to so: deficit, sfcWindmax, tasmin, tas.

Modele smo razvili z naslednjim izborom spremenljivk (21): naklon, ekspozicija, tla_fc, tla_br15, tla_globina, tla_ph, tla_dusik, tla_fosfor, tla_kalij, tla_h, tla_skalnat, deficit150, huss, rh, rsds, sfcWind, tasmax, litol, hwsd_drainage, hwsd_awc, tla_mat_podlaga.

Uporabili smo dva pristopa: (1) posplošeni linearni modeli (GLM); (2) metoda strojnega učenja Bagging (Breiman, 1996) z algoritmom M5' (Quinlan, 1992; Wang in Witten, 1997). Metoda Bagging izdelava ansambel modelov. V našem primeru smo uporabili ansambel 10 modelov M5'. Algoritem M5' izdelava regresijsko odločitveno drevo. Da smo preprečili prekomerno prilagajanje modelov izvornim podatkom, smo regresijska drevesa porezali, tako da smo v drevesu omejili najmanj štiri primere na en list.

3.2.3 Validacija modelov

3.2.3.1 Poškodovanost krošnje zaradi bolezni in žuželk

Učinkovitost modelov smo preverjali z naslednjimi kazalniki: REML (ang. REstricted Maximum Likelihood), AIC (ang. Akaike Information Criterion), MAE (srednja absolutna napaka), RMSE (koren srednje kvadratne napake).

3.2.3.2 Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni in žuželk

Modele razvite z metodo strojnega učenja Bagging in algoritmom M5' smo preverjali z 10-kratno navzkrižno validacijo (ang. cross-validation). Učinkovitost modelov smo preverjali z naslednjimi kazalniki: korelacijski koeficient (r), MAE, RMSE, relativno absolutno napako (RAE), koren relativne kvadratne napake (RRSE).

3.2.4 Napoved hiranja navadne bukve v Sloveniji zaradi bolezni in žuželk do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb

Izbrali smo najboljše modele in na njihovi osnovi napovedali poškodovanost navadne bukve v Sloveniji zaradi bolezni in škodljivcev do leta 2100 glede na dva scenarija RCP in šest GCM (**Preglednica 15**).

3.3 Rezultati in razprava

3.3.1 Poškodovanost krošnje bukve zaradi bolezni

3.3.1.1 Modeli

Razvili smo 180 modelov. Najboljša skupina modelov je bila tista, ki je vključevala vse spremenljivke (MULTI; **Preglednica 25**). Ta skupina je imela v povprečju najmanjši REML. Nekoliko je izstopala tudi skupina INTERAKCIJE, ker je imela najmanjši povprečni MAE in RMSE. Najslabša pa je bila skupina, ki je vključevala samo eno spremenljivko, tj. kazalnik suše.

Modele smo razvili samo za 33 traktov. Zato kategorične talne spremenljivke niso pokrile vseh možnih vrednosti, kjer se lahko bukev pojavlja. Zato so modeli, ki vključujejo kategorične spremenljivke, uporabni samo za napovedovanje na nivoju trakta in jih ni mogoče uporabiti za ekstrapolacijo na območje cele Slovenije. Spremenljivki FC in BR15 temeljita na tabelarnih vrednostih (Knisel in Davis, 2000), zato sta verjetno precej nezanesljivi.

Preglednica 25. Kakovost modelov glede na skupino neodvisnih spremenljivk

Skupina	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
MULTI	1.027,7	7,1	1.165,9	5,1	4,06	0,09	6,23	0,09	36
INTERAKCIJE	1.108,6	95,9	1.113,2	9,0	2,74	0,11	4,81	0,11	36
BREZ_FAKTOR	1.140,0	9,5	1.193,4	8,8	4,66	0,18	6,74	0,22	36
METEO	1.167,9	8,1	1.196,1	5,1	4,03	0,07	6,33	0,10	36
SUŠA	1.185,1	8,7	1.189,9	4,4	3,93	0,08	6,36	0,10	36

Poškodovanost krošnje bukve zaradi bolezni je najbolje pojasnjeval kazalnik suše SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 26**).

Preglednica 26. Kakovost modelov glede na kazalnik suše

Kazalnik suše	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
SPI1_1_ST_KUM	1.105,8	64,7	1.169,7	30,7	3,87	0,64	6,13	0,70	60
DEFICIT_ST150_KUM	1.112,7	65,0	1.173,1	33,2	3,89	0,65	6,10	0,69	60
DEFICIT_KUM	1.159,2	70,0	1.172,3	32,4	3,89	0,64	6,05	0,66	60

Kot najboljša kombinacija skupine modelov in indikatorja suše se je izkazal MULTI + SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 27**).

Preglednica 27. Kakovost modelov glede na kombinacijo skupine modelov in indikatorja suše

Skupina modelov	Kazalnik suše	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
		Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
MULTI	SPI1_1_ST_KUM	1.023,7	6,2	1.167,0	6,3	3,96	0,04	6,25	0,12	12
MULTI	DEFICIT_ST150_KUM	1.024,6	4,6	1.166,1	4,5	4,10	0,05	6,23	0,08	12
MULTI	DEFICIT_KUM	1.034,9	4,2	1.164,5	4,3	4,12	0,08	6,20	0,08	12
INTERAKCIJE	SPI1_1_ST_KUM	1.036,3	14,4	1.113,5	11,8	2,74	0,09	4,82	0,15	12
INTERAKCIJE	DEFICIT_ST150_KUM	1.047,9	6,3	1.112,4	6,7	2,73	0,09	4,79	0,08	12
BREZ_FAKTOR	SPI1_1_ST_KUM	1.131,5	7,8	1.187,7	7,8	4,66	0,19	6,79	0,24	12
BREZ_FAKTOR	DEFICIT_ST150_KUM	1.140,9	6,8	1.197,5	7,8	4,67	0,15	6,77	0,19	12
BREZ_FAKTOR	DEFICIT_KUM	1.147,7	5,9	1.194,9	8,2	4,66	0,19	6,67	0,23	12
METEO	SPI1_1_ST_KUM	1.161,4	6,3	1.194,4	6,2	4,00	0,05	6,35	0,13	12
METEO	DEFICIT_ST150_KUM	1.165,9	4,0	1.197,3	3,9	4,05	0,09	6,35	0,10	12
SUŠA	SPI1_1_ST_KUM	1.175,8	5,0	1.185,8	4,9	4,00	0,05	6,44	0,11	12
METEO	DEFICIT_KUM	1.176,4	4,6	1.196,4	5,1	4,03	0,07	6,30	0,07	12
SUŠA	DEFICIT_ST150_KUM	1.184,1	2,0	1.192,2	2,1	3,91	0,06	6,34	0,05	12
SUŠA	DEFICIT_KUM	1.195,4	1,9	1.191,8	2,1	3,89	0,06	6,29	0,03	12
INTERAKCIJE	DEFICIT_KUM	1.241,5	6,9	1.113,6	8,6	2,76	0,14	4,81	0,11	12

3.3.1.2 Napoved poškodovanosti krošnje navadne buke v Sloveniji zaradi bolezni do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb

Napoved poškodovanosti krošnje navadne buke v Sloveniji zaradi bolezni smo naredili samo za lokacije traktov na sistematični mreži 16 × 16 km, kjer se pojavlja bukev. Ker modelov nismo prostorsko ekstrapolirali izven traktov, smo se odločili, da uporabimo najboljšo skupino modelov METEO, kjer smo upoštevali vse meteorološke spremenljivke in indikator sušnega stresa SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 28**).

Preglednica 28. Modeli za poškodovanost krošnje buke zaradi bolezni za dva scenarija izpustov toplogrednih plinov (RCP) in šest GCM-RCM

RCP	GCM-RCM	Model
RCP4.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMCOM-CCLM4	$-114.711 + 0.64578 * SPI1_1_ST_KUM - 1004.15 * HUSS - 0.00366245 * PR + 0.0673584 * RSDS - 0.232368 * SFCWIND - 3.11721 * TASMAY + 1.72269 * TASMAY + 1.21094 * RH + 0.058007 * EVSPSBLPOT$
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	$-58.0503 + 0.328609 * SPI1_1_ST_KUM - 13977.9 * HUSS - 0.00128245 * PR + 0.474361 * RSDS - 0.295625 * SFCWIND + 2.02277 * TASMAY + 3.36849 * TASMAY + 0.954233 * RH - 0.0615433 * EVSPSBLPOT$
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	$39.2435 + 0.359932 * SPI1_1_ST_KUM - 2209.21 * HUSS + 9.50303E-005 * PR - 0.21573 * RSDS + 0.0423197 * SFCWIND - 0.888714 * TASMAY + 1.41336 * TASMAY + 0.00872125 * RH + 0.0146139 * EVSPSBLPOT$
	MOHC-HADGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	$-80.0685 + 0.489986 * SPI1_1_ST_KUM + 5535.63 * HUSS - 0.00340923 * PR - 0.110459 * RSDS - 0.922973 * SFCWIND + 2.40661 * TASMAY - 3.7615 * TASMAY + 0.49133 * RH + 0.0124931 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMCOM-CCLM4	$-76.6035 + 0.692569 * SPI1_1_ST_KUM - 6802.04 * HUSS + 0.0012345 * PR + 0.107198 * RSDS - 0.587696 * SFCWIND - 2.63284 * TASMAY + 1.67074 * TASMAY + 0.866781 * RH + 0.0662594 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	$-99.319 + 0.589059 * SPI1_1_ST_KUM - 982.495 * HUSS + 0.000984003 * PR + 0.0295946 * RSDS - 0.569939 * SFCWIND + 0.936053 * TASMAY - 3.27592 * TASMAY + 0.835346 * RH + 0.0369194 * EVSPSBLPOT$
RCP8.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMCOM-CCLM4	$-85.4669 + 0.406925 * SPI1_1_ST_KUM - 2061.58 * HUSS - 0.00314982 * PR + 0.188135 * RSDS + 0.173545 * SFCWIND + 2.07423 * TASMAY + 0.255362 * TASMAY + 0.791054 * RH - 0.0356862 * EVSPSBLPOT$
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	$-68.4357 + 0.301776 * SPI1_1_ST_KUM - 7845.09 * HUSS - 0.00129474 * PR + 0.192504 * RSDS - 0.82875 * SFCWIND - 0.636841 * TASMAY + 0.378287 * TASMAY + 1.07495 * RH + 0.0298011 * EVSPSBLPOT$
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	$5.76276 + 0.325555 * SPI1_1_ST_KUM - 4563.94 * HUSS + 0.000690854 * PR - 0.0227635 * RSDS - 0.10027 * SFCWIND - 1.74661 * TASMAY + 4.36782 * TASMAY + 0.309674 * RH + 0.000176512 * EVSPSBLPOT$
	MOHC-HADGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	$-62.2284 + 0.265089 * SPI1_1_ST_KUM + 1638.26 * HUSS + 0.00353644 * PR - 0.091608 * RSDS - 0.191303 * SFCWIND + 0.293185 * TASMAY - 1.2533 * TASMAY + 0.322634 * RH + 0.0496732 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMCOM-CCLM4	$-137.69 + 0.455246 * SPI1_1_ST_KUM - 5396.83 * HUSS + 0.0014117 * PR + 0.47328 * RSDS + 0.389291 * SFCWIND + 3.00004 * TASMAY + 0.427576 * TASMAY + 0.866096 * RH - 0.0289383 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	$-132.15 + 0.450266 * SPI1_1_ST_KUM - 2977.43 * HUSS - 0.00292598 * PR + 0.116633 * RSDS + 1.5207 * SFCWIND + 0.949121 * TASMAY + 0.787017 * TASMAY + 1.02707 * RH + 0.0122469 * EVSPSBLPOT$

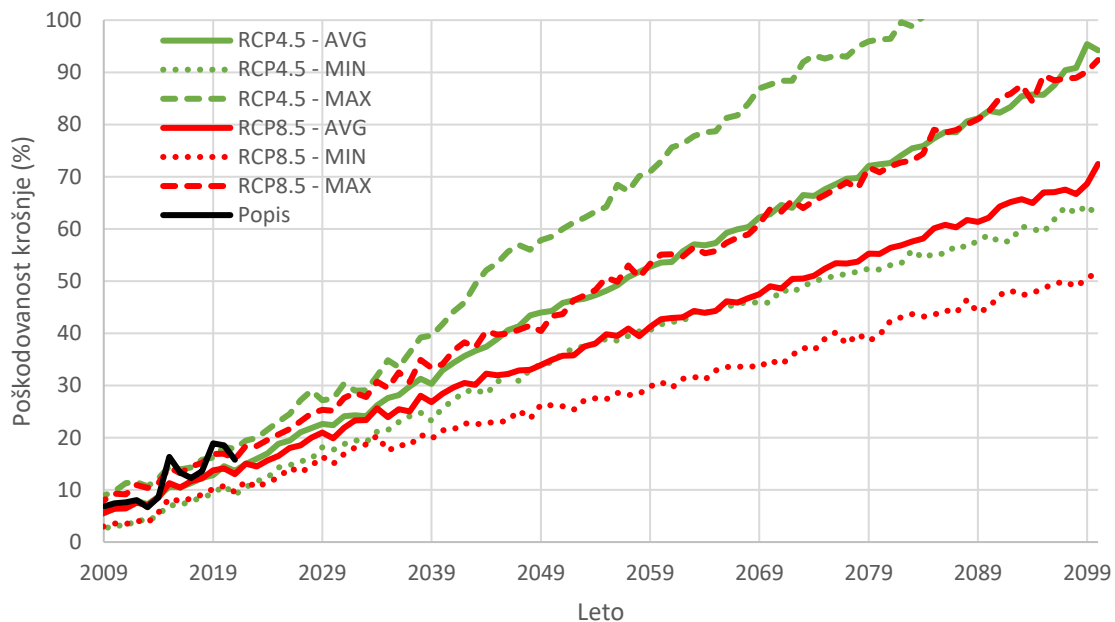
Napoved povprečne poškodovanosti bukove krošnje zaradi bolezni glede na šest GCM in dva RCP za leto 2021 je znašala 13,0–13,6 % kar je nekoliko manj kot je bila dejanska poškodovanost bukove krošnje zaradi bolezni iz popisa, tj. 15,8 % (**Slika 16**). Vendar vrednost s popisa je bila znotraj intervala napovedanih vrednosti.

Napoved povprečne poškodovanosti buke zaradi bolezni glede na šest GCM za leto 2050 je znašala 34,9–44,3 %, pri čemer je napoved za RCP8.5 bila manjša kot za RCP4.5. Razpon možnih vrednosti je bil za leto 2050 večji in je znašal 26,2–58,4 % (**Slika 16**).

Na koncu 21. stoletja je razlika med RCP4.5 in RCP8.5 še večja. Povprečna napovedana poškodovanost buke zaradi bolezni za leto 2100 za RCP8.5 je znašala 72,4 % in za RCP4.5 94,2 % (**Slika 16**).

Povprečna maksimalna vrednost za RCP8.5 se približno ujema s trendom povprečne poškodovanosti

bukve za RCP4.5. Po scenariju RCP4.5 bi povprečna maksimalna poškodovanost bukve presegla 100 % leta 2084.



Slika 16. Napoved povprečne poškodovanosti bukove krošnje zaradi bolezni glede na šest GCM in dva RCP za obdobje 2009–2100

Napoved predvideva pozitiven linearni trend večanja poškodovanosti bukve zaradi bolezni. Model napoveduje najmanjšo povprečno poškodovanost bukve zaradi bolezni 26,2 % za leto 2050 in 51,7 % za leto 2100. Bolj verjeten scenarij razvoja je RCP4.5, ki pa za leto 2050 napoveduje povprečno poškodovanost bukve zaradi bolezni 44,3 %, za leto 2100 pa že 94,2 %. Model napoveduje zelo pomemben vpliv bolezni na poškodovanost bukve v prihodnosti. To se sklada z izvedenskim mnenjem Ogris in sod. (2008), da bo vpliv bolezni na zdravje bukve v prihodnosti povečan. Kljub temu menimo, da so napovedi modelov razmeroma nezanesljive, ker slonijo na relativno kratki časovni vrsti 12 let.

Zanimivo je, da je scenarij RCP8.5 predvidel počasnejšo rast kot RCP4.5, saj RCP8.5 predvideva večjo koncentracijo CO₂ in posledično višje temperature zraka kot RCP4.5.

3.3.2 Poškodovanost krošnje bukve zaradi žuželk

3.3.2.1 Modeli

Razvili smo 180 modelov. Najboljša skupina modelov je bila tista, ki je vključevala vse spremenljivke (MULTI; **Preglednica 29**). Ta skupina je imela v povprečju najmanjši REML in AIC. Nekoliko je izstopala tudi skupina INTERAKCIJE, ker je imela najmanjši povprečni MAE in RMSE vendar glede na kriterij REML pa je bila ta skupina najslabša.

Modele smo razvili samo za 33 traktov. Zato kategorične talne spremenljivke niso pokrile vseh možnih vrednosti, kjer se lahko bukev pojavlja. Zato so modeli, ki vključujejo kategorične spremenljivke, uporabni samo za napovedovanje na nivoju trakta in jih ni mogoče uporabiti za ekstrapolacijo na območje cele Slovenije. Spremenljivki FC in BR15 temeljita na tabelarnih vrednostih (Knisel in Davis, 2000), zato sta verjetno precej nezanesljivi.

Preglednica 29. Kakovost modelov glede na skupino neodvisnih spremenljivk

Skupina	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
MULTI	1.391,3	8,2	1.503,5	5,9	2,09	0,04	3,88	0,04	36
BREZ_FAKTOR	1.498,1	9,5	1.504,7	8,2	2,27	0,05	4,10	0,06	36
METEO	1.508,9	7,6	1.519,6	4,5	2,11	0,04	3,98	0,03	36
SUŠA	1.511,1	7,0	1.512,0	1,0	2,06	0,01	3,96	0,00	36
INTERAKCIJE	1.713,3	174,8	1.535,2	6,9	1,85	0,04	3,65	0,04	36

Poškodovanost krošnje buke zaradi žuželk je najbolje pojasnjeval kazalnik suše SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 30**).

Preglednica 30. Kakovost modelov glede na kazalnik suše

Kazalnik suše	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
SPI1_1_ST_KUM	1.493,7	64,5	1.514,1	13,7	2,07	0,14	3,91	0,15	60
DEFICIT_ST150_KUM	1.499,8	68,7	1.515,4	13,0	2,08	0,14	3,92	0,16	60
DEFICIT_KUM	1.580,2	194,7	1.515,5	12,5	2,08	0,14	3,92	0,16	60

Kot najboljša kombinacija skupine modelov in indikatorja suše se je izkazal MULTI + SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 31**).

Preglednica 31. Kakovost modelov glede na kombinacijo skupine modelov in indikatorja suše

Skupina modelov	Kazalnik suše	REML		AIC		MAE		RMSE		Št. modelov
		Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	Povp.	St. odkl.	
MULTI	SPI1_1_ST_KUM	1.385,9	5,4	1.502,4	5,9	2,07	0,04	3,87	0,04	12
MULTI	DEFICIT_ST150_KUM	1.388,1	5,5	1.503,9	6,1	2,09	0,05	3,88	0,04	12
MULTI	DEFICIT_KUM	1.400,0	5,4	1.504,2	6,0	2,10	0,05	3,88	0,04	12
BREZ_FAKTOR	SPI1_1_ST_KUM	1.491,6	6,9	1.502,6	8,4	2,26	0,04	4,10	0,06	12
BREZ_FAKTOR	DEFICIT_ST150_KUM	1.495,6	6,8	1.505,7	8,3	2,28	0,05	4,10	0,06	12
METEO	SPI1_1_ST_KUM	1.502,9	3,7	1.518,9	4,2	2,09	0,04	3,97	0,03	12
SUŠA	SPI1_1_ST_KUM	1.504,2	1,1	1.511,0	1,2	2,05	0,01	3,96	0,01	12
METEO	DEFICIT_ST150_KUM	1.505,8	4,2	1.519,7	5,0	2,12	0,03	3,99	0,03	12
BREZ_FAKTOR	DEFICIT_KUM	1.507,2	6,9	1.505,6	8,3	2,28	0,05	4,10	0,06	12
SUŠA	DEFICIT_ST150_KUM	1.508,6	0,2	1.512,5	0,1	2,07	0,00	3,96	0,00	12
METEO	DEFICIT_KUM	1.517,9	3,9	1.520,3	4,7	2,12	0,03	3,98	0,03	12
SUŠA	DEFICIT_KUM	1.520,4	0,1	1.512,6	0,0	2,07	0,00	3,96	0,00	12
INTERAKCIJE	SPI1_1_ST_KUM	1.583,8	22,3	1.535,8	6,8	1,85	0,04	3,66	0,04	12
INTERAKCIJE	DEFICIT_ST150_KUM	1.600,7	18,4	1.535,2	8,1	1,85	0,04	3,65	0,06	12
INTERAKCIJE	DEFICIT_KUM	1.955,4	18,7	1.534,6	6,1	1,85	0,04	3,65	0,04	12

3.3.2.2 Napoved poškodovanosti krošnje navadne buke v Sloveniji zaradi žuželk do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb

Napoved poškodovanosti krošnje navadne buke v Sloveniji zaradi žuželk smo naredili samo za lokacije traktov na sistematični mreži 16 × 16 km, kjer se pojavlja bukev. Ker modelov nismo prostorsko ekstrapolirali izven traktov, smo se odločili, da uporabimo najboljšo skupino modelov METEO, kjer smo upoštevali vse meteorološke spremenljivke in indikator sušnega stresa SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 32**).

Preglednica 32. Modeli za poškodovanost krošnje buke zaradi žuželk za dva scenarija izpustov toplogrednih plinov (RCP) in šest GCM-RCM

RCP	GCM-RCM	Model
RCP4.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMCOM-CCLM4	$-60.9396 - 0.0719116 * SPI1_1_ST_KUM + 1646.26 * HUSS + 0.00157288 * PR + 0.194784 * RSDS + 0.187614 * SFCWIND - 0.726857 * TASMAY - 0.282262 * TASMAY + 0.442905 * RH + 0.0112893 * EVSPSBLPOT$

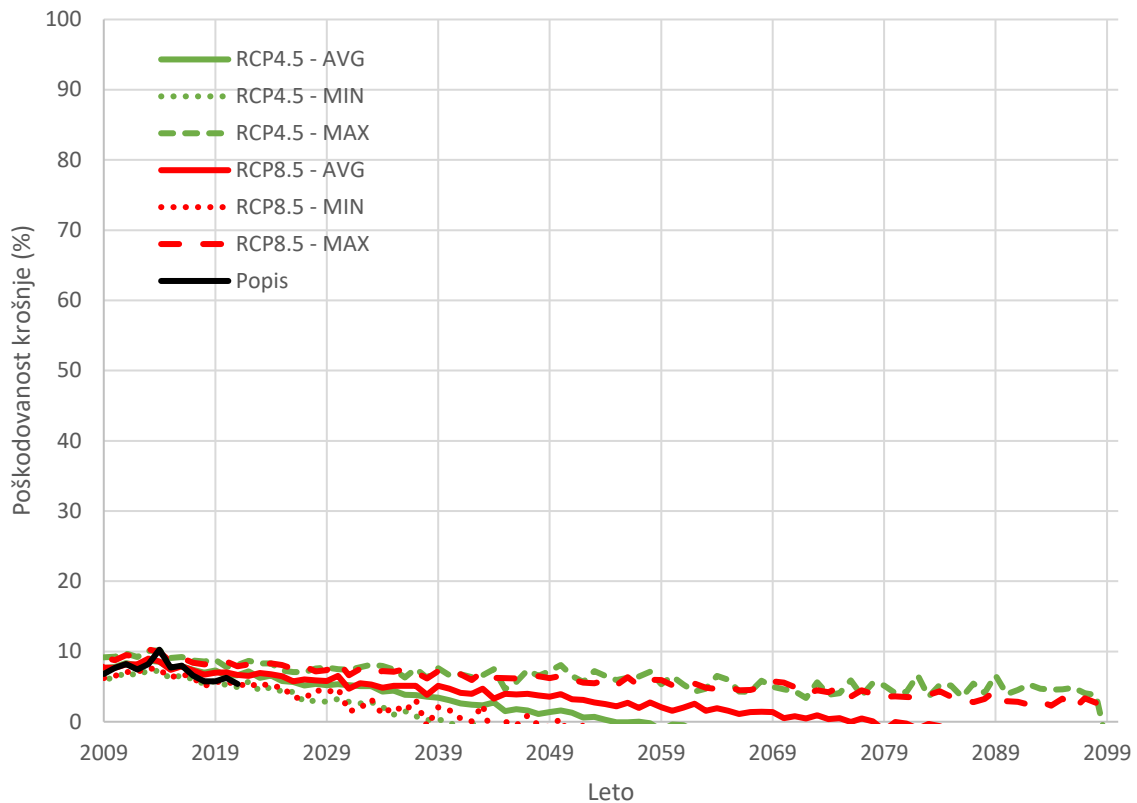
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	$27.2205 - 0.0713267 * SPI1_1_ST_KUM + 2426.97 * HUSS + 0.000526722 * PR - 0.043409 * RSDS + 0.257453 * SFCWIND - 0.534964 * TASMAY + 0.308304 * TASMAY - 0.281361 * RH - 0.00197345 * EVSPSBLPOT$
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	$-1.8281 - 0.122906 * SPI1_1_ST_KUM + 1160.66 * HUSS - 0.00176268 * PR + 0.052602 * RSDS - 0.261228 * SFCWIND + 0.0943189 * TASMAY - 0.349837 * TASMAY + 0.146432 * RH - 0.00733114 * EVSPSBLPOT$
	MOHC-HADGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	$19.6749 - 0.0120197 * SPI1_1_ST_KUM - 4376.82 * HUSS - 0.00198867 * PR + 0.00616613 * RSDS - 0.0440546 * SFCWIND - 1.64652 * TASMAY + 2.18664 * TASMAY + 0.328959 * RH + 0.00728228 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMCOM-CCLM4	$-47.55 - 0.177292 * SPI1_1_ST_KUM + 1380.24 * HUSS - 0.000967504 * PR + 0.2589 * RSDS - 0.153609 * SFCWIND + 0.674881 * TASMAY + 0.0158634 * TASMAY + 0.356762 * RH - 0.0212136 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	$-64.6976 - 0.119661 * SPI1_1_ST_KUM + 1594.38 * HUSS + 0.000864423 * PR + 0.287635 * RSDS + 0.331642 * SFCWIND - 1.05447 * TASMAY + 1.5013 * TASMAY + 0.301094 * RH - 0.00565349 * EVSPSBLPOT$
RCP8.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMCOM-CCLM4	$41.3243 - 0.0403885 * SPI1_1_ST_KUM - 1206.74 * HUSS + 0.000207592 * PR + 0.00761416 * RSDS - 0.352558 * SFCWIND - 0.544429 * TASMAY + 1.19236 * TASMAY - 0.211096 * RH - 0.00550728 * EVSPSBLPOT$
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	$28.3185 - 0.0396356 * SPI1_1_ST_KUM + 137.083 * HUSS + 0.00203934 * PR + 0.0749683 * RSDS + 0.11389 * SFCWIND + 1.06971 * TASMAY + 0.0873487 * TASMAY - 0.278085 * RH - 0.0427381 * EVSPSBLPOT$
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	$-26.031 - 0.0630898 * SPI1_1_ST_KUM + 678.284 * HUSS + 0.000170641 * PR + 0.249467 * RSDS - 0.11388 * SFCWIND + 0.190631 * TASMAY + 0.0771605 * TASMAY - 0.0436115 * RH - 0.0160691 * EVSPSBLPOT$
	MOHC-HADGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	$-20.2887 - 0.0677919 * SPI1_1_ST_KUM + 3993.19 * HUSS - 0.000509521 * PR + 0.0466522 * RSDS - 0.247902 * SFCWIND - 0.0618964 * TASMAY - 1.16402 * TASMAY + 0.0647942 * RH + 0.00420813 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMCOM-CCLM4	$12.6683 - 0.136821 * SPI1_1_ST_KUM + 708.364 * HUSS - 0.000649281 * PR - 0.0679644 * RSDS - 0.102148 * SFCWIND + 0.0543977 * TASMAY - 0.127771 * TASMAY + 0.178301 * RH - 0.00988344 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	$53.5872 - 0.055851 * SPI1_1_ST_KUM - 917.502 * HUSS + 0.00157624 * PR - 0.00552866 * RSDS - 0.605896 * SFCWIND - 0.719067 * TASMAY + 1.26034 * TASMAY - 0.23379 * RH - 0.0136851 * EVSPSBLPOT$

Napoved povprečne poškodovanosti bukove krošnje zaradi žuželk glede na šest GCM in dva RCP za leto 2021 je znašala 6,6 % kar je malenkost več kot je bila dejanska poškodovanost bukove krošnje zaradi žuželk za to leto iz popisa, tj. 5,4 % (**Slika 17**). Vendar vrednost s popisa je bila znotraj intervala napovedanih vrednosti.

Napoved povprečne poškodovanosti bukve zaradi žuželk glede na šest GCM za leto 2050 je znašala 1,6–3,9 %, pri čemer je napoved za RCP8.5 bila večja kot za RCP4.5. Razpon možnih vrednosti je bil za leto 2050 večji in je znašal 0–6,5 % (**Slika 17**).

Napoved predvideva negativen linearni trend poškodovanosti bukve zaradi žuželk. Glede na povprečno napoved po scenariju RCP4.5 bi žuželke ne imele vpliva na poškodovanost bukve leta 2055, po scenariju RCP8.5 pa leta 2076. Scenarij RCP8.5 je predvidel počasnejšo padec kot RCP4.5, kar je logično. Tudi povprečne maksimalne napovedi scenarijev predvidevajo zmanjševanje poškodovanosti bukve zaradi žuželk. Menimo, da je to posledica kratke časovne vrste podatkov, na podlagi katerih smo razvili model.

Izvedensko mnenje je, da bodo škodljive žuželke imele močnejši vpliv na zdravje bukve v prihodnosti zaradi podnebnih sprememb (Ogris in sod., 2008). Zato menimo, da je modelska napoved na podlagi popisa poškodovanosti gozdov nezanesljiva in manj verjetna.



Slika 17. Napoved povprečne poškodovanosti bukove krošnje zaradi žuželk glede na šest GCM in dva RCP za obdobje 2009–2100

3.3.3 Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni

3.3.3.1 Modeli

Razvili smo 12 modelov GLM in 12 modelov s pomočjo metode strojnega učenja (Bagging z algoritmom M5¹). Povprečne vrednosti kazalnikov učinkovitosti GLM modelov so bile: $r = 0,122$, MAE = 0,309, RMSE = 1,847. Kakovost modelov z metodo strojnega učenja je bila boljša, tj. korelacijski koeficient je v povprečju znašal 0,261, vrednosti MAE in RMSE so bile nižje (**Preglednica 33**). Zato smo za napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni uporabili modele razvite z metodo Bagging in algoritmom M5¹.

Na splošno je bila kakovost modelov slaba, kar se izkazuje z relativno nizkim korelacijskim koeficientom in visoko relativno napako RAE (v povprečju 92,0 %) in RRSE (v povprečju 96,6 %).

Preglednica 33. Kakovost modelov (Bagging z M5¹) za varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni glede na RCP in GCM

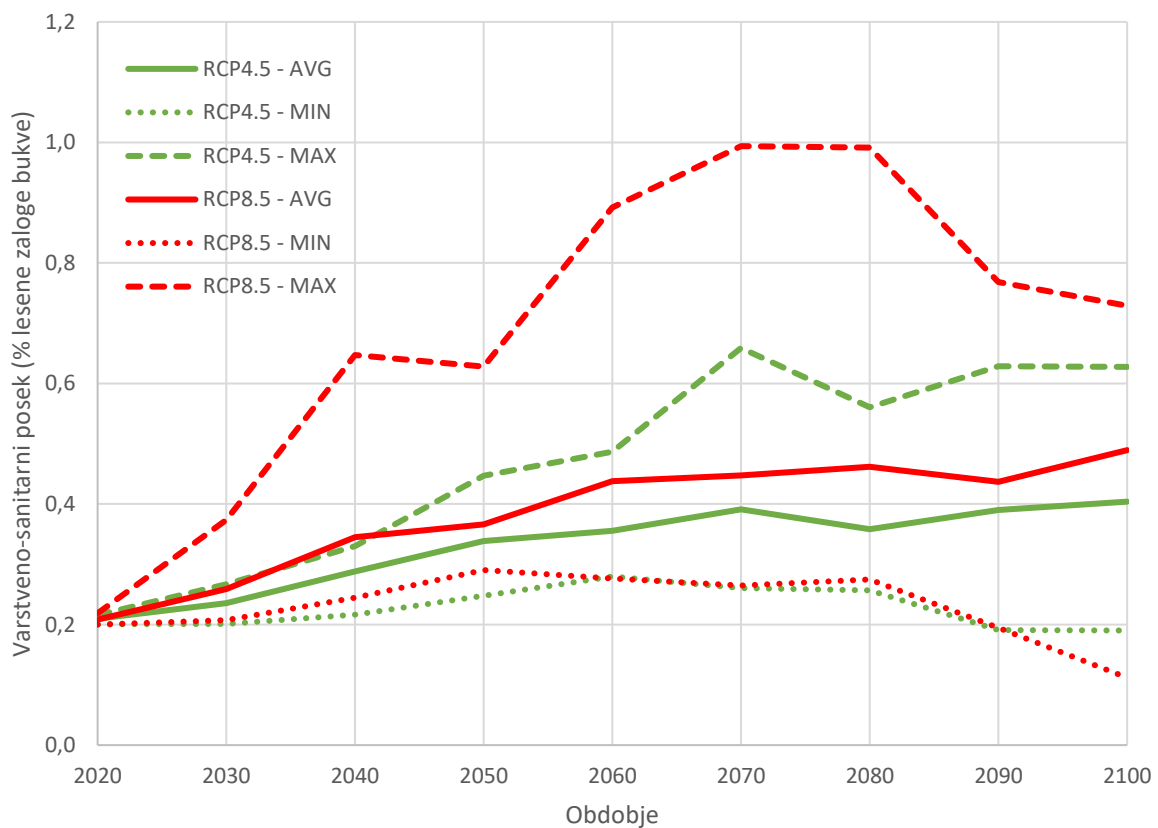
RCP	GCM	r	MAE	RMSE	RAE (%)	RRSE (%)
RCP4.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4	0,207	0,266	1,816	92,9	98,1
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	0,227	0,264	1,808	92,1	97,7
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	0,259	0,265	1,790	92,6	96,7
	MOHC-HadGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	0,342	0,262	1,748	91,6	94,5
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4	0,337	0,266	1,743	92,9	94,2
RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	0,198	0,262	1,820	91,6	98,4
	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4	0,334	0,262	1,747	91,5	94,4
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	0,316	0,263	1,756	91,8	94,9
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	0,255	0,261	1,789	91,2	96,7
	MOHC-HadGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	0,223	0,262	1,805	91,7	97,5
Povprečje		0,261	0,263	1,787	92,0	96,6

*Modeli so na voljo pri avtorju.

3.3.3.2 Napoved

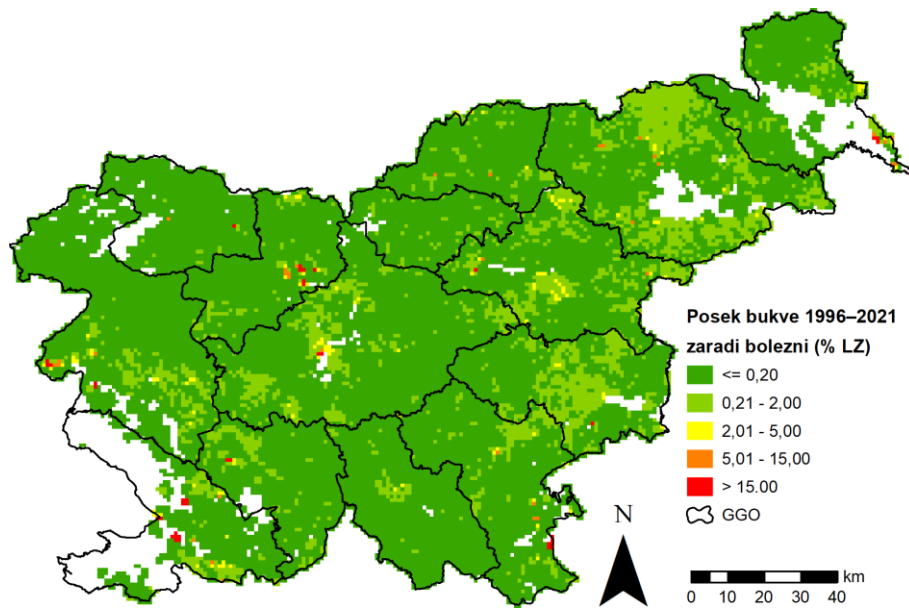
V obdobju 1996–2021 je bilo označenih bukev za varstveno-sanitarni posek zaradi bolezni v povprečju 0,21 % lesne zaloge bukve v modelski celici. Modelski izračun za obdobje 1991–2020 je predvidel enako povprečno vrednost (**Slika 18**), kar pomeni, da so modeli ocenili izhodiščno stanje kakovostno.

Oba scenarija RCP4.5 in RCP8.5 sta napovedala naraščajoči trend varstveno-sanitarnega poseka zaradi bolezni. Po scenariju RCP4.5 bo do konca 21. stoletja varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni v povprečju narasel na 0,40 % lesne zaloge bukve v modelski celici, po scenariju RCP8.5 pa na 0,49 % (**Slika 18**). Povprečne maksimalne vrednosti pa so dosegle 0,63 % za RCP4.5 in 0,73 % za RCP8.5.

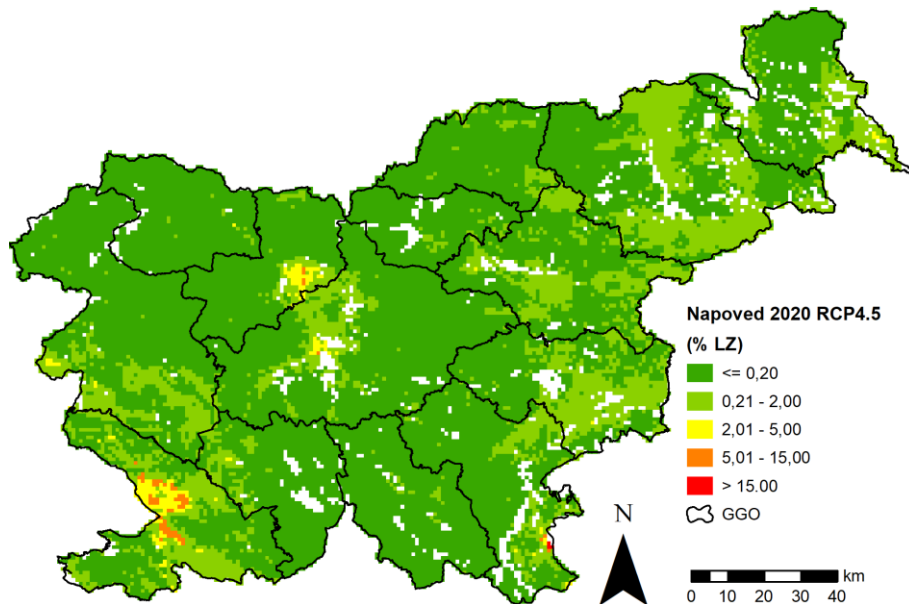


Slika 18. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni 2020–2100 glede na dva RCP (povprečje šest GCM za 30-letna obdobja; v deležu lesne zaloge bukve v modelski celici).

Po podatkih iz podatkovne zbirke Timber je bil največji delež varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni v obdobju 1996–2021 v GGO Sežana, Kranj in celotni vzhodni Sloveniji (**Slika 19**). Zelo podobno prostorsko razporeditev varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni je napovedal modelski izračun za obdobje 1991–2020 (**Slika 20**).

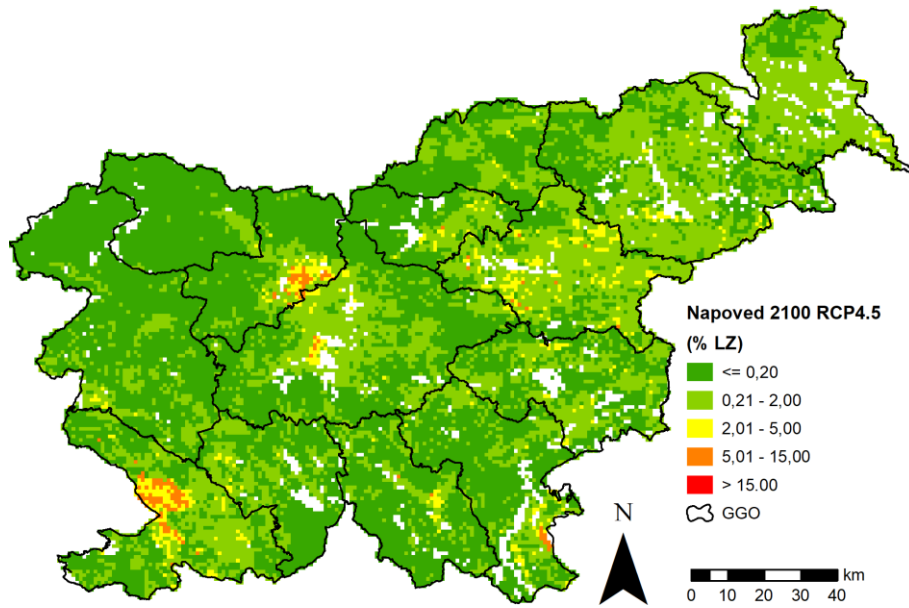


Slika 19. Varstveno sanitarni posek bukve zaradi bolezní 1996–2021 (v deležu lesne zaloge bukve v modelski celici)



Slika 20. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezní 1991–2020 glede na scenarij RCP4.5 in šest GCM (povprečna vrednost deleža lesne zaloge bukve v modelski celici)

Trend varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezní po GGO se načeloma ohrani do konca 21. stoletja (**Slika 21, Preglednica 34**), tj. tudi v obdobju 2071–2100 je modelski izračun napovedal, da bodo bolezní bukve predstavljale največji problem v GGO Sežana, Kranj in celotni vzhodni Sloveniji, tj. GGO Celje, Murska Sobota, Maribor, Novo mesto in Brežice. Največja variabilnost med lokacijami znotraj GGO v obdobju 2071–2100 je predvidena v GGO Sežana, Kranj, Celje in Novo mesto (**Preglednica 34**). Največje povprečne napovedi varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezní preko 13 % lesne zaloge bukve v modelski celici so predvidene v GGO Sežana, Novo mesto in Kranj.



Slika 21. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni 2071–2100 glede na scenarij RCP4.5 in šest GCM (povprečna vrednost deleža lesne zaloge bukve v modelski celici)

Primerjava med napovedjo za obdobje 1991–2020 in 2071–2100 je pokazala, da bodo največje spremembe varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni v GGO Nazarje (4,8 × več), Kočevje (4,1 × več), Celje (3,8 × več), Bled (3,1 × več), Slovenj Gradec (3,0 × več), Murska Sobota (2,5 × več) (**Preglednica 34**).

Preglednica 34. Statistika napovedi varstveno-sanitarnega poseka zaradi bolezni po gozdnogospodarskih območjih glede na povprečno napoved scenarija RCP4.5

GGO	Napoved 1991–2020			Napoved 2071–2100			Indeks
	AVG	SD	MAX	AVG	SD	MAX	
NAZARJE	0,08	0,07	0,73	0,38	0,60	5,33	4,79
KOČEVJE	0,05	0,05	0,55	0,22	0,54	7,46	4,12
CELJE	0,21	0,17	3,70	0,80	0,99	7,27	3,81
BLED	0,03	0,11	2,60	0,09	0,15	2,47	3,11
SLOVENJ GRADEC	0,09	0,10	0,79	0,27	0,35	3,80	2,99
MURSKA SOBOTA	0,23	0,28	3,61	0,57	0,47	2,39	2,51
KRANJ	0,25	0,70	8,35	0,59	1,48	13,12	2,39
POSTOJNA	0,11	0,16	2,81	0,25	0,38	4,58	2,24
LJUBLJANA	0,15	0,29	5,52	0,33	0,57	7,15	2,14
BREŽICE	0,20	0,12	2,01	0,37	0,52	3,75	1,83
MARIBOR	0,24	0,18	1,47	0,40	0,46	3,53	1,69
NOVO MESTO	0,24	1,29	27,87	0,37	0,92	13,23	1,56
SEŽANA	0,71	1,52	13,97	0,86	1,77	13,50	1,20
TOLMIN	0,15	0,30	4,43	0,14	0,32	4,34	0,94

*GGO = gozdnogospodarsko območje, AVG = povprečje, SD = standardni odklon, MAX = maksimum, Indeks = razmerje med povprečno napovedjo 1991–2020 in 2071–2100

3.3.4 Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk

3.3.4.1 Modeli

Razvili smo 12 modelov GLM in 12 modelov s pomočjo metode strojnega učenja (Bagging z algoritmom M5'). Povprečne vrednosti kazalnikov učinkovitosti GLM modelov so bile: $r = 0,078$, $MAE = 0,021$, $RMSE = 0,226$. Kakovost modelov z metodo strojnega učenja je podobna, tj. korelacijski koeficient je v povprečju znašal 0,066, vrednost MAE je bila za malenkost nižja (**Preglednica 35**). Zato

smo za napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni uporabili modele razvite z metodo Bagging in algoritmom M5'.

Na splošno je bila kakovost modelov slaba, kar se izkazuje z relativno nizkim korelacijskim koeficientom in visoko relativno napako RAE (v povprečju 101,9 %) in RRSE (v povprečju 100,8 %).

Preglednica 35. Kakovost modelov (Bagging z M5') za varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk glede na RCP in GCM

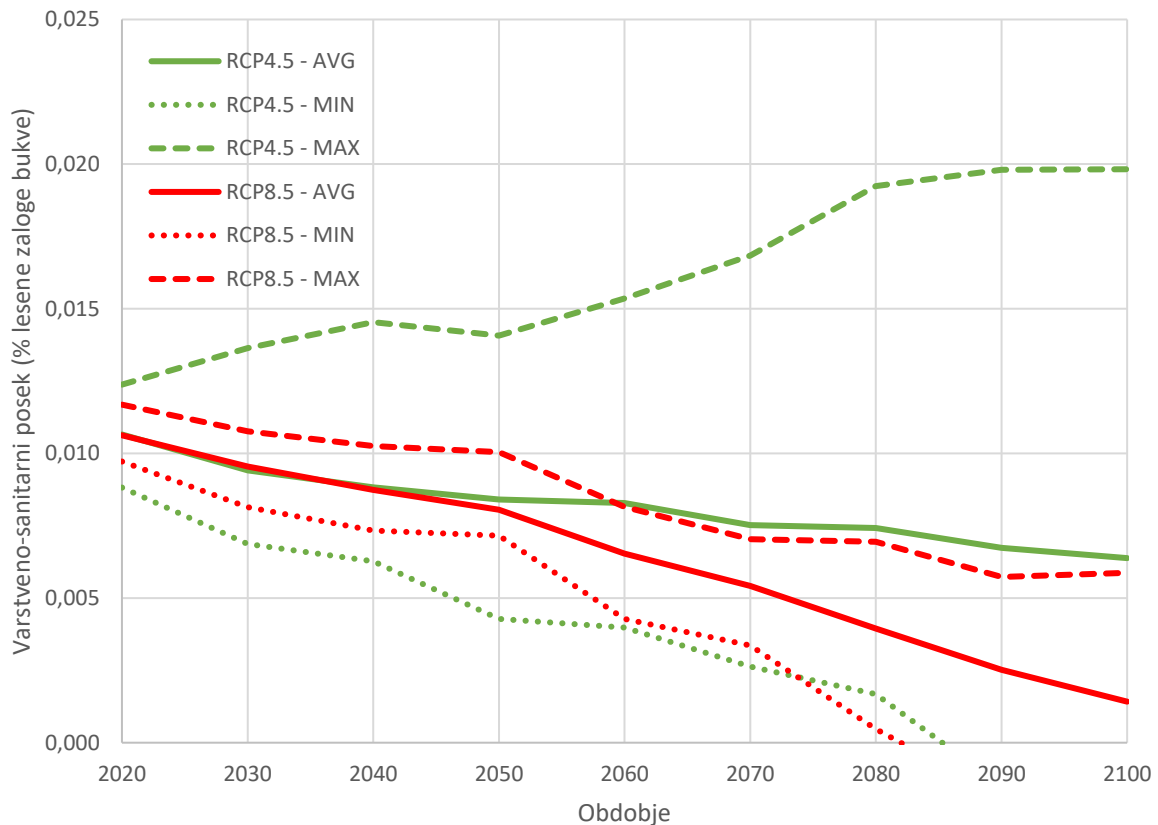
RCP	GCM	r	MAE	RMSE	RAE (%)	RRSE (%)
RCP4.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4	0,029	0,019	0,231	102,3	102,0
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	0,066	0,019	0,228	102,0	100,9
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	0,095	0,019	0,226	99,0	100,0
	MOHC-HadGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	0,067	0,019	0,228	99,9	100,6
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4	0,057	0,020	0,229	103,2	100,9
	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	0,075	0,019	0,228	101,4	100,6
RCP8.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4	0,071	0,020	0,228	103,2	100,7
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	0,024	0,020	0,231	104,9	101,8
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	0,136	0,019	0,225	100,5	99,5
	MOHC-HadGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	0,074	0,019	0,229	102,8	101,0
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4	0,056	0,020	0,229	103,6	101,2
	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	0,041	0,019	0,228	100,4	100,8
Povprečje		0,066	0,019	0,228	101,9	100,8

*Modeli so na voljo pri avtorju.

3.3.4.2 Napoved

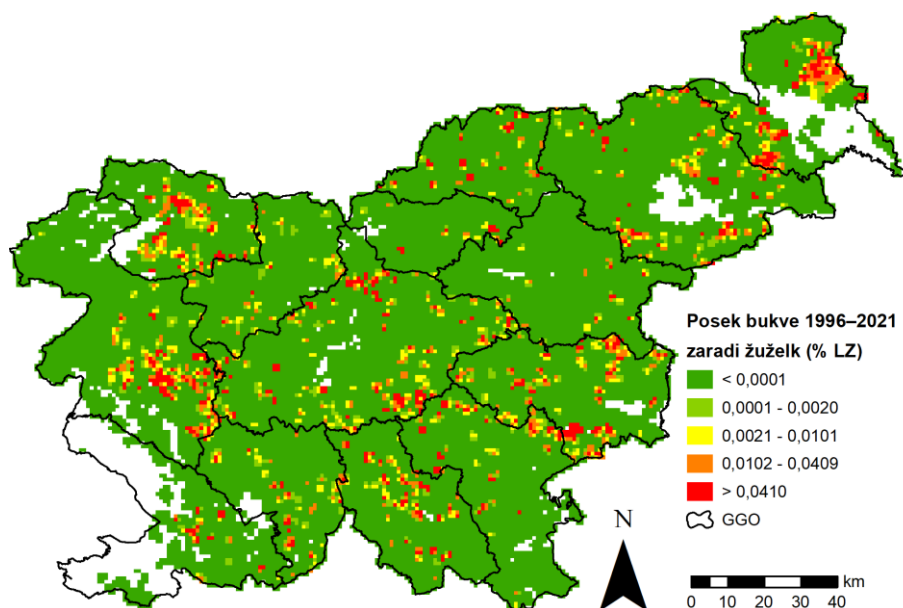
V obdobju 1996–2021 je bilo označenih bukev za varstveno-sanitarni posek zaradi žuželk v povprečju 0,01 % lesne zaloge bukve v modelski celici. Modelski izračun za obdobje 1991–2020 je predvidel enako povprečno vrednost (**Slika 22**), kar pomeni, da so modeli ocenili izhodiščno stanje kakovostno.

Oba scenarija RCP4.5 in RCP8.5 napovedujeta padajoči trend varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk. Po scenariju RCP4.5 bi do konca 21. stoletja varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v povprečju padel na 0,006 % lesne zaloge bukve v modelski celici, po scenariju RCP8.5 pa na 0,001 % (**Slika 22**). Po scenariju RCP8.5 bi prišlo hitrejšega upadanja varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk kot po scenariju RCP4.5.

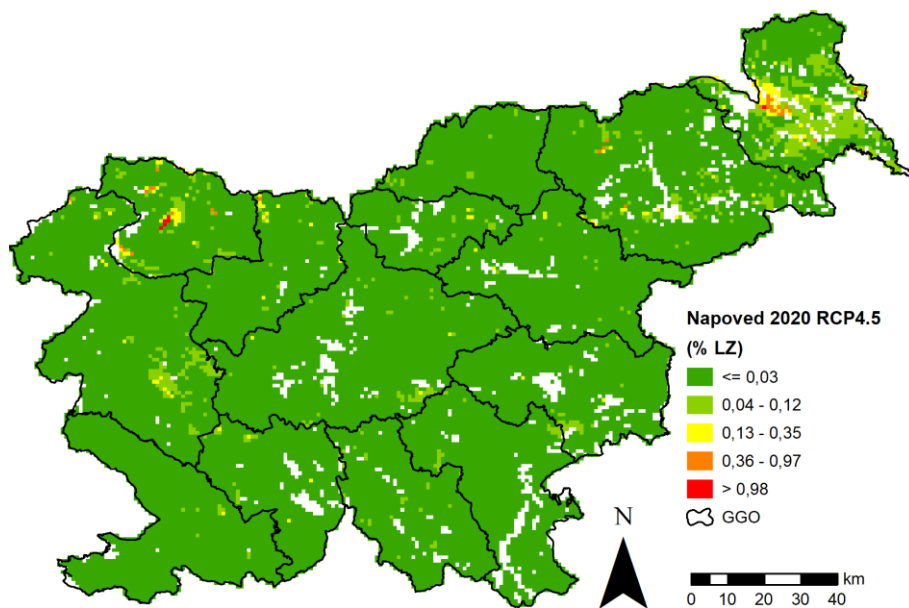


Slika 22. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk 2020–2100 glede na dva RCP (povprečje šest GCM za 30-letna obdobja; v deležu lesne zaloge bukve v modelski celici).

Po podatkih iz podatkovne zbirke Timber je bil varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v obdobju 1996–2021 razporejen lokalno po vsej Sloveniji (**Slika 23**). Največji povprečni varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk je bil zabeležen v GGO Bled in Murska Sobota z 0,04 % lesne zaloge bukve v modelski celici. Izstopala pa so tudi GGO Brežice, Tolmin in Maribor. Podobna prostorska razporeditev je bila ocenjena z modelskim izračunom za obdobje 1991–2020 (**Slika 24**).

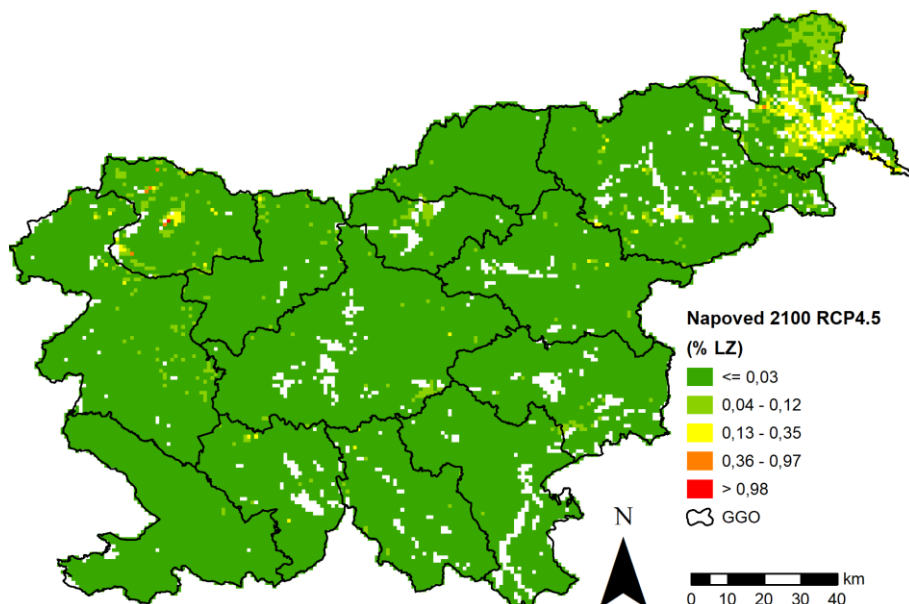


Slika 23. Varstveno sanitarni posek bukve zaradi žuželk 1996–2021 (v deležu lesne zaloge bukve v modelski celici)



Slika 24. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk 1991–2020 glede na scenarij RCP4.5 in šest GCM (povprečna vrednost deleža lesne zaloge bukve v modelski celici)

Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v obdobju 2071–2100 bo največji v GGO Murska Sobota in Bled glede na povprečno napoved po scenariju RCP4.5 in šest GCM (**Slika 25, Preglednica 36**), kar je podobno kot za referenčno obdobje 1991–2020. Primerjava med napovedjo za obdobje 1991–2020 in 2071–2100 je pokazala, da bodo največje spremembe varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk v GGO Murska Sobota (1,1 × več) in Nazarje (0,9 × več). Najmanjši povprečni varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v obdobju 2071–2100 je bil napovedan za GGO Novo mesto in Sežana. Največja variabilnost med lokacijami znotraj GGO v obdobju 2071–2100 je predvidena v GGO Bled in Murska Sobota.



Slika 25. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk 2071–2100 glede na scenarij RCP4.5 in šest GCM (povprečna vrednost deleža lesne zaloge bukve v modelski celici)

Preglednica 36. Statistika napovedi varstveno-sanitarnega poseka zaradi žuželk po gozdnogospodarskih območjih glede na povprečno napoved scenarija RCP4.5

GGO	Napoved 1991–2020			Napoved 2071–2100			Indeks
	AVG	SD	MAX	AVG	SD	MAX	
MURSKA SOBOTA	0,0466	0,0841	1,4138	0,0514	0,0662	0,4351	1,10
NAZARJE	0,0058	0,0147	0,1971	0,0054	0,0152	0,1433	0,94
KRANJ	0,0068	0,0284	0,4216	0,0040	0,0133	0,2496	0,59
BLED	0,0340	0,1628	2,7446	0,0183	0,0714	1,2406	0,54
TOLMIN	0,0099	0,0244	0,7483	0,0051	0,0179	0,6214	0,51
MARIBOR	0,0101	0,0281	0,6726	0,0051	0,0181	0,2203	0,51
SLOVENJ GRADEC	0,0045	0,0091	0,0824	0,0018	0,0098	0,1117	0,40
BREŽICE	0,0073	0,0116	0,1772	0,0025	0,0088	0,0994	0,34
CELJE	0,0044	0,0109	0,2229	0,0015	0,0088	0,1794	0,34
KOCEVJE	0,0071	0,0085	0,0944	0,0024	0,0102	0,2061	0,34
POSTOJNA	0,0070	0,0158	0,3061	0,0021	0,0141	0,2568	0,29
LJUBLJANA	0,0062	0,0103	0,2263	0,0018	0,0097	0,2267	0,29
NOVO MESTO	0,0048	0,0079	0,0771	-0,0004	0,0053	0,0472	-0,09
SEŽANA	0,0031	0,0067	0,1544	-0,0017	0,0038	0,0435	-0,55

*GGO = gozdnogospodarsko območje, AVG = povprečje, SD = standardni odklon, MAX = maksimum, Indeks = razmerje med povprečno napovedjo 1991–2020 in 2071–2100

3.4 Zaključki

Razvili smo modele o vplivu bolezni in škodljivcev na hiranje navadne bukve ter napovedali vpliv bolezni in škodljivcev na hiranje bukve v Sloveniji do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb. Za oceno vpliva bolezni in škodljivcev na hiranje bukve smo izbrali dva kazalca: (1) obseg poškodb dreves; (2) varstveno-sanitarni posek.

Glede na podatke o poškodovanosti dreves iz spremljanja stanja gozdov na sistematični mreži 16 × 16 km, so v zadnjem obdobju 2020–2021 najpomembnejši abiotični dejavniki, bolezni in drugi dejavniki. Bolezni so kazale naraščajoči trend poškodovanosti bukve v obdobju 2009–2021; v letu 2021 so povzročile povprečno 15,8 % poškodovanost bukve. Žuželke pa so imele padajoči trend in so obdobju 2016–2021 povzročile najmanjšo povprečno poškodovanost krošnje bukve izmed vseh kategorij škodljivih dejavnikov; v letu 2021 so žuželke povzročile povprečno 5,4 % poškodovanost bukve.

Varstvo-sanitarni posek bukve zaradi bolezni v obdobju 1996–2021 je obsegal samo 0,005–0,009 % v deležu lesne zaloge bukve na leto. Trend poseka zaradi bolezni je v naraščanju. Varstvo-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v obdobju 1996–2021 je obsegal izjemno malo, v povprečju 0,0002 % v deležu lesne zaloge bukve na leto. Trend poseka bukve zaradi žuželk je v upadanju.

Za oceno poškodovanosti krošnje bukve zaradi bolezni in žuželk smo razvili po 180 modelov za pet različnih skupin spremenljivk. Najboljša skupina modelov je bila tista, ki je vključevala vse spremenljivke. Modele smo razvili samo za 33 traktov. Napoved poškodovanosti krošnje navadne bukve v Sloveniji zaradi bolezni in žuželk smo naredili samo za lokacije traktov na sistematični mreži 16 × 16 km, kjer se pojavlja bukev. Ker modelov nismo prostorsko ekstrapolirali izven traktov, smo se odločili, da uporabimo najboljšo skupino modelov METEO, kjer smo upoštevali vse meteorološke spremenljivke in indikator sušnega stresa SPI1_1_ST_KUM.

Napoved predvideva pozitiven linearni trend večanja poškodovanosti bukve zaradi bolezni. Modelska napoved po scenariju RCP4.5 za leto 2050 predvideva povprečno poškodovanost bukve zaradi bolezni 44,3 %, za leto 2100 pa že 94,2 %. Model napoveduje zelo pomemben vpliv bolezni na poškodovanost bukve v prihodnosti. To se sklada z izvedenskim mnenjem Ogris in sod. (2008),

da bo vpliv bolezni na zdravje bukve v prihodnosti povečan. Kljub temu menimo, da so napovedi modelov razmeroma nezanesljive, ker slonijo na relativno kratki časovni vrsti 12 let.

Napoved povprečne poškodovanosti bukve zaradi žuželk glede na šest GCM za leto 2050 je znašala 1,6–3,9 %, pri čemer je napoved za RCP8.5 bila večja kot za RCP4.5. Razpon možnih vrednosti je bil za leto 2050 večji in je znašal 0–6,5 %. **Napoved predvideva negativen linearni trend poškodovanosti bukve zaradi žuželk. Glede na povprečno napoved po scenariju RCP4.5 bi žuželke ne imele vpliva na poškodovanost bukve leta 2055, po scenariju RCP8.5 pa leta 2076. Scenarij RCP8.5 je predvidel počasnejšo padec kot RCP4.5, kar je logično. Tudi povprečne maksimalne napovedi scenarijev predvidevajo zmanjševanje poškodovanosti bukve zaradi žuželk.** Menimo, da je to verjetno posledica kratke časovne vrste podatkov, na podlagi katerih smo razvili model. **Modelska napoved je v nasprotju z izvedenskim mnenjem, da bodo škodljive žuželke imele močnejši vpliv na zdravje bukve v prihodnosti zaradi podnebnih sprememb (Ogris in sod., 2008). Zato menimo, da je modelska napoved na podlagi popisa poškodovanosti gozdov nezanesljiva in manj verjetna.**

Za napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni smo uporabili modele razvite z metodo Bagging in algoritmom M5'. Na splošno je bila kakovost modelov slaba, kar se izkazuje z relativno nizkim korelacijskim koeficientom ($r = 0,26$) in visoko relativno napako RAE (v povprečju 92,0 %) in RRSE (v povprečju 96,6 %).

Oba scenarija RCP4.5 in RCP8.5 sta napovedala naraščajoči trend varstveno-sanitarnega poseka zaradi bolezni. Po scenariju RCP4.5 bo do konca 21. stoletja varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni v povprečju narasel na 0,40 % lesne zaloge bukve v modelski celici, po scenariju RCP8.5 pa na 0,49 %. Povprečne maksimalne vrednosti pa so dosegle 0,63 % za RCP4.5 in 0,73 % za RCP8.5.

V obdobju 2071–2100 je modelski izračun napovedal, da bodo bolezni bukve predstavljale največji problem v GGO Sežana, Kranj in celotni vzhodni Sloveniji, tj. GGO Celje, Murska Sobota, Maribor, Novo mesto in Brežice. Največje povprečne napovedi varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni preko 13 % lesne zaloge bukve v modelski celici so predvidene v GGO Sežana, Novo mesto in Kranj. Primerjava med napovedjo za obdobje 1991–2020 in 2071–2100 je pokazala, da bodo največje spremembe varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi bolezni v GGO Nazarje (4,8 × več), Kočevje (4,1 × več), Celje (3,8 × več), Bled (3,1 × več), Slovenj Gradec (3,0 × več), Murska Sobota (2,5 × več).

Glede na rezultate modelov varstveno-sanitarne sečnje bukve zaradi bolezni na splošno ni pričakovati bistvenega vpliva bolezni na zmanjševanje lesne zaloge bukve v Sloveniji, razen morda na ožjih območjih, kjer je možnost sušnega in vročinskega stresa največja.

Kakovost modelov za varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk je bila še slabša od modelov za bolezni, kar se izkazuje z relativno nizkim korelacijskim koeficientom ($r = 0,06$) in visoko relativno napako RAE (v povprečju 101,9 %) in RRSE (v povprečju 100,8 %).

Oba scenarija RCP4.5 in RCP8.5 napovedujeta padajoči trend varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk, kar je v nasprotju z izvedenskim mnenjem (Ogris in sod., 2008). Po scenariju RCP4.5 bi do konca 21. stoletja varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v povprečju padel na 0,006 % lesne zaloge bukve v modelski celici, po scenariju RCP8.5 pa na 0,001 %, kar je zanemarljivo. Po scenariju RCP8.5 bi prišlo hitrejšega upadanja varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk kot po scenariju RCP4.5.

Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v obdobju 2071–2100 bo največji v GGO Murska Sobota in Bled glede na povprečno napoved po scenariju RCP4.5 in šest GCM, kar je podobno kot za

referenčno obdobje 1991–2020. **Primerjava med napovedjo za obdobje 1991–2020 in 2071–2100 je pokazala, da bodo največje spremembe varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk v GGO Murska Sobota (1,1 × več) in Nazarje (0,9 × več).**

Glede na rezultate modelov varstveno-sanitarne sečnje bukve zaradi žuželk na splošno ni pričakovati bistvenega vpliva žuželk na zmanjševanje lesne zaloge bukve v Sloveniji, kar pa je v nasprotju z izvedenskim mnenjem (Ogris in sod., 2008), da bodo imele žuželke v toplejšem podnebju večji vpliv na zdravje bukve.

Trendi obsega poškodb dreves in varstveno-sanitarnega poseka se skladajo: bolezni bodo povzročile večji obseg poškodb bukve in višji varstveno-sanitarni posek, žuželke pa kažejo negativni trend v obeh kazalcih, kar je v nasprotju z izvedensko oceno. Bolezni bodo predvidoma povzročile visoko poškodovanost bukve do konca 21. stoletja, po drugi strani pa je napovedan relativno nizek oz. skoraj zanemarljiv vpliv bolezni na lesno zalogo bukve. Domnevamo, da bodo bolezni do konca 21. stoletja verjetno že zelo poškodovale bukev in se bo posledično postopoma povečala varstveno-sanitarna sečnja bukve zaradi njih. Prav tako lahko pričakujemo višje deleže varstveno-sanitarne sečnje zaradi žuželk, čeprav modelske napovedi kažejo prav nasprotno. Žuželke bodo predvidoma delovale lokalno v žariščih, bolezni pa bolj velikopovršinsko.

3.5 Viri

- Bates D., Mächler M., Bolker B., Walker S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1: 1 - 48. [10.18637/jss.v067.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01)
- Beguera S., Vicente-Serrano S.M. 2017. SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, R package version 1.7. <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>
- Bertalanč R., Dolinar M., Draksler A., Honzak L., Kobold M., Kozjek K., Lokošek N., Medved A., Vertačnik G., Vlahović Ž., Žust A. 2018. Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja: sintezno poročilo. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 156 str.
- Breiman L. 1996. Bagging predictors. *Machine Learning*, 24, 2: 123-140. [10.1007/BF00058655](https://doi.org/10.1007/BF00058655)
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC. 2009. Harmonized world soil database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/> (15.8.2022)
- GIS. 2022. Podatkovna zbirka o spremljanju stanja gozdov v Sloveniji na sistematični mreži 16 × 16 km. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije
- Hijmans R.J. 2022. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.5-21. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Jurc D., Jurc M. 2014. Popis povzročiteljev poškodb drevja. V: Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov: Priročnik za terensko snemanje podatkov. Kovač M. (ed.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 143-177
- Knisel W.G., Davis F.M. 2000. GLEAMS: ground loading effects of agricultural management systems. Version 3.0. User manual. Southeast Watershed Research Laboratory, SEWRL-WGK/FMD-050199: 194 str.
- Kovač M. (ed.) 2014. Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov: Priročnik za terensko snemanje podatkov. Studia Forestalia Slovenica. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 228 str.

- Kovač M., Skudnik M., Japelj A., Planinšek Š., Vochl S. 2014. Gozdna inventura. V: Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov: Priročnik za terensko snemanje podatkov. Kovač M. (ed.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica: 7-111
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California. American Meteorological Society: 179-184 str.
- Novak M., Bavec M., Trajanova M. 2014. Litološka karta Slovenije. Geološki zavod Slovenije. <https://egeologija.si/geonetwork/srv/slv/catalog.search#/metadata/8c21f080-854a-4df5-8d1a-86abb01af919> (23.1.2023)
- Ogris N. 2007. Model zdravja gozdov v Sloveniji: doktorska disertacija. Ljubljana, [N. Ogris]: 138 str.
- Ogris N., Jurc M., Jurc D. 2008. Varstvo bukovih gozdov - danes in jutri. V: Bukovi gozdovi: ekologija in gospodarjenje. Zbornik razširjenih povzetkov XXVI. gozdarskih študijskih dni. Bončina A. (ed.). Čatež ob Savi, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 36-39
- Ogris N., Skudnik M. 2021. V Sloveniji se povečuje osutost bukove krošnje. Gozdarski vestnik, 79, 5-6: 226-237
- PEDKRS. 1999. Pedološko rekartiranje in digitalizacija pedoloških kart Republike Slovenije v merilu 1:25.000 kot osnove za določitev talnega potenciala: digitalna pedološka karta, pedološki profili. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Center za pedologijo in varstvo okolja: 20 str.
- Pierce D. 2021. ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>
- Quinlan J.R. 1992. Learning with continuous classes V: 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. Adams A., Sterling L. (eds.). Hobart, Tasmania, World Scientific: 343-348
- Signorell A., et mult. al. 2022. DescTools: Tools for descriptive statistics. R package version 0.99.45. URL: <https://cran.r-project.org/package=DescTools>.
- Team R.C. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Veselič Ž., Grecs Z., Kolšek M., Oražem D., Matijašič D., Beguš J. 2015. Žled v Slovenskih gozdovih in njihova sanacija. Ujma, 29: 188-194
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 23, 7: 1696-1718. 10.1175/2009jcli2909.1
- Wang Y., Witten I.H. 1997. Inducing model trees for continuous classes. V: 9th European Conference on Machine Learning (ECML 97). van Someren M., Widmer G. (eds.). Prague, Czech Republic: 128-137
- ZGS. 2022a. Gozdni fondi. Podatkovna zbirka. Zavod za gozdove Slovenije
- ZGS. 2022b. Timber. Podatkovna zbirka o poseku gozdnega drevja. Zavod za gozdove Slovenije

4 Potencialna razširjenost navadne bukve glede na različne scenarije podnebnih sprememb (Aktivnost 3.3)

Nikica Ogris

4.1 Uvod

Cilj aktivnosti 3.3. je bil razviti model naravne razširjenosti navadne bukve (*Fagus sylvatica*) v Sloveniji in na njegovi podlagi narediti projekcijo potencialne razširjenosti navadne bukve do konca 21. stoletja glede na različne scenarije podnebnih sprememb.

Odvisno spremenljivko v modelu je predstavljala prisotnost ali odsotnost bukve v modelski celici (binarna spremenljivka). Ker areal navadne bukve presega območje Slovenije, smo morali razviti model, ki pokriva cel areal navadne bukve. Na njegovi osnovi pa smo potem napovedali potencialno razširjenost navadne bukve v Sloveniji v prihodnosti glede na štiri scenarije podnebnih sprememb in štiri obdobje 2021–2100.

Neodvisne spremenljivke, s katerimi smo pojasnjevali naravno razširjenost bukve, so opisovale podnebje in tla.

Model naravne razširjenosti bukve smo razvili z različnimi modelskimi pristopi. Napoved potencialne razširjenosti v prihodnosti smo izvedli s pomočjo ansambla modelov.

4.2 Metode

4.2.1 Priprava podatkov

Naravno razširjenost navadne bukve v Evropi smo pojasnjevali z neodvisnimi spremenljivkami, ki jih je uporabil tudi projekt EU-Trees4F (Mauri in sod., 2022) (**Preglednica 37**): povprečna letna temperatura (°C), poletna temperatura (°C), kontinentalnost (°C; razlika med temperaturo zraka najtoplejšega meseca in najhladnejšega meseca), povprečna letna količina padavin (mm/leto), povprečna količina padavin pozimi (mm), povprečna količina padavin poleti (mm), sezonskost padavin (koeficient variacije padavin), pH tal, vsebnost organskega ogljika v tleh.

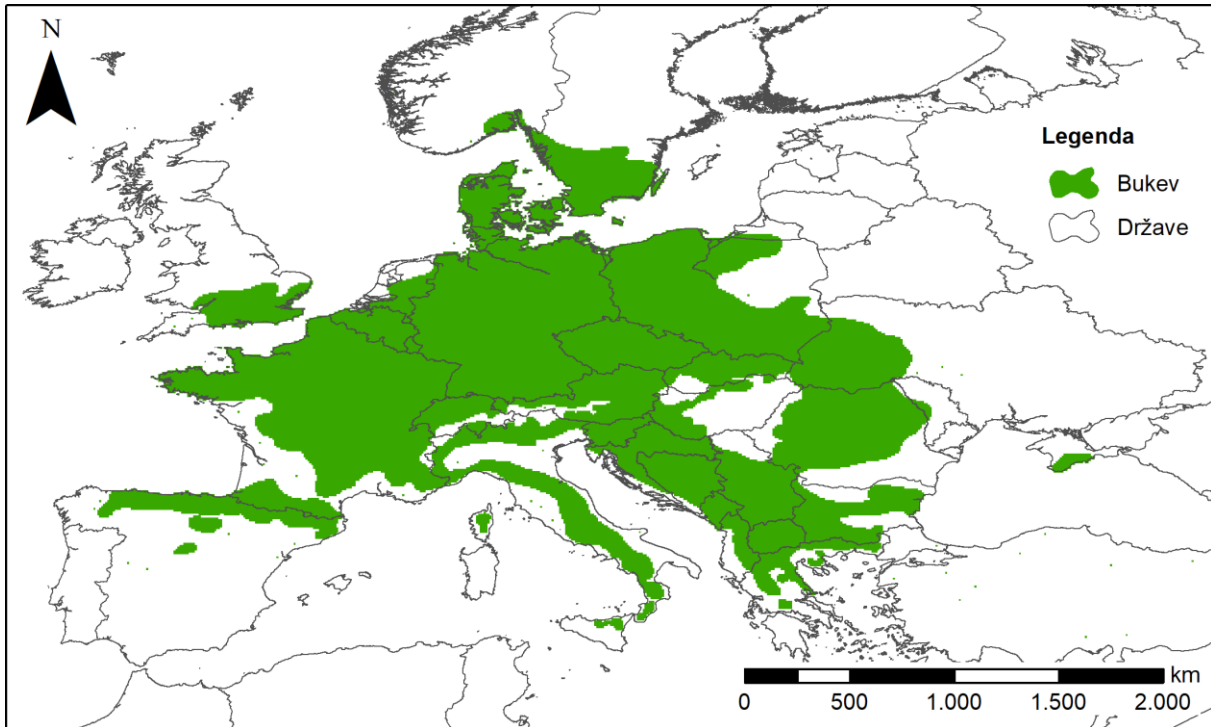
Bioklimatske spremenljivke smo pridobili iz podatkovne zbirke WorldClim 2 (Fick in Hijmans, 2017) v prostorski ločljivosti 5 ločnih minut (ok. 10 km) in 30 ločnih sekund (ok. 1 km) za obdobje 1970–2000.

Podatke o tleh smo pridobili iz podatkovne zbirke SoilGrids (Hengl in sod., 2017) v prostorski ločljivosti 1 km. Podatki o pH tal in vsebnosti organskega ogljika se nanašajo na zgornji horizont globine 0–15 cm. Podatkom o tleh smo zmanjšali prostorsko skalo na 5 ločnih minut.

Preglednica 37. Seznam spremenljivk za razvoj modelov

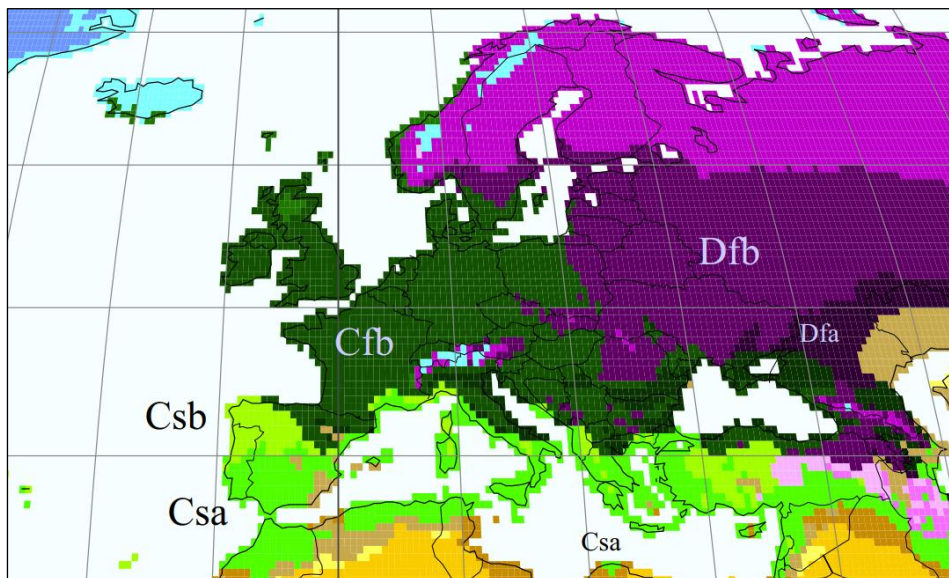
Spremenljivka	Ime spremenljivke	Vir
povprečna letna temperatura (°C)	BIO1	
poletna temperatura (°C)	BIO10	
kontinentalnost (°C)	BIO7	
povprečna letna količina padavin (mm/leto)	BIO12	Fick in Hijmans (2017)
povprečna količina padavin pozimi (mm)	BIO19	
povprečna količina padavin poleti (mm)	BIO18	
sezonskost padavin	BIO15	
pH tal (0–15 cm)	tla_ph	FAO in sod. (2009)
vsebnost organskega ogljika v tleh (0–15 cm)	tla_oc	

Odvisno spremenljivko je predstavljala naravna razširjenost navadne bukve. Areal razširjenosti navadne bukve smo črpali iz prostorske podatkovne zbirke, tj. kartah arealov drevesnih vrst v Evropi (Caudullo in sod., 2022). Upoštevali smo tako zvezne površine kot izolirane populacije (**Slika 26**). Prostorsko ločljivost odvisne spremenljivke smo prilagodili prostorski ločljivosti neodvisnih spremenljivk, tj. 5 ločnih minut (ok. 10 km).



Slika 26. Naravna razširjenost navadne bukve v Evropi (Caudullo in sod., 2022)

Trenutna razširjenost navadne bukve se dobro pokriva s podnebjem, ki po klasifikaciji Köppen–Geiger spada med zmerno klimo z veliko padavin in toplim poletjem (**Slika 27**) (Kottek in sod., 2006).



Slika 27. Navadna bukev se pojavlja v podnebnem tipu Cfb (zmerni klimati z veliko padavin in vročim poletjem) po klasifikaciji podnebnja Köppen–Geiger (Kottek in sod., 2006)

4.2.2 Razvoj modelov

Potencialno razširjenost navadne bukve smo modelirali v statistični programski opremi R (R Core Team, 2022) s platformo BIOMOD2 (Thuiller in sod., 2009), ki je pogosto uporabljena za modeliranje razširjenosti vrst z ansamblom modelov in za raziskave vplivov podnebnih sprememb na gozdove (Chakraborty in sod., 2021; Mauri in sod., 2022; Noce in sod., 2017; Takolander in sod., 2019; Thuiller in sod., 2005; Zhang in sod., 2015). V večji meri smo sledili postopku, ki so ga uporabili Mauri in sod. (2022) z naslednjimi razlikami:

- za učenje modelov smo uporabili naravni areal navadne bukve in ne točke iz stalnih vzorčnih ploskev gozdnih inventur, kjer se bukev pojavlja, ker so gozdovi na večjem delu Evrope predrugačeni in posledično gozdna inventura ne prikazuje potencialnega naravnega stanja;
- rezultatov modelov nismo naknadno maskirali s postopki MESS (območja, kjer prihodnje podnebje ni podobno trenutnemu na trenutnem arealu bukve) in Migclim (simulacija zmožnosti naravnega širjenja s pomočjo celičnih avtomatov);
- definiciji nekaterih neodvisnih spremenljivk (BIO10, BIO18, BIO19), kjer smo v naši raziskavi poletje in zimo definirali kot najtoplejšo četrtino oz. najhladnejšo četrtino leta, v raziskavi Mauri in sod. (2022) pa so letne čase definirali drugače.

Uporabili smo šest vrst modelov: GLM (ang. Generalized Linear Models), GAM (ang. Generalized Additive Models), GBM (ang. Generalized Boosting Models, Boosted Regression Trees), MARS (ang. Multiple Adaptive Regression Splines), MAXENT (ang. Maximum Entropy) in RF (ang. Random Forest).

Za razvoj modelov smo uporabili knjižnico BIOMOD2 (Thuiller in sod., 2023). Uporabili smo privzete nastavitve modelov razen za MAXENT, kjer smo parametre "product", "threshold" in "hinge" onemogočili, da bi preprečili pretirano prilagajanje modela podatkom, kakor so predlagali Merow in sod. (2013). Prisotnost in odsotnost bukve smo obravnavali enakovredno, tako da smo nastavili BIOMOD2 parameter "prevalence" na 0,5. Naključno smo izbrali 45.000 izmišljenih odsotnosti izven območja razširjenosti navadne bukve, tako da je bila gostota izmišljenih odsotnosti približna gostoti točk prisotnosti navadne bukve, kakor so predlagali Barbet-Massin in sod. (2012).

Dodatno smo razvili skupen model z združitvijo posameznih modelov. Ohranili smo samo modele, katerih TSS > 0,7, s čimer smo ohranili samo dobro kalibrirane modele.

Končne rezultate smo prikazali samo za območja, kjer je trenutno gozd. Masko gozda smo izdelali iz karte gozdnih sestojev (ZGS, 2021).

V model za potencialno razširjenost bukve nismo vključili podmodelov o vplivu bolezni in žuželk zaradi njihovega domnevno zanemarljivega vpliva na lesno zalogo bukve (Ogris, 2023b). Po drugi strani pa imajo in tudi bodo imele bolezni, žuželke in suša zelo pomemben vpliv na hiranje bukve (Ogris, 2023a, 2023b). Vendar nismo razvili procesnega modela, kjer bi lahko posebej obravnavali postopen vpliv različnih škodljivih dejavnikov, kot so posamična suša v določenem letu, ali pojav žarišč bolezni in žuželk na določenem območju in času. Za ta namen bi morali razviti procesen model, kar pa je bilo izven obsega te raziskave.

4.2.3 Validacija modelov

Modele smo preverjali z 10-kratno navzkrižno validacijo (ang. cross-validation). Rezultate validacije smo predstavili s kazalnikom TSS (ang. True Skill Statistics) (Allouche in sod., 2006). Formula za izračun $TSS = \text{občutljivost} + \text{specifičnost} - 1$.

Relativno pomembnost spremenljivk smo ocenili z metodo, ki so jo opisali Thuiller in sod. (2009), z uporabo knjižnice BIOMOD2.

4.2.4 Napoved potencialne razširjenosti navadne bukve do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb

S skupnim modelom smo izračunali potencialno razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju 1970–2000 in v prihodnosti glede na različne scenarije podnebnih sprememb. Izračunali smo koeficient variacije (KV) iz posameznih napovedi. Višji kot je KV, višja je negotovost napovedi.

Napovedi potencialne razširjenosti bukve so podane kot verjetnostne karte, katerih vrednosti smo pretvorili v interval med 0 in 1000. Končno smo izračunali skupen model kot srednjo vrednost posameznih modelov. Verjetnostno napoved smo pretvorili v binarno s pomočjo TSS.

Na ravni cele Evrope smo izračunali samo model za potencialno razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju. Na ravni Slovenije smo izračunali model tako za referenčno obdobje kot za prihodnost.

Napoved potencialne razširjenosti navadne bukve smo izračunali s skupnim modelom za štiri scenarije RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP7.0, RCP8.5) in devet GCM: CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-Veg-LR, FIO-ESM-2-0, GISS-E2-1-H, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-LR. Napovedi podnebnih spremenljivk smo pridobili iz podatkovne zbirke WorldClim 2 (Fick in Hijmans, 2017). Scenarij RCP2.6 velja za optimističnega, RCP8.5 za pesimističnega, RCP4.5 pa za srednjega in najbolj verjetnega.

4.3 Rezultati in razprava

4.3.1 Zanesljivost modelov in relativna pomembnost spremenljivk

Vse vrste modelov so imele TSS > 0,70 (**Preglednica 38**). Zato so bili vsi modeli vključeni v skupen model za napoved potencialne razširjenosti navadne bukve. Najbolj zanesljiva vrsta modela je bila RF, ki je imela TSS vrednost enako 0,96. Na drugem mestu je bila skupina modelov GBM, MARS in GLM, ki so imeli podobno zanesljivost. Nekoliko slabše ampak še vedno zadovoljivo sta se odrezala modela MAXENT in GAM. Skupen model je imel TSS = 0,88.

Preglednica 38. Ocena zanesljivosti modelov s kazalcem TSS (ang. True Skill Statistics)

	GAM	GBM	GLM	MARS	MAXENT	RF	Skupen model
TSS*	0,75	0,83	0,81	0,83	0,77	0,96	0,88

*Povprečna ocena za 10 ponovitev v okviru 10-kratne navzkrižne validacije.

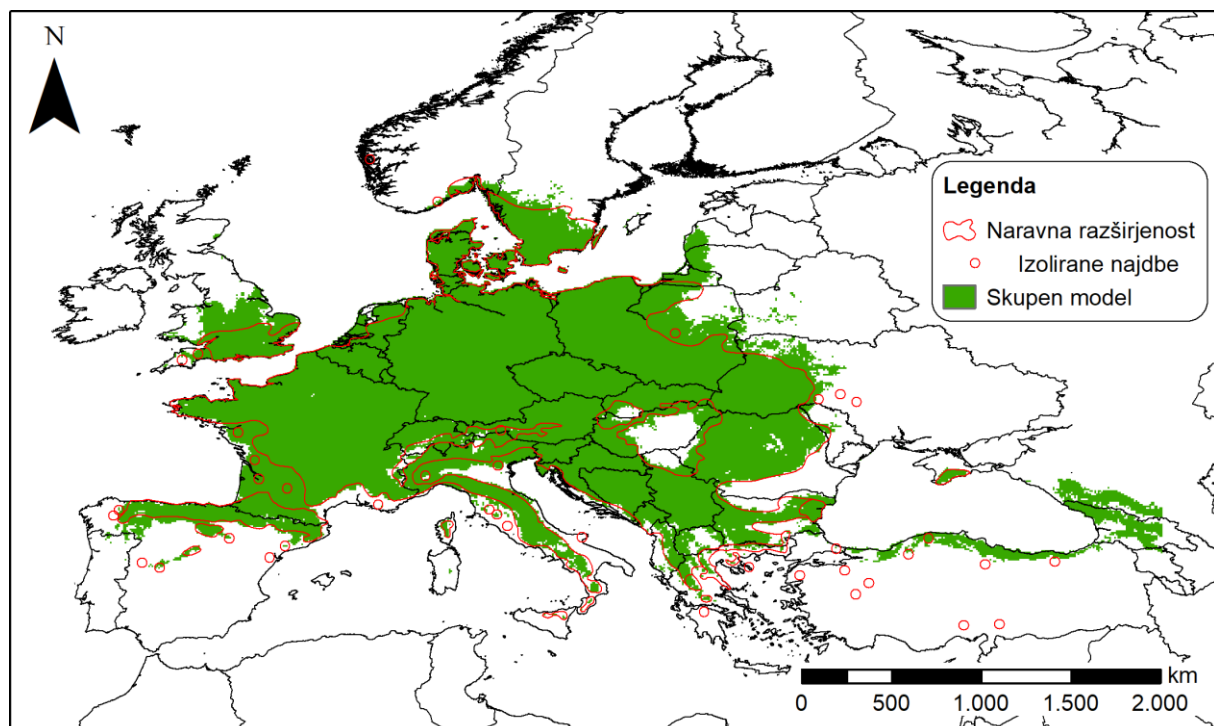
Kontinentalnost je bila najpomembnejša spremenljivka v modelih za potencialno razširjenost navadne bukve (**Preglednica 39**). Na drugem mestu je bila skupina spremenljivk vsebnost organskega ogljika v tleh, povprečna letna količina padavin in povprečna letna temperatura. Na tretjem mestu je bila skupina spremenljivk povprečna količina padavin pozimi in poletna temperatura. Najmanj pomembne so se izkazale spremenljivke pH tal, povprečna količina padavin poleti in sezonskost padavin. Največjo variabilnost relativne pomembnosti je imela povprečna letna količina padavin.

Preglednica 39. Relativna pomembnost spremenljivk v ansamblu modelov (N = 600)

Spremenljivka	Povp.	Min	Maks.	St. odkl.
kontinentalnost	0,31	0,23	0,41	0,06
vsebnost organskega ogljika v tleh	0,26	0,08	0,43	0,12
povprečna letna količina padavin	0,23	0,00	0,45	0,18
povprečna letna temperatura	0,22	0,06	0,37	0,10
povprečna količina padavin pozimi	0,15	0,00	0,29	0,12
poletna temperatura	0,10	0,00	0,26	0,08
pH tal	0,06	0,00	0,11	0,04
povprečna količina padavin poleti	0,06	0,02	0,12	0,04
sezonskost padavin	0,05	0,01	0,11	0,04

4.3.2 Potencialna razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju

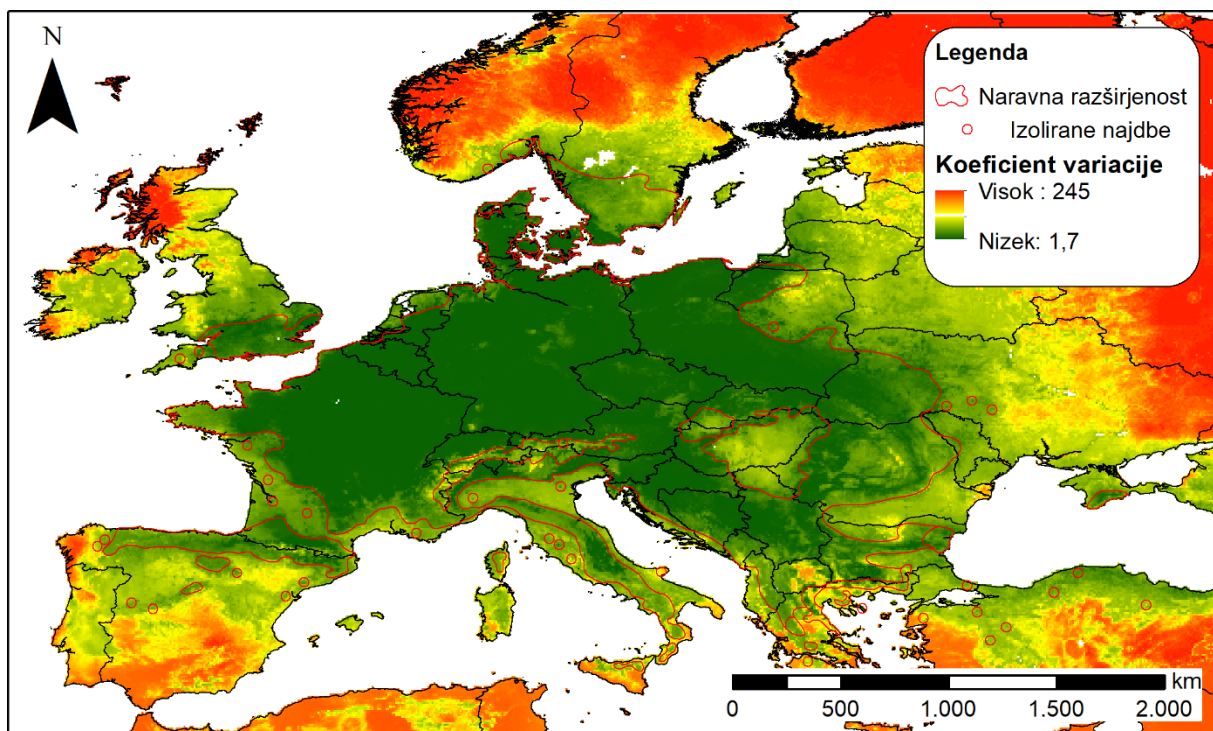
Skupen model je precej dobro napovedal potencialno razširjenost navadne bukve v Evropi v referenčnem obdobju 1970–2020 (**Slika 28**), kar je odraz relativno visoke zanesljivosti skupnega modela (**Preglednica 38**). V nekaterih območjih je napoved presegla naravni areal bukve, npr. Združeno kraljestvo, Litva, Latvija, Turčija.



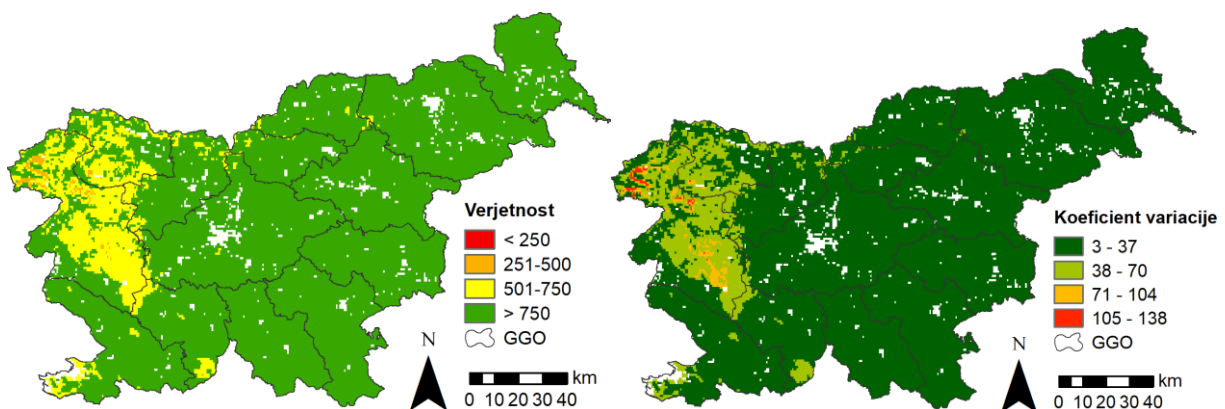
Slika 28. Potencialna razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju 1970–2000 v Evropi glede na napoved skupnega modela

V letu 2021 se je bukev pojavljala po vsej Sloveniji (**Slika 42**). Zahodni in jugozahodni del Slovenije leži na robu areala navadne bukve (**Slika 26**, **Slika 28**). Zato je na teh območjih verjetnost naravne

razširjenosti bukve glede na napoved skupnega modela že v referenčnem obdobju manjša in tudi koeficient variacije je višji (Slika 29, Slika 30). To pomeni, da je na teh območjih zanesljivost napovedi potencialne razširjenosti bukve v referenčnem območju nekoliko manjša. Napoved modela v ločljivosti 5 ločnih minut je pravilno predvidel, da se bukev pojavlja na celotnem območju Slovenije (Slika 28). Ko smo model aplicirali na podrobnejšo ločljivost 30 ločnih sekund, pa se je v določenih modelskih celicah v okolici Tolmina, Bovca in Idrije verjetnost pojavljanja bukve spustila pod 500 (Slika 30), kar pomeni, da za njo v teh modelskih celicah ni več primerno rastišče glede na napoved skupnega modela. Da zahodni, jugozahodni in južni del Slovenije postaja manj primeren za navadno bukev se odraža tudi v popisu poškodovanosti, saj se na teh območjih najhitreje povečuje osutost bukove krošnje s statistično značilnim pozitivnim trendom (Ogris in Skudnik, 2021). Na Trnovskem gozdu je že dokumentirano sušenje in hiranje bukve (Jurc in sod., 2019; Žlindra in sod., 2015).



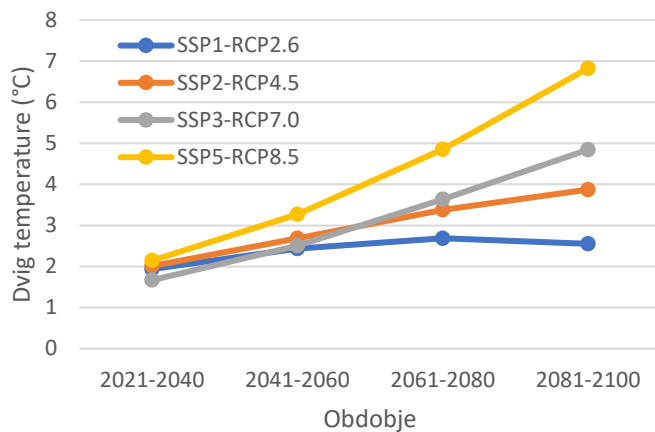
Slika 29. Koeficient variacije napovedi skupnega modela za potencialno razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju 1970–2000 v Evropi



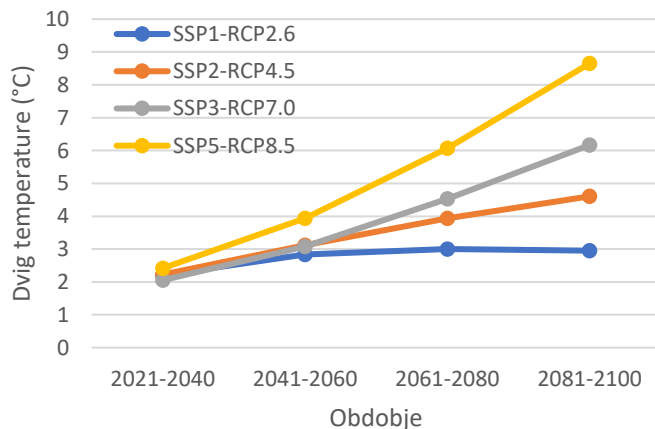
Slika 30. Verjetnost in koeficient variacije napovedi skupnega modela za potencialno razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju 1970–2000 v Sloveniji. Verjetnost je bila pretvorjena v interval 0–1000.

4.3.3 Sprememba temperature zraka in količine padavin glede na različne scenarije podnebnih sprememb

Vsi scenariji podnebnih sprememb napovedujejo dvig povprečne letne (**Slika 31**) in povprečne poletne (**Slika 32**) temperature zraka, pri čemer je najmanjši dvig predviden za SSP1-RCP2.6, največji pa za SSP5-RCP8.5. Do konca 21. stoletja se bo na območju Slovenije pri RCP 2.6 povprečna temperatura zraka dvignila za 2,6 °C, pri RCP 4.5 za 3,9 °C, pri RCP 8.5 za 6,8 °C (**Slika 31**). Povprečna poletna temperatura se bo pri RCP 2.6 v obdobju 2081–2100 na območju Slovenije dvignila za 3,0 °C, pri RCP 4.5 za 4,6 °C, pri RCP 8.5 za 8,7 °C (**Slika 32**).

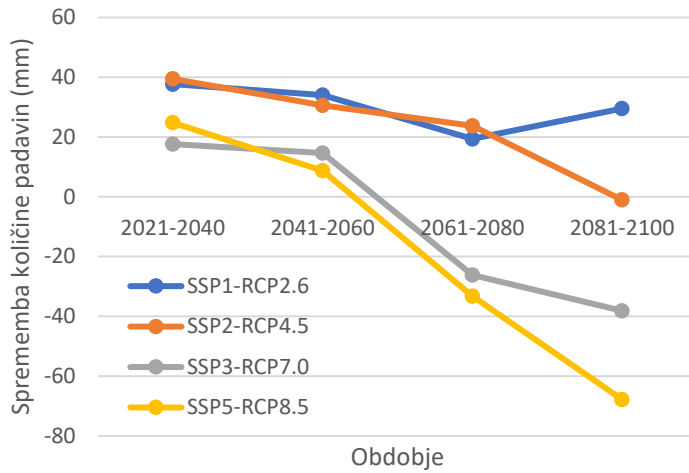


Slika 31. Sprememba povprečne letne temperature zraka (°C; BIO1) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100

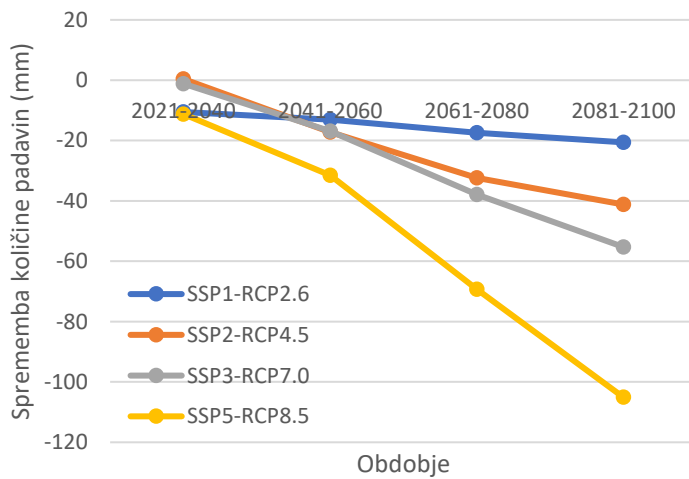


Slika 32. Sprememba povprečne poletne temperature zraka (°C; BIO10) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100

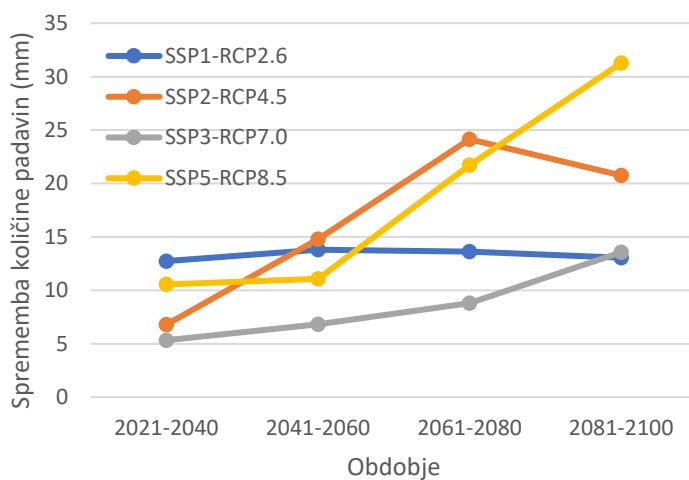
Povprečna letna in poletna količina padavin bo na območju Slovenije upadala (**Slika 33**, **Slika 34**), najmanj pri RCP 2.6, najbolj pa pri RCP 8.5, ko bi do 2100 v povprečju padlo 68 mm manj na leto in 105 mm manj poleti. Devet izbranih GCM za zimsko obdobje napoveduje večjo količino padavin v Sloveniji (**Slika 35**), pri čemer scenarija RCP 8.5 in RCP 4.5 napovedujeta največjo povečanje (za 31 mm in 21 mm do 2100), scenarija RCP 2.6 in RCP 7.0 pa nižjo povečanje (za 13 mm do 2100).



Slika 33. Sprememba povprečne letne količine padavin (mm; BIO12) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100



Slika 34. Sprememba povprečne poletne količine padavin (mm; BIO18) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100

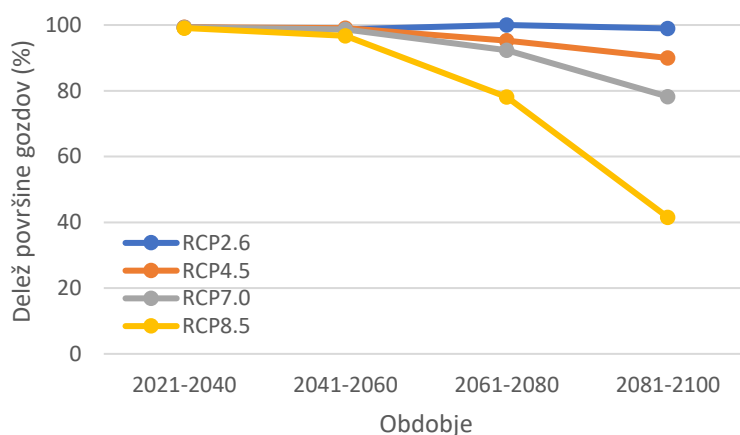


Slika 35. Sprememba povprečne zimske količine padavin (mm; BIO19) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100

4.3.4 Potencialna razširjenost navadne bukve v prihodnosti

V obdobju 2021–2040 in 2041–2060 bo potencialna razširjenost navadne bukve ostala na takšni ravni kot v referenčnem obdobju, tj. pojavljala se bo po vsej Sloveniji (**Slika 36**). Skupen model je napovedal, da se bo potencialna razširjenost navadne bukve vidneje zmanjševati po letu 2060 (**Slika 36**). Sicer je skupen model napovedal rahlo krčitev potencialnega areala bukve že v obdobju 2041–2060 v scenariju RCP8.5, ko se bi bukev pojavljala v 96,7 % gozdov (**Slika 36**).

Večje spremembe v potencialni razširjenosti navadne bukve so predvidene v scenarijih, ki predvidevajo višje temperature. Tako po scenariju RCP2.6 do konca 21. stoletja ne bi prišlo do sprememb v potencialni razširjenosti navadne bukve (**Slika 36**), tj. bukev se bo po tem scenariju še vedno pojavljala po vsej Sloveniji v vseh gozdovih. Po scenariju RCP4.5 se bo v obdobju 2081–2100 potencialna razširjenost bukve skrčila na 90 % gozdov, po scenariju RCP7.0 na 78,2 % gozdov, po scenariju RCP8.5 pa je predviden velik upad na 41,5 % gozdov (**Slika 36**).

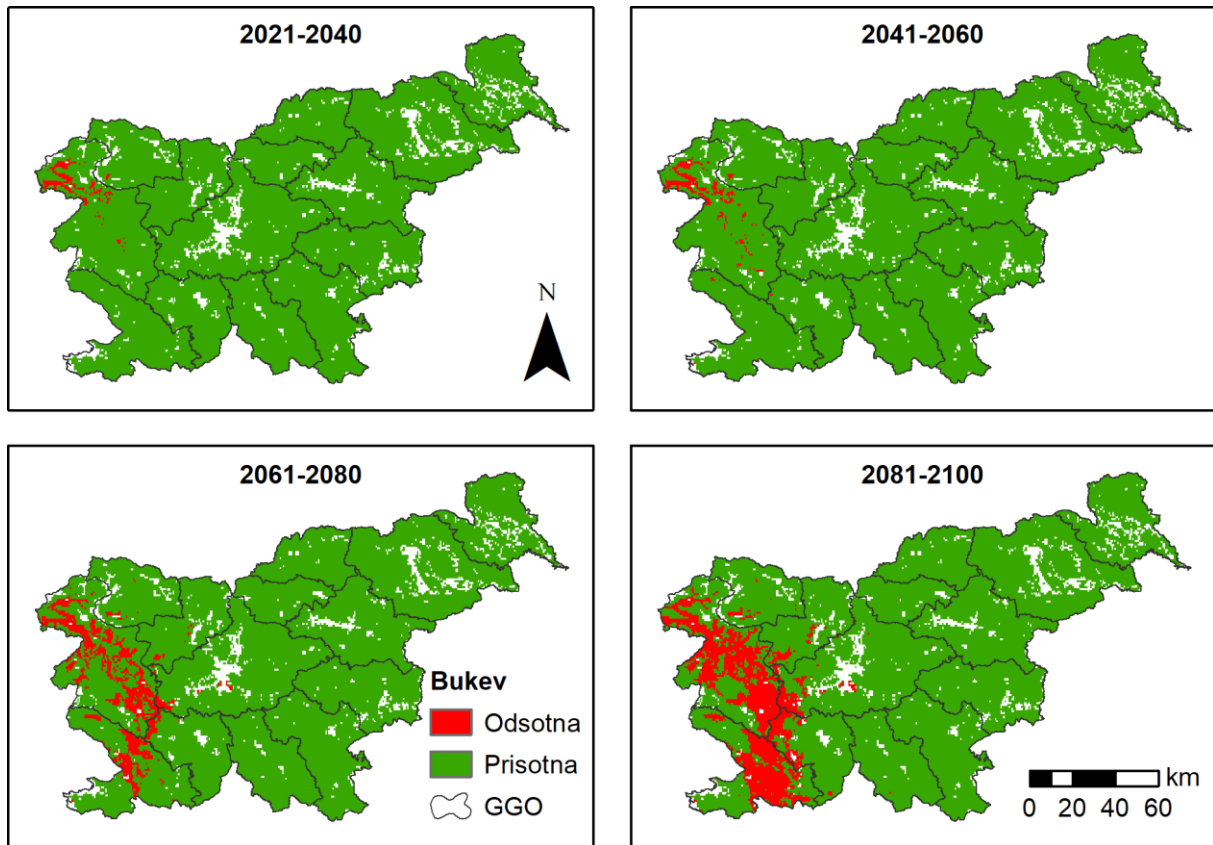


Slika 36. Delež gozdov, kjer se bo potencialno pojavljala navadna bukev v Sloveniji glede na rezultate skupnega modela in štiri scenarije podnebnih sprememb RCP za štiri obdobja 2021–2040 (povprečje 9 GCM in 6 vrst modelov)

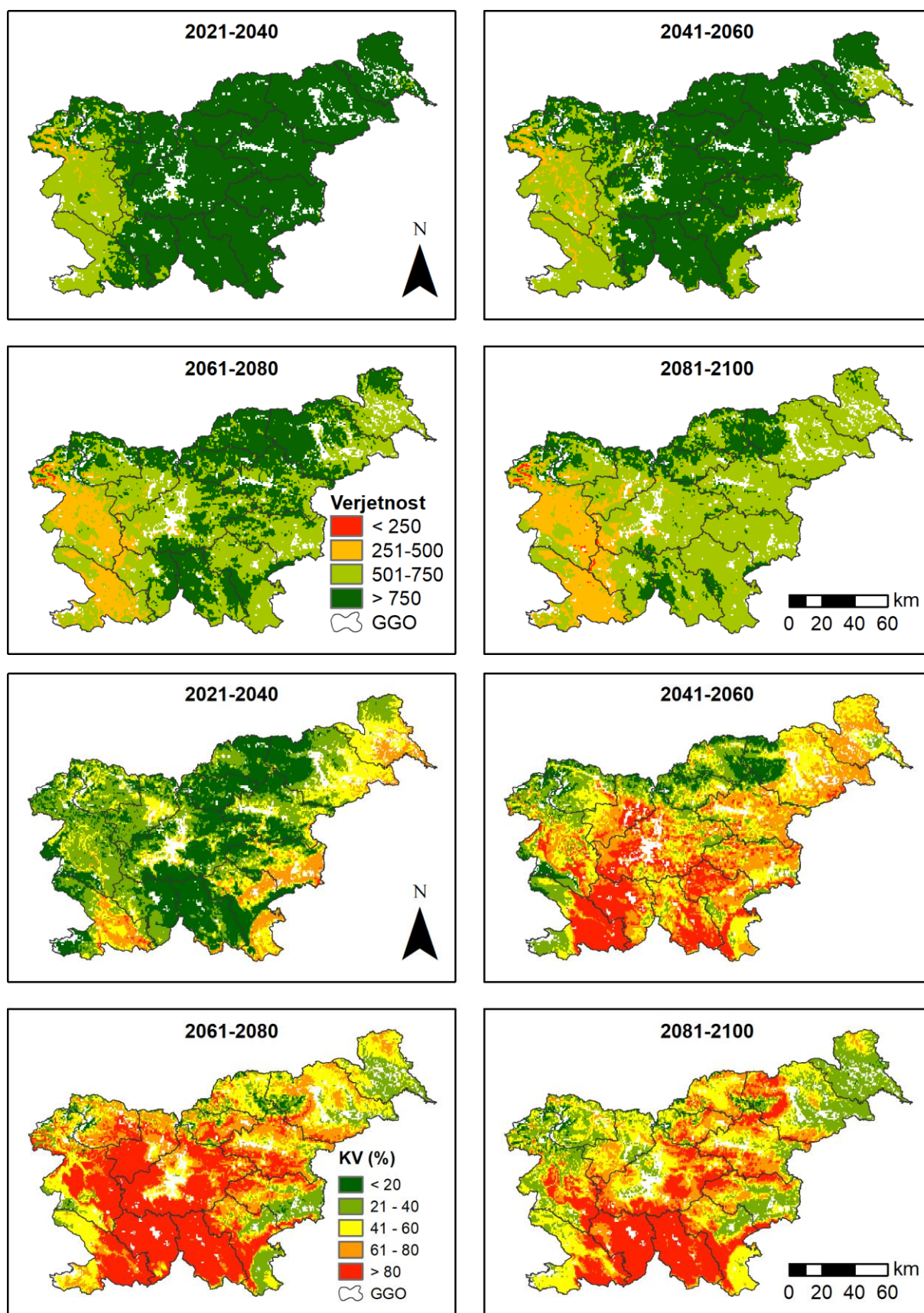
Karte potencialne razširjenosti navadne bukve 2021–2100 glede na štiri SSP-RCP so na voljo na spletnem portalu Varstvo gozdov na naslednji povezavi:

<https://www.zdravgozd.si/karta.aspx?idpor=6c936364-5ff3-4621-8d82-f894f0562143>

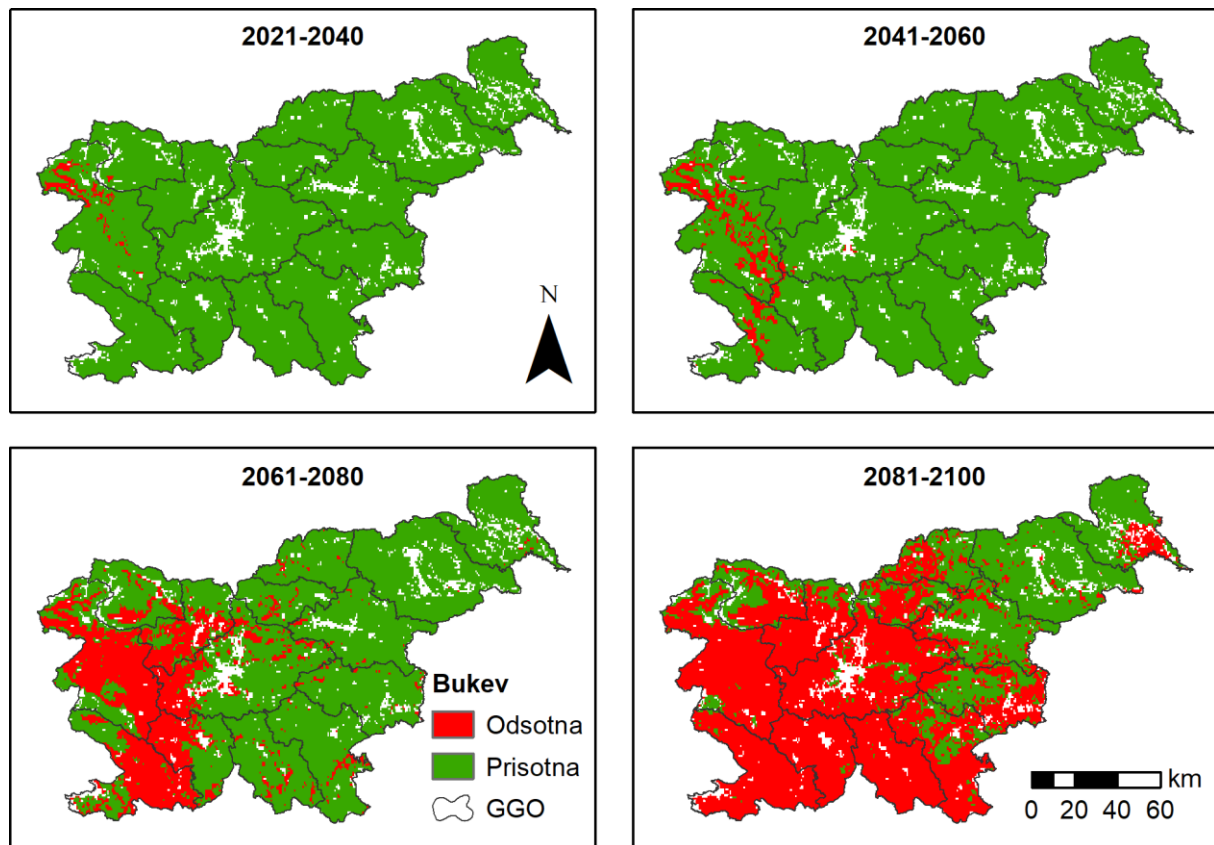
Potencialna razširjenost navadne bukve se bo zmanjševala iz smeri ZJZ (zahod jugozahod) (**Slika 37**, **Slika 38**, **Slika 39**, **Slika 40**). Tako je za obdobje 2081–2100 za RCP4.5 napovedano, da se bi potencialna razširjenost bukve zmanjšala od Bovca, do Cerknega, Žiri, Idrije, Logatca, Postojne, Ilirske Bistrice (**Slika 37**) in posamično tudi na obrobju Ljubljanske kotline ter med Kranjem in Škofjo Loko. Sicer pa je bil koeficient variacije visok za celotno južno Slovenijo in precejšen del vzhodne Slovenije vse do Maribora (**Slika 38**), kar pomeni, da je napoved za to območje precej nezanesljivo in lahko binarna napoved precej odstopa. S kombinacijo verjetnostne karte in karte koeficienta variacije lahko ocenimo verjetnost potencialne razširjenosti navadne bukve in zanesljivost teh napovedi (**Slika 38**), npr. KV za obdobje 2081–2100 je nizek za območje Posočja, Idrije in Bače, zato je napoved krčenja potencialne razširjenosti navadne bukve na tem območju bolj zanesljiva.



Slika 37. Potencialna razširjenost navadne bukve v Sloveniji 2021–2100 glede na rezultate skupnega modela, RCP4.5 in devet GCM



Slika 38. Verjetnost in koeficient variacije potencialne razširjenosti navadne bukve v Sloveniji 2021–2100 glede na skupen model, RCP4.5 in devet GCM. Verjetnost prikazujejo zgornje štiri slike, koeficient variacije pa spodnje štiri slike.

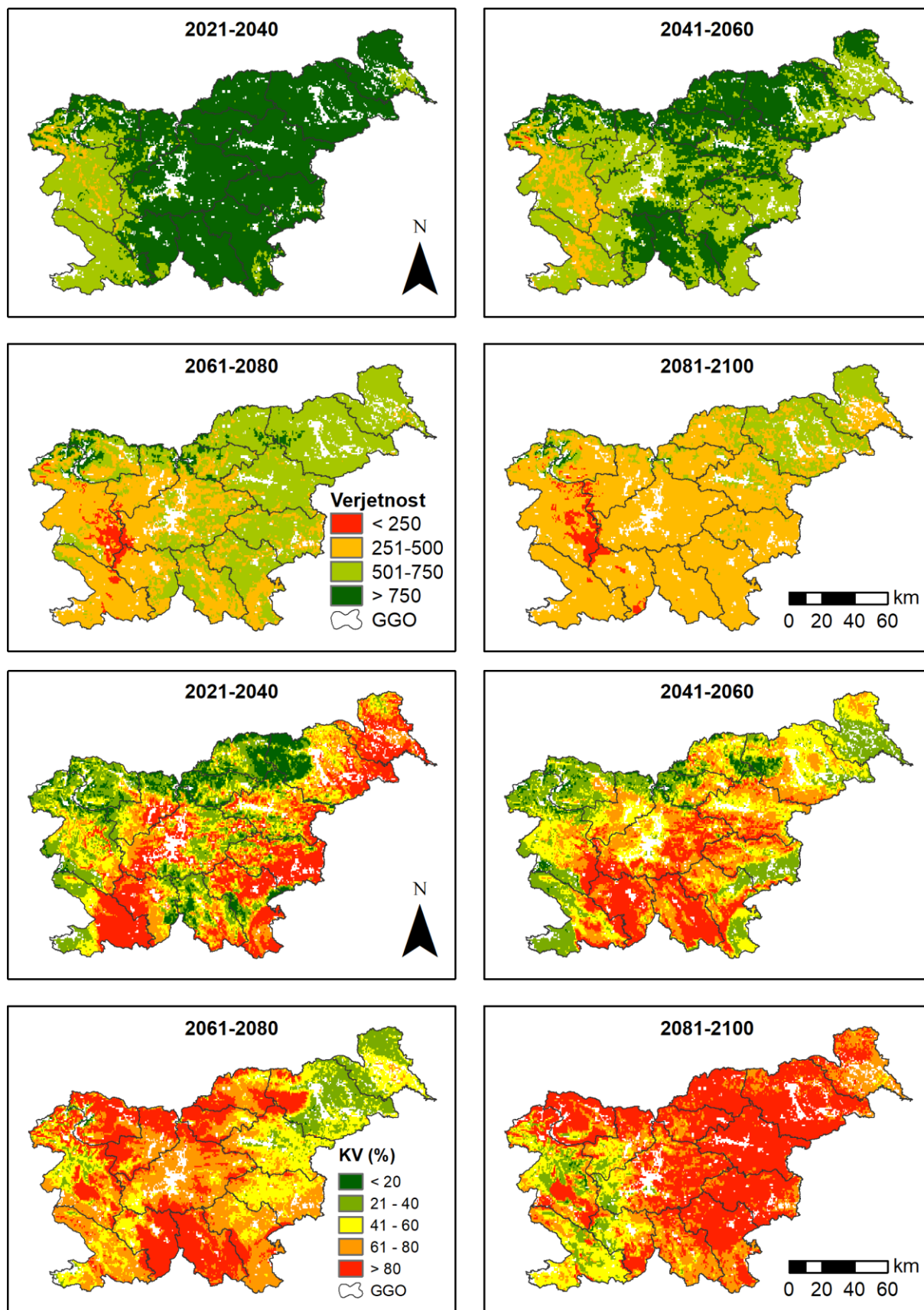


Slika 39. Potencialna razširjenost navadne bukve v Sloveniji 2021–2100 glede na skupen model, RCP8.5 in devet GCM

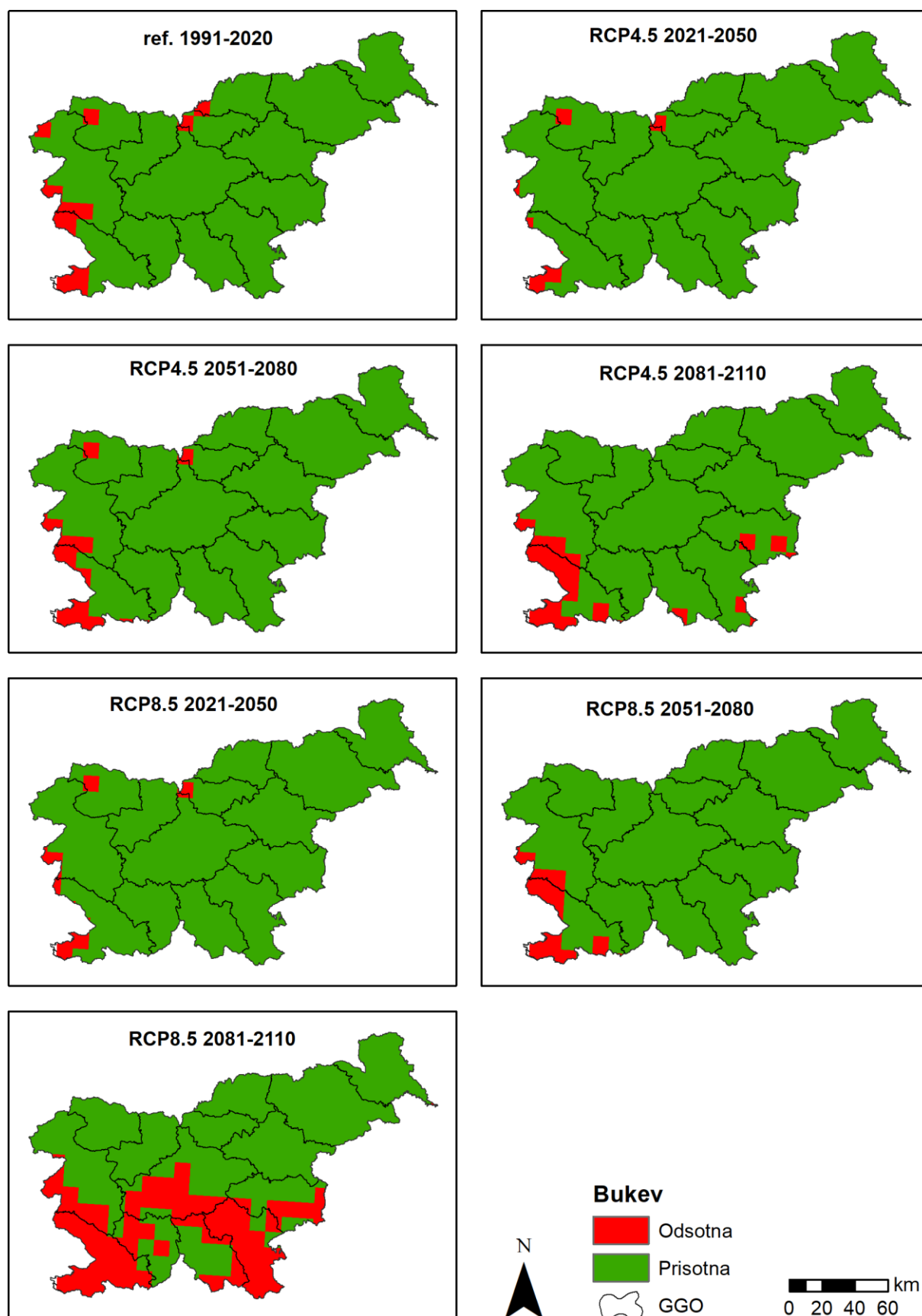
Po scenariju RCP8.5 se bo potencialna razširjenost navadne bukve krčila hitreje in intenzivneje kot po RCP4.5 (**Slika 36**). Po scenariju RCP8.5 se bi potencialna razširjenost bukve v obdobju 2041–2060 zmanjšala na raven, kot jo je napovedal RCP4.5 v obdobju 2061–2080. Prostorsko gledano sta si RCP4.5 in RCP8.5 zelo podobna – krčenje potencialnega areala bukve se širi iz smeri ZJZ. Po scenariju RCP8.5 so bo potencialna razširjenost bukve v obdobju 2061–2080 skrčila skoraj za celotni zahodni del Slovenije vse do Vrhnike in mestoma do Ljubljane in Kamnika, razen za predel Alp (**Slika 39**). V obdobju 2081–2100 se bo glede na RCP8.5 potencialni areal bukve zmanjšal od zahoda in juga države vse do Krškega, Laškega, Slovenj Gradca in mestoma tudi drugih ožjih območjih vse do Ormoža, krčitev bi zajela tudi Prekmurje, tj. predel Dolinskega.

Koeficient variacije napovedi skupnega modela za RCP8.5 je še bolj razgiban kot za RCP4.5 in to že za obdobje 2021–2040 (**Slika 40**). Za obdobje 2081–2100 je KV za ZJZ območje Slovenije nižji od 40 %, kar pomeni, da ansambel preskušanih modelov GCM z večjo zanesljivostjo napoveduje krčitev potencialne razširjenosti navadne bukve na tem območju (**Slika 40**).

Napoved skupnega modela Mauri in sod. (2022) za Slovenijo je manj ekstremna od našega modela (**Slika 41**). Za scenarij RCP4.5 je njihov model napovedal, da se bo v obdobju 2081–2110 potencialna razširjenost bukve nekoliko zmanjšala na JZ države in posameznih modelskih celicah na J in JV delu države. Po scenariju RCP8.5 je model Mauri in sod. (2022) napovedal krčenje potencialnega areala navadne bukve skoraj za celotni južni del države, vendar skupaj na manjšem obsegu kot naš model.



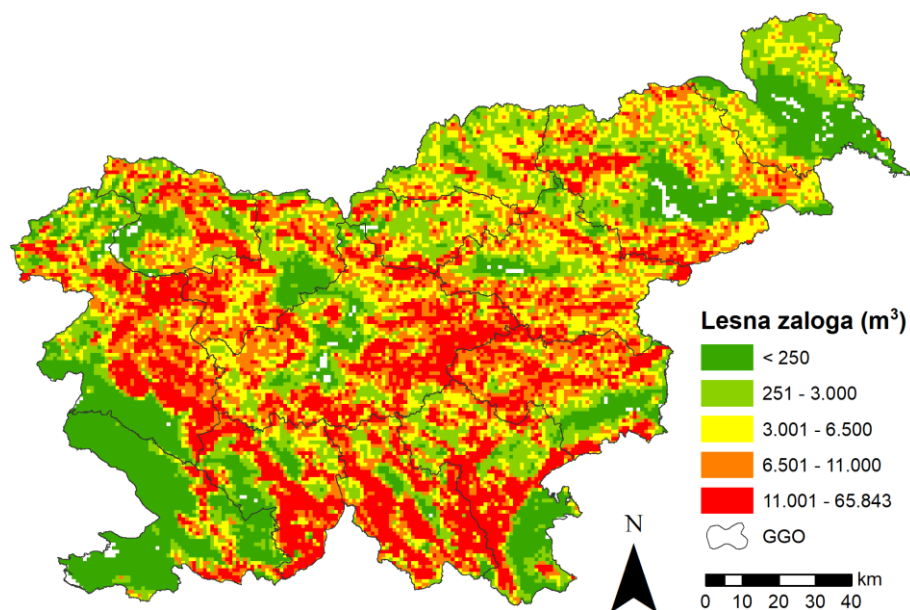
Slika 40. Verjetnost in koeficient variacije potencialne razširjenosti navadne bukve v Sloveniji 2021–2100 glede na skupen model, RCP8.5 in devet GCM. Verjetnost prikazujejo zgornje štiri slike, koeficient variacije pa spodnje štiri slike.



Slika 41. Napoved potencialne razširjenosti navadne bukve v Sloveniji glede na ansambel modelov v podatkovni zbirki EU-Trees4F, dva RCP in tri obdobja 2021–2110; prva karta prikazuje napoved za referenčno obdobje 1991–2020 (Mauri in sod., 2022)

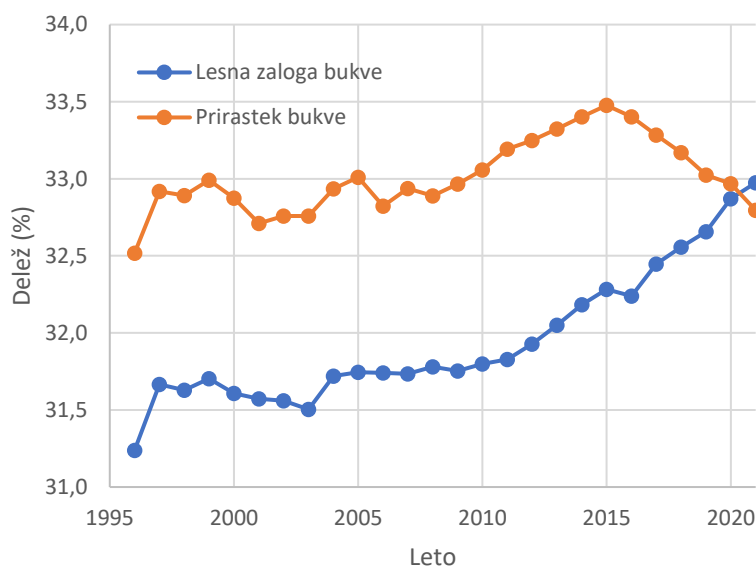
4.3.5 Lesna zaloga, prirastek, varstveno-sanitarni posek bukve

Navadna bukev se pojavlja po vsej Sloveniji v vseh gozdovih (**Slika 42**). Lesna zaloga navadne bukve v modelski celici je bila zelo variabilna. V jugozahodni, nekaterih predelih vzhodne Slovenije je bila lesna zaloga bukve v modelski celici nizka (pod 250 m^3).



Slika 42. Lesna zaloga navadne bukve leta 2021 (m^3 v modelski celici $1 \times 1 \text{ km}$)

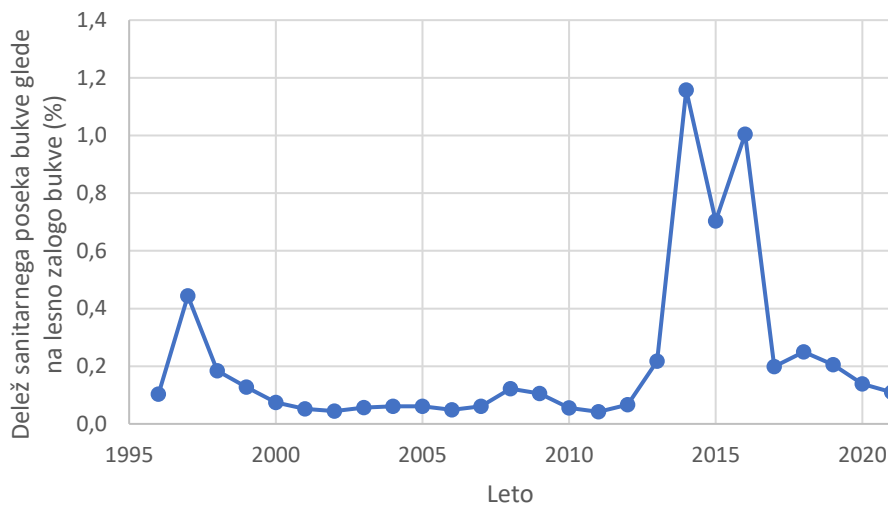
Delež lesne zaloge bukve narašča od 1996–2021 (**Slika 43**). Glede na trend bo lesna zaloga bukve še naprej naraščala še vsaj nekaj let. Delež prirastka bukve glede na cel prirastek je naraščal od 2008 do 2015, od 2015 naprej pa je pričel upadati (**Slika 43**), kar je verjetno posledica splošne starosti bukve in njene debelinske sestave.



Slika 43. Delež lesne zaloge bukve in prirastka bukve glede na celotno lesno zalogo in celoten prirastek 1996–2021

Delež sanitarnega poseka bukve 1996–2021 glede na njeno lesno zalogo je v povprečju znašal samo 0,21 % (**Slika 44**). Samo v izjemnih naravnih nesrečah, kot je bil snegolom in žledolom leta 1996 ter

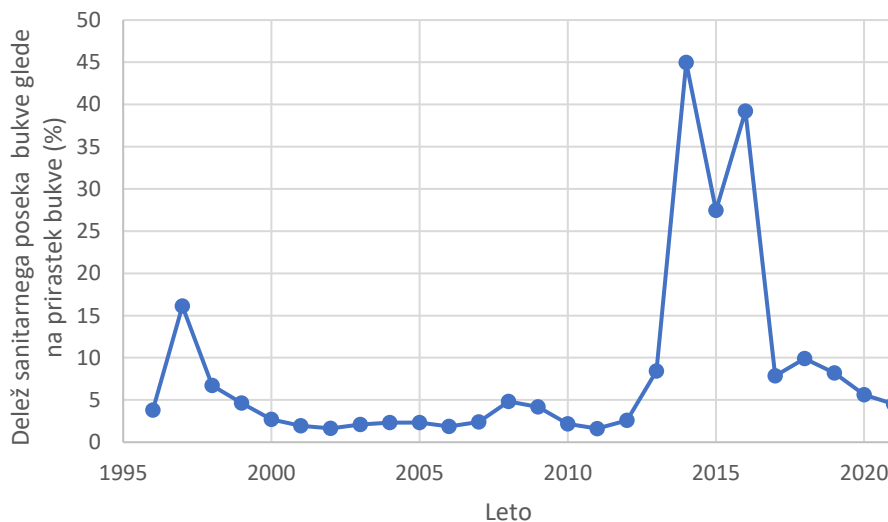
žledolom 2014, se delež sanitarnega poseka bukve glede na lesno zalogo presegele 0,4 % z maksimumom 1,16 % leta 2014.



Slika 44. Delež sanitarnega poseka navadne bukve glede na lesno zalogo bukve 1996–2021

Podoba krivulje deleža sanitarnega poseka bukve 1996–2021 glede na njen prirastek je identična kot delež sanitarnega poseka bukve glede na lesno zalogo bukve (**Slika 45**, **Slika 44**). Delež sanitarnega poseka bukve 1996–2021 glede na njen prirastek je v povprečju znašal 8,5 % (**Slika 45**). Največjo vrednost je dosegel leta 2014 po katastrofalnem žledolomu, ko je znašal 45 %.

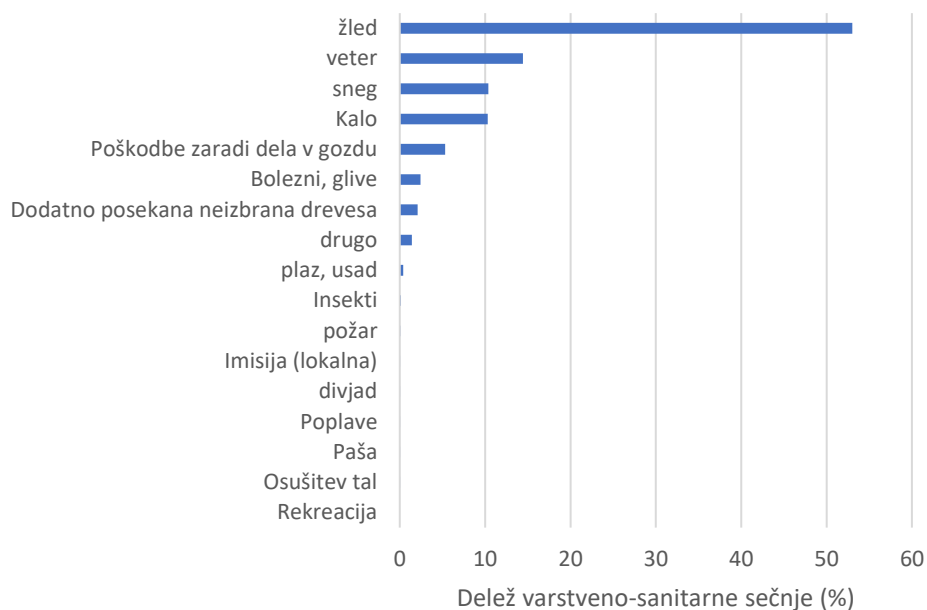
Opažamo, da je delež sanitarnega poseka bukve po žledolomu 2014 ostal na višji ravni kot pred tem (**Slika 44**). To pravilo opažamo tudi pri drugih naravnih nesrečah, kot je sanitarni posek smreke zaradi podlubnikov po žledolomu leta 2014 (de Groot in sod., 2018).



Slika 45. Delež sanitarnega poseka navadne bukve glede na prirastek bukve 1996–2021

Najpomembnejši razlogi za varstveno-sanitarno sečnjo bukve 1996–2021 v Sloveniji so bili žled, veter in sneg (**Slika 46**), pri čemer žled izjemno izstopa (53 % celotne varstveno-sanitarne sečnje bukve). Veliko poškodovanih bukev gre v izgubo (kalo), kar je primerljivo s posekom zaradi snegolomov. Poškodbe bukve zaradi dela so predstavljale nezanimljivih 5,3 % varstveno-sanitarne sečnje. Zaradi

bolezni se posekalo zgolj 2,4 % bukve. Žuželke, požar, divjad, poplave, paša, plaz pa so predstavljali majhen in zanemarljiv delež v varstveno-sanitarnem poseku bukve.



Slika 46. Vrste varstveno-sanitarne sečnje bukve 1996–2021 (% celotne varstveno-sanitarne sečnje bukve)

V prihodnosti bo verjetno manj poškodb bukve zaradi žleda (Ogris, 2007) in snega (napovedi kažejo, da bo snega manj z leti), zelo verjetno pa se bo povečale poškodbe zaradi vetra. **Priporočilo: izdelati modele in dolgoročne napovedi poškodb bukve zaradi žleda, snega in vetra z najnovejšimi scenariji podnebnih sprememb.**

4.4 Zaključki

Potencialno razširjenost navadne bukve smo simulirali s šestimi vrstami modelov (GAM, GBM, GLM, MARS, MAXENT, RF). Vsi modeli so imeli relativno visoko zanesljivost ($TSS > 0,70$). Na njihovi osnovi smo zgradili skupen model, ki je imel $TSS = 0,88$.

Najpomembnejša spremenljivka je bila kontinentalnost (razlika med temperaturo zraka najtoplejšega meseca in najhladnejšega meseca). Med pomembnejšimi pojasnjevalnimi spremenljivkami je bila tudi vsebnost organskega ogljika v tleh, povprečna letna količina padavin in povprečna letna temperatura.

V letu 2021 se je bukev pojavljala po vsej Sloveniji. Napoved skupnega modela za referenčno obdobje 1970–2000 v ločljivosti 5 ločnih minut je pravilno predvidel, da se bukev pojavlja na celotnem območju Slovenije.

V obdobju 2021–2040 in 2041–2060 bo potencialna razširjenost navadne bukve glede na napovedi skupnega modela ostala na takšni ravni kot v referenčnem obdobju, tj. pojavljala se bo po vsej Sloveniji. Skupen model je napovedal, da se bo potencialna razširjenost navadne bukve verjetno pričela zmanjševati po letu 2060. Vendar so te napovedi zelo nezanesljive in variabilne.

Bukev je na ZJZ Slovenije na robu svojega areala, zato se bo predvidoma potencialno krčenje njene razširjenosti pričelo iz te smeri.

Večje spremembe v potencialni razširjenosti navadne bukve so predvidene v scenarijih, ki predvidevajo višje temperature.

S kombinacijo verjetnostne karte in karte koeficienta variacije lahko ocenimo verjetnost potencialne razširjenosti navadne bukve in zanesljivost teh napovedi. Koeficient variacije napovedi različnih GCM je na določenih območjih visok, zato je tam napoved nezanesljiva. Dlje, ko gremo v prihodnost, bolj so napovedi nezanesljive oz. variabilne. Tako so napovedi za scenarij RCP4. vključno z obdobjem 2041–2060 in naprej zelo nezanesljive za večji predel Slovenije. Za scenarij RCP8.5 pa so napovedi nezanesljive za večji del Slovenije že za prvo obdobje 2021–2040.

Ansambel modelov, ki so jih razvili Mauri in sod. (2022), je napovedal podobno kot naš skupen model, da se potencialna razširjenost navadne bukve v Sloveniji verjetno ne bo spremenila do 2051–2080. Tudi njihov model napoveduje krčenje potencialne razširjenosti navadne bukve najprej na JZ in J predelu Slovenije.

Karte potencialne razširjenosti navadne bukve glede na napoved skupnega modela za štiri SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100 so na voljo na spletnem portalu Varstvo gozdov na naslednji povezavi: <https://www.zdravgozd.si/karta.aspx?idpor=6c936364-5ff3-4621-8d82-f894f0562143>

Delež lesne zaloge bukve je naraščal od 1996 do 2021. Glede na trend bo lesna zaloga bukve naraščala še naprej. Glede na napoved skupnega modela, lahko pričakujemo, da se potencialna razširjenost bukve ne bo spremenila do 2041–2060 oz. do 2051–2080 glede na rezultate modela od Mauri in sod. (2022).

Delež varstveno-sanitarnega poseka bukve 1996–2021 glede na njeno lesno zalogo je v povprečju znašal samo 0,21 %. Samo v izjemnih naravnih nesrečah, kot je bil snegolom in žledolom leta 1996 ter žledolom 2014, je delež varstveno-sanitarnega poseka bukve glede na lesno zalogo presegel 0,4 % z maksimumom 1,16 % leta 2014, ko se je zgodil katastrofalni žledolom. Zato lahko domnevamo, da škodljivi dejavniki v bližnji prihodnosti še ne bodo imeli večjega vpliva na razširjenost navadne bukve v Sloveniji. Ampak to še ne pomeni, da škodljivi dejavniki ne bodo imeli vpliva na razširjenost navadne bukve dolgoročno.

Glede na trende s popisa poškodovanosti gozdov bodo bolezni predvidoma povzročile visoko poškodovanost bukve do konca 21. stoletja (Ogris, 2023b). Posledično se bo verjetno postopoma povečala varstveno-sanitarna sečnja bukve zaradi njih. Prav tako lahko pričakujemo višje deleže varstveno-sanitarne sečnje zaradi žuželk (Ogris, 2023b; Ogris in sod., 2008).

Po napovedih bo povprečna osutost bukove krošnje leta 2100 znašala več kot 70 % na območju celotne Slovenije (Ogris, 2023a). Zato domnevamo, da bo lahko do konca 21. stoletja v povprečju prišlo do močnega poškodovanja bukove krošnje in zelo verjetno do sušenja bukve. Pri temu procesu bo imela velik vpliv suša. Ugotovili smo, da je kumulativno število dogodkov suše v pozitivni korelaciji s povprečno osutostjo bukove krošnje (Ogris, 2023a).

Napovedi poškodovanosti bukve zaradi bolezni (Ogris, 2023b) in osutosti bukove krošnje zaradi sušnega stresa (Ogris, 2023a) sovpadajo z napovedjo potencialne razširjenosti bukve s skupnim modelom, ko se bi areal navadne bukve pričel krčiti po letu 2060; takrat bo povprečna osutost bukve več kot 70 %, od tega bodo bolezni v povprečju poškodovale bukev več kot 50 %. Vendar so dolgoročne napovedi po letu 2060 za večji predel Slovenije zelo nezanesljive. Večjo zanesljivost ima napoved, da se bo potencialna razširjenost navadne bukve pričela krčiti iz smeri JZ in J, tj. iz smeri, kjer je zdaj na robu svojega areala.

Napovedi, ki smo jih naredili v tej raziskavi ne vključujejo tveganj, ki jih prinašajo invazivne tujerodne vrste tako rastlin kot škodljivih organizmov. Rezultati ne upoštevajo tudi sprememb v rabi tal. Vsi naštetih (pa še kakšni) dejavniki lahko imajo velik vpliv na potencialno razširjenost navadne bukve v Sloveniji, kar dodatno poveča nezanesljivost napovedi potencialne razširjenosti navadne bukve, ki so bile narejene v tej študiji.

4.5 Viri

- Allouche O., Tsoar A., Kadmon R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 6: 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Barbet-Massin M., Jiguet F., Albert C.H., Thuiller W. 2012. Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 2: 327-338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Caudullo G., Welk E., San-Miguel-Ayán J. 2022. Chorological maps for the main European woody species. *Data in Brief*, 12: 662-666. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.05.007>
- Chakraborty D., Móricz N., Rasztovits E., Dobor L., Schueler S. 2021. Provisioning forest and conservation science with high-resolution maps of potential distribution of major European tree species under climate change. *Annals of Forest Science*, 78, 2: 26. [10.1007/s13595-021-01029-4](https://doi.org/10.1007/s13595-021-01029-4)
- de Groot M., Ogris N., Kobler A. 2018. The effects of a large-scale ice storm event on the drivers of bark beetle outbreaks and associated management practices. *Forest Ecology and Management*, 408: 195-201. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.035>
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC. 2009. Harmonized world soil database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/> (15.8.2022)
- Fick S.E., Hijmans R.J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 12: 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R.A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12, 2: e0169748. [10.1371/journal.pone.0169748](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748)
- Jurc D., Piškur B., Smolnikar P., Ogris N. 2019. Poročilo o preskusu št. LVG 2019-010: pooglenitev bukve, *Biscogniauxia nummularia*, ZGS OE Tolmin, Škvarska rajda. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Laboratorij za varstvo gozdov: 4 str.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. 2006. World Map of Köppen-Geiger Climate Classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 3: 259-263. [10.1127/0941-2948/2006/0130](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130)
- Mauri A., Girardello M., Strona G., Beck P.S.A., Forzieri G., Caudullo G., Manca F., Cescatti A. 2022. EU-Trees4F, a dataset on the future distribution of European tree species. *Scientific Data*, 9, 1: 37. [10.1038/s41597-022-01128-5](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01128-5)
- Merow C., Smith M.J., Silander Jr J.A. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 10: 1058-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Noce S., Collalti A., Santini M. 2017. Likelihood of changes in forest species suitability, distribution, and diversity under future climate: The case of Southern Europe. *Ecology and Evolution*, 7, 22: 9358-9375. <https://doi.org/10.1002/ece3.3427>
- Ogris N. 2007. Model zdravja gozdov v Sloveniji: doktorska disertacija. Ljubljana, [N. Ogris]: 138 str.

- Ogris N. 2023a. Bolezni, škodljivci in sušni stres pri navadni bukvi v različnih scenarijih podnebnih sprememb (V4-2026). Aktivnost 3.1: Vpliv suše na hiranje bukve. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 20 str.
- Ogris N. 2023b. Bolezni, škodljivci in sušni stres pri navadni bukvi v različnih scenarijih podnebnih sprememb (V4-2026). Aktivnost 3.2: Vpliv boleznin in škodljivcev na hiranje bukve. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 26 str.
- Ogris N., Jurc M., Jurc D. 2008. Varstvo bukovih gozdov - danes in jutri. V: Bukovi gozdovi: ekologija in gospodarjenje. Zbornik razširjenih povzetkov XXVI. gozdarskih študijskih dni. Bončina A. (ed.). Čatež ob Savi, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 36–39
- Ogris N., Skudnik M. 2021. V Sloveniji se povečuje osutost bukove krošnje. Gozdarski vestnik, 79, 5-6: 226-237
- Takolander A., Hickler T., Meller L., Cabeza M. 2019. Comparing future shifts in tree species distributions across Europe projected by statistical and dynamic process-based models. *Regional Environmental Change*, 19, 1: 251-266. 10.1007/s10113-018-1403-x
- Team R.C. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Thuiller W., Georges D., Gueguen M., Engler R., Breiner F., Lafourcade B., Patin R. 2023. biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 4.2-2. <https://CRAN.R-project.org/package=biomod2> (21.2.2023)
- Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araújo M.B. 2009. BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32, 3: 369-373. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x>
- Thuiller W., Lavorel S., Araújo M.B., Sykes M.T., Prentice C. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 23: 8245–8250
- ZGS. 2021. Sestojna karta. Grafični sloj. Zavod za gozdove Slovenije
- Zhang L., Liu S., Sun P., Wang T., Wang G., Zhang X., Wang L. 2015. Consensus Forecasting of Species Distributions: The Effects of Niche Model Performance and Niche Properties. *PLOS ONE*, 10, 3: e0120056. 10.1371/journal.pone.0120056
- Žlindra D., Levanič T., Rupel M., Skudnik M. 2015. Degradation of *Fagus sylvatica* on Trnovo plateau in southwest Slovenia. V: Long-term trends and effects of air pollution on forest ecosystems, their services, and sustainability, 4th ICP Forests Scientific Conference, May 2015, Ljubljana, Slovenia. Seidling W. (ed.). Ljubljana, Slovenian Forestry Institute, The Silva Slovenica Publishing Centre: 49-49

5 Priporočila in usmeritve za dolgoročno gospodarjenje z navadno bukvijo z vidika njenega zdravja (Aktivnost 4.1)

Nikica Ogris, Maarten de Groot, Barbara Piškur, Marija Kolšek

5.1 Uvod

Cilj aktivnosti 4.1. je bil izdelati priporočila in usmeritve za dolgoročno gospodarjenje z navadno bukvijo v Sloveniji z vidika njenega zdravja, vključno s predlogi ukrepov za izboljšanje zdravstvenega stanja navadne bukve.

V priporočila in usmeritve smo integrirali rezultate delovnega sklopa 2 in 3 ter strategije in usmeritve drugih avtorjev.

Pozor: priporočila in usmeritve dolgoročnega gospodarjenja z navadno bukvijo so podana zgolj z vidika njenega zdravja in niso obravnavana celostno.

5.2 Strokovne podlage za usmeritve

- Rezultati popisa poškodovanosti gozdov kažejo na večanje osutosti bukve in na njeno dolgoročno hiranje. Povprečna osutost bukove krošnje v Sloveniji v letu 2020 je bila 32,2 %. Dolgoročen linearen trend je pokazal, da se povprečna osutost bukove krošnje povečuje za 0,63 % na leto (Ogris, 2020, 2023a; Ogris in Skudnik, 2021).
- Po napovedih bo povprečna osutost bukove krošnje leta 2100 znašala več kot 70 % na območju celotne Slovenije (Ogris, 2023a). Zato domnevamo, da bo lahko do konca 21. stoletja v povprečju prišlo do močnega poškodovanja bukve in zelo verjetno do sušenja bukve na lokacijah, kjer bo bukev najbolj poškodovana. Pri temu procesu bo imela velik vpliv suša in drugi škodljivi dejavniki.
- Glede na trende s popisa poškodovanosti gozdov bodo bolezni predvidoma povzročile visoko poškodovanost bukve do konca 21. stoletja (Ogris, 2023b; Ogris in Skudnik, 2021). Posledično se bo verjetno postopoma povečala varstveno-sanacijska oz. sanitarna sečnja bukve zaradi njih. Prav tako lahko pričakujemo višji delež sanitarne sečnje bukve zaradi žuželk (Ogris in sod., 2008).
- Delež lesne zaloge bukve je naraščal od 1996 do 2021. Glede na trend bo lesna zaloga bukve naraščala še naprej vsaj še nekaj let (Ogris, 2023c; Poljanec Aleš in sod., 2012).
- V obdobju 2021–2060 bo potencialna razširjenost navadne bukve glede na napovedi ansamblov modelov ostala na takšni ravni kot v referenčnem obdobju, tj. pojavljala se bo po vsej Sloveniji (Ogris, 2023c).
- Bukve je na ZJZ in JZ Slovenije na robu svojega areala, zato se bo predvidoma potencialno krčenje njene razširjenosti pričelo iz te smeri, tj. v submediteranski regiji (Mauri in sod., 2022; Ogris, 2023c; Poljanec Aleš in sod., 2012). V tej regiji bi bila bukev lahko ogrožena zaradi občutljivosti na pomanjkanje vode in daljša sušna območja (Poljanec Aleš in sod., 2012), kar bi povečalo njeno dovzetnost za bolezni in škodljivce (Ogris in sod., 2008). Na teh območjih je ogroženo trajnostno gospodarjenje z navadno bukvijo v Sloveniji.
- Dolgoročne napovedi potencialne razširjenosti navadne bukve so nezanesljive in zelo variabilne (Ogris, 2023c).
- Kljub napovedim o zmanjšanju trenutnega areala razširjenosti bukve v Sloveniji zaradi podnebnih sprememb pričakujemo v prihodnjih desetletjih njeno širjenje (Poljanec Aleš in sod., 2012). Predvidevamo, da se bo pojavila na območjih gozdov, ki ustrezajo njenim ekološkim zahtevam, v katerih pa je trenutno ni zaradi antropogenih vplivov iz preteklosti

(Poljanec Ales in sod., 2010). To so predvsem območja smrekovih nasadov, pionirskih gozdov in nekaterih vrstno spremenjenih gozdov v kolinskem in submontanskem pasu.

- Navadna bukev se v Sloveniji uspešno pomlajuje (Roženberger in Diaci, 2012). Mladje bukve je občutljivo na pozebe, suše, objedanje in konkurenco zeliščnega sloja (Roženberger in Diaci, 2012). Na bukovem mladju se pojavljajo škodljivi organizmi, ki vplivajo na njeno zdravje. Vendar do danes poročil o resnem vplivu škodljivih organizmov na pomlajevanje mladja na obsežnih območjih ni. Bukve je tudi manj priljubljena pri rastlinojedih živali (Poljanec Aleš in sod., 2012).
- Skoraj po vsej Evropi se zmanjšuje letni prirastek temeljnice navadne bukve. Po optimističnem scenariju RCP2.6 v osrednji Evropi do konca 21. stoletja verjetno ne bo prišlo do večjih sprememb (v gorskem svetu se naj bi prirastek celo povečal). Po pesimističnem scenariju RCP8.5 pa bi prišlo v osrednji Evropi do zmanjšanja prirastka 20–30 % (Martinez del Castillo in sod., 2022). Širina branik je manjša ob pojavu suše in visokih temperatur (Decuyper in sod., 2020). Bukve se lahko delno fiziološko prilagodi na sušni stres, ki se ponavlja, vendar je ta prilagoditev omejena (Knutzen, 2016). Po scenariju RCP4.5 se bo v obdobju 2081–2100 potencialna razširjenost bukve v Sloveniji skrčila na 90 % gozdov, po scenariju RCP7.0 na 78,2 % gozdov, po scenariju RCP8.5 pa je predviden velik upad na 41,5 % gozdov (Ogris, 2023c).
- Tveganje za bukev predstavljajo nekateri invazivni tujerodni škodljivi organizmi, npr. *Anoplophora chinensis*, *Orgyia leucostigma*, *Phytophthora kernoviae* (EPPO, 2023). Ti organizmi imajo sposobnost napasti oz. okužiti in resno poškodovati popolnoma zdrava drevesa. Nobeden od naštetih invazivnih tujerodnih škodljivih organizmov še ni bil najden v Sloveniji, vendar so nekateri že prisotni v Evropi, npr. *Anoplophora chinensis* in *Phytophthora kernoviae*. Ker gre za karantenske škodljive organizme, bo pomembno, da jih najdemo čim prej, ko bodo vneseni v državo. Takrat bo aktiviran državni načrt izrednega ukrepanja proti škodljivim organizmom. Ta tveganja niso vključena v trenutne napovedi potencialne razširjenosti bukve v prihodnosti.
- Proizvodna doba je močno odvisna od bonitete rastišča (Kadunc, 2012). Na rastiščih s SI_{100} okoli 20 m naj bi proizvodna doba bukve trajala ok. 150 let, na rastiščih s SI_{100} ok. 32 m pa naj bi bila že krajša od 100 let (Kadunc, 2012).
- Mešani gozdovi povečujejo odpornost proti podnebnim spremembam (Gessler in sod., 2007).
- Povečala se bo požarna ogroženost gozdov v Sloveniji na splošno, povečala se bo ogroženost bukovih gozdov zaradi naravnih ujm, predvsem suše, vetra, toče in zmrzali.
- Vzrok za hiranje bukve je kompleksna bolezen, v katero je vključenih več škodljivih dejavnikov. Bolezni povzročijo v povprečju večjo poškodovanost navadne bukve v Sloveniji kot žuželke in drugi škodljivi dejavniki. V zdravih drevesih se pojavlja ista združba gliv in žuželk kot v poškodovanih. V poškodovanih delih dreves se najpogosteje pojavljajo endofiti, kot so *Neohendersonia kickxii*, *Neonectria coccinea* in *Apiognomonium errabunda*. Zato so izjemnega pomena zunanji sprožilni dejavniki, ki spodbudijo patogeno delovanje teh vrst (Ogris in sod., 2023).

5.3 Strategije, priporočila in usmeritve za dolgoročno gospodarjenje z navadno bukvijo v Sloveniji z vidika njenega zdravja

- Upoštevamo splošne smernice gospodarjenja z gozdovi v Sloveniji: sonaravno, trajnostno in večnamensko gospodarjenje (RS, 1993).
- Upoštevamo smernice gospodarjenja z bukovimi gozdovi (Bončina, 2012; Bončina in sod., 2021).
- Izvajamo adaptivno gospodarjenje z gozdovi, ki temelji na učenju in dopolnjevanju upravljanja na podlagi ukrepanja (Bončina in Klopčič, 2022). Koncept prilagajanja gozdov podnebnim

spremembam vključuje naslednje faze: (1) okvirni pogoji; (2) izhodišče, analiza stanja; (3) ocena ogroženosti gozdov; (4) cilji gospodarjenja glede na ogroženost gozdov; (5) strategije, smernice in ukrepi prilagajanja; (6) izvedba; (7) monitoring.

- Pri odločanju o prilagoditvenih ukrepih upoštevamo dejanske razmere v območju (rastiščne razmere, cilje gospodarjenja, stopnjo ogroženosti gozdov) (Bončina in Klopčič, 2022).
- Dopolniti koncept upravljanja gozdov, ki bo vključeval tudi upravljanje tveganj (Bončina, 2022).
- Pospešiti vključevanje analiz tveganj v gozdnogospodarsko načrtovanje z uporabo stohastičnih modelov odločanja, izdelavo scenarijev in ekonomskih vrednotenj (Ficko, 2022).
- Nekateri naloge/ukrepi za prilagojeno upravljanje gozdov ob upoštevanju tveganj (prilagojeno po Ficko, 2019):
 - Pripraviti metodologijo za kategorizacijo gozdnih sestojev in njihovih rastišč po občutljivosti na napovedane podnebne spremembe (rastiščno gojitveni tipi).
 - Ciljno spodbujati in sofinancirati gozdnogojitvene ukrepe za prilagajanje na podnebne spremembe.
 - Vgraditi tveganja v gozdnogospodarsko načrtovanje z izdelavo kazalnikov tveganosti.
 - Pospeševati razvoj modelov za razvoj gozdov ter modelov za škodljive biotske in abiotske dejavnike.
- Pospešujemo mešane, malopovršinsko raznodobne gozdove z veliko vrstno in genetsko pestrostjo, ki povečuje odpornost proti podnebnim spremembam (Gessler in sod., 2007).
- Stremimo k uravnoteženju razvojnih faz. Vzdržujemo in povečujemo strukturno pestrost gozdov (Bončina in Klopčič, 2022).
- Uvajamo provenience bukve, ki so prilagojene na sušo (Gessler in sod., 2007; Pluess in Weber, 2012).
- Na območjih nagnjenih k večji verjetnosti sušnega stresa postopoma skrajšujemo proizvodno dobo bukovih sestojev.
- Na območjih bukovih gozdov, ki imajo visoko tveganje zaradi sušnega stresa, prilagodimo vrstno sestavo in uvajamo sušno zdržne vrste.
- V naslednjih 30–40 letih pomladiti bukove debeljake, s poudarkom na območjih, kjer je osutost bukve večja kot 30 %.
- Na območja z večjim tveganjem z zmrzaljo postopoma uvajamo provenience bukve, ki odganjajo kasneje.
- Zasnovati semenske sestoje bukve, kjer se bi pridobivalo seme bukve, ki odganja kasneje.
- Izvajati ukrepe za zgodnje zaznavanje invazivnih tujerodnih vrst – rastlin, boleznih in škodljivcev.
- Redno izvajati sanitarno sečnjo, kar zmanjšuje vpliv boleznih in škodljivcev.
- Informirati in promovirati prilagajanje gospodarjenja z gozdovi podnebnim spremembam (Seppälä in sod., 2009).
- Nadaljevati vsako letno spremljanje poškodovanosti gozdov (monitoring).
- Prilagoditev pravnih aktov, ki bo omogočala bolj učinkovito izvajanje ukrepov za prilagajanje podnebnim spremembam (Keenan, 2015).
- Zmanjševati vpliv sprožilnih dejavnikov hiranja bukve, kot so suša, pozeba in defolijatorji.

5.4 Viri

Bončina A. (ed.) 2012. Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje. Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani: 469 str.

- Bončina A. (ed.) 2022. Gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji do leta 2030: razvojni problemi in njihovo reševanje : XXXVIII. Gozdarski študijski dnevi. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 136 str. <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?lang=slv&id=164320&dn=>
- Bončina A., Klopčič M. 2022. Podnebne spremembe in prilagoditeno gospodarjenje z gozdovi. V: Gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji do leta 2030: razvojni problemi in njihovo reševanje : XXXVIII. Gozdarski študijski dnevi. Bončina A. (ed.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 128-136 <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=142823>
- Bončina A., Rozman A., Dakskobler I., Klopčič M., Babij V., Poljanec A. 2021. Gozdni rastiščni tipi Slovenije: vegetacijske, sestojne in upravljaljske značilnosti Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani in Zavod za gozdove Slovenije: 576 str.
- Decuyper M., Chávez R.O., Čufar K., Estay S.A., Clevers J.G.P.W., Prislan P., Gričar J., Črepinšek Z., Merela M., de Luis M., Notivoli R.S., del Castillo E.M., Rozendaal D.M.A., Bongers F., Herold M., Sass-Klaassen U. 2020. Spatio-temporal assessment of beech growth in relation to climate extremes in Slovenia – An integrated approach using remote sensing and tree-ring data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287: 107925. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107925>
- EPPO. 2023. EPPO Global Database. France. <https://gd.eppo.int/> (13.3.2023)
- Ficko A. (ed.) 2019. Ukrepi za prilagojeno upravljanje gozdov ob izjemnih vremenskih dogodkih. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 114 str.
- Ficko A. 2022. Upravljanje gozdov kot upravljanje tveganj. V: Gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji do leta 2030: razvojni problemi in njihovo reševanje : XXXVIII. Gozdarski študijski dnevi. Bončina A. (ed.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 45-50 <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?lang=slv&id=164320&dn=>
- Gessler A., Keitel C., Kreuzwieser J., Matyssek R., Seiler W., Rennenberg H. 2007. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees*, 21: 1–11
- Kadunc A. 2012. Rastne značilnosti, kakovost lesa, pojav rdečega srca in vrednostne karakteristike bukovih sestojev. V: Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje. Bončina A. (ed.). Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani: 209-229
- Keenan R.J. 2015. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Annals of Forest Science*, 72, 2: 145-167. 10.1007/s13595-014-0446-5
- Knutzen F. 2016. Response of European beech to decreasing summer precipitation under global climate change. Göttingen, Georg-August-University Göttingen: 185 str.
- Martinez del Castillo E., Zang C.S., Buras A., Hackett-Pain A., Esper J., Serrano-Notivoli R., Hartl C., Weigel R., Klesse S., Resco de Dios V., Scharnweber T., Dorado-Liñán I., van der Maaten-Theunissen M., van der Maaten E., Jump A., Mikac S., Banzragch B.-E., Beck W., Cavin L., Claessens H., Čada V., Čufar K., Dulamsuren C., Gričar J., Gil-Pelegrín E., Janda P., Kazimirovic M., Kreyling J., Latte N., Leuschner C., Longares L.A., Menzel A., Merela M., Motta R., Muffler L., Nola P., Petritan A.M., Petritan I.C., Prislan P., Rubio-Cuadrado Á., Rydval M., Stajić B., Svoboda M., Toromani E., Trotsiuk V., Wilmking M., Zlatanov T., de Luis M. 2022. Climate-change-driven growth decline

- of European beech forests. *Communications Biology*, 5, 1: 163. 10.1038/s42003-022-03107-3
- Mauri A., Girardello M., Strona G., Beck P.S.A., Forzieri G., Caudullo G., Manca F., Cescatti A. 2022. EU-Trees4F, a dataset on the future distribution of European tree species. *Scientific Data*, 9, 1: 37. 10.1038/s41597-022-01128-5
- Ogris N. 2020. Hiranje navadne bukve po vsej Sloveniji 2010–2019. *Novice iz varstva gozdov*, 13: 3-7. <http://dx.doi.org/10.20315/NVG.13.2>
- Ogris N. 2023a. Bolezni, škodljivci in sušni stres pri navadni bukvi v različnih scenarijih podnebnih sprememb (V4-2026). Aktivnost 3.1: Vpliv suše na hiranje bukve. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 20 str.
- Ogris N. 2023b. Bolezni, škodljivci in sušni stres pri navadni bukvi v različnih scenarijih podnebnih sprememb (V4-2026). Aktivnost 3.2: Vpliv bolezni in škodljivcev na hiranje bukve. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 26 str.
- Ogris N. 2023c. Bolezni, škodljivci in sušni stres pri navadni bukvi v različnih scenarijih podnebnih sprememb (V4-2026). Aktivnost 3.3: Potencialna razširjenost navadne bukve glede na različne scenarije podnebnih sprememb. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 23 str.
- Ogris N., Jurc M., Jurc D. 2008. Varstvo bukovih gozdov - danes in jutri. V: *Bukovi gozdovi: ekologija in gospodarjenje. Zbornik razširjenih povzetkov XXVI. gozdarskih študijskih dni*. Bončina A. (ed.). Čatež ob Savi, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 36–39
- Ogris N., Kavčič A., Zajc J., Brglez A., de Groot M., Piškur B. 2023. Bolezni, škodljivci in sušni stres pri navadni bukvi v različnih scenarijih podnebnih sprememb (V4-2026). Aktivnost 2.1: Vzroki hiranja navadne bukve v Sloveniji. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 31 str.
- Ogris N., Skudnik M. 2021. V Sloveniji se povečuje osutost bukove krošnje. *Gozdarski vestnik*, 79, 5-6: 226-237
- Pluess A.R., Weber P. 2012. Drought-Adaptation Potential in *Fagus sylvatica*: Linking Moisture Availability with Genetic Diversity and Dendrochronology. *PLOS ONE*, 7, 3: e33636. 10.1371/journal.pone.0033636
- Poljanec A., Ficko A., Bončina A. 2010. Spatiotemporal dynamic of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Slovenia, 1970–2005. *Forest Ecology and Management*, 259, 11: 2183-2190. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.022>
- Poljanec A., Ficko A., Klopčič M., Bončina A. 2012. Razširjenost in razvojne spremembe bukovih gozdov v Sloveniji. V: *Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje*. Bončina A. (ed.). Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani: 247-257
- Roženberger D., Diaci J. 2012. Pomlajevanje bukovih gozdov. V: *Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje*. Bončina A. (ed.). Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani: 231-246
- RS. 1993. Zakon o gozdovih. Uradni list RS, št. 30/93, 56/99 – ZON, 67/02, 110/02 – ZGO-1, 115/06 – ORZG40, 110/07, 106/10, 63/13, 101/13 – ZDavNepr, 17/14, 22/14 – odl. US, 24/15, 9/16 – ZGGLRS in 77/16
- Seppälä R., Buck A., Katila P. (eds.). 2009. *Adaptation of Forests and People to Climate Change: a Global Assessment Report*. IUFRO World Series. Helsinki, International Union of Forest Research Organizations (IUFRO): 224 str.

6 Seznam rezultatov

Št.	Naslov	Cilj	DS
1	Elaborat o vzrokih hiranja navadne bukve v Sloveniji	1	2
2	Model o vplivu suše na hiranje navadne bukve	2	3
3	Elaborat o vplivu suše na hiranje navadne bukve	2	3
4	Model(i) o vplivu boleznih in škodljivcev na hiranje navadne bukve	4	3
5	Elaborat o vplivu boleznih in škodljivcev na hiranje navadne bukve	4	3
6	Model naravne razširjenosti navadne bukve v Sloveniji	4	3
7	Projekcija potencialne razširjenosti navadne bukve v prihodnjih 10–50 letih glede na tri scenarije podnebnih sprememb (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5)	4	3
8	Ocena potencialne ogroženosti navadne bukve v Sloveniji zaradi boleznih, škodljivcev in vpliva suše v prihodnjih 10–50 letih glede na tri scenarije podnebnih sprememb (RCP2.6, RCP4.5 in RCP8.5)	3	3
9	Objava rezultatov dolgoročne napovedi razširjenosti navadne bukve v Sloveniji na spletnem portalu Varstvo gozdov	4	3
10	Priporočila in usmeritve za dolgoročno gospodarjenje z navadno bukvijo z vidika njenega zdravja vključno s predlogi ukrepov za izboljšanje zdravstvenega stanja navadne bukve	5	4
11	Zaključna konferenca projekta	5	1, 4
12	Organizacija letnih srečanj z naročniki in končnimi uporabniki	5	1, 4
13	Spletna stran projekta	5	1, 4
14	Objava izvirnih znanstvenih in/ali strokovnih člankov (vsaj tri)	5	1, 4

7 Naslov spletne strani

<https://www.zdravgozd.si/projekti/bukev/>