

**GOZDARSKI INŠTITUT SLOVENIJE**  
*SLOVENIAN FORESTRY INSTITUTE*

## 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**

Nikica Ogris

Ljubljana 2023

## Kazalo vsebine

<b>1</b>	<b>Uvod</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Metode</b> .....	<b>3</b>
2.1	Priprava podatkov .....	3
2.2	Razvoj modelov.....	5
2.3	Validacija modelov.....	6
2.4	Napoved potencialne razširjenosti navadne bukve do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb .....	6
<b>3</b>	<b>Rezultati in razprava</b> .....	<b>6</b>
3.1	Zanesljivost modelov in relativna pomembnost spremenljivk.....	6
3.2	Potencialna razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju.....	7
3.3	Sprememba temperature zraka in količine padavin glede na različne scenarije podnebnih sprememb .....	9
3.4	Potencialna razširjenost navadne bukve v prihodnosti .....	11
3.5	Lesna zaloga, prirastek, varstveno-sanitarni posek bukve .....	17
<b>4</b>	<b>Zaključki</b> .....	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Viri</b> .....	<b>22</b>

## 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.

## 2 Metode

### 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 1**): 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.

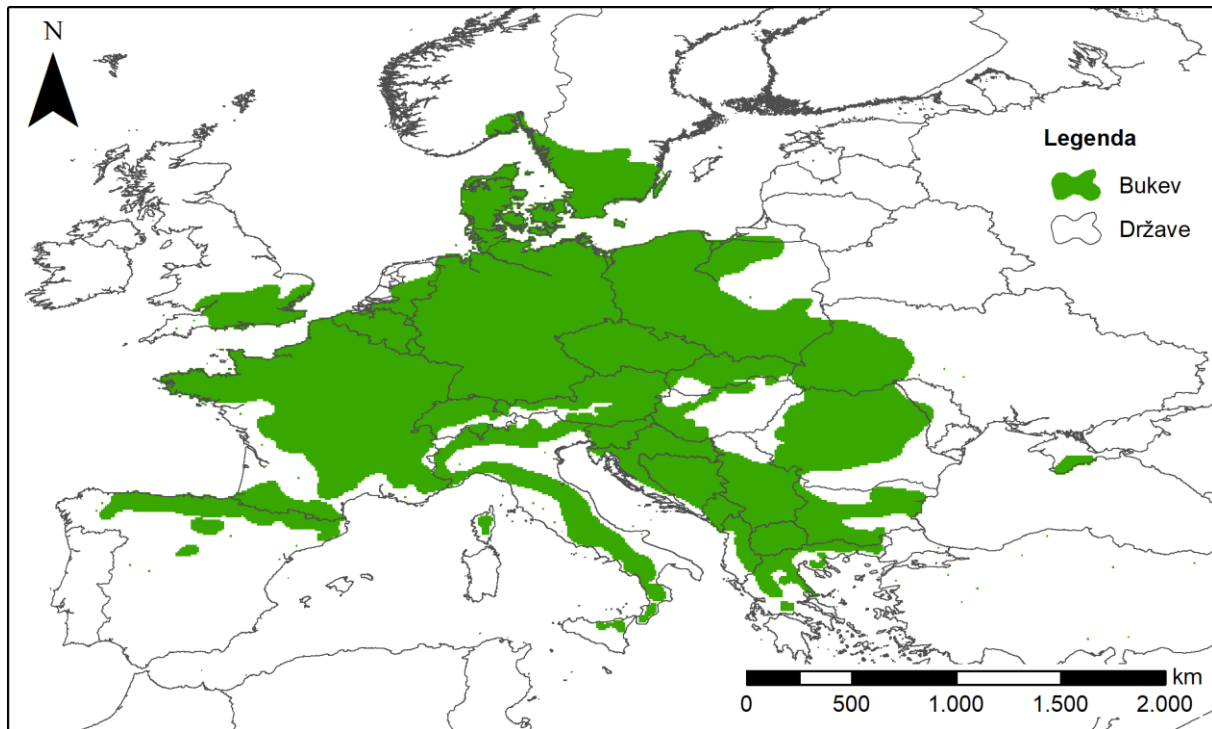
Bioklimatske spremenljivke smo pridobili iz podatkovne zbirke WorldClim 2 (Fick in Hijmans, 2017) v prostorski ločljivosti 5 ločnih minut (ok. 10 km) in 30 ločnih sekund (ok. 1 km) za obdobje 1970–2000.

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 1.** Seznam spremenljivk za razvoj modelov

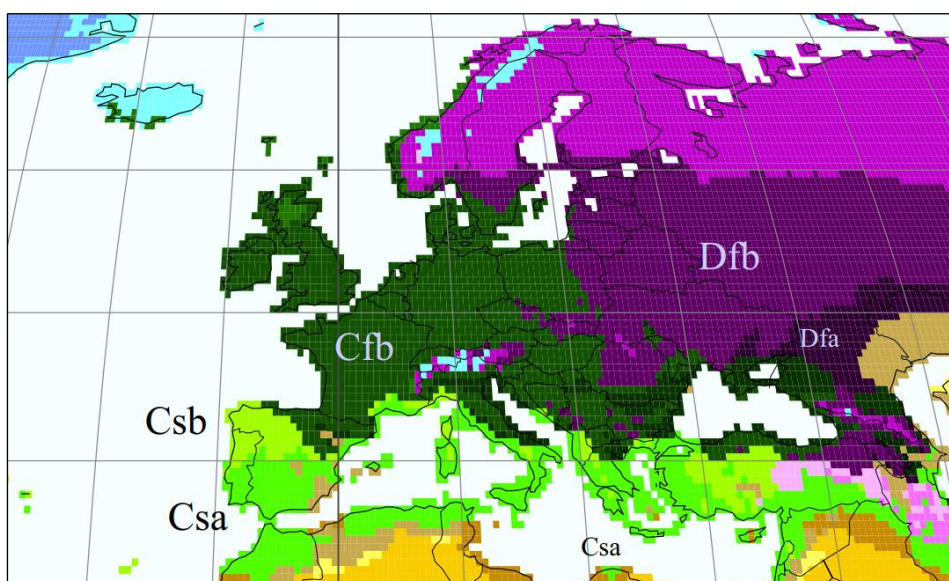
Spremenljivka	Ime spremenljivke	Vir
povprečna letna temperatura (°C)	BIO1	
poletna temperatura (°C)	BIO10	
kontinentalnost (°C)	BIO7	
povprečna letna količina padavin (mm/leto)	BIO12	Fick in Hijmans (2017)
povprečna količina padavin pozimi (mm)	BIO19	
povprečna količina padavin poleti (mm)	BIO18	
sezonskost 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 1**). Prostorsko ločljivost odvisne spremenljivke smo prilagodili prostorski ločljivosti neodvisnih spremenljivk, tj. 5 ločnih minut (ok. 10 km).



**Slika 1.** 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 2**) (Kottek in sod., 2006).



**Slika 2.** Navadna bukev se pojavlja v podnebnem tipu Cfb (zmerni klimati z veliko padavin in vročim poletjem) po klasifikaciji podnebja Köppen–Geiger (Kottek in sod., 2006)

## 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.

## 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 = občutljivost + specifičnost – 1.

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

## 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.

## 3 Rezultati in razprava

### 3.1 Zanesljivost modelov in relativna pomembnost spremenljivk

Vse vrste modelov so imele TSS > 0,70 (**Preglednica 2**). 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 2.** 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 3**). Na drugem mestu je bila skupina spremenljivk vsebnost organskega ogljika v tleh, povprečna letna količina padavin in povprečna letna temperatura.

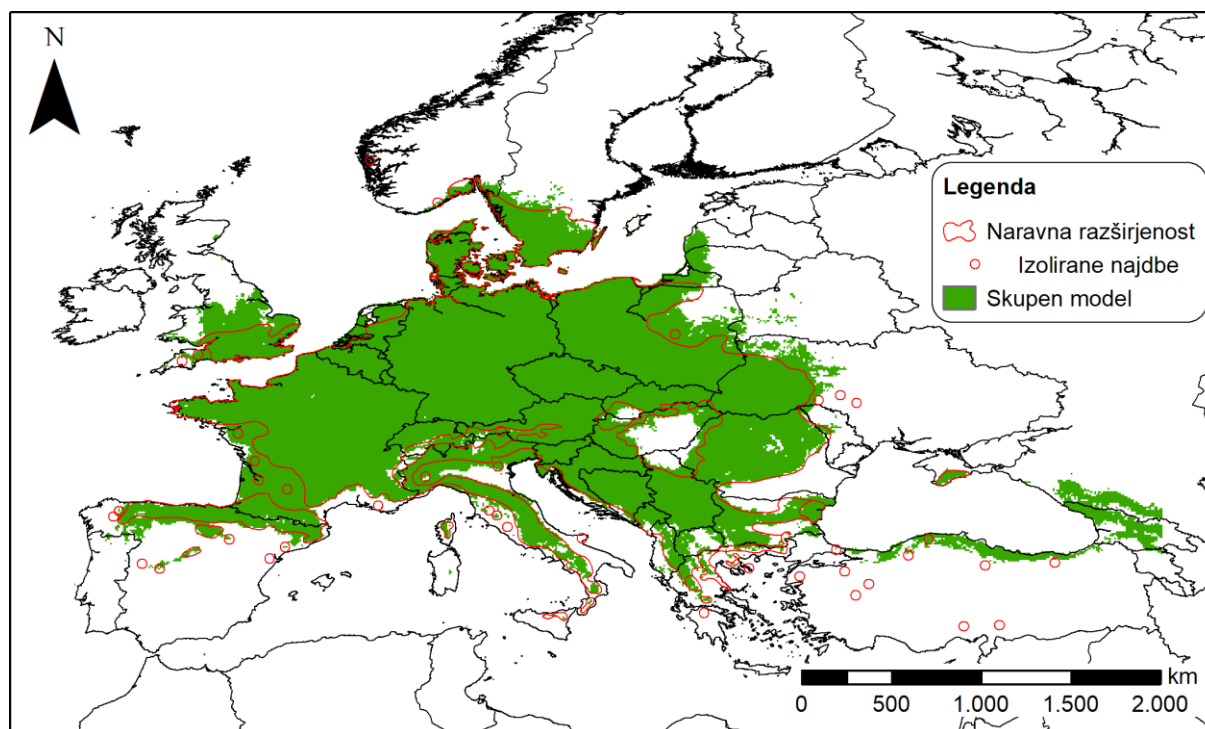
Na tretjem mestu je bila skupina spremenljivk povprečna količina padavin pozimi in poletna temperatura. Najmanj pomembne so se izkazale spremenljivke pH tal, povprečna količina padavin poleti in sezonskost padavin. Največjo variabilnost relativne pomembnosti je imela povprečna letna količina padavin.

**Preglednica 3.** 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

### 3.2 Potencialna razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju

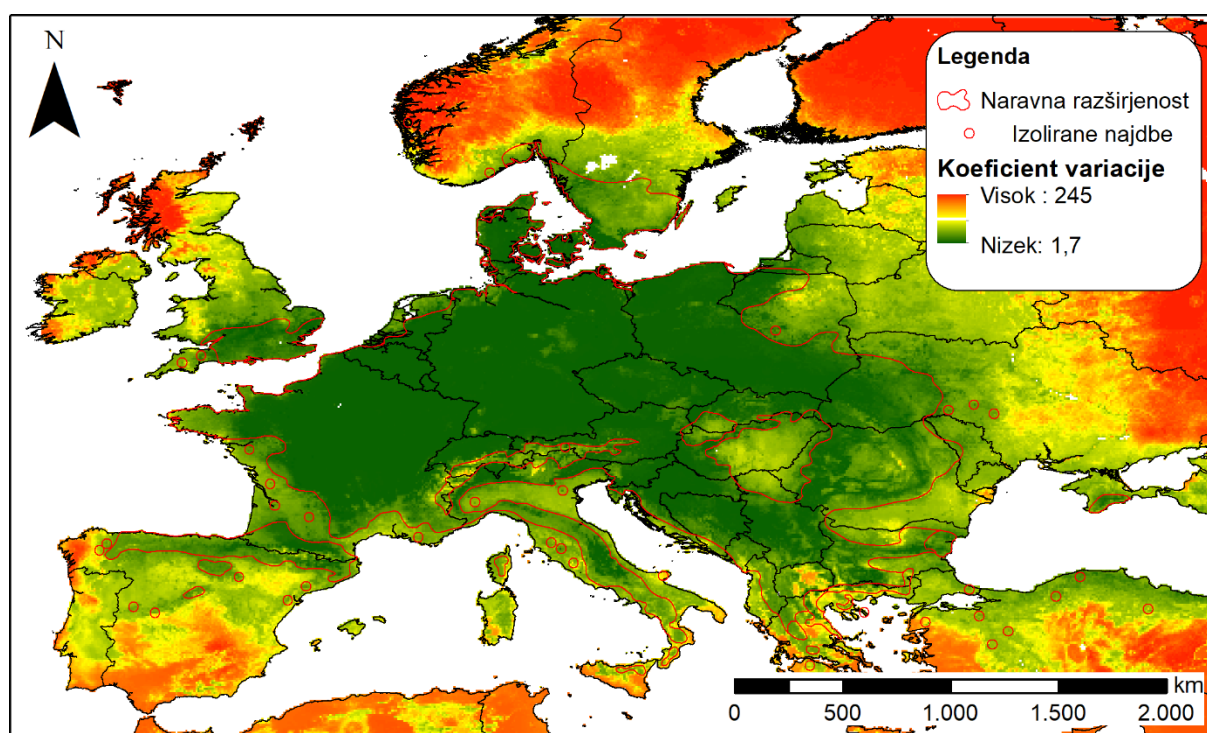
Skupen model je precej dobro napovedal potencialno razširjenost navadne bukve v Evropi v referenčnem obdobju 1970–2020 (**Slika 3**), kar je odraz relativno visoke zanesljivosti skupnega modela (**Preglednica 2**). V nekaterih območjih je napoved presegla naravni areal bukve, npr. Združeno kraljestvo, Litva, Latvija, Turčija.



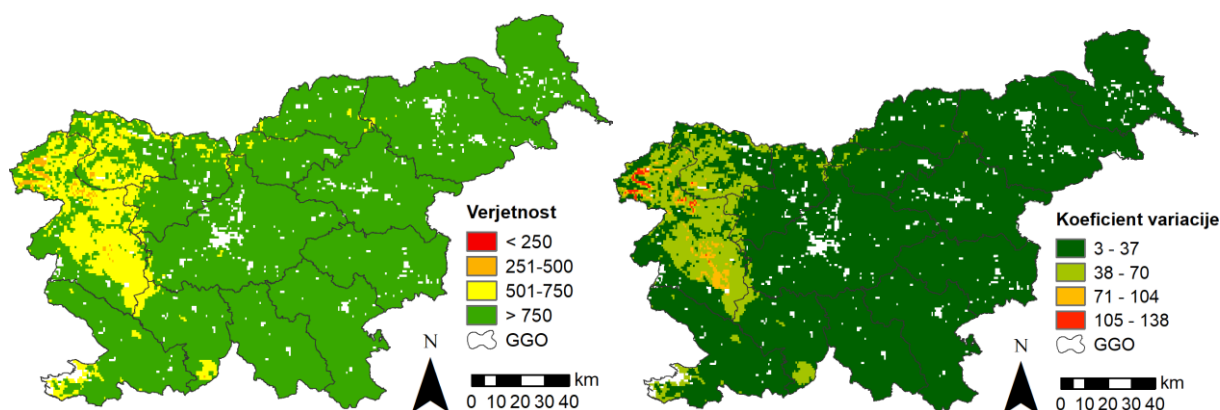
**Slika 3.** Potencialna razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju 1970–2020 v Evropi glede na napoved skupnega modela

V letu 2021 se je bukev pojavljala po vsej Sloveniji (**Slika 17**). Zahodni in jugozahodni del Slovenije leži na robu areala navadne bukve (**Slika 1**, **Slika 3**). 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 4, Slika 5). 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 3). 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 5), 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 4. Koeficient variacije napovedi skupnega modela za potencialno razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju 1970–2000 v Evropi

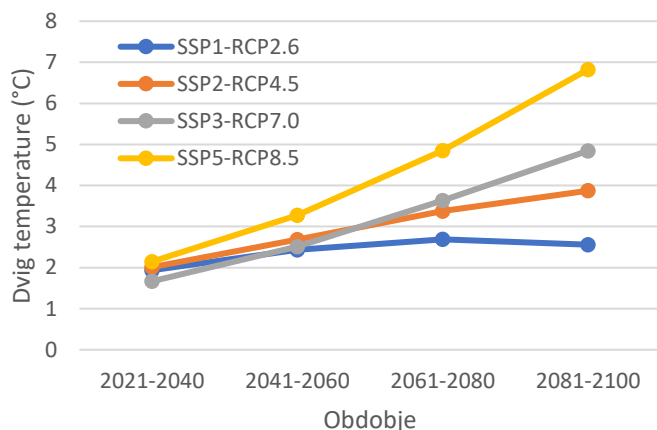


Slika 5. Verjetnost in koeficient variacije napovedi skupnega modela za potencialno razširjenost navadne bukve v referenčnem obdobju 1970–2000 v Sloveniji. Verjetnost je bila pretvorjena v interval 0–1000.

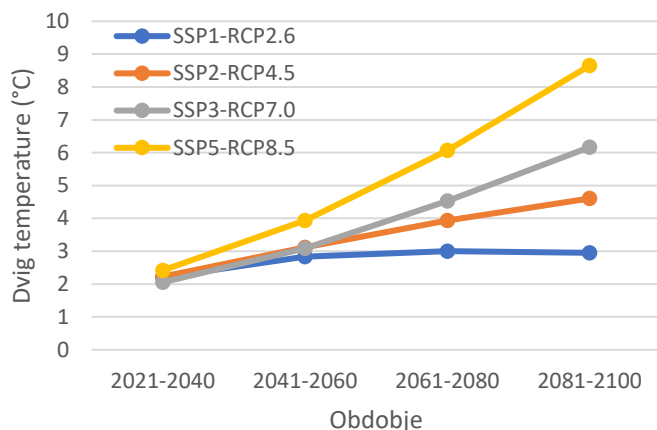


### 3.3 Sprememba temperature zraka in količine padavin glede na različne scenarije podnebnih sprememb

Vsi scenariji podnebnih sprememb napovedujejo dvig povprečne letne (**Slika 6**) in povprečne poletne (**Slika 7**) 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 6**). 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 7**).

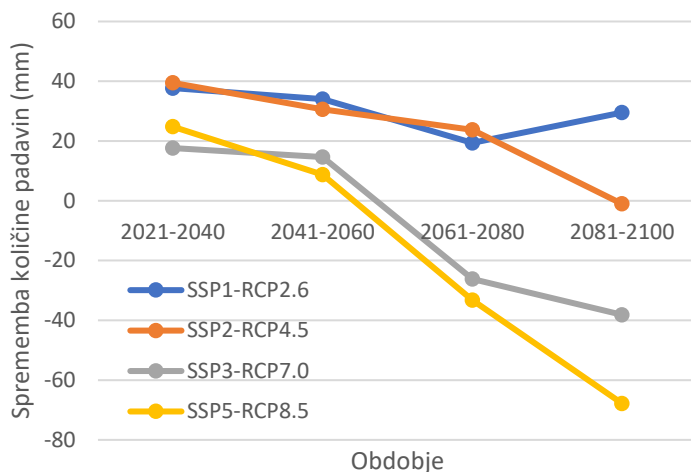


**Slika 6.** Sprememba povprečne letne temperature zraka (°C; BIO1) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100

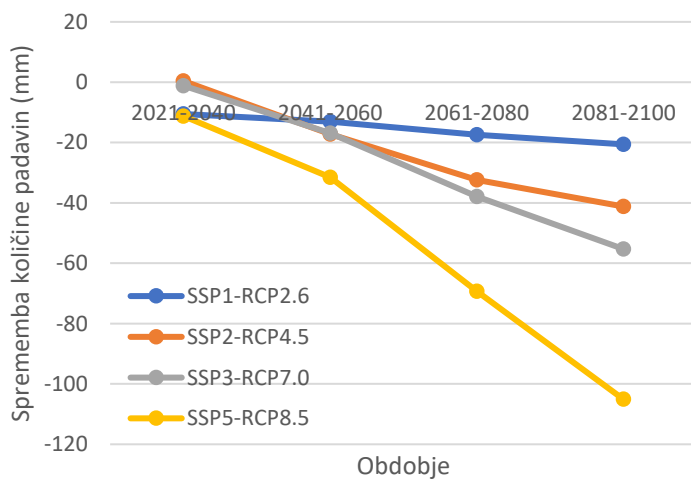


**Slika 7.** Sprememba povprečne poletne temperature zraka (°C; BIO10) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100

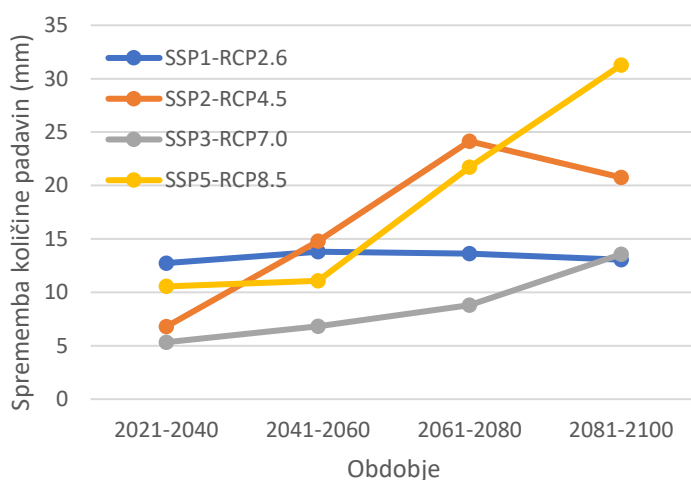
Povprečna letna in poletna količina padavin bo na območju Slovenije upadala (**Slika 8**, **Slika 9**), najmanj pri RCP 2.6, najbolj pa pri RCP 8.5, ko bi do 2100 v povprečju padlo 68 mm manj na leto in 105 mm manj poleti. Devet izbranih GCM za zimsko obdobje napoveduje večjo količino padavin v Sloveniji (**Slika 10**), 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 8.** 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 9.** 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

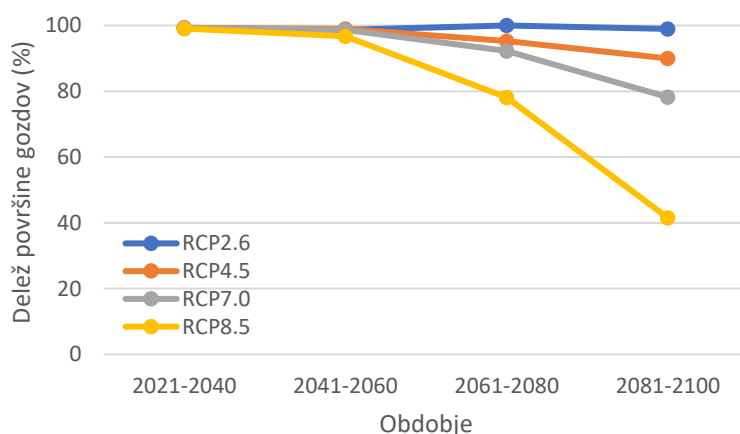


**Slika 10.** Sprememba povprečne zimske količine padavin (mm; BIO19) v Sloveniji glede na referenčno obdobje 1971–2000 in devet izbranih GCM za štiri kombinacije SSP-RCP in štiri obdobja 2021–2100

### 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 11**). Skupen model je napovedal, da se bo potencialna razširjenost navadne bukve vidneje zmanjševati po letu 2060 (**Slika 11**). 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 11**).

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 11**), 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 11**).

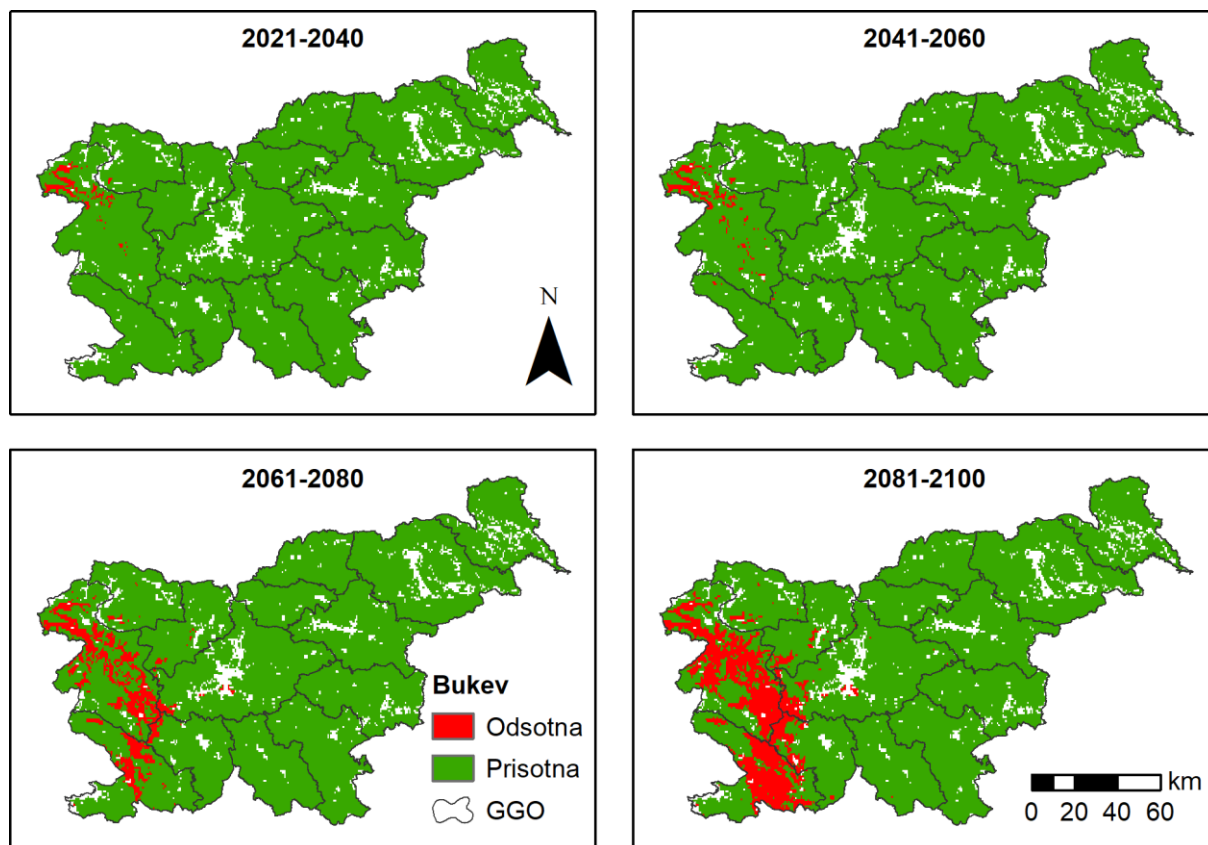


**Slika 11.** Delež gozdov, kjer se bo potencialno pojavljala navadna bukev v Sloveniji glede na rezultate skupnega modela in štiri scenarije podnebnih sprememb RCP za štiri obdobja 2021–2040 (povprečje 9 GCM in 6 vrst modelov)

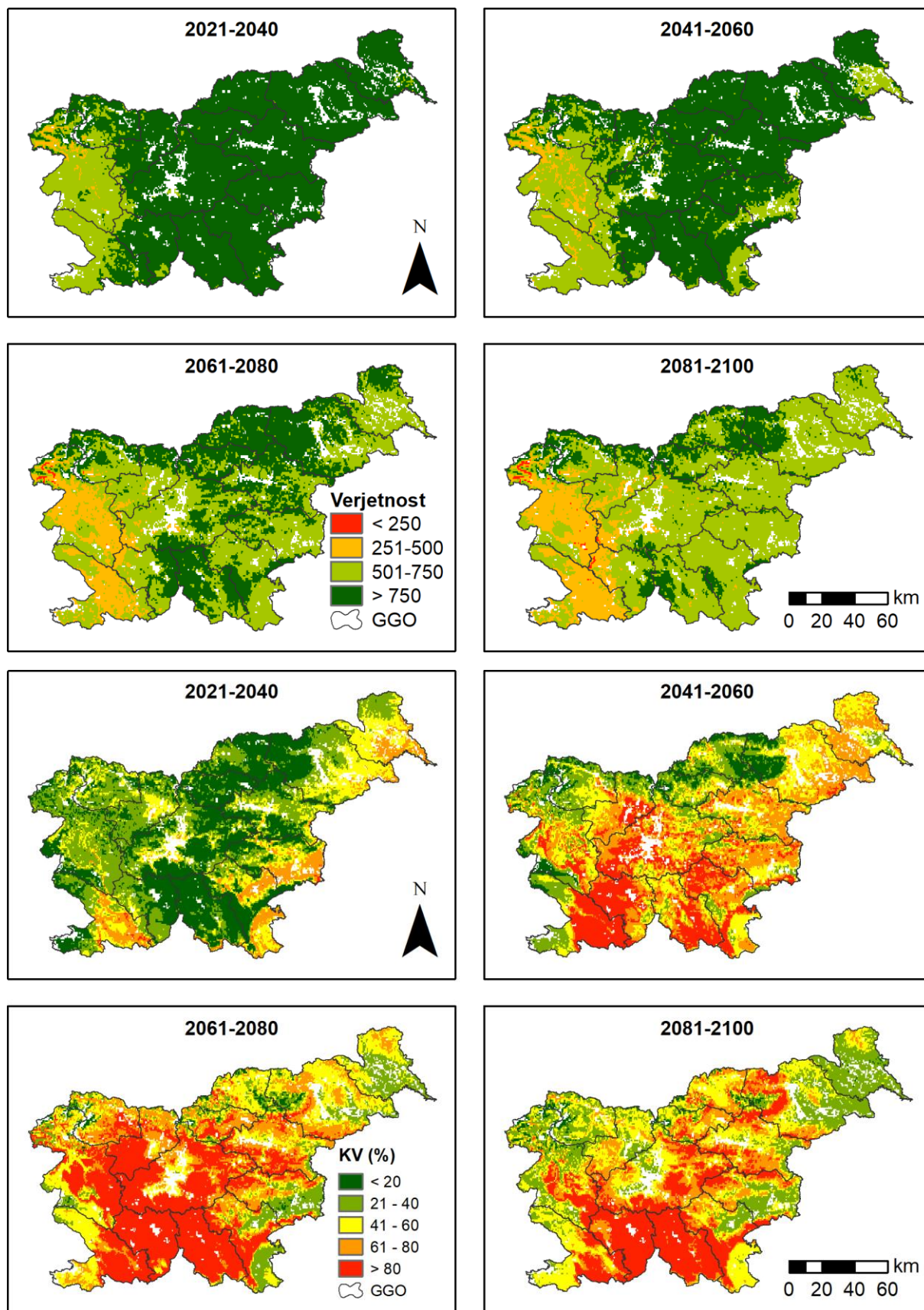
Karte potencialne razširjenosti navadne bukve 2021–2100 glede na štiri SSP-RCP so na voljo na spletnem portalu Varstvo gozdov na naslednji povezavi:

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

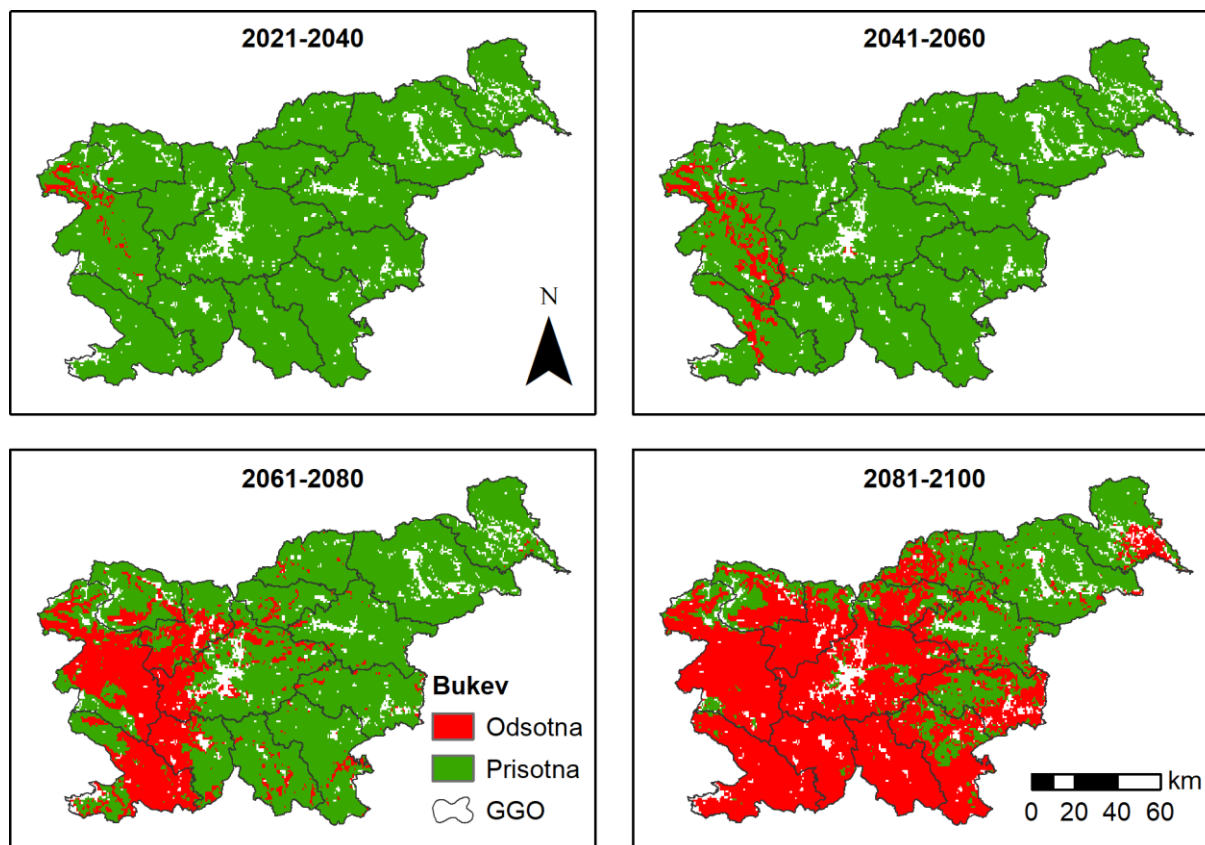
Potencialna razširjenost navadne bukve se bo zmanjševala iz smeri ZIZ (zahod jugozahod) (**Slika 12**, **Slika 13**, **Slika 14**, **Slika 15**). Tako je za obdobje 2081–2100 za RCP4.5 napovedano, da se bi potencialna razširjenost bukve zmanjšala od Bovca, do Cerknega, Žiri, Idrije, Logatca, Postojne, Ilirske Bistrice (**Slika 12**) 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 13**), 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 13**), 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 12.** Potencialna razširjenost navadne bukve v Sloveniji 2021–2100 glede na rezultate skupnega modela, RCP4.5 in devet GCM



**Slika 13.** Verjetnost in koeficient variacije potencialne razširjenosti navadne buke v Sloveniji 2021–2100 glede na skupen model, RCP4.5 in devet GCM. Verjetnost prikazujejo zgornje štiri slike, koeficient variacije pa spodnje štiri slike.

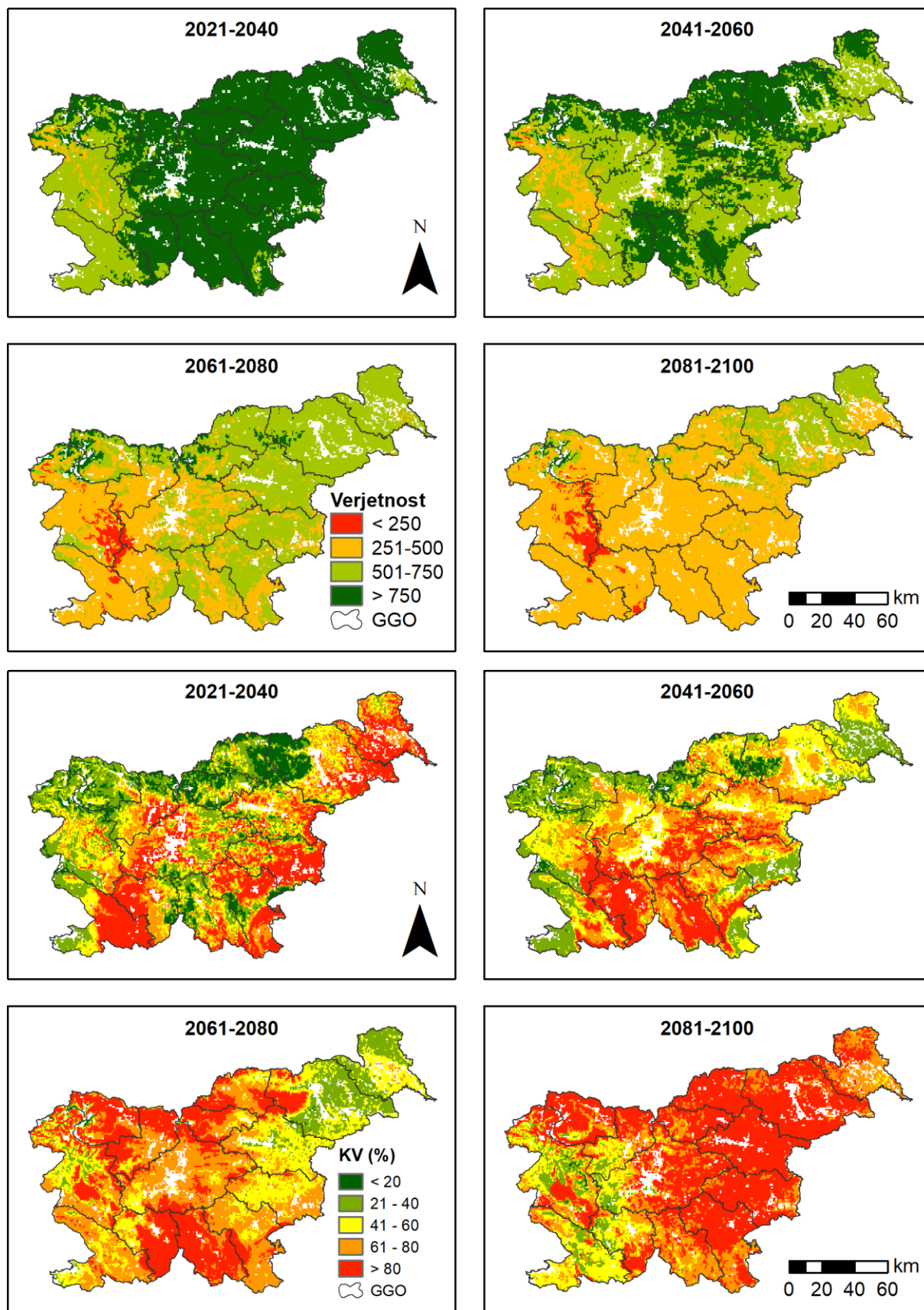


**Slika 14.** Potencialna razširjenost navadne bukve v Sloveniji 2021–2100 glede na skupen model, RCP8.5 in devet GCM

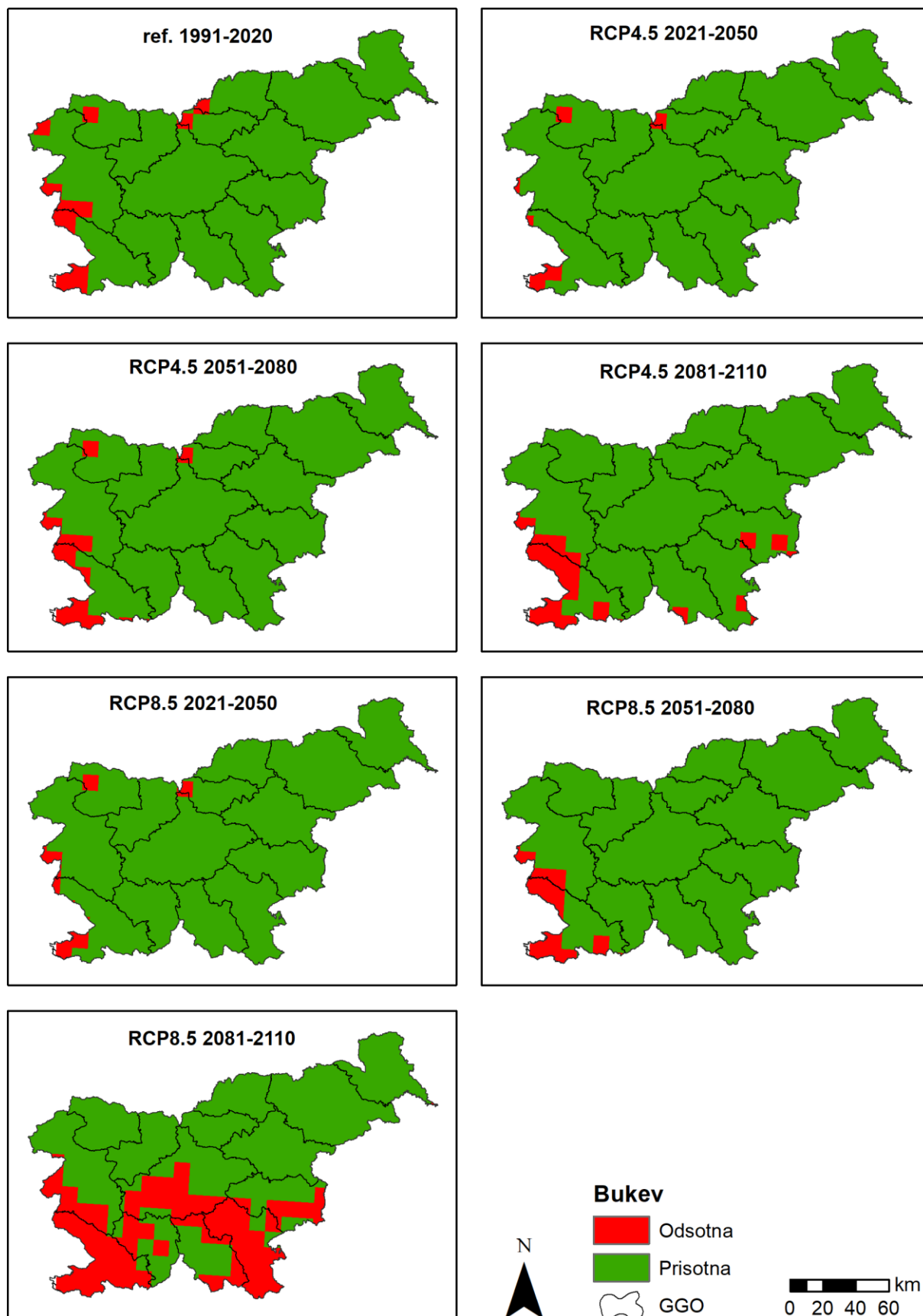
Po scenariju RCP8.5 se bo potencialna razširjenost navadne bukve krčila hitreje in intenzivneje kot po RCP4.5 (**Slika 11**). Po scenariju RCP8.5 se bi potencialna razširjenost bukve v obdobju 2041–2060 zmanjšala na raven, kot jo je napovedal RCP4.5 v obdobju 2061–2080. Prostorsko gledano sta si RCP4.5 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 14**). 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 15**). 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 15**).

Napoved skupnega modela Mauri in sod. (2022) za Slovenijo je manj ekstremna od našega modela (**Slika 16**). 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 15.** Verjetnost in koeficient variacije potencialne razširjenosti navadne buke v Sloveniji 2021–2100 glede na skupen model, RCP8.5 in devet GCM. Verjetnost prikazuje zgornje štiri slike, koeficient variacije pa spodnje štiri slike.

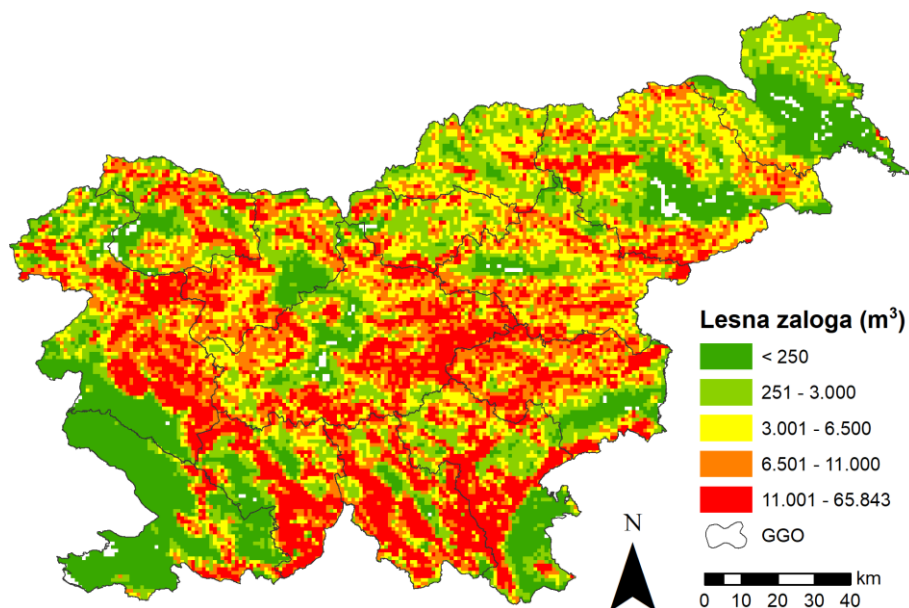


**Slika 16.** Napoved potencialne razširjenosti navadne buke v Sloveniji glede na ansambel modelov v podatkovni zbirki EU-Trees4F, dva RCP in tri obdobja 2021–2110; prva karta prikazuje napoved za referenčno obdobje 1991–2020 (Mauri in sod., 2022)



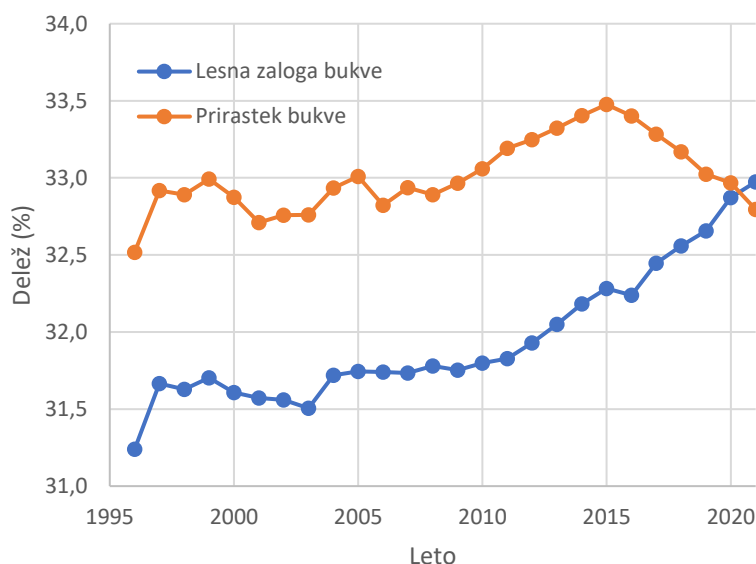
### 3.5 Lesna zaloga, prirastek, varstveno-sanitarni posek bukve

Navadna bukev se pojavlja po vsej Sloveniji v vseh gozdovih (**Slika 17**). 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<sup>3</sup>).



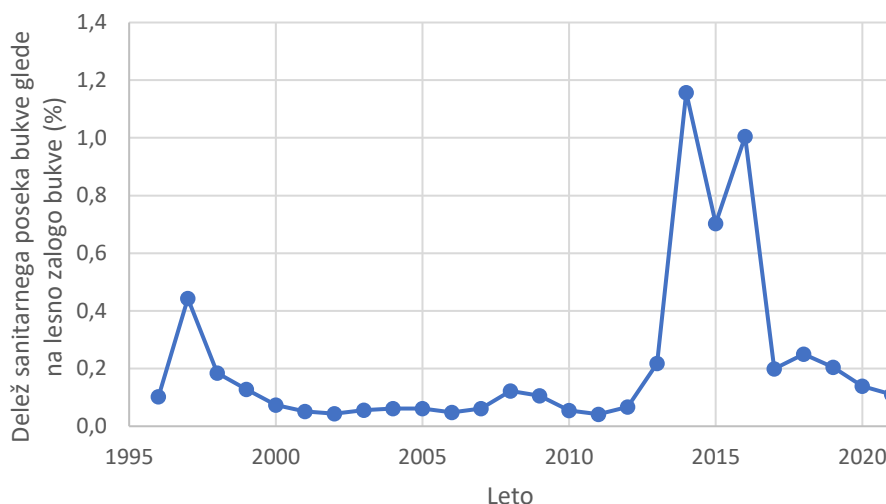
**Slika 17.** Lesna zaloga navadne bukve leta 2021 (m<sup>3</sup> v modelski celici 1 × 1 km)

Delež lesne zaloge bukve narašča od 1996–2021 (**Slika 18**). 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 18**), kar je verjetno posledica splošne starosti bukve in njene debelinske sestave.



**Slika 18.** Delež lesne zaloge bukve in prirastka bukve glede na celotno lesno zalogo in celoten prirastek 1996–2021

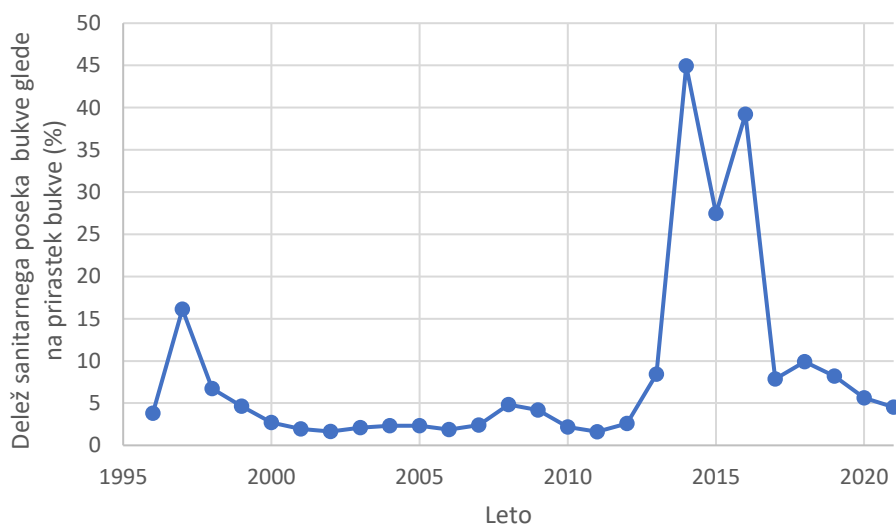
Delež sanitarnega poseka bukve 1996–2021 glede na njeno lesno zalogo je v povprečju znašal samo 0,21 % (**Slika 19**). Samo v izjemnih naravnih nesrečah, kot je bil snegolom in žledolom leta 1996 ter žledolom 2014, se delež sanitarnega poseka bukve glede na lesno zalogo presegele 0,4 % z maksimumom 1,16 % leta 2014.



**Slika 19.** Delež sanitarnega poseka navadne bukve glede na lesno zalogo bukve 1996–2021

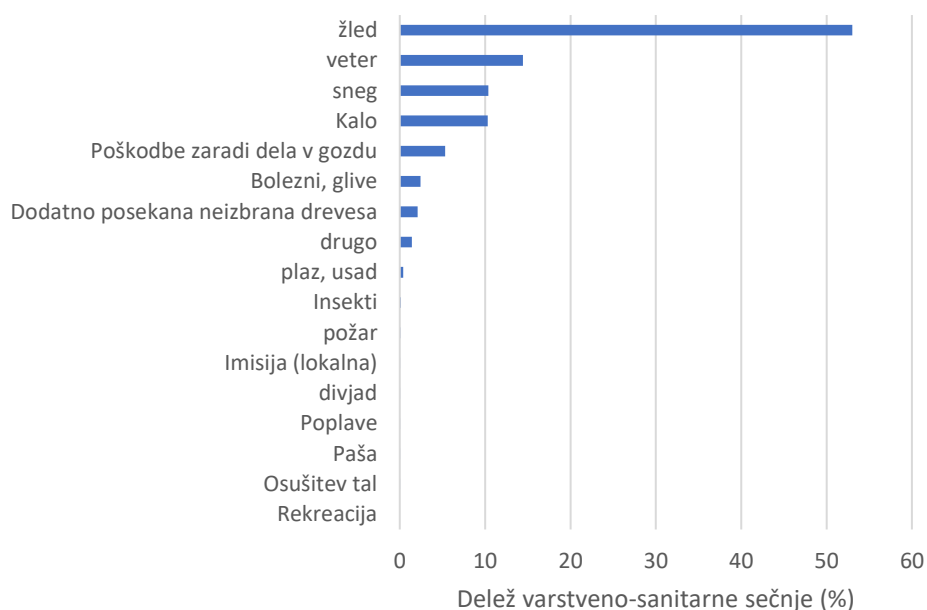
Podoba krivulje deleža sanitarnega poseka bukve 1996–2021 glede na njen prirastek je identična kot delež sanitarnega poseka bukve glede na lesno zalogo bukve (**Slika 20**, **Slika 19**). Delež sanitarnega poseka bukve 1996–2021 glede na njen prirastek je v povprečju znašal 8,5 % (**Slika 20**). Največjo 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 19**). 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 20.** Delež sanitarnega poseka navadne bukve glede na prirastek bukve 1996–2021

Najpomembnejši razlogi za varstveno-sanitarne sečnje bukve 1996–2021 v Sloveniji so bili žled, veter in sneg (**Slika 21**), 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 nezanemarljivih 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 21.** 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 Zaključki

Potencialno razširjenost navadne buke 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 buke 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 buke 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 buke so predvidene v scenarijih, ki predvidevajo višje temperature.**

**S kombinacijo verjetnostne karte in karte koeficienta variacije lahko ocenimo verjetnost potencialne razširjenosti navadne buke 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 buke v Sloveniji verjetno ne bo spremenila do 2051–2080. Tudi njihov model napoveduje krčenje potencialne razširjenosti navadne buke najprej na JZ in J predelu Slovenije.**

**Karte potencialne razširjenosti navadne buke 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 buke je naraščal od 1996 do 2021. Glede na trend bo lesna zaloga buke naraščala še naprej. Glede na napoved skupnega modela, lahko pričakujemo, da se potencialna razširjenost buke 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.

## 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-Ayanz 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
- 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
- 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
- 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
- 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