

GOZDARSKI INŠTITUT SLOVENIJE
SLOVENIAN FORESTRY INSTITUTE

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

Nikica Ogris

Ljubljana 2023

Kazalo vsebine

1	Uvod	3
2	Metode	5
2.1	Priprava podatkov	5
2.1.1	Poškodovanost bukove krošnje	5
2.1.2	Varstveno-sanitarni posek bukve.....	6
2.1.3	Meteorološke spremenljivke	6
2.1.4	Tla	8
2.1.5	Ostale spremenljivke	8
2.2	Razvoj modelov.....	8
2.2.1	Poškodovanost krošnje zaradi bolezni in žuželk	8
2.2.2	Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni in žuželk.....	9
2.3	Validacija modelov.....	10
2.3.1	Poškodovanost krošnje zaradi bolezni in žuželk	10
2.3.2	Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni in žuželk.....	10
2.4	Napoved hiranja navadne bukve v Sloveniji zaradi bolezni in žuželk do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb	10
3	Rezultati in razprava.....	10
3.1	Poškodovanost krošnje bukve zaradi bolezni.....	10
3.1.1	Modeli.....	10
3.1.2	Napoved poškodovanosti krošnje navadne bukve v Sloveniji zaradi bolezni do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb.....	11
3.2	Poškodovanost krošnje bukve zaradi žuželk	13
3.2.1	Modeli.....	13
3.2.2	Napoved poškodovanosti krošnje navadne bukve v Sloveniji zaradi žuželk do leta 2100 glede na različne scenarije podnebnih sprememb	14
3.3	Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi bolezni.....	16
3.3.1	Modeli.....	16
3.3.2	Napoved.....	16
3.4	Varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk	19
3.4.1	Modeli.....	19
3.4.2	Napoved.....	20
4	Zaključki.....	22
5	Viri.....	25

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.

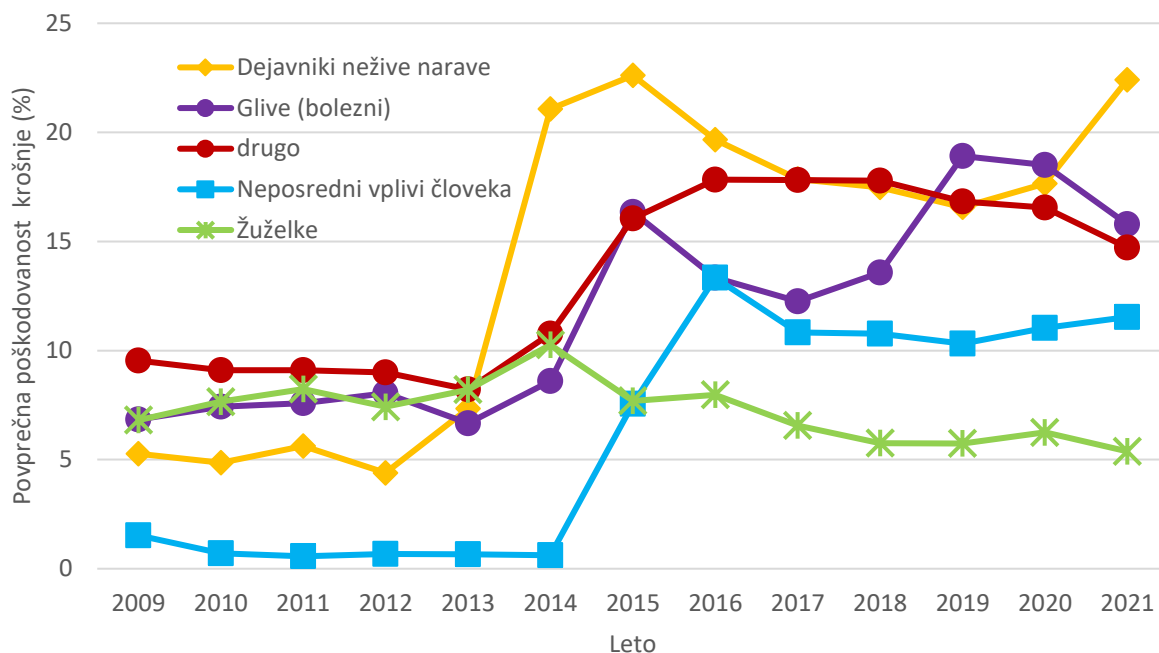
Vir podatkov o obsegu poškodb dreves je bilo spremljanje stanje gozdov na sistematični mreži 16 × 16 km, tj. na 44 traktih. Poškodovanost dreves se ocenjuje na M6 ploskvah. Vsak trakt ima štiri M6 ploskev. Na vsaki M6 ploskvi je 6 dreves (M6 = metoda 6 dreves). Tako se na vsakem traktu oceni osutost 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 presegati.

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 1**). 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 abiotski 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 1**). V letu 2014 se je povprečna poškodovanost bukove krošnje zaradi škodljivih abiotskih dejavnikov povečala iz 7,3 % na 21,1 % (Ogris in Skudnik, 2021). V letu 2015 se je povprečna poškodovanost bukove krošnje zaradi škodljivih abiotskih 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 1**).



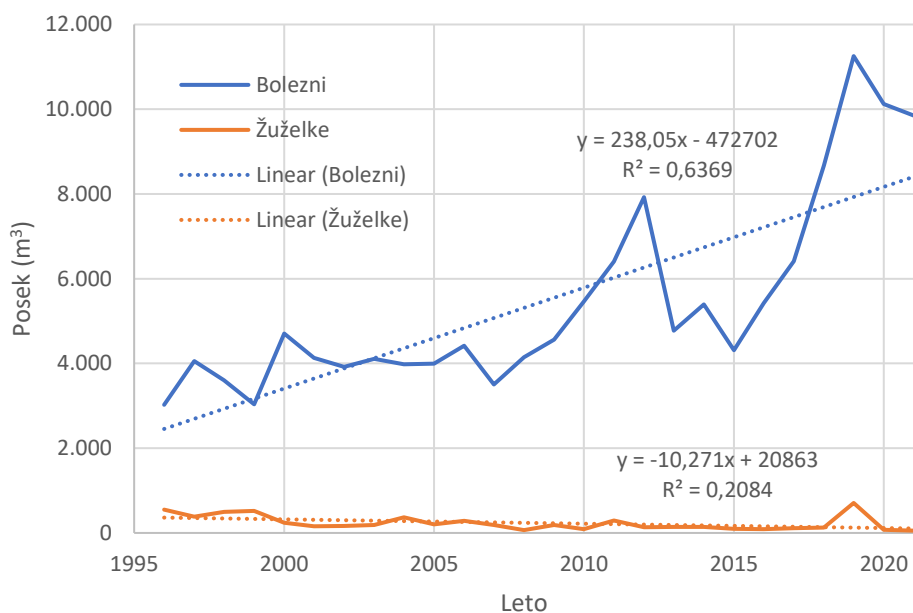
Slika 1. Povprečna poškodovanost bukove krošnje zaradi različnih kategorij škodljivih dejavnikov na ploskvah M6 v obdobju 2009–2021

Glive, ki povzročajo bolezni gozdnega drevja, so postale eno leto po žledolomu 2014 drugi najpomembnejši škodljiv dejavnik bukve, takoj za škodljivimi abiotскими dejavniki, in so povzročile povprečno 16,3 % poškodovanost krošnje (**Slika 1**). 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 abiotски 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 1**). 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 2**). 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 2**). 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 2. 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.

2 Metode

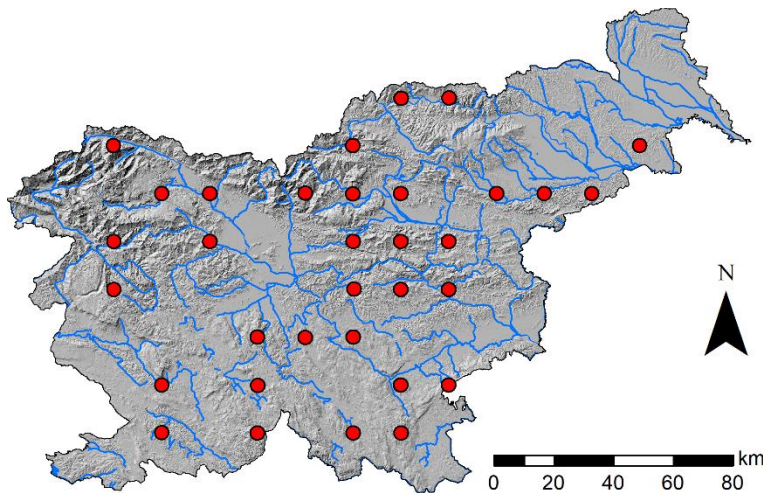
2.1 Priprava podatkov

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 3**). 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 3. 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.

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 definiranega poligona – za te smo poligon določili kot krog, ki ustreza površini gozda v gozdnem odseku. Lesno zalogo bukve smo pridobili iz podatkovne zbirke Gozdni fondi, 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.

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 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 (Bertalanich 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).

2.1.4 Tla

V analizo smo vključili 14 talnih spremenljivk (**Preglednica 1**).

Preglednica 1. 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 najboljšežnejša 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 [%]	

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).

2.2 Razvoj modelov

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 2**).

Preglednica 2. 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 3**), smo razvili več modelov za vsako kombinacijo GCM-RCM in RCP.

Preglednica 3. 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 (Bertalanč 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.

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.

2.3 Validacija modelov

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).

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).

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 3**).

3 Rezultati in razprava

3.1 Poškodovanost krošnje bukve zaradi bolezni

3.1.1 Modeli

Razvili smo 180 modelov. Najboljša skupina modelov je bila tista, ki je vključevala vse spremenljivke (MULTI; **Preglednica 4**). 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 tabelaričnih vrednostih (Knisel in Davis, 2000), zato sta verjetno precej nezanesljivi.

Preglednica 4. 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 najboljše pojasnjeval kazalnik suše SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 5**).

Preglednica 5. 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 6).

Preglednica 6. 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

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

Napoved poškodovanosti krošnje navadne bukke v Sloveniji zaradi bolezni smo naredili samo za lokacije traktov na sistematični mreži 16 × 16 km, kjer se pojavlja bukke. 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 7).

Preglednica 7. Modeli za poškodovanost krošnje bukke zaradi bolezni za dva scenarija izpustov toplogrednih plinov (RCP) in šest GCM-RCM

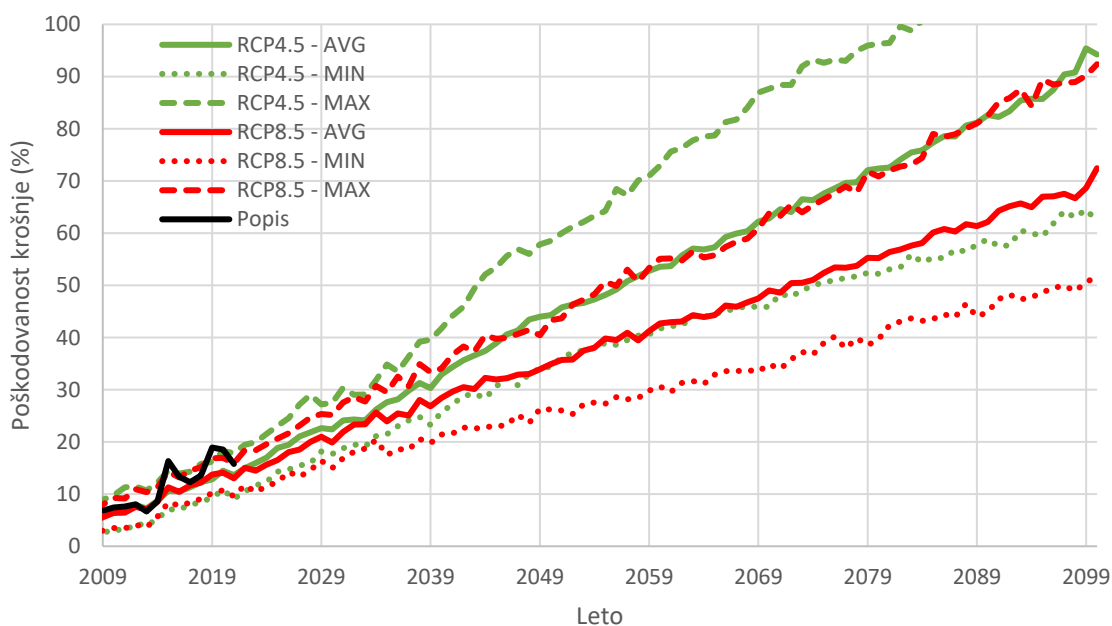
RCP	GCM-RCM	Model
RCP4.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMCOM-CCLM4	$-114.711 + 0.64578 * SPI1_1_ST_KUM - 1004.15 * HUSS - 0.00366245 * PR + 0.0673584 * RSDS - 0.232368 * SFCWIND - 3.11721 * TASMAY + 1.72269 * TASMAY + 1.21094 * RH + 0.058007 * EVSPSBLPOT$
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	$-58.0503 + 0.328609 * SPI1_1_ST_KUM - 13977.9 * HUSS - 0.00128245 * PR + 0.474361 * RSDS - 0.295625 * SFCWIND + 2.02277 * TASMAY + 3.36849 * TASMAY + 0.954233 * RH - 0.0615433 * EVSPSBLPOT$
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INNERIS	$39.2435 + 0.359932 * SPI1_1_ST_KUM - 2209.21 * HUSS + 9.50303E-005 * PR - 0.21573 * RSDS + 0.0423197 * SFCWIND - 0.888714 * TASMAY + 1.41336 * TASMAY + 0.00872125 * RH + 0.0146139 * EVSPSBLPOT$
	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	$-85.4669 + 0.406925 * SPI1_1_ST_KUM - 2061.58 * HUSS - 0.00314982 * PR + 0.188135 * RSDS + 0.173545 * SFCWIND + 2.07423 * TASMAX + 0.255362 * TASMING + 0.791054 * RH - 0.0356862 * EVSPSBLPOT$
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	$-68.4357 + 0.301776 * SPI1_1_ST_KUM - 7845.09 * HUSS - 0.00129474 * PR + 0.192504 * RSDS - 0.82875 * SFCWIND - 0.636841 * TASMAX + 0.378287 * TASMING + 1.07495 * RH + 0.0298011 * EVSPSBLPOT$
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	$5.76276 + 0.325555 * SPI1_1_ST_KUM - 4563.94 * HUSS + 0.000690854 * PR - 0.0227635 * RSDS - 0.10027 * SFCWIND - 1.74661 * TASMAX + 4.36782 * TASMING + 0.309674 * RH + 0.000176512 * EVSPSBLPOT$
	MOHC-HADGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	$-62.2284 + 0.265089 * SPI1_1_ST_KUM + 1638.26 * HUSS + 0.00353644 * PR - 0.091608 * RSDS - 0.191303 * SFCWIND + 0.293185 * TASMAX - 1.2533 * TASMING + 0.322634 * RH + 0.0496732 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMCOM-CCLM4	$-137.69 + 0.455246 * SPI1_1_ST_KUM - 5396.83 * HUSS + 0.0014117 * PR + 0.47328 * RSDS + 0.389291 * SFCWIND + 3.00004 * TASMAX + 0.427576 * TASMING + 0.866096 * RH - 0.0289383 * EVSPSBLPOT$
	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	$-132.15 + 0.450266 * SPI1_1_ST_KUM - 2977.43 * HUSS - 0.00292598 * PR + 0.116633 * RSDS + 1.5207 * SFCWIND + 0.949121 * TASMAX + 0.787017 * TASMING + 1.02707 * RH + 0.0122469 * EVSPSBLPOT$

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 4). Vendar vrednost s popisa je bila znotraj intervala napovedanih vrednosti.

Napoved povprečne poškodovanosti bukve 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 4).

Na koncu 21. stoletja je razlika med RCP4.5 in RCP8.5 še večja. Povprečna napovedana poškodovanost bukve zaradi bolezni za leto 2100 za RCP8.5 je znašala 72,4 % in za RCP4.5 94,2 % (Slika 4). 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 4. 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 bukke zaradi bolezni. Model napoveduje najmanjšo povprečno poškodovanost bukke 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 bukke zaradi bolezni 44,3 %, za leto 2100 pa že 94,2 %. Model napoveduje zelo pomemben vpliv bolezni na poškodovanost bukke v prihodnosti. To se sklada z izvedenskim mnenjem Ogris in sod. (2008), da bo vpliv bolezni na zdravje bukke 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.

3.2 Poškodovanost krošnje bukke zaradi žuželk

3.2.1 Modeli

Razvili smo 180 modelov. Najboljša skupina modelov je bila tista, ki je vključevala vse spremenljivke (MULTI; **Preglednica 8**). 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 8. 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 bukke zaradi žuželk je najbolje pojasnjeval kazalnik suše SPI1_1_ST_KUM (**Preglednica 9**).

Preglednica 9. 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 10**).

Preglednica 10. 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

3.2.2 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 11**).

Preglednica 11. 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	$12.6683 - 0.136821 * SPI1_1_ST_KUM + 708.364 * HUSS - 0.000649281 * PR - 0.0679644 * RSDS - 0.102148 * SFCWIND + 0.0543977 * TASMAY - 0.127771 * TASMAY + 0.178301 * RH - 0.00988344 * EVSPSBLPOT$

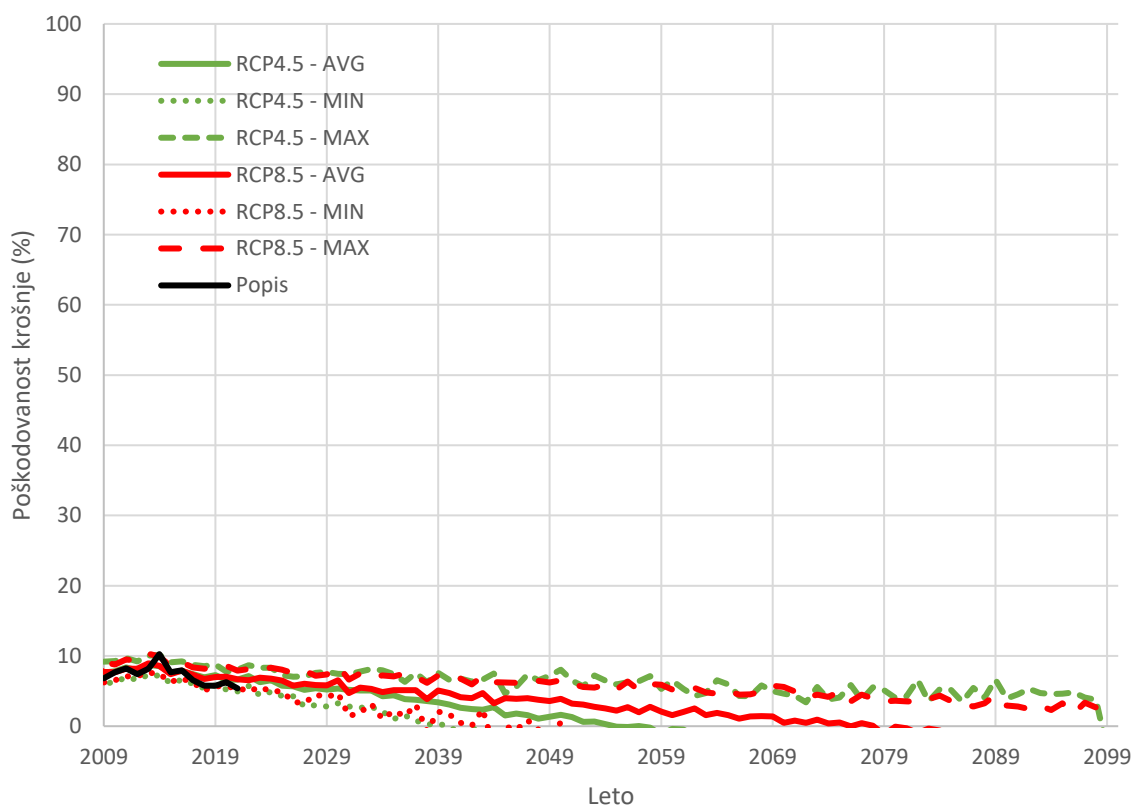
MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4	$53.5872 - 0.055851 * SPI1_1_ST_KUM - 917.502 * HUSS + 0.00157624 * PR - 0.00552866 * RSDS - 0.605896 * SFCWIND - 0.719067 * TASMAX + 1.26034 * TASMINT - 0.23379 * RH - 0.0136851 * EVSPSBLPOT$
----------------------------	---

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 5**). Vendar vrednost s popisa je bila znotraj intervala napovedanih vrednosti.

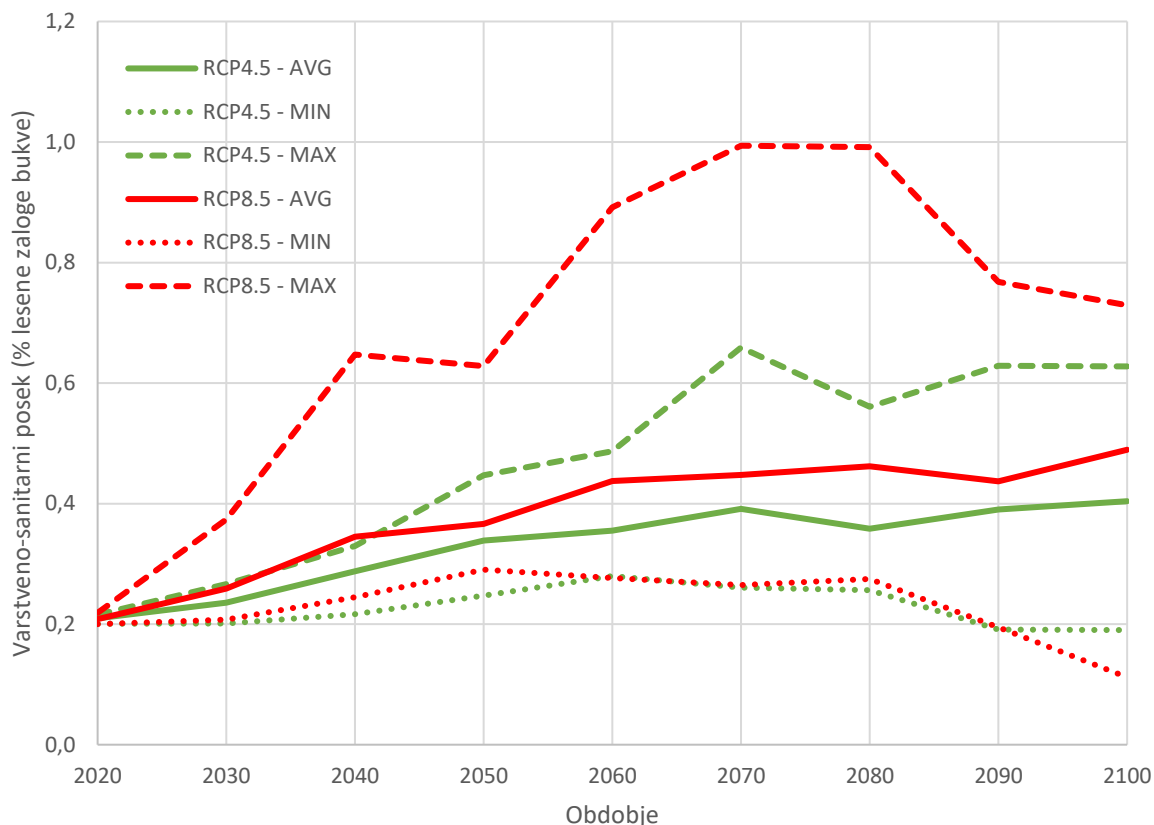
Napoved povprečne poškodovanosti bukve zaradi žuželk glede na šest GCM za leto 2050 je znašala 1,6–3,9 %, pri čemer je napoved za RCP8.5 bila večja kot za RCP4.5. Razpon možnih vrednosti je bil za leto 2050 večji in je znašal 0–6,5 % (**Slika 5**).

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 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.

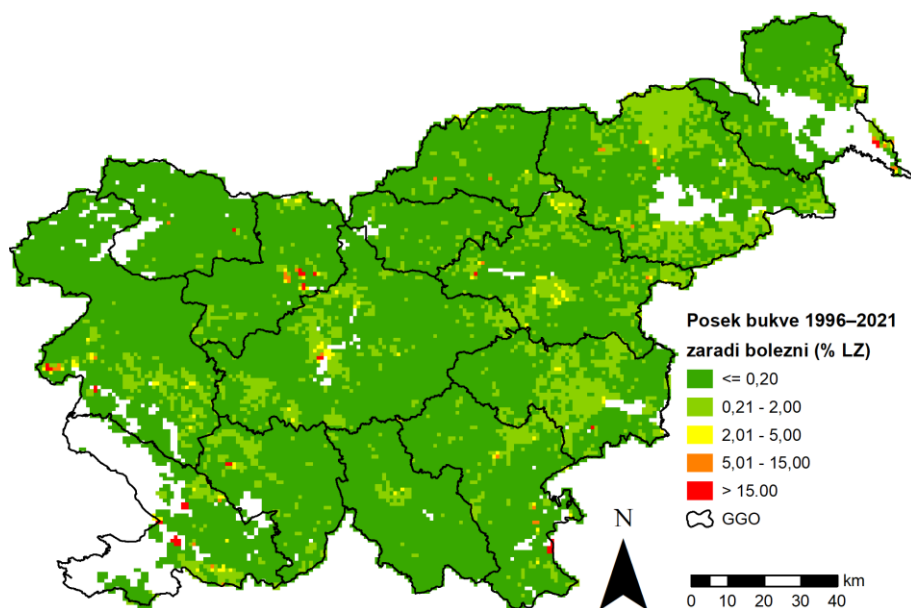


Slika 5. Napoved povprečne poškodovanosti bukove krošnje zaradi žuželk glede na šest GCM in dva RCP za obdobje 2009–2100

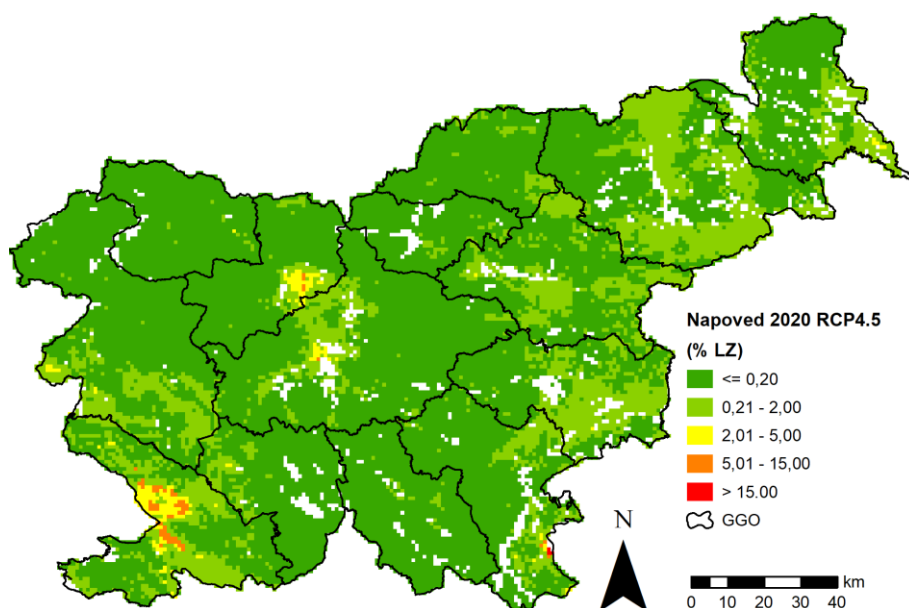


Slika 6. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukke zaradi bolezni 2020–2100 glede na dva RCP (povprečje šest GCM za 30-letna obdobja; v deležu lesne zaloge bukke v modelski celici).

Po podatkih iz podatkovne zbirke Timber je bil največji delež varstveno-sanitarnega poseka bukke zaradi bolezni v obdobju 1996–2021 v GGO Sežana, Kranj in celotni vzhodni Sloveniji (Slika 7). Zelo podobno prostorsko razporeditev varstveno-sanitarnega poseka bukke zaradi bolezni je napovedal modelski izračun za obdobje 1991–2020 (Slika 8).

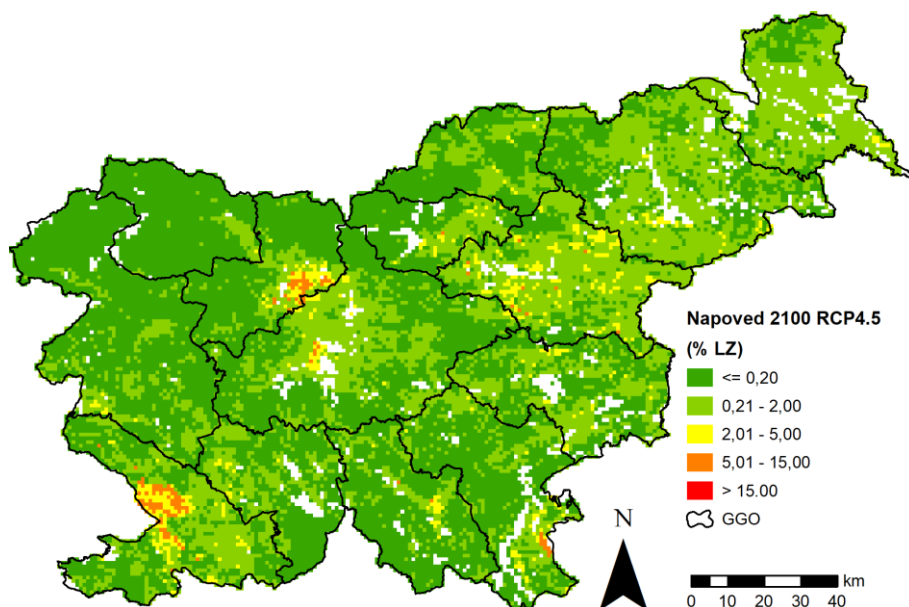


Slika 7. Varstveno sanitarni posek bukke zaradi bolezni 1996–2021 (v deležu lesne zaloge bukke v modelski celici)



Slika 8. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukke zaradi bolezni 1991–2020 glede na scenarij RCP4.5 in šest GCM (povprečna vrednost deleža lesne zaloge bukke v modelski celici)

Trend varstveno-sanitarnega poseka bukke zaradi bolezni po GGO se načeloma ohrani do konca 21. stoletja (**Slika 9, Preglednica 13**), tj. tudi v obdobju 2071–2100 je modelski izračun napovedal, da bodo bolezni bukke 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 13**). Največje povprečne napovedi varstveno-sanitarnega poseka bukke zaradi bolezni preko 13 % lesne zaloge bukke v modelski celici so predvidene v GGO Sežana, Novo mesto in Kranj.



Slika 9. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukke zaradi bolezni 2071–2100 glede na scenarij RCP4.5 in šest GCM (povprečna vrednost deleža lesne zaloge bukke v modelski celici)

Primerjava med napovedjo za obdobje 1991–2020 in 2071–2100 je pokazala, da bodo največje spremembe varstveno-sanitarnega poseka bukke 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 13**).

Preglednica 13. 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

3.4 Varstveno-sanitarni posek bukke zaradi žuželk

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 12**). Zato smo za napoved varstveno-sanitarnega poseka bukke 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 14. Kakovost modelov (Bagging z M5') za varstveno-sanitarni posek bukke zaradi žuželk glede na RCP in GCM

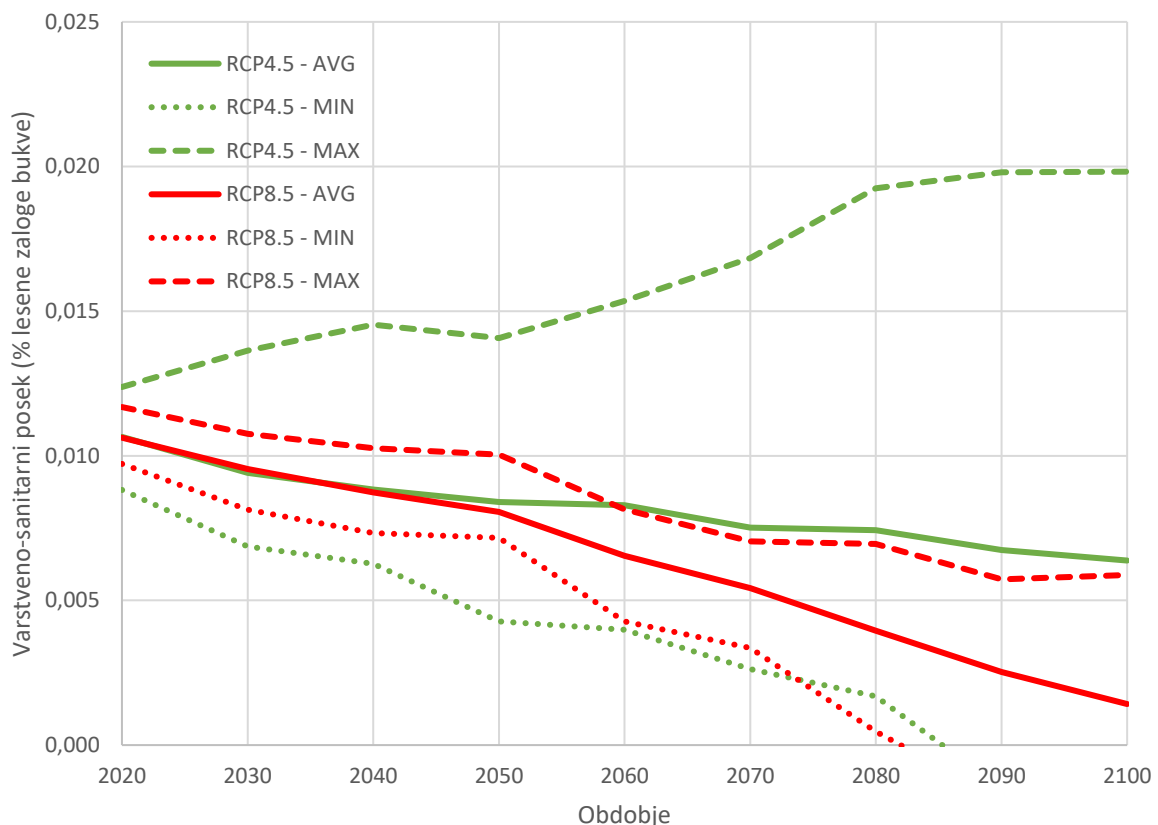
RCP	GCM	r	MAE	RMSE	RAE (%)	RRSE (%)
RCP4.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4	0,029	0,019	0,231	102,3	102,0
	ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHAM5	0,066	0,019	0,228	102,0	100,9
	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS	0,095	0,019	0,226	99,0	100,0
	MOHC-HadGEM2-ES_KNMI-RACMO22E	0,067	0,019	0,228	99,9	100,6
	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4	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.

3.4.2 Napoved

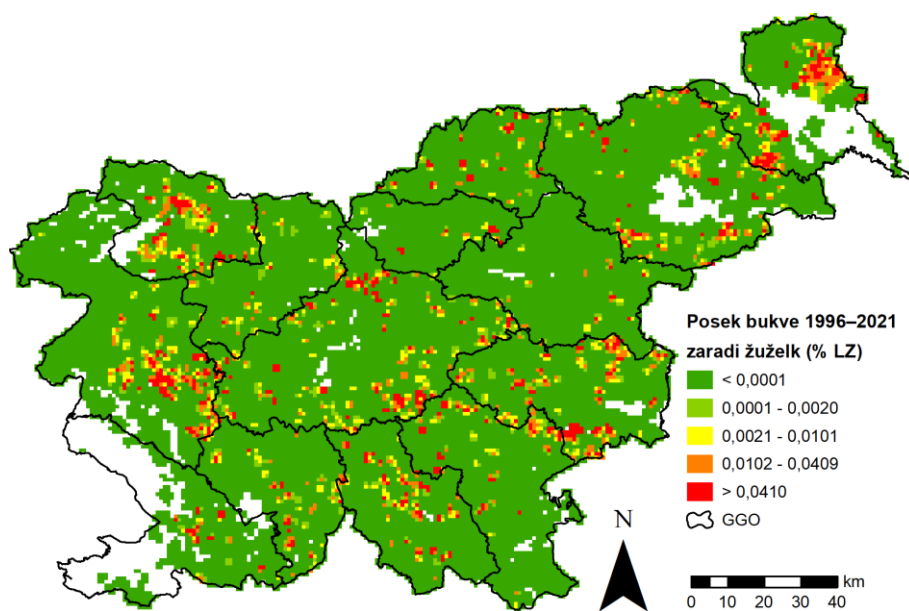
V obdobju 1996–2021 je bilo označenih bukev za varstveno-sanitarni posek zaradi žuželk v povprečju 0,01 % lesne zaloge bukve v modelski celici. Modelski izračun za obdobje 1991–2020 je predvidel enako povprečno vrednost (**Slika 10**), kar pomeni, da so modeli ocenili izhodiščno stanje kakovostno.

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 10**). Po scenariju RCP8.5 bi prišlo hitrejšega upadanja varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk kot po scenariju RCP4.5.

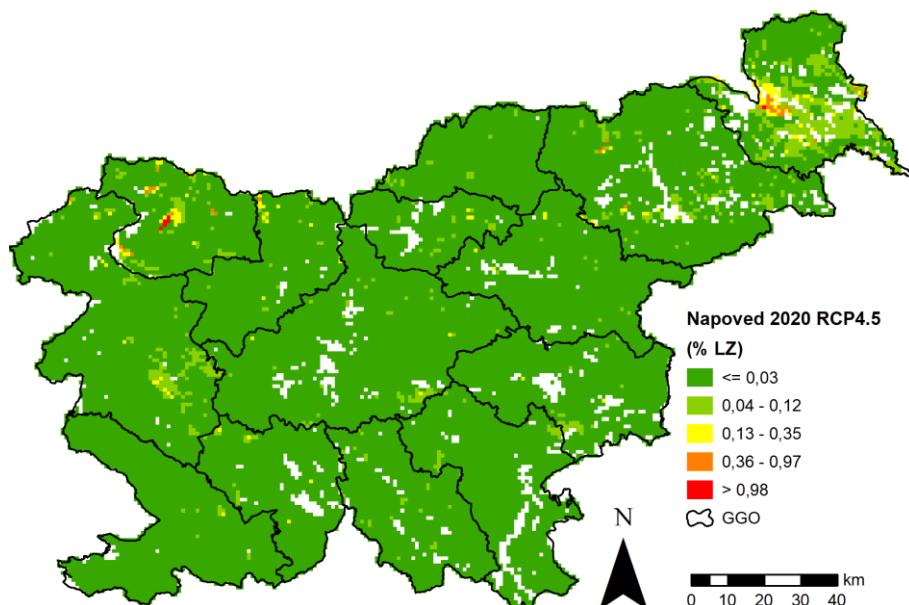


Slika 10. Napoved varstveno-sanitarnega poseka bukve zaradi žuželk 2020–2100 glede na dva RCP (povprečje šest GCM za 30-letna obdobja; v deležu lesne zaloge bukve v modelski celici).

Po podatkih iz podatkovne zbirke Timber je bil varstveno-sanitarni posek bukve zaradi žuželk v obdobju 1996–2021 razporejen lokalno po vsej Sloveniji (**Slika 11**). 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 12**).

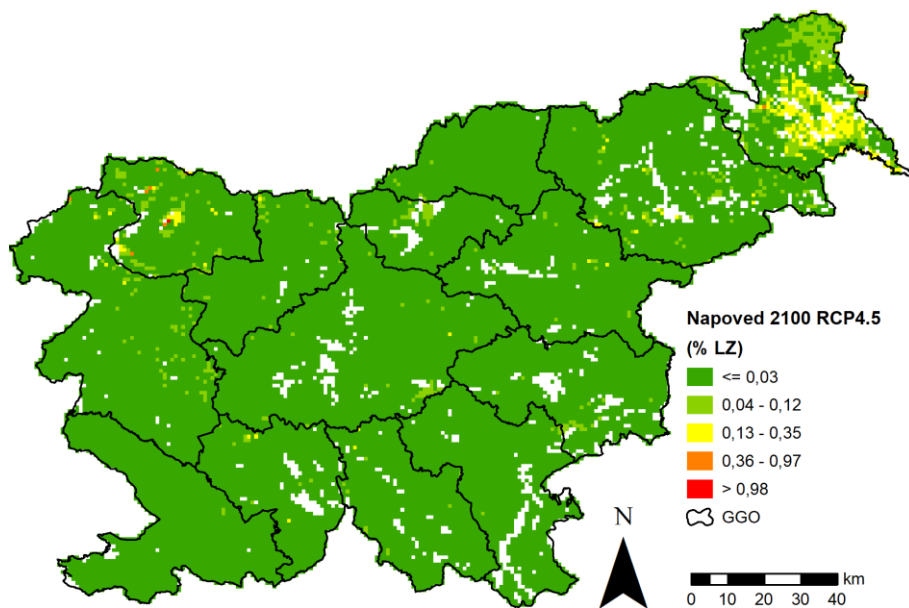


Slika 11. Varstveno sanitarni posek bukve zaradi žuželk 1996–2021 (v deležu lesne zaloge bukve v modelski celici)



Slika 12. 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 13, Preglednica 15), 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 ($1,1 \times$ več) in Nazarje ($0,9 \times$ 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 13. 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 15. 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

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 podnebjju 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.

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)
- 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., 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. ncd4: 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