

## Raziskovanje možnosti prilagoditve trenutnega načina gospodarjenja z mešanimi gorskimi gozdovi za povečanje vezave ogljika v gozdovih

*Exploring possibilities to adapt current forest management in mixed mountain forests to enlarge carbon sequestration*

Suzana PODVINŠEK<sup>1</sup>, Hana ŠTRAUS<sup>2</sup>, Matija KLOPČIČ<sup>3</sup>

### Izvleček:

Gozd ima pomembno vlogo pri blaženju vpliva podnebnih sprememb z zagotavljanjem ponora CO<sub>2</sub> in skladiščenju ogljika (C). V raziskavi smo se osredotočili na dve ekosistemski storitvi gozdov: zagotavljanje lesa kot osnovne surovine in vezave C kot ekosistemska storitev blaženja (negativnih) vplivov podnebnih sprememb. Razvoj gozdov smo modelirali na dveh projektnih pilotnih območjih: na Pohorju in v Dinaridih. Simulacijo smo izvedli s populacijskim matričnim modelom SLOMATRIX, ki je sestavljen iz štirih glavnih modulov, od katerih vsak simulira enega od ključnih procesov v raznomernih gozdovih: vrast, naravno odmiranje, sečnjo oziroma antropogeno smrtnost in rast dreves. V okviru projekta smo v model dodali dodaten modul za izračun vezave C. Razvoj gozda je simuliran za pet drevesnih vrst oziroma skupin drevesnih vrst: jelko, bukev, smreko, druge iglavce in druge listavce. Simulirali smo trenutno gospodarjenje z gozdovi (scenarij BAU), scenarij brez aktivnega gospodarjenja (NOM) in z linearnim programiranjem iskali optimizirani scenarij COPT, pri katerem smo iskali način gospodarjenja, ki bo izkazoval največjo vezavo C v gozdovih v naslednjih sto letih. Pri scenarijih BAU in COPT smo kljub zelo majhnim razlikam v začetni debelinski strukturi gozdov zasledili razlike v debelinski strukturi in drevesni sestavi posekanih dreves in dva različna načina za maksimizacijo vezave C. Za prvi način, ki je bil simuliran v Dinaridih, je značilen manjši posek skupnega števila dreves z izrazitim poudarkom na poseku jelke, vendar so drevesa v povprečju večjih premerov kot pri scenariju BAU. Za drugi način, ki je bil simuliran na Pohorju, pa je značilen posek znatnega deleža tanjšega drevja s poudarkom na smreki in bukvi, kar se odraža v znatnem povečanju števila dreves velikih premerov. Domnevamo, da so razlike v pristopih k optimizaciji posledica različne produktivnosti rastišč in razlik v razmerjih počasi : srednje hitro : hitro rastočih dreves.

**Ključne besede:** sekvestracija ogljika, modeliranje razvoja gozdov, scenariji gospodarjenja z gozdovi, lesnoproizvodna funkcija

### Abstract:

Forests importantly mitigate the impact of climate change by ensuring CO<sub>2</sub> sequestration and storing carbon (C). In our research, we focused on two ecosystem forest services: the production of timber as a basic raw material and carbon sequestration as an ecosystem service for mitigating (negative) impacts of climate change. We modelled forest development on two pilot areas, namely Pohorje and Dinaric Mountains. We performed the simulation using the SLOMATRIX population matrix model composed of four main modules, each simulating one of the key processes in uneven-aged forests: ingrowth, natural mortality, harvest (anthropogenic mortality), and growth of trees. In the framework of the project, we added a module for calculating the C sequestration. We simulated forest development for five tree species or tree species groups: fir, beech, spruce, other conifers, and broadleaves. We simulated the current forest management (BAU scenario), scenario without active management (NOM), and, using the linear programming, we looked for the COPT optimized scenario, at which we searched for the management scheme that would maximize C sequestration in forests in the next 100 years. In BAU and COPT scenarios, despite the minimal differences in the initial diameter structure of forests, we detected differences in the diameter structure and tree species composition of the harvested trees and two diverse approaches to C sequestration maximization. The first approach was characterized by a lower total number of harvested trees with a distinct emphasis on the harvest of fir; however, the harvested trees were on average of larger diameters than harvested trees in BAU. This approach was simulated in the Dinaric Mountains. In Pohorje a different approach was simulated; it was characterized by the harvest of a considerable share of thinner trees with an emphasis on spruce and beech, resulting in a substantial increase of large-diameter trees. We assume the differences in the optimization approaches may be caused by diverse site productivities and differences in the proportions of slow, medium-fast, and fast-growing trees.

**Key words:** carbon sequestration, modelling forest development, forest management scenarios, timber production function

<sup>1</sup> S. P., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, 1000 Ljubljana, Slovenija  
suzana.podvinsek@bf.uni-lj.si

<sup>2</sup> H. Š., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, 1000 Ljubljana, Slovenija  
hana.straus@bf.uni-lj.si

<sup>3</sup> dr. M. K., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, 1000 Ljubljana, Slovenija  
matija.klopcc@bf.uni-lj.si

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Toplogredni plini, ki jih ljudje zaradi različnih dejavnosti sproščamo v ozračje, povzročajo učinek tople grede in podnebne spremembe, ki imajo in bodo imele tako negativne kot pozitivne učinke na gozdove. Pozitivna učinka sta npr. povečana rast v določenih biomih (npr. v gorskih in visokogorskih gozdovih, borealnih gozdovih (Reyer in sod., 2017) in povečana produkcijska sposobnost določenih gozdnih rastišč (Thiele in sod., 2017)). Kot negativen učinek se vse pogosteje pojavljajo intenzivnejše naravne motnje (Seidl in sod., 2014), pogostejši napadi žuželk in širjenje bolezni, pogostejši sušni dogodki (Bertalančič in sod., 2018), spremembe razširjenosti ciljnih drevesnih vrst (Klopčič in sod., 2022) in posledično izrazite spremembe v drevesni sestavi (Hanewinkel in sod., 2014).

Ker so (negativni) vplivi podnebnih sprememb čedalje bolj zaznavni, je aktivno ukrepanje nujno. Ločimo ukrepe prilagajanja (ang. *adaptation measures*) in ukrepe blaženja (ang. *mitigation measures*) vplivov podnebnih sprememb (Kajfež Bogataj, 2014). Gozdni ekosistemi so ključni pri blaženju in prilagajanju na podnebne spremembe ter vezavi (sekvestraciji) ogljikovega dioksida in skladiščenju atmosferskega ogljika (v nadaljevanju C). V gozdu ukrepi prilagajanja pomenijo predvsem spremembo vrstne sestave in zgradbe sestoja, s čimer povečamo stabilnost in odpornost gozdov (Konjar in sod., 2022.). Ukrepi blaženja pa temeljijo na sposobnosti gozda in dreves, ki iz ozračja črpajo atmosferski C in ga vežejo v živi biomasi ter gozdnih tleh. Ključni vzvod gozdarstva pri blaženju podnebnih sprememb je torej ohranjanje ali povečevanje vezave atmosferskega C (v nadaljevanju vezava C) v gozdovih in njegovo dolgotrajno skladiščenje (Jevšenak in sod., 2020).

V Sloveniji imajo gozdovi ogromen potencial vezave C, zadržijo približno 9 % slovenskih letnih emisij (Jevšenak in sod., 2020). Ključni ponor C v gozdu je volumenski prirastek nadzemne in podzemne lesne biomase (Blattert in sod., 2018; Thrippleton in sod., 2021), saj se v tem primeru C praviloma skladišči na dolgi rok. Z ustreznim pristopom bi bil lahko potencial vezave C še

bolj izkoriščen, s čimer bi dodatno pripomogli k blaženju podnebnih sprememb. V izračunu vezave C smo upoštevali tudi naravno odmrlo drevje, ki na bilanco C vpliva posredno kot srednjeročno skladišče C in kot emisija, ko se razkrajajo. Gozdna tla so pomembno skladišče C, a so manj pomembna kot vir njegovih ponorov (Blattert in sod., 2018). Pomembno je upoštevati tudi posekano lesno maso. Lesno biomaso lahko uporabimo kot lesni izdelek; v tem primeru je C trajno vezan v izdelek in se ne sprošča v ozračje. Z uporabo lesa in izdelavo trajnih lesnih izdelkov preprečimo emisijo C zaradi biološkega razpada (Lipušček, 2003).

V zmernem pasu so najugodnejšo bilanco C praviloma evidentirali v negospodarjenih gozdovih (Luyssaert in sod., 2008), a zahteve po lesni surovini terjajo aktivno gospodarjenje in zadostno količino posekanega lesa. Z uporabo lesa iz gozda sicer odstranimo C in povzročimo emisije, a hkrati gozd obnovimo ter tako omogočimo rast mladega gozda, s katerim omogočimo nadaljnjo vezavo C (Kirschbaum, 2003). Z ustreznim gospodarjenjem z gozdovi (t. j. z ustreznimi redčenji) lahko znatno vplivamo na volumenski prirastek (Pretzsch, 2020) in tudi na količino odmrle lesne mase (Thrippleton in sod., 2021).

Pri ukrepih blaženja in prilagajanja vplivom podnebnih sprememb je ključno najti načine, kako ohraniti ali celo povečevati vezavo C v gozdovih ob hkratnem aktivnem gospodarjenju z gozdovi, ki bo še zagotavljalo zadostno količino lesne surovine. S projektom Gozdovi za prihodnost smo med drugim preverjali možnosti kombinacije aktivnega gospodarjenja z gozdovi in ohranjanje ali celo povečevanje vezavo C v gozdovih. Eden izmed ciljev projekta je bil raziskati možnosti prilagoditve trenutnega načina gospodarjenja z mešanimi gorskimi gozdovi s ciljem ohraniti ali povečati vezavo C v njih ob hkratnem aktivnem gospodarjenju z gozdovi, ki bo zagotavljalo zadostno količino lesne mase. Preverjana ničelna raziskovalna hipoteza je bila, da bosta optimizirana scenarija, katerih cilj je bil ohraniti ali povečevati (maksimirati) vezavo C ob hkratnem aktivnem gospodarjenju z gozdovi, izkazovala podoben vzorec poseka, saj smo obravnavali strukturno podobne gozdove.

## 2 METODE

## 2 METHODS

### 2.1 Raziskovalno območje

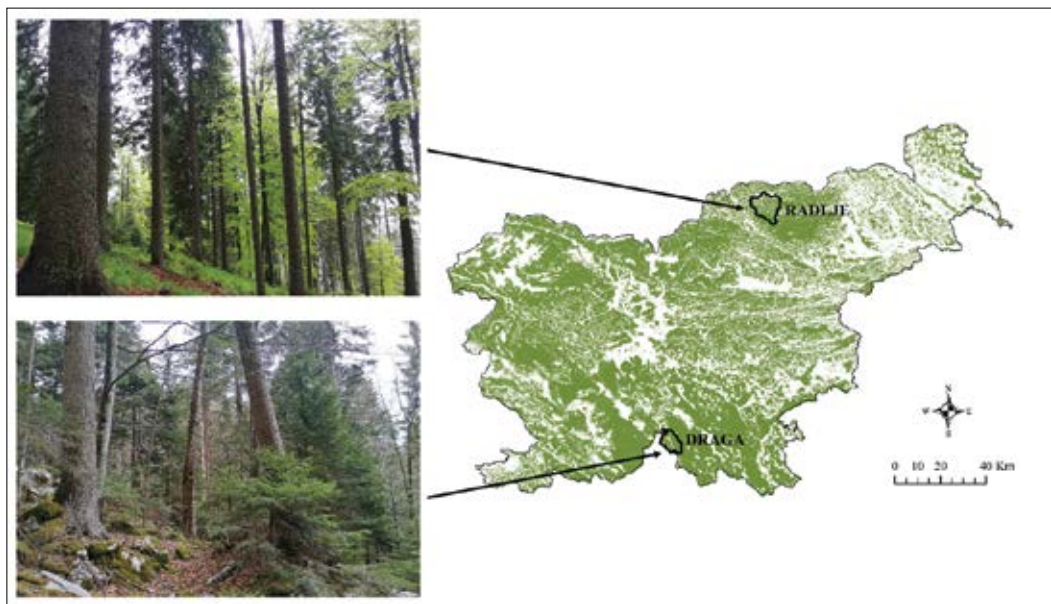
#### 2.1 Study area

V prispevku predstavljamo poskus modeliranja razvoja gozdov v dveh projektih pilotnih območjih: Pohorje in Dinaridi. V obeh so mešani gorski gozdovi smreke (*Picea abies*), jelke (*Abies alba*) in bukve (*Fagus sylvatica*) s primešanimi nekaterimi drugimi drevesnimi vrstami (slika 1). Pilotni območji se razlikujeta v zgodovini gospodarjenja z gozdovi in rastiščnih značilnostih, saj na Pohorju prevladuje silikatna matična podlaga, v Dinaridih pa karbonatna. Slednje se odraža v razlikah v gozdnih združbah in produkcijski sposobnosti gozdnih rastišč, oboje skupaj pa v razlikah v sestojnih parametrih (preglednica 1).

Pilotno območje Pohorje zavzema gozdno-gospodarsko enoto Radlje – desni breg (v nadaljevanju GGE Radlje) v gozdnogospodarskem območju Slovenj Gradec (slika 1), kjer prevladujejo mešani gorski gozdovi s prevladujočo smrekovo na

silikatni podlagi. V enoti prevladujejo kisloljubna jelovja (48 %) in zgornjegorska bukvoja (32 %) ter kisloljubna bukvoja z rebrenjačo (7 %). V GGE Radlje je 15 % državnih gozdov in 85 % zasebnih. Prevladujejo debeljaki (62,5 %), sledijo sestoji v obnovi (20,8 %), drogovnjaki (9,3 %), mladovje (4,2 %), raznomerni sestoji (2,4 %) in tipični prebiralni gozdovi (0,9 %) (GGN GGE Radlje-desni breg, 2014).

Pilotno območje Dinaridi zavzema gozdno-gospodarsko enoto Draga (v nadaljevanju GGE Draga) v gozdnogospodarskem območju Kočevje, kjer prevladujejo mešani gorski gozdovi jelke, bukve in smreke na karbonatni podlagi. V enoti prevladuje gozdna združba dinarska jelova-bukvoja. V GGE Draga je 64 % površine državnih gozdov, 32 % zasebnih in 4 % gozdov v lasti lokalnih skupnosti. Gozdovi sodijo med naravno najbolj ohranjene jelovo-bukove gozdove dinarskega sveta. Prevladujejo raznomerni sestoji (66,8 %), sledijo debeljaki (24,5 %), drogovnjaki (4,6 %), sestoji v obnovi (3,1 %) in mladovje (1 %) (GGN GGE Draga, 2021).



Slika 1: Lokacija obravnavanih pilotnih območjih na Pohorju (gozdnogospodarska enota Radlje – desni breg) in v Dinaridih (gozdnogospodarska enota Draga) s fotografijama tipičnih gozdov na vsakem območju (vir fotografij: Hana Štraus; vir podatkov za izdelavo karte: Zavod za gozdove Slovenije)

Figure 1: Location of the pilot areas in Pohorje (Forest management unit Radlje - right bank) and in the Dinaric Mountains (Forest management unit Draga) with photos of typical forests in each area (photo source: Hana Štraus; data source for map: Slovenia Forest Service)

**Preglednica 1:** Nekateri osnovni podatki za projektni pilotni območji Pohorje in Draga

*Table 1: Characteristics of the Pohorje and the Dinaric Mountains pilot areas*

Pilotno območje	Pohorje	Dinaridi
Gozdnogospodarska enota	Radlje – desni breg	Draga
Velikost (ha)	8.372	5.341
Rastiščne značilnosti		
Gozdni tip	kisloljubno jelovje, kisloljubno zgornje-gorsko bukovje	dinarsko jelovo-bukovje
Prevladujoči talni tip *	distrična rjava tla	rjava pokarbonatna tla, rendzine
Produkcijska sposobnost rastišča ( $m^3 ha^{-1} leto^{-1}$ ) *	9,4-10,9	8,1
Povprečni rastiščni indeks (jelka/smreka/bukev) *	38/38/31	29/33/29
Povprečna nadmorska višina (min/max)	764 (316/1542)	920 (496/1230)
Povprečna letna temperatura °C	8	7,5-9,1
Povprečna količina padavin (mm)	1300	1800
Sestojne značilnosti		
Povprečna lesna zaloga ( $m^3 ha^{-1}$ )	426	385
Sestojna temeljnica ( $m^2 ha^{-1}$ )	36,5	30,8
Drevesna sestava (% lesne zaloge)		
Jelka	16	32
Bukev	14	34
Smreka	61	28
Ostali iglavci	5	1
Ostali listavci	4	5
Značilnosti gozdne inventure		
Število stalnih vzorčnih ploskev	552	890
Leto zadnje inventure	2014	2020
Število izmerjenih dreves	9676	13762

\* povzeto po Bončina in sod., 2021

## 2.2 Model in vhodni podatki

### 2.2 Model and input data

Razvoj gozdov na pilotnih območjih smo simulirali s populacijskim matričnim modelom SLO-MATRIX, ki je bil razvit za simuliranje razvoja raznomernih mešanih jelovo-bukovo-smrekovih gozdov (Ficko in sod., 2016; Roessiger in sod., 2016). Model je sestavljen iz štirih glavnih modulov, od katerih vsak simulira enega od ključnih procesov v raznomernih gozdovih: i) vrast, ii) sečnjo oziroma antropogeno smrtnost, iii) naravno

smrtnost (mortaliteta) in iv) rast, ki je simulirana kot preraščanje dreves v višje debelinske stopnje zaradi njihove rasti. V okviru projekta smo v model dodali še v) modul izračuna vezave ogljika. Vsak modul vključuje vrstno-specifične empirične funkcije, ki posamezni proces simulirajo sočasno z drugimi procesi. V osnovi so drevesa posamezne drevesne vrste razdeljena v tri rastne razrede glede na njihov debelinski prirastek v zadnjem inventurnem obdobju (Roessiger in sod., 2016): 1) 0–2 cm/10 let, 2) 2–4 cm/10 let in 3)  $\geq 4$  cm/

10 let. Razvoj gozda je simuliran za pet drevesnih vrst ali skupin vrst, in sicer za jelko, bukev, smreko, druge iglavce in druge listavce.

i) Modul VRAST: Vrast tankih dreves nad merskim pragom 10 cm prsnega premera napoveduje empirična vrstno-specifična nelinearna verjetnostna funkcija, izračunana z binarno logistično regresijo. Ključni prediktor je gostota sestoja, merjena s sestojno temeljnico (Roessiger in sod., 2016). Skupno število vraslih dreves določene vrste se nato z drugo vrstno-specifično nelinearno verjetnostno funkcijo razdeli med rastne razrede, prediktorja sta prsni premer in sestojna temeljnica. Vrast izračunamo in upoštevamo na začetku vsakega simuliranega desetletnega koraka.

ii) Modul POSEK: Sečnjo simuliramo s pomočjo empiričnih vrstno-specifičnih verjetnostnih funkcij, izračunanih z binarno logistično regresijo, pri čemer je edini prediktor prsni premer drevesa. S tem modulom napovemo število dreves, ki naj bi jih skladno s scenarijem gospodarjenja z gozdovi posekali v vsakem simuliranem koraku deset let, njihovo debelinsko strukturo in drevesno sestavo.

iii) Modul MORTALITETA: Naravno smrtnost drevja prav tako simuliramo z empiričnimi vrstno-specifičnimi verjetnostnimi funkcijami, izračunanimi z binarno logistično regresijo. Tudi tu je edini prediktor prsni premer drevesa. Na podlagi izračunane verjetnosti opredelimo število dreves v posamezni štiricentimetrski debelinski stopnji, ki odmre v desetletnem koraku, končni simulirani rezultat je debelinska struktura odmrlih dreves po drevesnih vrstah.

iv) Modul RAST: Empirično izračunana funkcija preraščanja izračuna verjetnost, da bo obravnavano drevo v debelinski stopnji  $i$  v desetletnem simulacijskem obdobju preraslo iz te stopnje v debelinsko stopnjo  $i+1$  ali  $i+2$ . Verjetnost je izračunana kot vsota konstantnih verjetnosti preraščanja, izračunanih iz povprečnega debelinskega prirastka vsakega ravnega razreda, in spremenljive verjetnosti preraščanja, izračunane z uporabo binarne logistične regresije ter prsnega premera drevesa in sestojne temeljnice (vključena kot mera konkurence) kot neodvisnih spremenljivk (Roessiger in sod., 2016). Za simulacijo rasti dreves (in sestoja) število dreves posamezne drevesne vrste v določeni debelinski

stopnji v desetletju  $t+10$  izračunamo po algoritmu: 1) skupno število dreves v debelinski stopnji  $i$  v desetletju  $t$  se zmanjša za simulirano število posekanih dreves v obdobju  $t+10$  (modul POSEK); 2) zmanjšano število dreves v debelinski stopnji  $i$  se dodatno zmanjša za število dreves, ki naj bi v tej debelinski stopnji  $i$  po simulaciji v obdobju  $t+10$  naravno odmrla (modul MORTALITETA); 3) zmanjšano število dreves v debelinski stopnji  $i$  nato pomnožimo z verjetnostjo preraščanja dreves v debelinsko stopnjo  $i+1$ , število dreves v debelinski stopnji  $i$  se zmanjša za število preraslih dreves v debelinsko stopnjo  $i+1$ ; 4) zmanjšanemu številu dreves v debelinski stopnji  $i$  prištejemo prerasla drevesa iz debelinske stopnje  $i-1$  in  $i-2$  (v najnižji debelinski stopnji namesto tega prištejemo število vraslih dreves – modul VRAST).

v) Osnovnim štirim modulom modela SLO-MATRIX smo dodali še modul za izračun zalog (skladišča, ang. *pool*) in vezave C (ang. *sequestration*). V naših analizah smo računali le vezavo (sekvestracijo) C ob upoštevanju spremembe njegove zaloge v živi nadzemni lesni biomasi, biomasi naravno odmrlih dreves, saj ostajajo v gozdovih, in biomasi sečnih ostankov, ki prav tako ostanejo v gozdu. Za izračun sekvestracije C smo uporabili enačbo 1 (prirejena po Blattert in sod. (2018) in Thrippleton in sod. (2021)):

$$\Delta C = C_{nadz,t+n} - C_{nadz,t} + \sum V_{odmrlo} \cdot e^{-k \cdot (t+n-a)} \quad (1)$$

kjer je  $\Delta C$  sekvestracija C v času med  $t$  in  $t+n$  ( $t$  C ha<sup>-1</sup>),  $C_{nadz}$  je zaloga C v nadzemni biomasi in jo izračunamo po enačbi 2 (IPCC, 2003),  $V_{odmrlo}$  je prostornina odmrlega lesa,  $t$  je začetni čas simulacije (let),  $n$  je trajanje simulacije (let),  $a$  je simulacijski interval (let) in  $k$  je indikator stopnje razgradnje, izračunan po enačbi 3 (Mackensen in sod., 2003).

$$C_{nadz} = V_{zivo\ drevje} \cdot WD \cdot BEF \cdot CF, \quad (2)$$

kjer je  $V_{zivo\ drevje}$  lesna zaloga živih dreves (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>),  $WD$  gostota lesa vrste (preglednica 2),  $BEF$  je vrstno-specifičen razširitveni faktor biomase,  $CF$  pa je za vrsto specifičen faktor C.

$$k = dec1 \cdot e^{dec2 \cdot MAT}, \quad (3)$$

kjer je *dec1* faktor razgradnje 1, ki je 0,0166, *dec2* faktor razgradnje 2 in je 0,093, *MAT* pa srednja letna temperatura (°C).

Pri izračunu vezave C nismo upoštevali posekanega lesa, saj ne prispeva k sekvestraciji C v gozdovih, je pa dolgoročno pomemben pri skupni količini in skupnih sekvestraciji C (IPCC, 2003; Thrippleton s sod., 2021). Prav tako nismo upošte-

**Preglednica 2:** Parametri, uporabljeni za izračun nadzemne biomase živih dreves (IPCC, 2003)  
*Table 2:* Parameters used to calculate the aboveground biomass of living trees (IPCC, 2003)

	Bukev	Smreka	Jelka	Ostali iglavci	Ostali listavci
CF	0,48	0,51	0,51	0,51	0,48
BEF	1,4	1,3	1,3	1,3	1,4
WD	0.58	0,4	0,4	0,4	0,52

vali vezave C v gozdnih tleh, saj količina C v tleh ostane razmeroma stabilna, če je gospodarjenje z gozdom sonaravno (Thüring in Kaufmann, 2010) in vezava C v tleh zelo majhna v primerjavi z njegovo vezavo v lesni biomasi (Jandl in sod., 2007).

Na pilotnem območju Pohorje je bil model SLOMATRIX predhodno v celoti parametriziran (Ficko in sod., 2016) in smo ga uporabili v tej obliki. Na pilotnem območju v Dinaridih smo model delno parametrizirali. Na območju Dinaridov je bil model predhodno parametriziran za gozdove v gozdnogospodarski enoti Leskova dolina (Ficko in sod., 2016), a kljub istemu gozdnemu rastiščnemu tipu ter podobnemu stanju gozdov in podobnemu gospodarjenju z njimi so predhodne analize in simulacije pokazale, da je model neustrezen zaradi drugačne intenzivnosti poseka v zadnjih desetih letih, kar je bilo delno posledica načrtnega pospeševanja obnove gozdov (GGN GGE Draga, 2011), delno pa žledoloma leta 2014, ki je bil v delu enote izjemno intenziven (Klopčič in sod., 2020; Pajnič, 2021). Ker je bila posledično sečnja v našem pilotnem območju v obdobju parametrizacije modela bistveno intenzivnejša kot na Snežniku v obdobju 2003–2013 (Roessiger in sod., 2015), je bila za ustrezno simulacijo scenarija gospodarjenja z gozdom po scenariju 'trenutno gospodarjenje' potrebna parametrizacija modula POSEK. Zaradi zaznanih razlik v odmiranju drevja po naravni poti smo parametrizirali tudi funkcijo v modulu MORTALITETA. Funkcije v modulih VRAST in RAST so bile prevzete iz prvotnega modela.

Za parametrizacijo modela in inicializacijo simulacij smo uporabili podatke iz gozdne inventure, ki jo redno izvaja Zavod za gozdove Slovenije (ZGS, 2021). Za obe pilotni območji smo pridobili podatke iz dveh zaporednih inventur na stalnih vzorčnih ploskvah (SVP, razmak meritev deset let, preglednica 1). Morebitne manjkajoče podatke in informacije smo pridobili z dodatnimi terenskimi meritvami in obiski na terenu, med katerimi smo podatke in informacije zbirali na sestankih z načrtovalci, vodji krajevnih enot in revirnimi gozdarji Zavoda za gozdove Slovenije. Zaporedne meritve na SVP omogočajo parametrizacijo modela, kar pomeni izračun vrstno-specifičnih funkcij, ki simulirajo prej omenjene ključne procese funkcioniranja raznomernih gozdov. Osnovni vhodni podatki, uporabljeni za simulacije razvoja gozdov, predstavljajo debelinsko strukturo (t.j. število dreves) po štiricentimetrskih debelinskih stopnjah, drevesnih vrstah in treh že omenjenih rastiščnih razredih; podatki so bili pridobljeni iz zadnje inventure gozdov na pilotnih območjih.

## 2.3 Scenariji razvoja gozdov

### 2.3 Forest development scenarios

Na vsakem pilotnem območju smo simulirali tri scenarije gospodarjenja z gozdovi: i) brez gospodarjenja (NOM), ii) scenarij trenutnega gospodarjenja (BAU) in iii) optimiziran scenarij za maksimiranje vezave C (COPT). Scenarij brez gospodarjenja NOM posnema naravni razvoj gozda. V scenariju NOM smo uporabili parametre, specifične za pilotno območje, predviden posek

je bil  $0 \text{ m}^3$ . Scenarij trenutnega gospodarjenja z gozdovi BAU simulira razvoj gozda, kot če bi bil gospodarjen na način, kakršen je bil v zadnjem inventurnem obdobju. Model smo parametrizirali s pomočjo podatkov s SVP. BAU je bil tako privzet kot način gospodarjenja, ki ga odražajo SVP.

Pri oblikovanju optimiziranega scenarija COPT pa smo sledili dvema ciljema: i) maksimizacija vezave C v naslednjih sto letih in ii) zagotavljanje aktivnega gospodarjenja z gozdovi, kar smo zagotovili z omejitvijo minimalne količine posekane lesne mase v časovnem koraku simulacije. Iskanje optimiziranega scenarija (v nadaljevanju optimizacija) je bilo izvedeno z uporabo linearnega programiranja za maksimiranje ali minimiziranje ciljne funkcije s spreminjanjem vrednosti nastavljive spremenljivke in hkratnem upoštevanju ene ali več omejitev (Garcia, 1990); postavljenih omejitev ne sme biti preveč, saj se s tem zmanjšuje možnost za doseg optimalne rešitve. Za izvedbo optimizacije smo uporabili Excelov dodatek What's best (Lindo Systems Inc., 2021). V postopku smo določili tri glavne dele optimizacije: i) cilj, ii) omejitvene spremenljivke in iii) nastavljive spremenljivke.

i) Kot cilj smo določili največjo vezavo C v gozdovih v sto letih simulacije, maksimirali smo seštevek desetletnih vrednosti vezanega C.

ii) V protokol optimizacije smo vključili različne omejitve, da bi dosegli cilj in ohranili pričakovano količino skupne posekane lesne mase v desetletnem obdobju. Za določitev slednje smo uporabili načrtovani posek v aktualnih gozdnogospodarskih načrtih (GGN GGE Radlje – desni breg, 2014; GGN GGE Draga, 2021) in informacije lokalnih gozdarskih strokovnjakov. V raziskavi smo preizkusili več scenarijev z različnimi omejitvami glede poseka, ki so se nanašale na skupno količino posekanega lesa, količine posekanega lesa glede na drevesne vrste ali količine posekanega lesa glede na debelinske stopnje. V končni različici scenarija, predstavljeni v prispevku, smo uporabili le omejitve najmanjše in največje količine skupne posekane lesne mase v inventurnem obdobju, ki smo jo opredelili kot minimalni/maksimalni delež lesne zaloge, ki naj bi ga posekali. Zgornja meja je bila postavljena kot načrtovana jakost poseka glede na lesno zalogo na območju za

tekoče desetletno načrtovano obdobje, spodnja meja pa je bila opredeljena kot realizirana jakost poseka v predhodnem desetletnem obdobju načrtovanja ali kot najmanjša pričakovana količina posekanega lesa, ki so jo kot potrebno ocenili gozdarski strokovnjaki, izražena kot jakost glede na lesno zalogo. Slednjo smo uporabili, če je bila realizirana količina poseka majhna, hkrati pa je bila ocena lokalnih gozdarskih strokovnjakov, da se količina posekane lesne mase povečuje in je bila realizacija v predhodnem obdobju znatno manjša, kot je trenutni trend. V GGE Radlje smo tako najmanjšo količino poseka določili na 12 % lesne zaloge, največjo pa na 18,6 %, v GGE Draga pa sta bili vrednosti 13 % in 22 %.

iii) Nastavljiva spremenljivka, to je parameter, ki ga programsko orodje za optimizacijo spreminja, da doseže cilj ob upoštevanju vključenih omejitev, je bila število posekanih dreves po drevesnih vrstah, štiricentimetrskih debelinskih stopnjah in rastnih razredih.

## 2.4 Simulacije razvoja gozdov in obdelave podatkov

### 2.4 Simulations of forest development and data processing

Za vsako pilotno območje smo simulirali razvoj gozdov po vseh treh scenarijih gospodarjenja z gozdovi za obdobje sto let s časovnimi koraki po deset let. S podatki o debelinski strukturi po drevesnih vrstah smo izračunali osnovne sestojne parametre in vezavo C. Lesno zalogo posameznih drevesnih vrst smo izračunali z vmesnimi tarifami (Kotar, 2003), v formuli smo uporabili ponderirano povprečje vrednosti  $V_{45}$ , ki nakazuje uporabljeni tarifni razred; ponder je bila površina odsekov. Drevesno sestavo smo izračunali kot deleže posameznih vrst v skupni lesni zalogi.

V analizah dinamike sestojnih parametrov smo se osredotočili le na prvih trideset let, le izjemoma na prvih petdeset let. Analizirali smo razvoj gostote sestojev, lesne zaloge, drevesne sestave, debelinske strukture živega drevja, količino poseka in njegovo debelinsko strukturo ter naravno smrtnost drevja, ključna pa je analiza vezave C v gozdovih obeh pilotnih območjih po različnih scenarijih gospodarjenja.

### 3 REZULTATI

### 3 RESULTS

#### 3.1 Simulacije poseka po različnih scenarijih gospodarjenja z gozdovi

#### 3.1 Simulations of harvest according to different forest management scenarios

Po scenariju trenutno gospodarjenje BAU bi bila v prvem desetletju simulacije na Pohorju skupna količina posekanega lesa 476.052 m<sup>3</sup> ali 13,5 % lesne zaloge (preglednica 3). Če bi v gozdovih nadaljevali s trenutnim gospodarjenjem, bi se do tridesetega leta simulacije posek na Pohorju povečal za 4 %, v nadaljevanju bi se rahlo zmanjševal. Na Pohorju v prvih tridesetih letih simulacije v poseku prevladuje smreka, manj je jelke in bukke (preglednica 4), drevesna sestava poseka ostaja skorajda nespremenjena. Debelinska struktura volumna posekanih dreves izkazuje zvonasto porazdelitev z vrhom pri 50–58 cm prsnega premera (slika 3). Deleži posekanih dreves po ravninskih razredih so bili dokaj uravnoteženi (prvo desetletje 22 % : 44 % : 34 %, drugo desetletje 24 % : 42 % : 35 %).

V Dinaridih je bila v prvem desetletju skupna simulirana količina posekanega lesa 409.307 m<sup>3</sup> ali 19,2 % lesne zaloge. Do tridesetega leta simulacije bi se posek zmanjšal za 22 % (preglednica 3), tudi

v nadaljevanju simulacije bi se posek zmanjševal. Po scenariju BAU so bile v simuliranem poseku v prvem desetletju skoraj enakovredno zastopane smreka, jelka in bukev (preglednica 4). Debelinska struktura volumna simuliranega poseka (slika 4) izkazuje unimodalno rahlo desno asimetrično porazdelitev z največjo vrednostjo pri srednje debelih drevesih 38–50 cm prsnega premera. V naslednjem desetletju je bila porazdelitev simetrična zvonasta z največjo vrednostjo pri drevesih prsnih premerov 38–54 cm. Deleži posekanih dreves po ravninskih razredih so bili uravnoteženi (v prvem in drugem desetletju 34 % : 30 % : 36 %).

Po scenariju COPT je na Pohorju v prvem desetletju simulirani desetletni posek znašal 489.575 m<sup>3</sup> (5,8 m<sup>3</sup>/ha), v naslednjem desetletju naj bi se povečal za 0,6 %, nato pa v naslednjih desetih letih zmanjšal za 4 % glede na začetno desetletje. Z optimizacijo je bila simulirana jakost poseka ves čas blizu omejitve najmanjše jakosti poseka. V poseku je v prvem desetletju prevladovala bukev, precej je bilo tudi smreke, nato pa je v naslednjih desetletjih zelo prevladovala smreka. Debelinska struktura volumna posekanih dreves v prvem desetletju izkazuje bimodalno porazdelitev (slika 2); bukev naj bi sekali v višjih debelinskih stopnjah (več kot 42 cm), medtem ko smreko

**Preglednica 3:** Posek po scenarijih „trenutno gospodarjenje“ (BAU) in „optimizirano“ (COPT) v pilotnih območjih Pohorje (GGE Radlje) in Dinaridi (GGE Draga)

*Table 3: Harvesting under „business-as-usual management“ (BAU) and „optimised“ (COPT) scenarios in the pilot areas Pohorje (GGE Radlje) and Dinaric Mountains (GGE Draga).*

Pilotno območje	Časovno obdobje v simulaciji	Posek po scenariju BAU			Posek po scenariju COPT		
		skupaj (m <sup>3</sup> )	na hektar (m <sup>3</sup> /ha)	jakost (% lesne zaloge)	skupaj (m <sup>3</sup> )	na hektar (m <sup>3</sup> /ha)	jakost (% lesne zaloge)
Pohorje	1. desetletje	476.053	5,7	13,5	489.575	5,8	13,9
	2. desetletje	522.959	6,3	15,5	492.314	5,9	14,3
	3. desetletje	496.690	5,9	15,2	484.045	5,9	14,4
Dinaridi	1. desetletje	409.307	7,7	19,2	276.543	5,2	13,0
	2. desetletje	358.678	6,7	18,6	269.532	5,1	12,9
	3. desetletje	318.476	6,0	18,1	265.207	5,0	12,9



**Preglednica 4:** Drevesna sestava poseka po scenarijih „trenutno gospodarjenje“ (BAU) in „optimizirano“ (COPT) v pilotnih območjih Pohorje (GGE Radlje) in Dinaridi (GGE Draga)

*Table 4: Species composition of harvested timber under „current management“ (BAU) and „optimised“ (COPT) scenarios in the pilot areas Pohorje (GGE Radlje) and Dinaric Mountains (GGE Draga).*

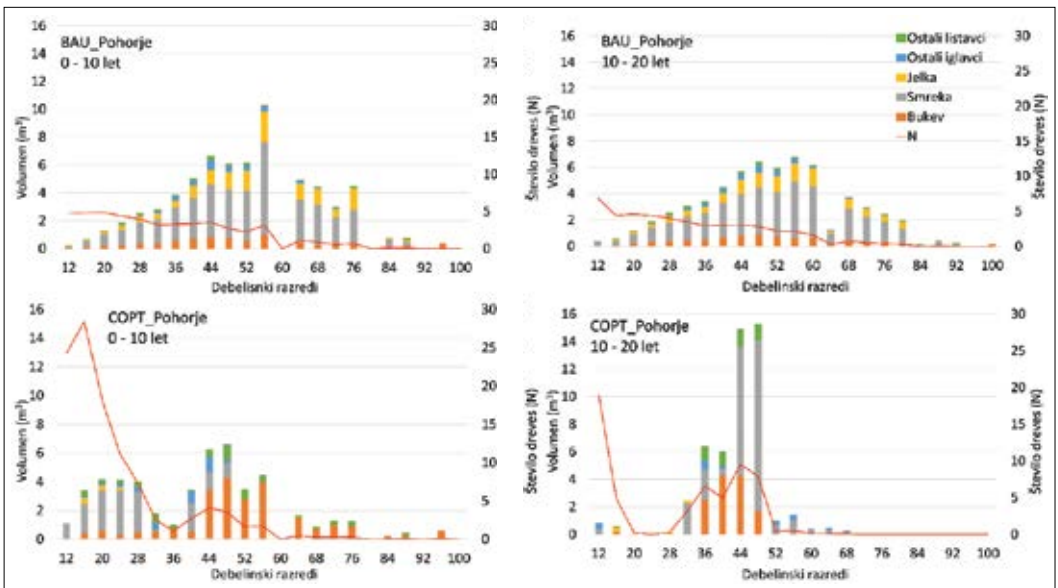
Pilotno območje	Časovno obdobje v simulaciji	Posek po scenariju BAU (%)				
		bukev	smreka	jelka	Drugi iglavci	Drugi listavci
Pohorje	1. desetletje	12	59	20	5	3
	2. desetletje	13	59	19	5	4
	3. desetletje	14	59	18	5	4
Dinaridi	1. desetletje	24	40	32	1	3
	2. desetletje	26	38	31	1	4
	3. desetletje	28	35	31	2	5

Pilotno območje	Časovno obdobje v simulaciji	Posek po scenariju COPT (%)				
		bukev	smreka	jelka	drugi iglavci	drugi listavci
Pohorje	1. desetletje	46	32	2	7	13
	2. desetletje	25	59	2	5	9
	3. desetletje	4	90	2	1	3
Dinaridi	1. desetletje	14	4	80	0	2
	2. desetletje	21	12	65	0	3
	3. desetletje	30	23	41	0	5

predvsem v nižjih (do 30 cm). V drugem desetletju je porazdelitev povsem drugačna, pretežno naj bi sekali srednje debelo bukev (34-50 cm) in smreko (30-50 cm). Prevladoval je posek počasi rastočih dreves (91,2 % v prvem desetletju in 55,6 % v drugem), sledil je posek srednje hitro rastočih dreves (6,9 % oziroma 36,8 %), hitro rastočih dreves je bilo izrazito manj (1,9 % oziroma 7,5 %).

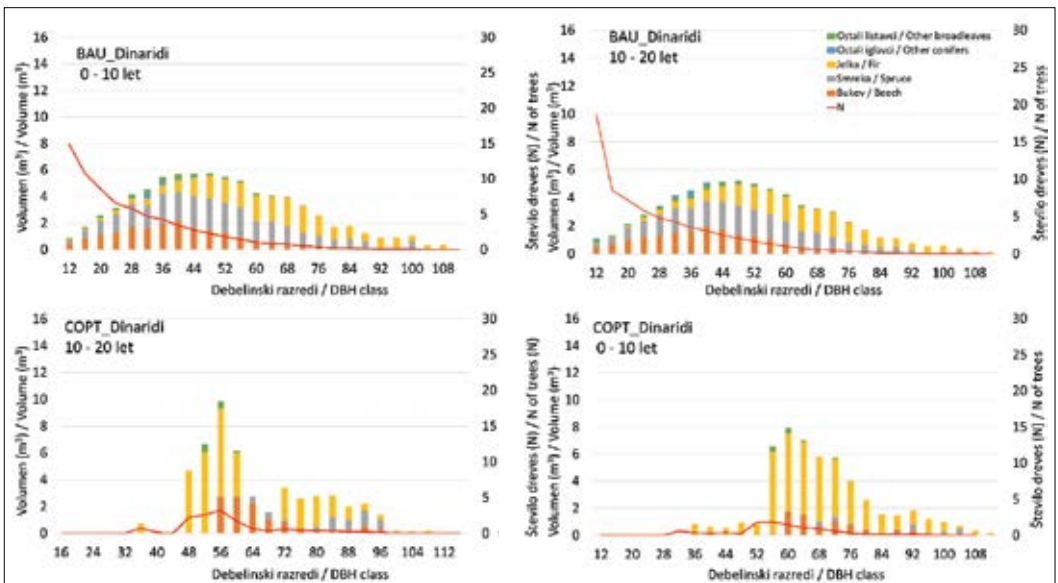
V Dinaridih je simuliran desetletni posek sprva znašal 276.543 m<sup>3</sup> (5,2 m<sup>3</sup>/ha) in se je nato konstantno zmanjševal (preglednica 3) do 50. leta simulacije, nato pa zopet povečeval. V poseku je v

prvih treh desetletjih prevladovala jelka, z vsakim desetletjem pa sta se povečevala deleža smreke in bukve. V prvem desetletju je simulacija predvidevala posek predvsem debelih jelk (>54 cm prsnega premera) (slika 3), v drugem se je meja le nekoliko znižala (>46 cm prsnega premera), v poseku je bilo tudi več debelih bukev in smrek, posek tankega drevja ni bil simuliran. Prevladoval je posek srednje hitro rastočih dreves (60,8 % v prvem desetletju in 63,1 % v drugem), sledil je posek počasi rastočih dreves (39,1 % oziroma 24,7 %), hitro rastočih dreves je bilo izrazito manj (0,1 % oziroma 12,2 %).



Slika 2: Debelinska struktura in drevesna sestava simuliranega poseka; prikazana sta volumen debeljadi (stolpci) in število (rdeča črta) posekanih dreves po scenarijih „trenutno gospodarjenje“ (BAU) in „optimizirano“ (COPT) v pilotnem območju Pohorje (GGE Radlje).

Figure 2: Diameter distribution and tree species composition of harvested volume (columns) and the number of harvested trees (red line) simulated by the „business-as-usual“ (BAU) and „optimized“ (COPT) scenarios in Pohorje (FMU Radlje).



Slika 3: Debelinska struktura in drevesna sestava simuliranega poseka; prikazana sta volumen debeljadi (stolpci) in število (rdeča črta) posekanih dreves po scenarijih „trenutno gospodarjenje“ (BAU) in „optimizirano“ (COPT) v pilotnem območju Dinaridi (GGE Draga).

Figure 3: Diameter distribution and tree species composition of harvested volume (columns) and the number of harvested trees (red line) simulated by the „business-as-usual“ (BAU) and „optimized“ (COPT) scenarios in the Dinaric Mountains (FMU Draga).

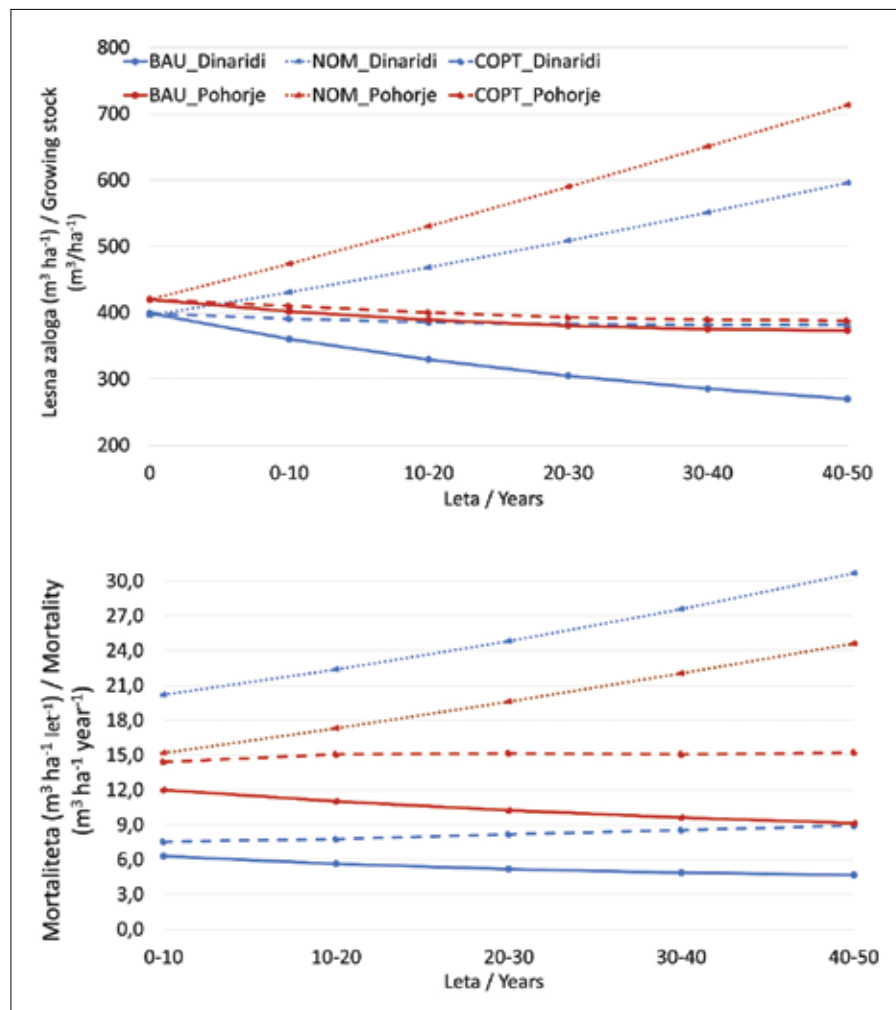
### 3.2 Simulacije sestojnih parametrov po različnih scenarijih gospodarjenja z gozdovi

#### 3.2 Simulations of stand parameters according to diverse forest management scenarios

Če bi v gozdovih nadaljevali s trenutnim načinom gospodarjenja (scenarij BAU), bi se v naslednjih tridesetih letih lesna zaloga zmanjšala na Pohorju

(za 11 %) in v Dinaridih (za 21 %). Po scenariju NOM pa bi se lesna zaloga na obeh območjih linearno povečala: v tridesetih letih simulacije za 41 % na Pohorju in za 35 % v Dinaridih (slika 4). Ob aplikaciji scenarijev COPT bi lesna zaloga nihala, a se nekako ohranjala na višini trenutne lesne zaloge.

Simulirana naravna smrtnost drevja (slika 4) je bila na Pohorju v celotnem obdobju simulacije

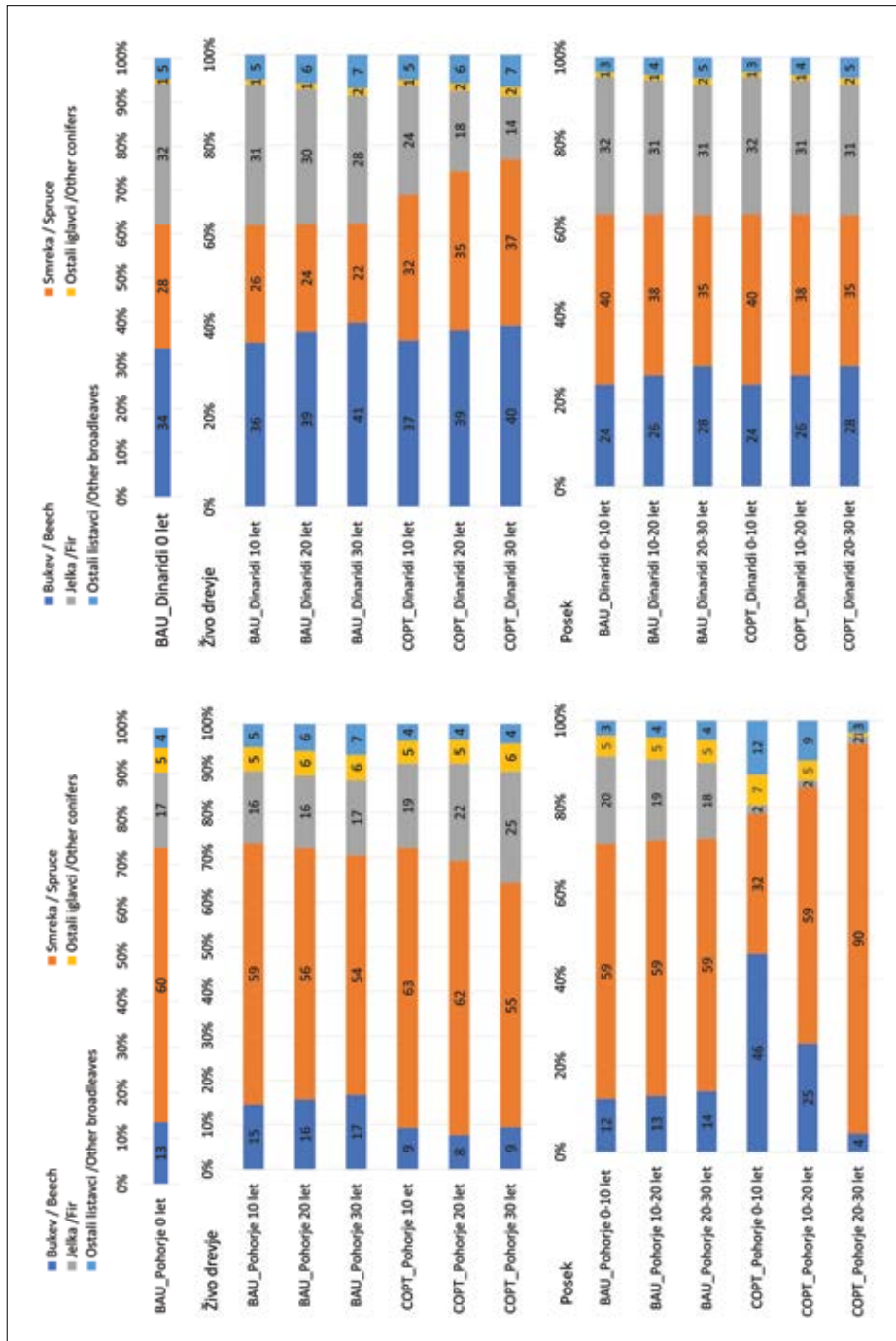


Slika 4: Dinamika sestojnih parametrov v 50-letnem obdobju pri scenarijih „brez gospodarjenja“ (NOM), »trenutno gospodarjenje« (BAU) in »optimiziran scenarij« (COPT) na pilotnem območju Pohorje (GGE Radlje) in Dinaridi (GGE Draga)

Figure 4: Dynamics of stand volume and mortality over a 50-year period according to the „no management“ (NOM), „business-as-usual management“ (BAU) and „optimized“ (COPT) scenarios in the Pohorje (GGE Radlje) and Dinaric Mountains (GGE Draga) pilot areas

scenarija BAU razmeroma velika (v povprečju 9,3 m<sup>3</sup>/ha/leto), v Dinaridih pa skoraj polovico manjša (v povprečju 4,8 m<sup>3</sup>/ha/leto). Po scenarijih COPT naj bi se v obeh pilotnih območjih smrtnost

drevja nekoliko povečala. Največja smrtnost drevja je bila simulirana po scenariju NOM. Zanimivo je, da je v obeh območjih v simulirani smrtnosti prevladovala bukev.



Slika 5: Dinamika drevesne sestave lesne zaloge in poseka do 30. leta simulacije na pilotnih območjih Pohorje (levo) in Dinaridi (desno); številke na grafikonu predstavljajo delež posamezne vrste v skupni lesni zalogi.  
 (right); shown numbers represent the proportions of tree species in the total stand volume.

V nadaljevanju trenutnega gospodarjenja po scenariju BAU bi na Pohorju delež jelke ostal nespremenjen, delež smreke bi se po tridesetih letih le nekoliko zmanjšal, povečal pa delež bukve (slika 5). Po scenariju COPT bi se znatno povečal delež jelke (za 8 %), zmanjšal pa delež bukve in smreke. V Dinaridih bi se ob nadaljevanju trenutnega gospodarjenja po scenariju BAU v tridesetih letih zmanjšala deleža smreke in jelke, povečal bi se delež bukve in drugih vrst. COPT je simuliral drastično zmanjšanje deleža jelke (po tridesetih letih za kar 18 %), ob hkratnem povečanju deležev smreke (za 9 %) in bukve (za 6 %).

Razvoj debelinske strukture živih dreves po scenarijih BAU na obeh pilotnih območjih nakazuje predvsem spremembe v korist tanjših dreves. V tridesetih letih simulacije naj bi se povečalo število vraslih dreves, kar je posledica zmanjševanja sestojne gostote in lesne zaloge. V primerjavi z začetno debelinsko strukturo naj bi se povečalo predvsem število dreves do 34 cm prsnega premera. V tridesetih letih simulacije naj bi se na obeh območjih zmanjšalo število debelih dreves ( $\geq 70$  cm prsnega premera).

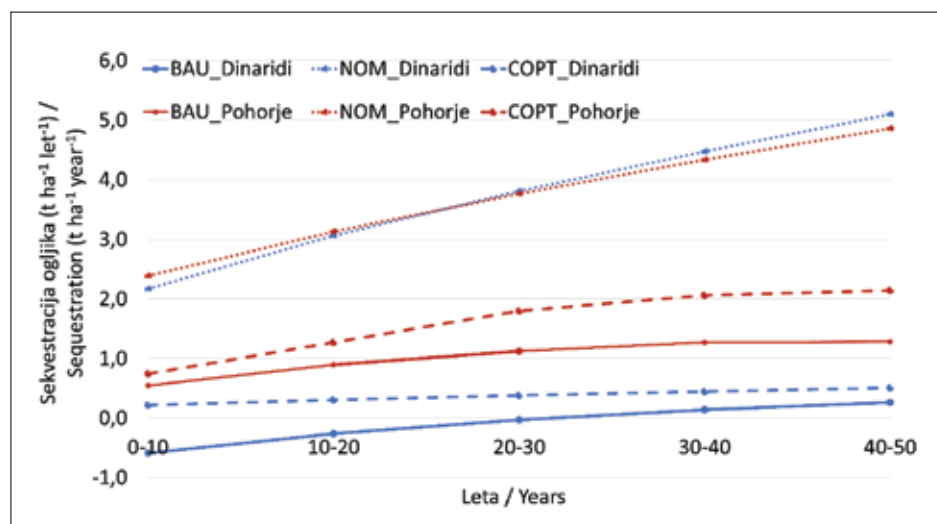
Po scenariju COPT naj bi se v Dinaridih število vraslih dreves povečalo v primerjavi s scenarijem BAU, medtem ko naj bi se delež debelega drevja  $> 70$  cm prsnega premera do tridesetega leta simulacije na Pohorju povečal s 4,5/ha na 7,0/ha, v Dinaridih pa zmanjšal s 5,6/ha na 2,3/ha.

### 3.3 Simulirana dinamika ponorov ogljika po različnih scenarijih gospodarjenja z gozdovi

#### 3.3 Simulated dynamics of carbon sequestration according to diverse forest management scenarios

Razvoju analiziranih sestojnih parametrov sledi razvoj simulirane vezave C. Na obeh pilotnih območjih so bili največje količine vezanega C simulirane po scenariju NOM, po katerem se količine povečujejo linearno. Količina vezanega C bi se v tridesetih letih simulacije na Pohorju povečala za 37 %, v Dinaridih pa za 42 % glede na trenutno raven.

Po scenariju BAU bi se na Pohorju kljub zmanjšanju lesne zaloge letna vezava C počasi povečevala in se postopno ustalila po petdesetih



Slika 6: Dinamika ponorov ogljika v 50-letnem obdobju po scenarijih „brez gospodarjenja“ (NOM), »trenutno gospodarjenje« (BAU) in »optimiziran scenarij« (COPT) na pilotnih območjih Pohorje (GGE Radlje) in Dinaridi (GGE Draga)

Figure 6: Dynamics of carbon sequestration over a 50-year period according to the „no management“ (NOM), „business-as-usual management“ (BAU) and „optimized“ (COPT) scenarios in the Pohorje (GGE Radlje) and Dinaric Mountains (GGE Draga) pilot areas

letih. Do tridesetega leta simulacije bi se povečal za več kot 100 % glede na trenutno raven in znašal približno 1,3 t/ha/leto. V Dinaridih scenarij BAU v prvih treh desetletjih simulacije odraža emisije C, saj je predviden velik posek. Vseeno naj bi se emisije zmanjševale in se v četrtem desetletju simulacije pretvorile v ponore C. Nato naj bi se ponori C konstantno povečevali, do petdesetega leta simulacije naj bi dosegli 0,26 t/ha/leto.

Po scenariju COPT je v tridesetletnem obdobju na Pohorju pričakovati povečanje vezave C za 26 %. Vezava C na Pohorju se lahko poveča ob hkratnem dovolj aktivnem gospodarjenju z gozdovi. V Dinaridih je bila po scenariju COPT vezava C opazno večja kot po scenariju BAU. Po scenariju BAU so v prvih dveh desetletjih izražene emisije C, po scenariju COPT pa v istih desetletjih ponori C 0,3–0,4 t/ha/leto.

#### 4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

#### 4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Izsledki raziskave nakazujejo, da bi lahko z nekoliko spremenjenim načinom gospodarjenja z gozdovi, kot je trenutni (BAU), letno vezavo C povečali, vsekakor pa ohranili na razmeroma visoki ravni kljub aktivnemu gospodarjenju s sečnjo. Na vezavo C v gozdovih vplivajo tri ključne komponente: volumenski prirastek sestojev, višina in struktura poseka ter količina in sestava odmrle lesne mase.

Optimizirani scenarij COPT je na pilotnih območjih simuliral količino posekanega lesa na spodnji meji predpisane omejitve. Simulacija je takšna zaradi ohranjanja čim večje lesne zaloge raznomernih gozdov, kar praviloma pomeni tudi večje volumenske prirastke sestojev (Kotar, 2005; Pretzsch, 2009) in ob enaki količini poseka večjo akumulacijo prirastka. Večji volumenski prirastek sestojev zagotavlja tudi ohranjanje hitro rastočih dreves oziroma posek počasi rastočih. Med scenarijema BAU in COPT so bile na obeh pilotnih območjih pričakovano simulirane razlike v desetletni količini in strukturi posekanega drevja. Vendar bi oba scenarija zagotovila zadostno količino lesne biomase, ki bi jo lahko uporabili lastniki gozdov.

Med scenarijema BAU in COPT smo zasledili opazne razlike v debelinski strukturi posekanih

dreves. Med pilotnima območjema lahko opazimo dva različna koncepta optimiziranega gospodarjenja (poseka) z namenom povečanja vezave C (COPT). Za prvi koncept, ki je bil simuliran v Dinaridih, je bil značilen posek manjšega skupnega števila dreves, vendar so bila drevesa v povprečju veliko večjih premerov (dimenzij) kot pri scenariju BAU. V prvih desetletjih, na katera smo se prvenstveno osredotočili, je bil simuliran predvsem posek jelk velikih premerov, kasneje tudi bukev in smrek velikih premerov. Simuliran je bil torej skoraj izključno posek glavnih drevesnih vrst. Predvidevamo, da pri takem načinu spodbujamo naravno obnovo gozdov, ki zaradi zmanjšane gostote sestojev povzroči povečanje vrasti dreves prek meritvenega praga, pa tudi povečano volumensko rast dreves, ki ostanejo v sestoji (Kotar, 2005). Dolgoročno to pomeni več mladih dreves manjših do srednjih premerov, ki na splošno rastejo hitreje (Pretzsch, 2010). Drevesa velikih premerov so zaradi svoje velike prostornine pomembno skladišče C, vendar se zdi, da je njihov pomen za vezavo C manjši. Glede na rezultate optimizirani scenarij pospešuje hitro rastoča drevesa. Pri tem se odpira vprašanje, po katerih zunanjih znakih in kako v sestoji prepoznati počasi rastoča/hitro rastoča drevesa (upoštevajoč volumensko rast).

Drugi koncept maksimiranja vezave C v gozdu je ravno nasprotje prvega. Na Pohorju je bilo simulirano znatno več posekanih tankih in srednje debelih dreves v primerjavi s trenutnim načinom gospodarjenja (BAU). V poseku sicer prevladuje smreka, znaten delež pa zavzemajo bukve srednjih do večjih premerov. Ta koncept v večji meri sledi konceptu redčenj in povečani rasti drevja zaradi zmanjšane gostote in povečanja ravnega prostora posameznim drevesom (Kotar, 2005). Zanimivo je, da je ta koncept ohranjal debelo drevje, kar je ravno nasprotno prvemu opisanemu konceptu.

Razliko v konceptih COPT scenarijev gospodarjenja za maksimiranje vezave C bi lahko do določene mere pripisali produktivnosti rastišča. Na Pohorju so rastišča produktivnejša kot v Dinaridih (preglednica 1), kar pomeni hitrejšo rast dreves in večje volumenske prirastke sestojev. V začetni debelinski strukturi sicer nismo ugotovili statistično značilnih razlik (test KS, rezultati niso

prikazani), a vseeno je bil delež hitro rastočih dreves na Pohorju opazno večji (39,7 %) kot v Dinaridih (27,7 %); med debelim drevjem je bila razlika še očitnejša (73 % proti 47 %).

Drugi pomemben dejavnik, ki posredno vpliva na količino vezanega C v gozdu, je odmrta lesna biomasa. Rezultati so pokazali, da bi se količina vezanega C zmanjšala za tretjino, če bi iz gozda odstranili vsa naravno odmrta drevesa. Mrtva drevesa so skladišče C za več desetletij, dokler popolnoma ne razpadejo (Mackensen in sod., 2003; Humphrey in Bailey, 2012). V modelu je upoštevano, da drevesna biomasa postopoma razpada (les iglavcev počasneje kot les listavcev), kar predstavlja emisije C, vseeno pa je odmrta masa še precej let upoštevana pri izračunu vezave C.

Pri interpretaciji rezultatov, predvsem pa pri prenosu ugotovitev v gozdarsko prakso, moramo biti previdni. V Sloveniji gospodarjenje z gozdovi temelji na načelu večnamenskega gospodarjenja, COPT scenarija pa prikazujeta dva izmed številnih mogočih scenarijev gospodarjenja z gozdovi, ki ne sledita temu načelu, saj izključujeta večino funkcij gozdov. V raziskavi smo se osredotočili le na dve funkciji gozdov: zagotavljanje lesa kot osnovne surovine (lesnoproizvodna funkcija) in vezava C kot pomembna ekosistemska storitev blaženja (negativnih) vplivov podnebnih sprememb. Slednji v Pravilniku o načrtih za gospodarjenje z gozdovi in upravljanje z divjadjo (2020) ni obravnavan kot posebna funkcija, ampak je delno vključen v klimatsko funkcijo gozdov. Drugih funkcij oziroma ekosistemskih storitev nismo neposredno obravnavali, kar znatno vpliva na rezultate simulacij gospodarjenja z gozdovi in je zato to nujno upoštevati pri interpretaciji rezultatov. Če bi bila edina upoštevana funkcija gozda oziroma ekosistemska storitev vezava C, bi bil scenarij brez gospodarjenja (NOM) prepoznan kot najprimernejši v obeh proučevanih pilotnih območjih; podobno je bilo že ugotovljeno (npr. Luysaert in sod., 2018). Vendar imamo v Sloveniji in Evropi gozdove, s katerimi želijo lastniki in družba poleg vezave C pridobiti tudi les kot surovino in vir prihodka. Številnim lastnikom gozdnih površin gozd in gozdarstvo pomenita ekonomsko in socialno varnost. Zanje je aktivno gospodarjenje z gozdovi nujno potrebno, kar se kaže v rednem poseku in

spravilu ter rabi lesa. Posledično na večini gozdnih površin poteka aktivno gospodarjenje, ki zagotavlja večje ali manjše ponore C ali občasno celo njegove emisije. Pomemben zaključek naše raziskave je, da je povečanje vezave C v gozdovih mogoče z manjšimi spremembami trenutnega načina gospodarjenja, ne vemo pa, kako bi to vplivalo na druge funkcije gozdov.

Pri zasledovanju večnamenskosti gozdov se upošteva integralno zagotavljanje vseh funkcij gozda (Pravilnik o načrtih ..., 2020). Funkcije, kot so zagotavljanje lesa in finančnih donosov, zagotavljanje biotske raznovrstnosti in ohranjanje naravne in kulturne dediščine, rekreacijska funkcija, zadostna količina pitne vode in druge, se med seboj prepletajo in njihovo vrednotenje lahko povzroča težave. Za ta namen bi bilo ključno razviti večkriterijski sistem za podporo odločanju (ang. *Decision Support System* ali DSS), ki bi omogočal hkratno in vzajemno vrednotenje pomena različnih funkcij gozdov, tudi na podlagi podatkov iz simulacij razvoja gozdov z različnimi modeli. Hkrati pa bi takšen sistem nudil tudi podporo odločevalcem pri upravljanju z gozdovi (npr. načrtovalcem) pri odločanju in zagotavljanju ter načrtovanju večnamenskega in trajnostnega gospodarjenja z gozdovi (npr. Mina in sod., 2017; Thrippleton in sod., 2021).

## 5 ZAHVALA

## 5 ACKNOWLEDGEMENT

Prispevek je bil pripravljen v okviru projekta Gozdovi za prihodnost. Projekt je del Evropske podnebne pobude (EUKI). EUKI je mehanizem financiranja projektov pod pokroviteljstvom nemškega zveznega ministrstva za okolje, varstvo narave in jedrsko varnost (nem. *Bundministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz*; BMUV). Razpis EUKI za projektne ideje vodi Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Glavni cilj EUKI je promocija sodelovanja znotraj Evropske unije (EU) za ublažitev vpliva podnebnih sprememb z zmanjševanjem emisij toplogrednih plinov. Del raziskave je bil opravljen v IC Raziskovalni gozd – Pahernikova posest, ki je del MR IC Univerze v Ljubljani, in njegovo izvajanje

financira Agencija RS za raziskovalno dejavnost. Avtorji delujejo v programski skupini P4-0059, katere delovanje prav tako financira Agencija RS za raziskovalno dejavnost.

## 6 VIRI

## 6 REFERENCES

- Blattert C., Lemm R., Thees O., Hansen J., Lexer M. J., Hanewinkel M. 2018. Segregated versus integrated biodiversity conservation: Value-based ecosystem service assessment under varying forest management strategies in a Swiss case study. *Ecological Indicators*, 95: 751–764
- Bertalančič R., Dolinar M., Draksler A., Honzak L., Kobold M., Kozjek K., Lokošek N., Medved A., Vertačnik G., Vlahovič Ž., Žust A. 2018. Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja. Sintezno poročilo – prvi del. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, Slovenija.
- Ficko A., Roessiger J., Bončina A. 2016. Can the use of continuous cover forestry alone maintain silver fir (*Abies alba* Mill.) in central European mountain forests? *Forestry*, 89: 412–421. DOI:10.1093/forestry/cpw013
- GGN GGE Draga, 2021. Gozdnogospodarski načrt gozdnogospodarske enote Draga (2021–2030). Kočevje, Zavod za gozdove Slovenije.
- GGN GGE Radlje-desni breg, 2014. Gozdnogospodarski načrt gozdnogospodarske enote Radlje-desni breg (2014–2023). Slovenj Gradec, Zavod za gozdove Slovenije.
- Hanewinkel M., Kuhn T., Bugmann H., Lanz A., Brang P. 2014. Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage, *Forestry*, 87, 4: 525–534. DOI: 10.1093/forestry/cpu008
- Humphrey J., Bailey S., 2012. Managing deadwood in forests and woodlands. Forestry Commission Practice Guide. Forestry Commission, Edinburgh, 24 str.
- Jevšenak J., Klopčič M., Mali B. 2020. The Effect of Harvesting on National Forest Carbon Sinks up to 2050 Simulated by the CBM-CFS3 Model: A Case Study from Slovenia. *Forests*, 11, 1090. DOI: 10.3390/f11101090
- Kirschbaum M.U.F. 2003. To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances through storing carbon or providing biofuels. *Biomass and Bioenergy*, 24, 4/5: 297–310. DOI: 10.1016/S0961-9534(02)00171-X
- Kotar M. 2003. Ugotavljanje, spremljanje in pomen uravnoteženega stanja v prebiralnem gozdu. *Gozdarski vestnik*, 61, 7/8: 283–300
- Lipušček I., Tišler V. 2003. Les-skladišče ogljika. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 71: 71–89
- Lindo Systems Inc., 2021. What's Best 17.0. Excel add-in for linear, non-linear, and integer modeling. Lindo Systems Inc., Chicago, USA.
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B. E., Ciais P. in Grace J. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455(7210): 213–215.
- Kajfež Bogataj L., 2014. Prilaganje na podnebne spremembe: izzivi in priložnosti. Posvet Sporočila znanosti o podnebnih spremembah. SAZU <https://www.slideshare.net/Umanotera/04-luka-kajfe-bogataj>
- Kirschbaum M.U.F., 2003. To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances through storing carbon or providing biofuels. *Biomass and Bioenergy* 24: 297–310.
- Mackensen J., Bauhaus J., Webber E. 2003. Decomposition rates of coarse woody debris—A review with particular emphasis on Australian tree species. *Australian Journal of Botany*, 51, 1: 27–37. DOI: 10.1071/BT02014
- Mina M., Bugmann H., Klopčič M., Cailleret M. 2017. Accurate modelling of harvesting is key for projecting future forest dynamics: a case study in the Slovenian mountains. *Regional Environmental Change*, 17, 1: 49–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0902-2>
- IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. 2003. [https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf\\_contents.html](https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_contents.html) (14. 12. 2020)
- Pajnič M. 2021. »Gospodarjenje z gozdovi na območju GGE Draga«. Draga, Zavod za gozdove Slovenije (osebni vir, marec 2022)
- Pravilnik o načrtih za gospodarjenje z gozdovi in upravljanje z divjadjo. 2020. UR. I. RS. list RS, št. 91/10 in 200/20.
- Pretzsch H. 2020. Density and growth of forest stands revisited. Effect of the temporal scale of observation, site quality, and thinning. *Forest Ecology and Management*, 460, 15: 117879. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117879
- Podnebne spremembe. (2022) [https://europa.eu/climate-pact/about/climate-change\\_sl](https://europa.eu/climate-pact/about/climate-change_sl) (1. 8. 2022)
- Reyer C. P. O., Bathgate S., Blennow K., Borges J. G., Bugmann H., Delzon S., Faias S.P., Garcia-Gonzalo J., Gardiner B., Gonzalez-Olabarria J.R., Gracia C., Hernández J.G., Kellomäki S., Kramer K., Lexer M. J., Lindner M., Maaten E., Maroschek M., Muys B., Nicoll B., Palahi M., Palma J.H.N., Paulo J. A., Peltola H., Pukkala T., Rammer W., Ray D., Sabaté S., Schelhaas M. J., Seidl R., Temperli C., Tomé M., Yousefpour R., Zimmermann N. E., Hanewinkel M.



2017. Are forest disturbances amplifying or canceling out climate change-induced productivity changes in European forests? *Environmental Research Letters*, 12: 034027. DOI: 1088/1748-9326/aa5ef1
- Roessiger J., Ficko A., Clasen C., Griess V., Knoke T. 2016. Variability in growth of trees in unevenaged stands displays the need for optimizing diversified harvest diameters. *European Journal of Forest Research*, 135, 2: 238–295. DOI: 10.1007/s10342-015-0935-6
- Sandström J., Bernes C., Junninen K., Lohmus A., Macdonald E., Müller J., Jonsson B.G. 2018. Impacts of dead wood manipulation on the biodiversity of temperate and boreal forests. A systematic review. *Journal of Applied Ecology*, 56: 1770–1781. DOI: 10.1111/1365-2664.13395
- Simončič T., Bončina A., 2015. Are forest functions a useful tool for multi-objective forest management planning? Experiences from Slovenia. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 36, 2: 293–305
- Thrippleton T., Blattert C., Bont L. G., Mey R., Zell J., Thürig E., Schweier J. 2021. A Multi-Criteria Decision Support System for Strategic Planning at the Swiss Forest Enterprise Level: Coping With Climate Change and Shifting Demands in Ecosystem Service Provisioning. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4: 693020. DOI: 10.3389/ffgc.2021.693020
- Thürig E., Kaufmann E. 2010. Increasing carbon sinks through forest management: a model-based comparison for Switzerland with its Eastern Plateau and Eastern Alps. *European Journal of Forest Research*, 129, 563–572.