

## MORSE – simulator razvoja gozdnih sestojev

### MORSE – Forest Stand Simulator

Andrej BONČINA<sup>1</sup>, Hana ŠTRAUS<sup>1</sup>

#### Izvleček:

V prispevku je predstavljen sestojni simulator MORSE (MOdel Razvoja SEstojev), ki omogoča simuliranje razvoja enomernih mešanih sestojev na ravni posameznih sestojev in večji prostorski ravni. Zgrajen je iz treh modulov, ki obravnavajo rast, mortaliteto in ukrepanje (redčenje in obnova). Regresijski model razvoja dominantnega premera sestojev je temeljni algoritem, izdelan na podlagi empiričnih podatkov. Za zagon simulatorja so potrebni vhodni podatki o sestojnih in rastiščnih znakih, ki so preprosto določljivi. MORSE simulira razvoj sestojev za obdobje dvesto let glede na upravljavske odločitve o redčenju (jakost, pogostnost, vrst, pospeševanje drevesnih vrst) in obnovi (ciljne velikosti, pomladitvena doba, čas in jakost pomladitvenih sečenj, pomladitveni cilj). Mogoča sta dva načina določanja režima redčenja: i) eksplicitna določitev terminov in jakosti redčenja in ii) posredna glede na primerjavo dejanske in optimalne temeljne sestojne. Razvoj sestojnih znakov za opredeljeno obdobje je prikazan grafično in v preglednicah. Za isto obdobje so navedeni parametri poseka in mortalitete drevja. MORSE je sedaj v fazi preverjanja na sestojni ravni, potem sledi razvoj simulatorja na večji prostorski ravni. V prispevku so prikazane variante razvoja testnega sestoja glede na različno ukrepanje.

**Ključne besede:** modeliranje, rast, mortaliteta, redčenje, obnova, dominantni premer, gozdnogospodarsko načrtovanje

#### Abstract:

In this paper, the stand simulator MORSE is presented. It enables simulating stand development of even-aged mixed forest stands at the single stand level and the landscape level. It consists of three modules, dealing with growth, mortality and management (thinning and regeneration). The diameter increment of the forest stand dominant diameter is a key algorithm integrated into the simulator. Data on stand and site characteristics, which can be determined easily, are needed for the simulation run. The simulation period is 200 years. The simulated stand development depends on the decision on thinning (intensity, frequency, type, favouring tree species) and regeneration (target dimension, regeneration period, intensity and frequency of regeneration cut, tree species of a regeneration). Thinning regime is defined i) explicitly, by defining the time and intensity of thinning or ii) the time and thinning intensity are defined based on the comparison of optimal and real stand basal area. Stand development in the selected period is presented by main stand parameters in the graphical and table form. For the same period, parameters of mortality and harvest are presented. MORSE is now in the testing phase at the single stand level, and then an upgrade at the landscape level will follow. In the paper, variants of the stand development of the case study under various management decisions are described.

**Key words:** modelling, growth, mortality, thinning, stand regeneration, dominant diameter, forest management planning

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Modeli razvoja gozdnih sestojev so pomembni za razumevanje razvojnih značilnosti gozdnih sestojev, napovedovanje njihovega razvoja glede na rastiščne in okoljske dejavnike ter različne variante ukrepanja. Zato so koristen pripomoček za boljše odločanje o gospodarjenju z gozdovi in komuniciranje z lastniki gozdov ter interesnimi skupinami. Modele razvoja gozdnih sestojev glede na koncept izgradnje delimo na empirične, procesne in hibridne (Pretzsch, 2009; Burkhardt in Tomé, 2012). Za upravljanje gozdov so

pomembni predvsem prvi, ki temeljijo na odvisnosti med drevesnimi, sestojnimi in rastiščnimi znaki. Odvisnosti ugotovimo za izbrana območja gozdov oziroma določene rastiščne razmere. Glede na objekt modeliranja razlikujemo sestojne in drevesne modele ter modele, ki združujejo značilnosti obeh. Prvi prikazujejo razvoj sestojnih znakov (npr. števila dreves, temeljnice). Drevesni modeli so znatno natančnejši, njihova izdelava zato tudi zahtevnejša. Vmesne oblike modelov povezujejo rast sestoja z rastjo drevesnih vrst v sestoju ali pa z debelinskimi razredi gozdnih sestojev. Modeli so praviloma izdelani ločeno

<sup>1</sup> Prof. dr. A. B., H. Š. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Večna pot 83, 1000 Ljubljana, Slovenija, [andrej.boncina@bf.uni-lj.si](mailto:andrej.boncina@bf.uni-lj.si)

za enomerne in raznomerne gozdove. Prvih je precej več, saj prevladujejo gojitveni sistemi, ki ustvarjajo enomerne oblike sestojev. V zadnjih dveh desetletjih je opazen tudi razvoj modelov za raznomerne gozdove (Pukkala in sod., 2009; Sterba in Monserud, 1997) which is predicted from size (diameter, crown ratio).

Tehnološki razvoj na področju računalništva in večja razpoložljivost podatkov, pridobljenih z nacionalnimi ali območnimi gozdnimi inventurami, spodbujata razvoj modeliranja. Kljub temu pa je bilo do nedavnega modeliranje gozdnih sestojev v Sloveniji precej zapostavljeno. Zaenkrat še nimamo aplikacij za modeliranje razvoja gozdnih sestojev, ki bi bili vsestransko uporabni za pedagoške in upravljalvske namene. Opravljane pa so bile številne raziskave, pomembne za razvoj modelov (npr. Cedilnik, 1986; Klopčič in sod., 2010; Kobal, 2011; Hladnik in Kobal, 2012), na testnih območjih so bili testirani nekateri tuji modeli (Mina in sod., 2015; Klopčič in sod., 2017), za nekaj gozdnih tipov smo izdelali matrične modele razvoja raznomernih sestojev (Ficko in sod., 2016; Ficko in sod., 2018). Sedaj je modeliranje namenjen večji poudarek na magistrskem študiju gozdarstva; z izbirnim predmetom Modeliranje razvoja gozdnih sestojev je mogoče pridobiti osnovno znanje na tem področju. Velik premik v razvoju modelov pomenita dva Ciljna raziskovalna projekta (Ficko, 2020; Klopčič in sod., 2021). V okviru projekta V4-2014 Razvoj modelov gospodarjenja z gozdovi v Sloveniji (Ficko, 2020) nameravamo razviti sestojni simulator, ki bo deloval na podlagi modeliranja na ravni dreves v sestoji.

Poleg »drevesnega modela razvoja sestojev« smo v zadnjih letih razvijali empirični simulator razvoja gozdov, ki je zasnovan na modeliranju sestojnih znakov (Bončina, 2021) in ga še vedno dopolnjujemo. Model smo že vključili v vsebino predmeta Gozdnogospodarsko načrtovanje. Simulator smo poimenovali MORSE, po izumitelju telegrafa in soavtorju Morsejeve abecede (S.F.B. Morse), sicer pa označuje MOdeliranje Razvoja gozdnih SEstojev. Poglavitna cilja prispevka sta 1) predstaviti konceptualno zasnovo simulatorja MORSE in 2) pojasniti njegovo delovanje na izbranih primerih. Simulator deluje na dveh ravneh, in sicer na ravni posameznega sestoja ter

na ravni izbranega območja gozdov. V prispevku predstavljamo prvi del, torej simulacije na ravni posameznih sestojev, ki so narejene v programu Excel (Bončina in Štraus 2022a, 2022b).

## 2 OZADJE IN KONCEPTI

### 2 BACKGROUNDS AND CONCEPTS

#### 2.1 Zahteve

##### 2.1 Requirements

Tuji sestojni simulatorji, tudi tisti, ki jih že uporabljamo v pedagoške namene, npr. Siwawa (Rosset in sod., 2013, Rosset in sod., 2018; Klopčič, 2020), so bili izdelani za čiste sestoe in parameterizirani za razmere v deželah, v katerih so jih razvili. Naše zahteve pri izdelavi simulatorja so bile naslednje:

- možnost modeliranja razvoja enomernih mešanih in čistih gozdnih sestojev,
- možnost modeliranja razvoja posameznega sestoja in razvoja gozdnih sestojev v območju, tako da je simulator uporaben za podrobno in okvirno načrtovanje razvoja gozdov,
- možnost izbire raznovrstnega ukrepanje glede režima redčenj, načinov pomlajevanja sestojev, pospeševanje drevesnih vrst,
- simulator naj temelji na empiričnih podatkih,
- možnost stalnega dopolnjevanja posameznih modulov simulatorja (npr. dopolnjevanje modelov rasti drevja, njihove mortalitete, optimalne sestojne gostote).

#### 2.2 Koncept simulatorja

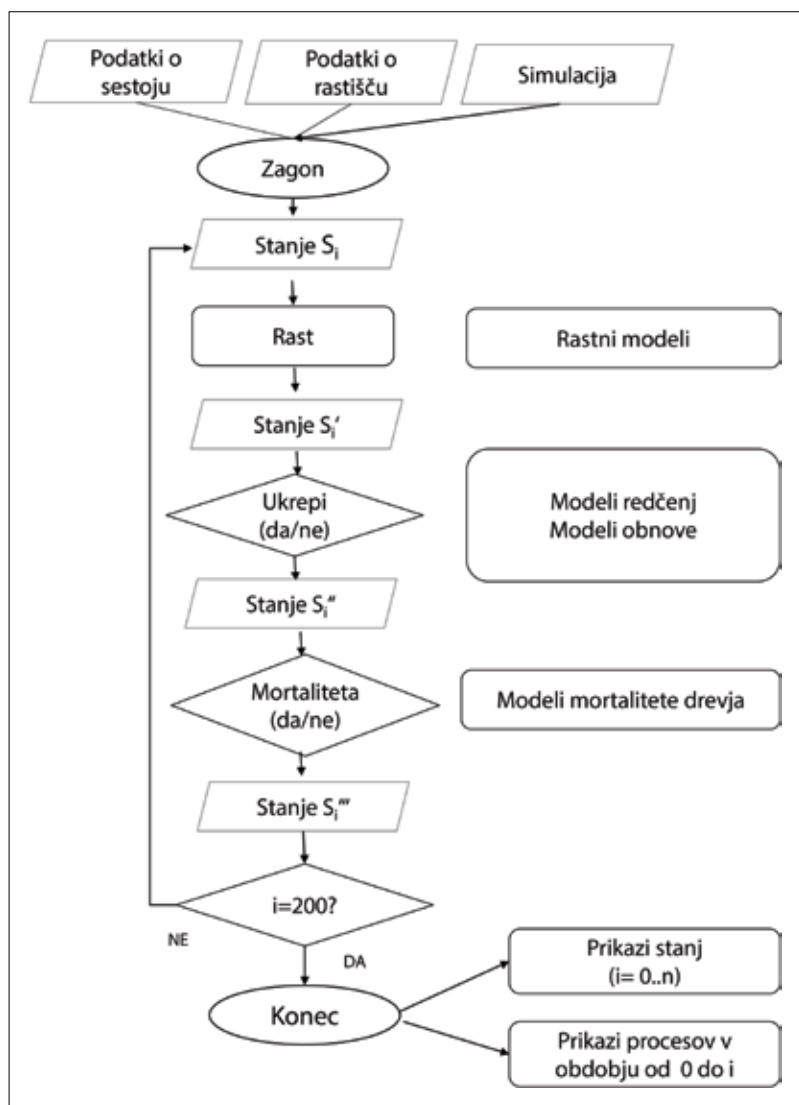
##### 2.2 Simulator concept

Za zagon simulacije (Slika 1) potrebujemo osnovne spremenljivke o gozdnem sestoji (npr. temeljnica, število dreves, drevesna sestava) in rastiščnih razmerah (npr. nadmorska višina, skalnatost, produktivnost). Simuliranje razvoja sestoja poteka na ravni sestojnih spremenljivk; ključne so dominantni premer sestoja (Ddom), sestojna temeljnica (G), število dreves (N), srednji temeljnični premer (Dg), drevesna sestava, prikazana z deleži osmih skupin drevesnih vrst.

Simuliranje je omejeno na enomerne gozdove, za katere je značilen razvoj od mladih do zrelih sestojev, njihove obnove ter ponovnega razvoja mladih sestojev. Poglavitni moduli simulatorja obravnavajo rast, mortaliteto in ukrepanje (red-

čenje, pomladitev). MORSE simulira razvoj sestoja za obdobje dvesto let, časovni korak je eno leto. Rezultat simulacije na ravni posameznega sestoja je datoteka, ki obsega 201 vrstico ( $i = 0 \dots 200$ ). Za vsako posamezno leto  $i$  so določene začetne vrednosti sestojnih spremenljivk v tistem letu (npr.  $G_i$ ). Zaradi rasti se vrednosti v tekočem letu spremenijo (spremenljivke so označene z apostroфом, npr.  $G_i'$ ). V tekočem letu je lahko opravljen posek, zato se vrednost sestojnega

znaka spremeni (oznaka je dvojni apostrof, npr.  $G_i''$ ). Zaradi velike sestojne gostote lahko drevec odmre, kar vpliva na spremembo sestojnih spremenljivk (spremenljivke so označene s trojnim apostroфом, npr.  $G_i'''$ ). Za temeljnico tako velja, da je vrednost na koncu tekočega leta enaka vrednosti na začetku leta ( $G_i'$ ), kateri prištejemo prirastek temeljnice in odštejemo temeljnico morebitnih posekanih ( $G_{pos}$ ) in odmrlih dreves ( $G_m$ ). Vrednosti sestojnih spremenljivk ob koncu



Slika 1: Zasnova sestojnega simulatorja MORSE  
 Figure 1: MORSE stand simulator scheme

leta so hkrati začetne vrednosti spremenljivke v naslednjem letu (npr.  $G_i^{\text{nov}} = G_{i+1}$ ). Aplikacija je zasnovana tako, da je mogoče module dopoljevati na podlagi novih podatkov ali izboljšanih regresij. Nekatere module, ki še niso vključeni (npr. modul vrasti), bo mogoče dodati.

## 2.3 Modeliranje razvoja sestoja

### 2.3 Stand development modelling

Razvoj sestoja je opisan z izbranimi sestojnimi znaki. Najpomembnejši so:

- Ddom, dominantni premer sestoja; je srednji kvadratični premer stotih najdebelejših dreves v sestoju. Ddom je pomemben za razvrščanje gozdnih sestojev v razvojne faze in za določitev ciljnih premerov, ko sestoj lahko pomladimo,
- G, temeljnica sestoja ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ); je seštevek ploščin presekov dreves s prsnim premerom ( $D \geq 10$  cm),
- Dg, srednji temeljnični premer; je srednji kvadratični premer dreves ( $D \geq 10$  cm),
- IDdom in IDg, prirastek dominantnega premera in prirastek temeljničnega premera,
- N, število dreves v sestoju nad meritvenim pragom ( $D \geq 10$  cm),
- drevesna sestava, prikazana s temeljnico osmih skupin drevesnih vrst, kot jih uporablja Zavod za gozdove Slovenije (11, smreka (sm); 21, jelka (je); 30, drugi iglavci (d. igl); 41, bukev (bu); 50, hrasti (hr); 60, plemeniti listavci (pl. list); 70, trdi listavci (t. list) in 80, mehki listavci (m. list));
- lesna zaloga (LZ), volumenski prirastek (IVOL), prirastek sestojne temeljnice (IG).

MORSE omogoča prikaz stanja sestoja za poljubno leto v intervalu od 0 do 200 let (Slika 1). Poleg omenjenih lahko prikažemo še druge sestojne spremenljivke (npr. starost, razvojna faza), ki omogočajo zbirne prikaze stanj sestojev na ravni izbranega območja v izbranem letu (npr. razmerje razvojnih faz). Stanje sestojnih znakov v izbranem letu je prikazano v grafični obliki in v preglednici. MORSE prikazuje tudi kumulativne vrednosti spremenljivk, ki opisujejo rast, posek in mortaliteto, in sicer za obdobje od začetnega leta do iskanega leta. Primeri takšnih spremenljivk so skupna količina poseka v obdobju, posek po skupinah drevesnih vrst, volumen in število odmrlega drevja.

## 2.4 Vhodni podatki

### 2.4 Input data

Vhodni podatki so spremenljivke, ki so vključene v regresijske funkcije, ali so kot logične vrednosti pomembne za delovanje simulatorja. Vhodne sestojne spremenljivke, ki jih ocenimo s sestojno inventuro, so G, Ddom, (Dg), N in deleži osmih skupin drevesnih vrst. Če je  $D_{\text{dom}} < 10$  cm (mladje, gošča), je vhodni podatek za zagon simulatorja ocenjena starost mladovja. Rastiščne spremenljivke so nadmorska višina (NV), naklon (NAK), volumni posameznih skupin drevesnih vrst pri prsnem premeru 45 cm (K), ki so izpeljani iz tarif, določenih za odsek, v katerem je sestoj. K je cenilka produktivnosti gozdnih rastišč ob upoštevanju dejanske drevesne sestave; izračunamo jo kot srednjo tehtano vrednost K posameznih skupin drevesnih vrst glede na njihov delež v sestoju. Nekatere druge spremenljivke (npr. površina sestoja) so pomembne za prikaz stanja gozdov na območni ravni.

## 2.5 Moduli simulatorja

### 2.5 Simulator modules

Ključni moduli simulatorja razvoja gozdov so priraščanje sestojev, mortaliteta drevja in upravljanje. V sedanji različici MORSE ne modeliramo vrasti, saj je manj bistvena za modeliranje razvoja enomernih gozdov. Prav tako ne modeliramo pomlajevanja. Je pa uporabniku omogočeno, da določi drevesno sestavo sestoja v naslednjem ciklu (za posamezni sestoj ali gozdni tip) (glej 2.5.3).

### 2.5.1 Priraščanje

#### 2.5.1 Growth

Priraščanje sestoja temelji na modelu priraščanja dominantnega premera sestoja (IDdom). Ddom je pomemben za upravljanje gozdov, saj je povezan z določanjem razvojnih faz, razvojem izbrancev, ciljnim premeri drevesnih vrst (Bončina, 2022). Regresijski model IDdom za izbrano območje gozdov je izračunan iz eksperimentalnih podatkov iz zbirke DdomPloskev (Bončina, 2022). Omenjena zbirka je pripravljena na podlagi podatkov s stalnih vzorčnih ploskev Zavoda za gozdove Slovenije. Letna vrednost IDdom je razlika med Ddom druge meritve in vrednostjo Ddom za

ista drevesa pri prvi meritvi, deljena z dolžino obdobja med meritvama. Na tak način smo se izognili negativnim vrednostim IDdom, ki so sicer mogoče. Na priraščanje sestojev vplivajo rastiščne in sestojne spremenljivke (Enačba 1, Priloga 2). Model IDdom določimo za posamezen gozdni rastiščni tip ali pa za širše izbrano območje. Nekatere pojasnjevalne spremenljivke (npr. temeljnica) se z razvojem sestoja spreminjajo in jih upoštevamo pri izračunu IDdom za vsako leto posebej.

$$\text{IDdom} = f(\text{Rastišče}, \text{Sestoj}) \quad (\text{enačba 1})$$

Na podlagi IDdom je izračunan prirastek srednjega temeljničnega premera (IDg (enačba 2)). Tudi ta regresija je določena na podlagi podatkov s stalnih vzročnih ploskev.

$$\text{IDg} = f(\text{IDdom}, \text{Dg}, \text{G}) \quad (\text{enačba 2})$$

Na podlagi IDg so za vsako leto v obdobju od 0 do 200 let izračunane vrednosti drugih sestojnih znakov (npr. G, LZ).

## 2.5.2 Mortalitet

### 2.5.2 Mortality

Mortaliteta je določena glede na primerjavo G in maksimalne temeljnice (Gmax) pri določenem Dg. Gmax smo določili glede na sestojno gostoto (*stand density index*; SDI). Izsledke o SDI drevesnih vrst smo prevzeli (Pretzsch in Biber, 2016), vrednosti za bukev smo spremenili. Gmax je v obdobju razvoja sestoja izračunan za vsako leto posebej glede na Dg in drevesno sestavo. Količina odmrlega drevja, ki jo izrazimo s temeljnico odmrlih dreves (Gm), je določena z razliko med Gmax in G<sup>o</sup> (Slika 1). Število odmrlih dreves (Nm) je izračunano na podlagi G<sup>o</sup>, Dg<sup>o</sup> in QDm. QDm je razmerje med srednjim temeljničnim premerom odmrlih dreves (Dgm) in Dg<sup>o</sup>. QDm določi uporabnik simulatorja; če je QDm enak 1, potem je Dgm enak Dg<sup>o</sup>. Pri naravni mortaliteti praviloma odmirajo drevesa, ki so tanjša od Dg<sup>o</sup> (QDm < 1), kar pomeni, da pri določeni Gm odmore več dreves kot v primeru QDm = 1. Če je mortaliteta drugačna (npr. vpliv insektov, vetrolom), lahko to upoštevamo z vrednostjo QDm.

V sedanji različici MORSE je stopnja odmiranja enaka za vseh osem skupin drevesnih vrst.

## 2.5.3 Upravljanje

### 2.5.3 Management

Predvidena sta dva glavna vnosa upravljaljskih odločitev: 1) vnos za posamezne sestoje, 2) enotno ravnanje za vse sestoje istega gozdnega rastiščnega tipa v izbranem območju gozdov. Upravljaljske odločitve delimo na ukrepe redčenja in ukrepe obnove.

## Redčenje

### Thinning

Redčenje obsega ukrepanje od Ddom = 10 cm do začetka pomlajevanja sestojev. Za boljšo oceno stanja gozdnega sestoja in za podporo določanju jakosti poseka smo v simulator vgradili optimalno temeljnico (Gopt), ki je odvisna predvsem od drevesne sestave, produktivnosti rastišča in ciljev gospodarjenja. Gopt smo modelirali na podlagi slovaških sestojnih tablic za vsako skupino drevesnih vrst posebej (enačba 3), pri tem upoštevali Dg in produktivnost rastišča, pri kateri smo na podlagi tabeliranih vrednosti sestojnih parametrov poiskali povezavo med rastiščnim indeksom in K.

$$\text{Gopt} = f(\text{Dg}, \text{K}) \quad (\text{Enačba 3})$$

Pri modeliranju Gopt za posamezne vrste velja omeniti zanimivost: po slovaških tablicah je Gopt bukke pri istem Dg na manj produktivnih rastiščih višja kot na produktivnejših rastiščih. To ne velja za švicarske tablice, kjer je Gopt pri istem Dg nekoliko večja na produktivnejših rastiščih. Če pa upoštevamo starost bukovega sestoja, potem je Gopt pri enaki starosti višja na produktivnejših rastiščih. Vrednosti Gopt smreke so pri istem Dg na produktivnejših rastiščih vedno nekoliko višje. Gopt mešanega sestoja smo izračunali glede na vrednosti optimalne temeljnice za čiste sestoje posameznih drevesnih vrst ter njihov delež v G. Uporabniki lahko prilagodijo model Gopt glede na specifične cilje gospodarjenja ali druge razloge, ki vplivajo na določitev optimalne gostote. To pomeni, da lahko vrednosti Gopt za nekaj odstotkov proporcionalno povečajo ali zmanjšajo.

Zaradi razvoja sestoja so vrednosti Gopt izračunane za vsako leto posebej, saj se spreminja Dg, zaradi spreminjanja drevesne sestave pa se lahko nekoliko spreminja tudi vrednost K.

Pri redčenju je treba izbrati:

- čas in jakost izvedbe ukrepa; razvili smo dva načina (A in B) določanja (Bončina in Štraus, 2022a, 2022b):
  - pri načinu A uporabnik določi, v katerih letih naj bodo izvedena redčenja in kakšna naj bo njihova jakost. Pri tem lahko sproti opazuje grafični prikaz spremembe temeljnice sestoja in njegovo primerjavo z Gopt ter odločitve spreminja;
  - pri načinu B uporabnik določi čas in jakost izvedbe z dvema kvocientoma. Čas izvedbe redčenja je določen s kvocientom  $G'/Gopt$ . Če uporabnik za čas izvedbe redčenja določi  $G'/Gopt = 1,05$ , to pomeni, da se redčenja izvede v letih, ko sestoj doseže temeljnico, ki je za 5 % višja od Gopt. Uporabnik s kvocientom  $G'/Gopt$  določi tudi jakost poseka v letu, ko poteka redčenje. Tako jakost, določena s kvocientom  $G'/Gopt = 0,9$ , pomeni, da bo jakost redčenja takšna, da bo vrednost G po redčenju ( $G''$ ) za 10 % nižja od Gopt;
- zvrst redčenja; določena je s koeficientom QD, ki je razmerje med Dg posekanih dreves in Dg sestoja pred izvedbo redčenja. Če je  $QD > 1$ , posegamo pri isti jakosti poseka med debelejšje drevje (izbiralno redčenje); če je  $QD < 1$ , bolj posegamo med drobno drevje (nizko redčenje). QD vpliva na število posekanega drevja; pri isti posekani temeljnici je število posekanih dreves ( $Np$ ) glede na QD različno, kar vpliva na število dreves v sestoji po opravljenem redčenju. Uporabnik lahko določi QD specifično za vsako razvojno fazo gozda;
- pospeševanje drevesnih vrst; med osmimi skupinami drevesnih vrst je mogoče izbrati, katere vrste in kako intenzivno jih z redčenji pospešujemo oziroma zaviramo. Tako posredno določimo različne relativne jakosti poseka skupin drevesnih vrst pri predhodno določeni jakosti poseka na ravni sestoja.

## Obnova sestoja

### Stand regeneration

Odločanje glede pomlajevanja obsega določitev začetka pomlajevanja, dolžino pomladitvenega obdobja, dinamike in jakosti pomladitvenih sečenj znotraj obdobja in drevesno sestavo novega sestoja. Uporabnik določi:

- ciljni dominantni premer sestoja (CDdom); trenutna različica MORSE je takšna, da z določitvijo CDdom opredelimo začetek obnove. V letu, ko sestoj doseže ciljne velikosti, se začne obnova;
- pomladitveno obdobje (PD); to je obdobje od začetka obnove do poseka zadnjega drevesa v sestoji. Mogoča je določitev v intervalu od 0 do 50 let, pogosto so vrednosti v intervalu od 10 do 30 let. Na koncu PD je opravljen posek vsega preostalega nadstojnega drevja (jakost = 1). Takrat se sestojni cikl zaključijo, z naslednjim letom se začnejo cikl novega sestoja. Razvojna starost novega sestoja ob zaključku pomladitve je enaka  $1 + 0,5 \cdot PD$ . Za delovanje simulatorja je treba vnesti podatek o razvojni starosti sestoja, ko Ddom doseže 10 cm. Ta vrednost je različna med gozdnimi rastiščnimi tipi in je rezultat prirastoslovne analize podatkov v podatkovnih zbirkah DdomDrevo in DdomPloskev (Bončina, 2022);
- jakost in potek pomladitvenih sečenj; v obdobju pomlajevanja je mogoče določiti več pomladitvenih sečenj (do največ pet), in sicer določimo leto v pomladitvenem obdobju in jakost poseka, ki je izražena z deležem sestojne temeljnice;
- drevesno sestavo sestoja v naslednjem ciklu; z deležem drevesnih vrst v skupni temeljnici določimo sestavo novega sestoja pri Ddom = 10 cm.

## 2.6 Sestojni znaki

### 2.6 Stand data

Datoteka za posamezni sestoj obsega 201 vrstico. Prva vrstica opisuje začetno stanje, potem sledijo stanja za obdobje dvesto let. V začetni vrstici je določena tudi starost sestoja, ocenjena z regresijo  $Starost = f(Ddom)$  za izbrano območje ali gozdni tip na podlagi podatkov podatkovne zbirke DdomPloskev (Bončina, 2022). Starost ima le informativno vrednost, saj ni vključena v regresijske modele.

### 3 PRIKAZ DELOVANJA MORSE NA IZBRANEM PRIMERU

### 3 DEMONSTRATION OF MORSE ON THE SELECTED EXAMPLE

#### 3.1 Objekt in variante ukrepanja

#### 3.1 A case study and management variants

Delovanje prikazujemo na primeru testnega sestoja v podgorskih bukovih gozdovih v Sloveniji. Ta skupina gozdov obseg več gozdnih rastiščnih tipov (Bončina in sod., 2021). Za izdelavo modela IDdom (preglednica 1) in drugih regresijskih

modelov za izbrano skupino gozdov smo uporabili podatke zaporednih meritev na stalnih vzorčnih ploskvah (n = 20.180) Zavoda za gozdove Slovenije.

Razvoj testnega sestoja (preglednica 2) prikazujemo za različne variante ukrepanja (preglednica 3, in sicer smo spreminjali režim redčenj (npr. jakost, pogostnost, različno pospeševanje drevesnih vrst). Zaradi poenostavitve prikazov je način obnove enak za vse variante: začetek obnove je v letu, ko sestoj doseže Ddom = 55 cm, pomladitvena doba je dvajset let, jakost prvega pomladitvenega poseka je 0,2, drugega po desetih letih 0,5 in končnega

**Preglednica 1:** Model priraščanja dominantnega premera sestojev podgorskih bukovij. Odvisna spremenljivka je kvadratni koren prirastka dominantnega premera sestojev (IDdom) ( $R^2 = 0,19$ )

**Table 1:** Dominant diameter growth model for sub-montane beech forests. The dependent variable is the square root of the dominant diameter increment (IDdom) ( $R^2 = 0.19$ )

Spremenljivka	Kratica	Enota	Koeficienti
Konstanta			0,9696
Dominantni premer	Ddom	cm	-0,0129
Kvadrat dominantnega premera	Ddom <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	0,0002
Sestojna temeljnica	G	m <sup>2</sup>	-0,0019
Naklon terena	NAKL	stopinje	-0,0008
Nadmorska višina	NV	m	-0,0001
Skalnatost	SKAL	%	-0,0007
Produktivnost rastišča	K	m <sup>3</sup>	0,0275
Delež smreke	d_g_sm		0,0608
Delež jelke	d_g_je		0,1695
Delež ostalih iglavcev	d_g_o.igl		-0,1064
Delež bukve	d_g_bu		-0,0386
Delež hrastov	d_g_hrast		-0,0612
Delež plemeniteih listavcev	d_g_pl.list		0,0118
Delež trdih listavcev	d_g_t.list		-0,1065

**Preglednica 2:** Vhodni podatki o drevesni sestavi testnega sestoja, produktivnosti drevesnih vrst in sestavi novega sestoja pri Ddom = 10 cm za modeliranje razvoja testnega sestoja. Začetne vrednosti testnega sestoja so: Ddom = 14 cm, N = 3200 dreves/ha, G = 23 m<sup>2</sup>/ha. Rastiščne značilnosti: NAK = 15 o, NV = 500 m, SKAL = 10 %

**Table 2:** Input data on the tree composition of the test stand, tree species productivity, and composition of a new stand for stand development modelling. Initial values of the test stand: Ddom = 14 cm, N = 3200 trees/ha, G = 23 m<sup>2</sup>/ha. Site characteristics: NAK = 15 o, NV = 500 m, SKAL = 10%.

	Smreka	Jelka	Drugi igl.	Bukev	Hrasti	Pl. list.	T. list.	M. list.
<b>K</b>	2,05	2,09	1,78	2,02	1,975	1,975	1,73	1,73
<b>Deleži</b>	0,20	0,02	0,08	0,40	0,15	0,05	0,10	0
<b>Nov sestoj</b>	0,05	0,05	0,00	0,50	0,10	0,15	0,15	0

Preglednica 3: Opis variant (V) za modeliranje razvoja testnega sestoja

Table 3: Description of management variants (V)

V	Čas in jakost redčenja		Zvrst redčenja	Pospeševanje drevesnih vrst
V1	–	–		–
V2	Čas	Jakost	QD = 1	–
	8	0,25		
	16	0,23		
	26	0,20		
	36	0,19		
	47	0,18		
	58	0,17		
	70	0,15		
	84	0,15		
V3*	Enako kot V2 (zadnje redčenje ni izvedeno)		QD = 1	–
V4	Enako kot V2		QD = 1	Zmerno pospeševanje: hr. in pl. list., predvsem na račun sm. in t. list.
V5	Enako kot V2		QD = 0,85	Enako kot V4
V6	Čas	Redčenje	QD=1	Enako kot V4
	26	0,25		
	58	0,25		
	84	0,20		
V7	Čas (G/Gopt)	Jakost (G'/Gopt)	QD=1	Enako kot V4
	1,15	0,80		
	1,10	0,85		
	1,10	0,90		
	1,10	0,90		

\* smrekov nasad

1,0. Za koeficient odmiranja drevja  $QD_m$  smo v vseh variantah izbrali vrednost 0,5. Prav tako nismo spreminjali drevesne sestave podmladka po končani obnovi. Grafični prikaz razvoja sestoja je omejen na obdobje 150 let.

### 3.2 Rezultati

#### 3.2 Results

##### 3.2.1 Grafični prikaz razvoja sestoja

##### 3.2.1 Graphical presentation of the stand development

Grafične prikaze stanja gozdnih sestojev smo standardizirali, kar je prikazano na primeru variante V4 (Slika 2). Prikaz razvoja temeljnice kaže temeljnice

sestoja (G), poseka (Gp) in mortalitete (Gm). Na grafu sta prikazani tudi optimalna (Gopt) in maksimalna temeljnica (Gmax). Z redčenji zmanjšujemo temeljnico in sledimo poteku optimalne temeljnice. Ker v obdobju okoli 90. in 100. leta ni bilo redčenj, je sestoj dosegel maksimalno temeljnico in nekaj drevja je odmrlo. Trije pomladitveni poseki znatno zmanjšajo sestojno temeljnico. V obdobju od končnega poseka do leta, ko novi sestoj doseže meritveni prag, je vrednost temeljnice 0. Drugi graf kaže razvoj Ddom in Dg; pri slednjem sta prikazana še Dg posekanega (Dgp) in odmrlega drevja (Dgm). Ker je  $QD = 1$ , je Dg posekanega drevja enak Dg sestoja, medtem ko je premer odmrlega

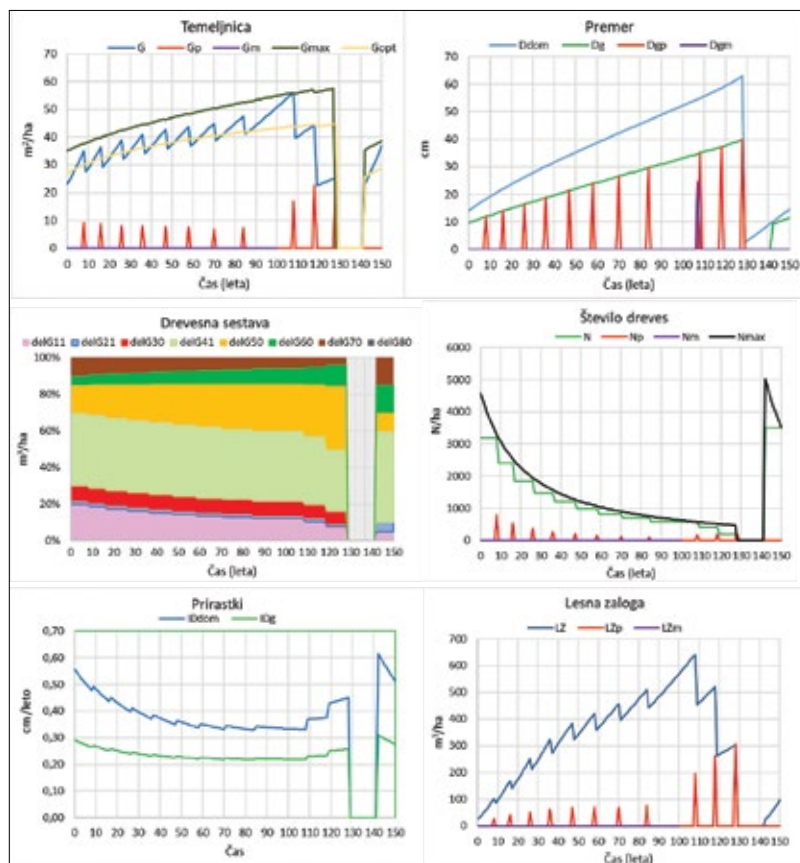


drevja manjši od Dg sestoja. Tretji graf kaže spreminjanje drevesne sestave glede na upravljavske odločitve; spremembe nastanejo ob redčenju in pomladitvenih posekih. Na grafu števila dreves je razvidno zmanjševanje števila dreves z razvojem sestoja, prikazano je tudi število posekanih ( $N_p$ ) in odmrlih dreves ( $N_m$ ) ter maksimalno število dreves ( $N_{max}$ ). Graf lesne zaloge kaže značilen razvoj enomernih sestojev ter čas in količino poseka in mortalitete drevja. Ko dominantna drevesa dosežejo ciljno vrednost, sledijo trije pomladitveni poseki. Zadnji graf kaže prirastke; pri IDdom je opaziti, da se prirastki po redčenju nekoliko povečajo, potem pa se učinek zmanjšuje.

### 3.5.2 Primerjava variant razvoja sestoja

#### 3.5.2 Comparison of stand development variants

Značilnosti variant razvoja sestoja prikazujeta preglednica 4 in slika 3. Primerjava prvih dveh variant (V1 in V2) kaže, da neredčeni sestoj doseže ciljne velikosti deset let pozneje; takrat so sestojne gostote pričakovano večje kot v redčenem sestoju. V neredčenem sestoju v analiziranem obdobju odmre 482 m<sup>3</sup>/ha drevja; poprečni volumenski prirastek pa je neznatno večji. Varianta 3 kaže razvoj smrekove kulture pri enakih začetnih vrednostih drugih sestojnih (Ddom, G, N) in rastiščnih spremenljivk (NV, NAK, SKAL). Tak sestoj doseže ciljne vrednosti v najkrajšem obdobju (82 let), od vseh variant je letna produkcija največja (13,8 m<sup>3</sup>/ha).



Slika 2: Razvoj sestoja po varianti V4  
 Figure 2: Stand development according to the variant V4

Če z nego pospešujemo hraste in plemenite listavce (varianta V4), potem je obdobje, ko sestoj doseže ciljne vrednosti, nekoliko daljše. V analiziranem obdobju se delež hrastov poveča od 15 % na 25 % celotne sestojne temeljnice, delež plemenitih listavcev pa iz 5 % na 8 %. Količina poseka je enaka kot v V2; poprečna letna produkcija je nekoliko manjša, predvsem zaradi zmanjšanega deleža smreke. Če v sestoji izvajamo nizko redčenje (varianta V5), potem je obdobje, ko sestoj doseže ciljne vrednosti, podobno kot pri variantah V2 in V4; posekanega drevja je več, volumen posekanega drevja pa je manjši kot pri varianti V4. Varianta V6 opisuje primer, ko so v analiziranem obdobju izvedena le tri redčenja. V primerjavi z varianto V4 se proizvodni cikel podaljša. Ker sestoj v razvoju večkrat doseže maksimalno gostoto, drevje odмира. Končna lesna zaloga in temeljnica v letu pred začetkom obnove sta pričakovano večja, vpliv na drevesno sestavo pa manjši kot pri varianti V4.

Način določanja časa in jakosti redčenj s primerjavo dejanske in optimalne temeljnice prikazuje varianta V6. Pri njej je opaziti, da se pogostnost redčenj zmanjšuje z razvojem sestoja. Iz grafa lahko razberemo, v katerih letih bi izvajali

redčenja. Produkcija je nekoliko manjša, kar je posledica večjega poseka in manjših sestojnih gostot. V primerjavi z drugimi variantami se najbolj poveča delež želenih drevesnih vrst.

### 3.3 Pomen rastiščnih spremenljivk

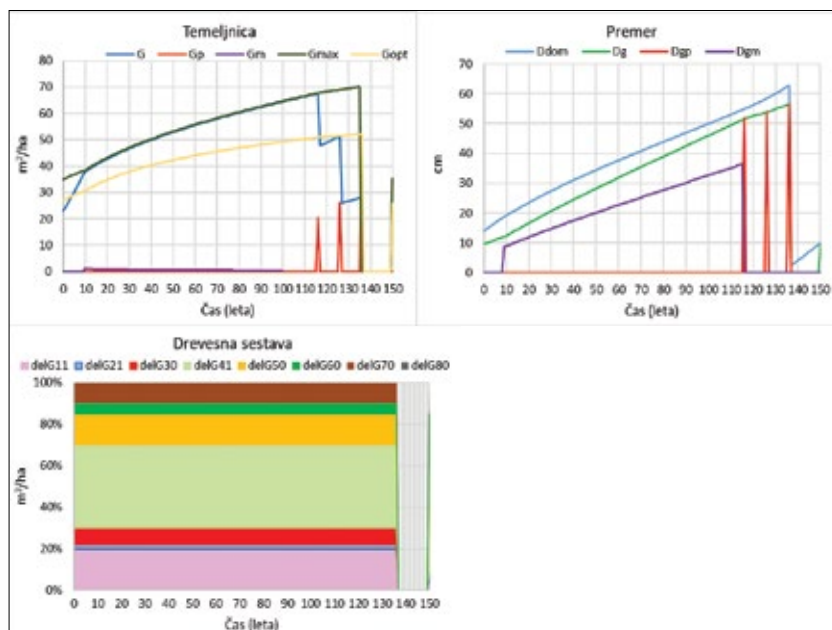
#### 3.3 Importance of site variables

Znotraj gozdnega območja, za katerega uporabljamo isti model priraščanja dominantnega drevja (Priloga 2), so razlike v rastiščnih razmerah. Le-te vplivajo na simulirani razvoj gozdnega sestoja, kar prikazujemo na primeru variante V4 (Preglednica 5). Pri varianti V4 traja obdobje do  $D = 55$  cm 108 let, povprečna produkcija v tem obdobju je  $10,2$  m<sup>3</sup>/ha. Če bi bil sestoj na nižji nadmorski višini (V4a), bi se produkcija povečala, obdobje, da sestoj doseže ciljne velikosti, pa skrajšalo. To je še opazneje, če bi bil sestoj na ravni površini brez površinske skalnatosti (V4b); obdobje bi trajalo le 96 let, povprečna produkcija pa bi bila več kot  $11$  m<sup>3</sup>/ha. V primeru večjih naklonov in večje stopnje skalnatosti (V4c) se obdobje do ciljnih velikosti znatno podaljša (120 let), povprečna produkcija pa znatno zmanjša. Tarife so cenilka produktivnosti posameznih drevesnih vrst. Pri

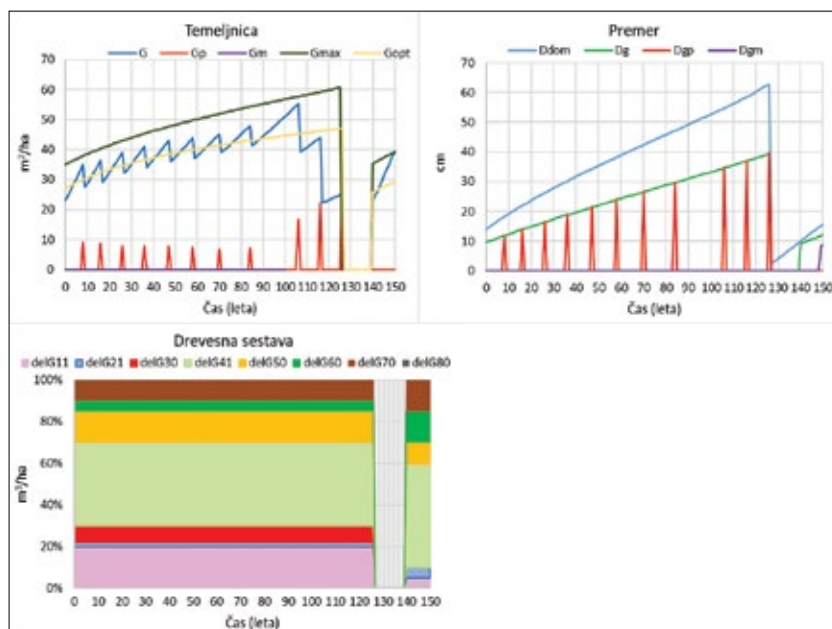
**Preglednica 4:** Stanje testnega sestoja v letu, ko dominantni premer doseže vrednost 55 cm, in poprečni prirastki, kumulativne vrednosti poseka in mortalitete drevja v tem obdobju za sedem variant (V) ukrepanja  
**Table 4:** Status of the forests stand in the year when the dominant diameter achieves the value of 55 cm. Mean volume increment, amount of cut and mortality are presented for seven management variants (V)

V	Obdobje (leta)*	LZ (m <sup>3</sup> /ha)	G (m <sup>2</sup> /ha)	Drevesna sestava (delež temeljnice) sm; je; o.igl; bu; hr; pl.lst; t.lst; m.lst	Produkcija (m <sup>3</sup> /ha)	Posek (m <sup>3</sup> /ha; N)	Mortaliteta (m <sup>3</sup> /ha; N)
V1	116	862	67,6	0,21; 0,02; 0,07; 0,41; 0,15; 0,05; 0,09; 0,00	11,2	0	456; 2877
V2	106	639	55,3	0,21; 0,02; 0,07; 0,41; 0,15; 0,05; 0,09; 0,00	11,1	482; 2611	0
V3	82	648	55,3	1,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00	13,8	508; 2507	0
V4	108	650	55,9	0,12; 0,02; 0,07; 0,40; 0,25; 0,08; 0,05; 0,00	10,2	480; 2611	3; 6
V5	106	573	47,9	0,12; 0,02; 0,07; 0,40; 0,25; 0,08; 0,05; 0,00	9,4	447; 2782	0
V6	112	743	60,9	0,17; 0,02; 0,07; 0,41; 0,20; 0,07; 0,07; 0,00	11,0	369; 722	146; 2022
V7	106	543	46,9	0,12; 0,02; 0,07; 0,39; 0,27; 0,09; 0,05; 0,00	9,6	537; 2719	0

V1



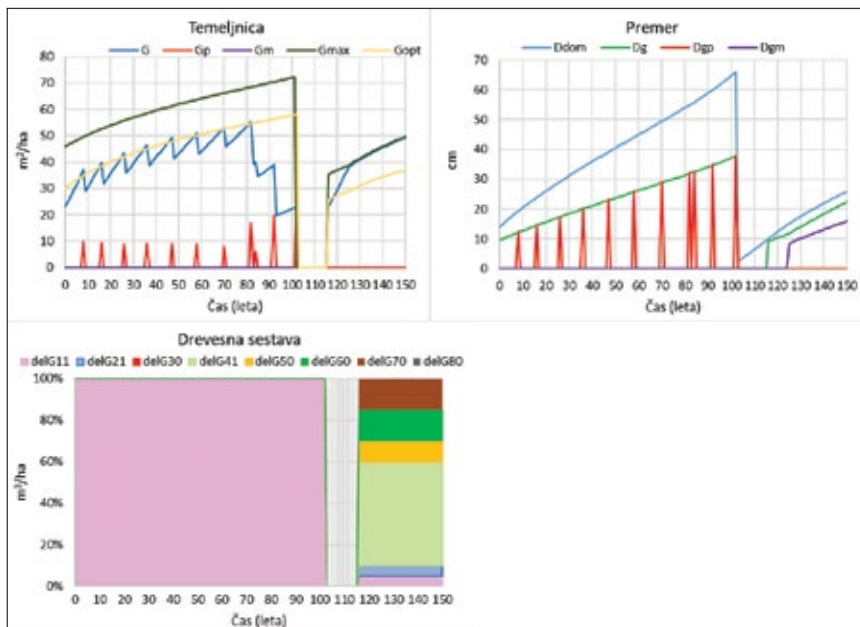
V2



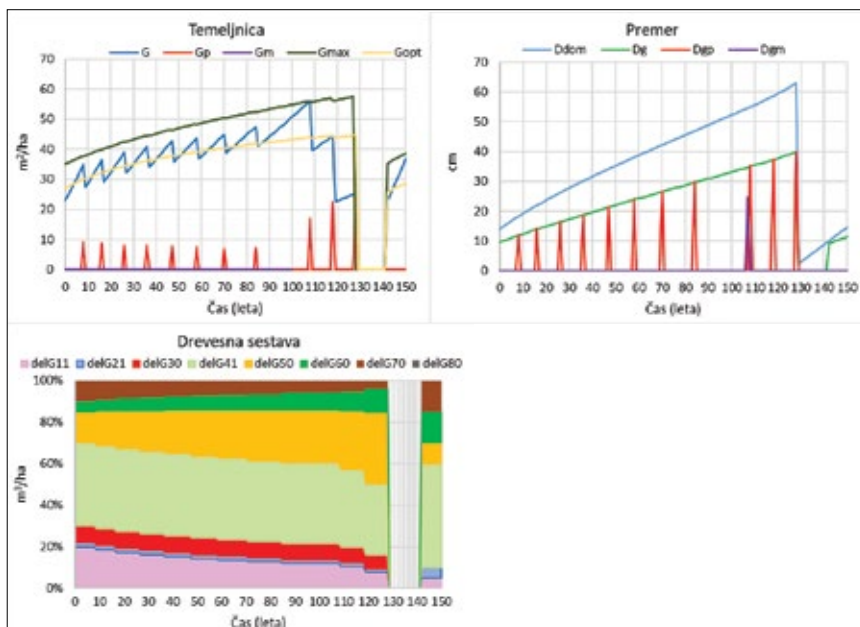
Slika 3: Variante razvoja testnega sestoja v obdobju 150 let (V1 do V7), prikazane z razvojem temeljnice, srednjih premerov sestoja in drevesne sestave.

Figure 3: Stand development for seven management variants, presented by stand basal area, stand mean diameter, and tree species composition.

V3



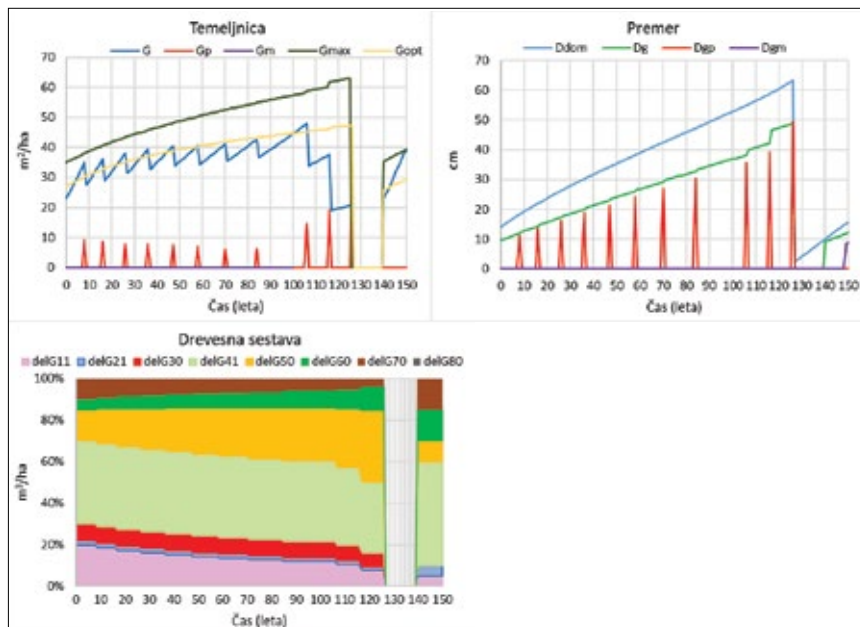
V4



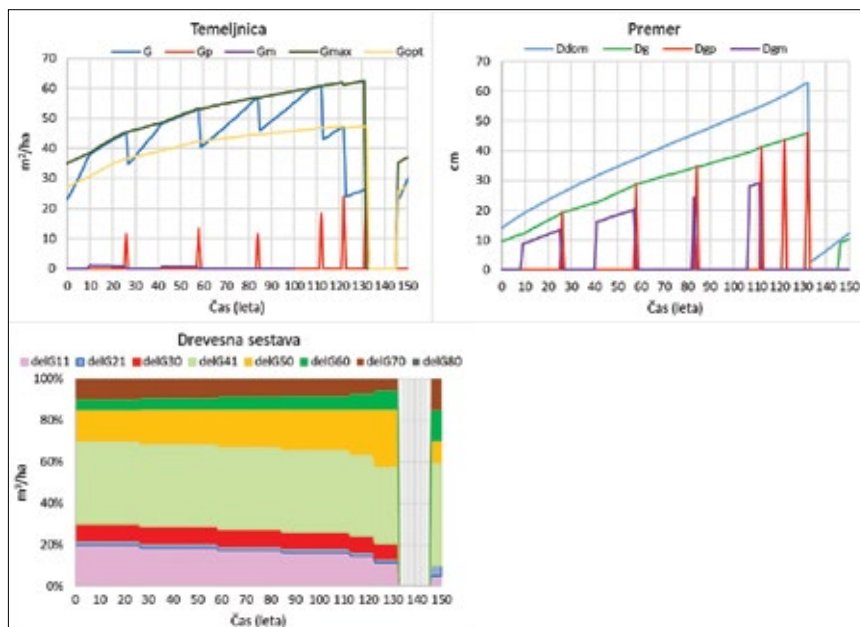
Slika 3: Variante razvoja testnega sestaja v obdobju 150 let (V1 do V7), prikazane z razvojem temeljnice, srednjih premerov sestaja in drevesne sestave.

Figure 3: Stand development for seven management variants, presented by stand basal area, stand mean diameter, and tree species composition.

V5



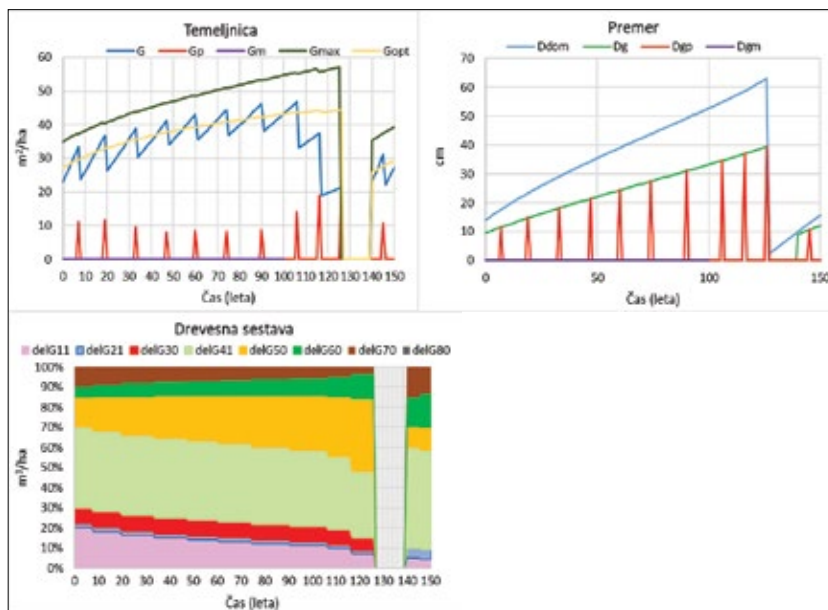
V6



Slika 3: Variante razvoja testnega sestoja v obdobju 150 let (V1 do V7), prikazane z razvojem temeljnice, srednjih premerov sestoja in drevesne sestave.

Figure 3: Stand development for seven management variants, presented by stand basal area, stand mean diameter, and tree species composition.

V7



Slika 3: Variante razvoja testnega sestoja v obdobju 150 let (V1 do V7), prikazane z razvojem temeljnice, srednjih premerov sestoja in drevesne sestave.

Figure 3: Stand development for seven management variants, presented by stand basal area, stand mean diameter, and tree species composition.

varianti V4 je povprečna vrednost  $K = 1,972$ . Če bi hipotetično za vse drevesne vrste uporabili tarifni razred 5 ( $K = 1,791$ ), bi se obdobje do  $D_{dom} = 55$  cm podaljšalo na 110 let (varianta V4d), opazno pa bi se zmanjšala povprečna produkcija ( $9,2 \text{ m}^3/\text{ha}$ ). V primeru večje produktivnosti (varianta V4e) (tarifni razred 7,  $K = 2,188$ ) pa bi bilo obdobje nekoliko krajše, relativno veliko bolj pa bi se povečala produkcija sestoja ( $11,5 \text{ m}^3/\text{ha}$ ).

#### 4 RAZPRAVA

#### 4 DISCUSSION

MORSE je sestojni simulator, namenjen modeliranju razvoja sestojev na ravni posameznega sestoja in na ravni izbranega območja gozdov. V primerjavi z drugimi sestojnimi simulatorji so njegove poglavitne značilnosti: 1) namenjen je modeliranju mešanih sestojev, in sicer na ravni

Preglednica 5: Vpliv topografskih spremenljivk na razvoj testnega gozdnega sestoja po varianti V4

Table 5: Impact of the topographical variables on the forest stand development according to the variant V4

Varianta	Nadmorska višina (m)	Naklon (o)	Skalnatost (%)	Leta to $D_{dom} = 55$ cm	Produkcija na leto v obdobju do $D_{dom} = 55$ cm ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )
V4	500	15	10	108	10,2
V4a	250	15	10	102	10,7
V4b	250	0	0	96	11,3
V4c	500	30	40	120	9,4
V4d ( $K = 1,791$ )	500	15	10	110	9,2
V4e ( $K = 2,188$ )	500	15	10	106	11,5

posameznega sestoja in modeliranju na ravni več sestojev (območje gozdov), 2) zasnovan je na modeliranju dominantnega premera sestojev, 3) vključuje različno gozdnogojitveno obravnavo gozdov.

Upoštevanje zmesi drevesnih vrst je pomembno zaradi treh razlogov. Prvi je, da v naravnih gozdovih Slovenije prevladujejo mešani sestoji. Pri sonaravnem gospodarjenju izhajamo iz naravne drevesne sestave, ki pa jo lahko nekoliko spreminjamo. Drugi razlog je usmerjanje razvoja gozdov; drevesna sestava je element ciljnega gozda. Gojitvena obravnavo gozdov v obdobju od mladih do zrelih sestojev je v znatni meri namenjena pospeševanju izbranih drevesnih vrst, kar je razvidno tudi v prikazanih variantah razvoja testnega sestoja. Tretji razlog je povezan s priraščanjem sestoja, saj drevesna sestava vpliva na razvoj sestojnih spremenljivk, kot sta Ddom in lesna zaloga. V naši študiji je to najbolj očitno pri varianti V3, ki opisuje razvoj smrekove kulture.

Pri razvijanju MORSE smo želeli povezati razvoj modeliranja posameznega sestoja, kar prikazuje prispevek, in modeliranje več sestojev, kjer nas zanima razvoj drugih spremenljivk, predvsem demografskih, kot je razmerje razvojnih faz gozda v izbranem območju gozdov.

Za obdobje simulacije smo izbrali dvesto let. Tako dolgo obdobje je pomembno za pedagoške namene, saj kaže možnosti za usmerjanje razvoja gozdov v celotnem proizvodnem obdobju, vključno z obnovo in novim sestojnim ciklom. Za načrtovalce je zanimiv predvsem razvoj sestojev v nekaj naslednjih letih ali pa v desetletju. Tako je zanje pomembno vprašanje, kakšni bodo sestoji ob predvidenem ukrepanju ob koncu načrtovanega obdobja. Uporabnik lahko dobi vpogled v stanje gozdov v poljubno izbranem obdobju znotraj intervala dvesto let. Ta možnost je pomembna za sodelovanje gozdarjev z gozdnimi posestniki, saj simulator prikazuje prihodnja stanja glede na različno ukrepanje.

MORSE je zasnovan na razvoju dominantnega premera sestoja. Pri dosedanjih raziskavah smo se že ukvarjali z modeliranjem razvoja dominantnega drevja in opazili velike razlike v priraščanju dominantnih dreves različnih drevesnih vrst na istem rastišču pa tudi velike razlike v priraščanju

iste drevesne vrste na različnih rastiščih (Bončina, 2022). Razvoj dominantnega drevja je zelo pomemben za upravljanje gozdov; v Sloveniji prevladuje skupinsko-postopno gospodarjenje, ki ustvarja sestojne zgradbe, znotraj katerih lahko razlikujemo razvojne faze. Slednje so definirane predvsem z vrednostjo dominantnega premera sestojev. V Sloveniji izvajamo predvsem izbiralno redčenje, Ddom v veliki meri opisuje razvoj izbranec. Ddom je primeren tudi za določanje ciljnih velikosti drevja, ki pomenijo, kdaj je smiselno obnavljati sestoj. Modeliranje na ravni sestojnih znakov je preprostejše in zato tudi manj podrobno kot simuliranje razvoja sestoja, ki temelji na modeliranju posameznih dreves v sestoju.

Za upravljanje gozdov so uporabni simulatorji, ki omogočajo spreminjanje ukrepanja. Temu smo sledili pri razvoju MORSE. Uporabnik lahko preverja vplive različnih variant redčenja in pomladitve sestoja, kar je vidno na grafičnih prikazih in v preglednicah. Načrtovanje donosov (poseka) je tesno povezano z usmerjanjem razvoja sestoja, torej z odločitvami o režimu redčenj in pomladitev, ki se odražajo v količini in drevesni sestavi poseka.

Razvili smo dva načina določanja časa izvedbe in jakosti redčenj. Način A je primeren za obravnavo posameznih sestojev, še posebno za pedagoške namene, saj lahko na ravni sestoja preverjamo različne jakosti in ponovitve redčenj. Način B je primernejši za načrtovalce, posebno za načrtovanje na ravni rastiščnogojitvenega razreda, gozdne posesti ipd. Pri tem načinu lahko določimo enoten režim redčenj za vse sestojne istega gozdnega tipa. Simulator sam določi leto izvedbe glede na odločitve uporabnika o pogostosti in jakosti poseka, ki temeljijo na primerjavi dejanske in optimalne sestojne temeljnice. Zaenkrat so optimalne sestojne gostote določene na preprost način, tako da bo treba njihovo določanje preveriti in dopolniti. Optimalne sestojne gostote niso odvisne le od rastišča in drevesne sestave, ampak tudi od ciljev gospodarjenja. Zato lahko uporabnik simulatorja glede na zahteve do gozdov in poudarjene funkcije prilagaja njihove vrednosti.

V simulatorju MORSE je temeljni algoritem model priraščanja dominantnega premera sestojev. Pri pojasnjevalnih spremenljivkah tega modela smo se omejili na tiste, ki so bodisi dostopne v podatkov-

nih zbirkah Zavoda za gozdove Slovenije ali pa so enostavno določljive na ravni posameznih sestojev.

Predvideno je nadaljevanje testiranja MORSE na sestojni ravni in dopolnjevanje modulov simulatorja. Hkrati je treba izdelati aplikacijo, ki bo delovala na ravni izbranega območja gozdov in bo povezana z grafičnimi podatki za gozdne sestoje. Mogoče so tudi nadgradnje simulatorja, na primer z ekonomskim modulom, saj se različne variante ukrepanja razlikujejo v sestavi, količini in strukturi poseka. Izzivov je res veliko, eden izmed njih je razviti sestojni simulator za raznomerne gozdove.

## 5 ZAHVALA

## 5 ACKNOWLEDGEMENT

Zavodu za gozdove Slovenije se zahvaljujemo za možnost uporabe podatkov s stalnih vzorčnih ploskev, Vasiliju Trifkoviču za pomoč pri pripravi podatkovnih baz, anonimnemu recenzentu za konstruktivne pripombe.

## 6 VIRI

## 6 REFERENCES

- Bončina A., 2021. Zasnova simulatorja Morse. BF, Oddelek za gozdarstvo.
- Bončina A., Štraus H., 2022. Testna verzija simulatorja Morse v programu Excel, varianta A.
- Bončina A., Štraus H., 2022. Testna verzija simulatorja Morse v programu Excel, varianta B.
- Bončina A. 2022. Pomen analize dominantnih dreves za gozdnogospodarsko načrtovanje na primeru kisloljubnega bukova z rebrenjačo. *Gozdarski vestnik*, 80, 3: 115–127.
- Bončina A., Rozman A., Dakskobler I., Babij V., Poljanec A., 2021. Gozdni rastišči tipi Slovenije: vegetacijske, sestojne in upravljavske značilnosti. Oddelek za gozdarstvo BF, Zavod za gozdove Slovenije.
- Burkhardt H. E., Tomé M. (ur.). 2012. *Modelling forest trees and stands*. Dordrecht, Springer: 458 str.
- Cedilnik A. 1986. Optimal approximation of growth functions. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 27: 5–16.
- Ficko A. (ur) 2020. *Razvoj modelov za gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji*. CRP V4-2014.
- 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.
- Ficko A., Roessiger J., Bončina A. 2018. Optimizing silviculture in mixed uneven-aged forests to increase the recruitment of browse-sensitive tree species without intervening in ungulate population. *iForest*, 11, 2: 227–236.
- Hladnik D., Kopal M. 2012. Ocenjevanje natančnosti deblovcin in volumenskih funkcij. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 98: 3–14.
- Kopal M. 2011. Vpliv sestojnih, talnih in mikrorastiščnih razmer na rast in razvoj jelke (*Abies alba* Mill.) na visokem krasu Snežnika: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 148 str.
- Klopčič M., Matijašič D., Bončina A. 2010. Značilnosti debelinskega priraščanja jelke v Sloveniji. *Gozdarski vestnik*, 68, 4: 203–216.
- Klopčič M., Mina M., Bugmann H., Bončina A. 2017. The prospects of silver fir (*Abies alba* Mill.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in mixed mountain forests under various management strategies, climate change and high browsing pressure. *Eur. J. Forest Res.*, 136: 1071–1090.
- Klopčič M., 2002. Preverjanje uporabnosti modela SiWaWa za simuliranje razvoja čistih bukovich in smrekovich enomernih sestojev v Sloveniji. *Gozdarski vestnik*, 79: 3–20.
- Klopčič M., Bončina, A., Ficko, A., Grošel, P., Guček, M., Jevšenak, J., Mali, B., Poljanec, A., Skudnik, M., Bončina, Ž., Šmidovnik, T., Trifkovič, V., 2021. Pregled in presoja modelov razvoja gozdov za gozdnogospodarsko načrtovanje na različnih prostorskih ravneh. Zaključno vsebinsko poročilo CRP projekta V4-1821. BF, Oddelek za Gozdarstvo in obnovljive gozdne vire.
- Mina M., Bugmann H., Klopčič M., Cailleret M. 2015. Accurate modeling of harvesting is key for projecting future forest dynamics: a case study in the Slovenian mountains. *Reg. Environ. Change*, 17: 49–64.
- Rosset C., Schütz J.-P., Lanz A., Menk J., Gollut C., Weber D. 2013. SiWaWa: Waldwachstumssimulationsmodell der neue Generation – Das Waldwachstum für den Praktiker leicht gemacht. Schlussbericht. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wald, Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften HALF, Bern.
- Rosset C., Dumolard G., Gollut C., Weber D., Marti V., Wyss F., Sala V., Endtner J., Schütz J.-P. 2018. SiWaWa 2.0 et Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole (PPSS). Rapport Final. Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften HALF, Bern.
- Pretzsch H. (ur.). 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Heidelberg, Springer: 664 str.
- Pretzsch H., in Biber P. 2016. Tree species mixing can increase maximum stand density. *Can. J. For. Res.* 46, 10: 1179–1193.
- Pukkala T., Lähde E., Laiho O. 2009. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. *Forest Ecology and Management*. 258, 3: 207–216.
- Sterba H. in Monsrud R. A. 1997. Applicability of the forest stand growth simulator PROGNAUS for the Austrian part of the Bohemian Massif. *Ecological Modelling*. 98, 1: 23–34.