

Preverjanje uporabnosti modela SiWaWa za simuliranje razvoja čistih bukovih in smrekovih enomernih sestojev v Sloveniji

The Applicability of the SiWaWa Stand Model for Simulating Stand Development of Pure Beech and Spruce Even-Aged Forest Stands in Slovenia

Matija KLOPČIČ^{1,*}

Izvleček:

Modeli razvoja gozdov napovedujejo razvoj dreves in gozdnih sestojev glede na drevesne, sestojne, rastiščne in gozdno-gospodarske dejavnike. Zaradi kompleksne narave gozdnih ekosistemov in dolgih proizvodnih ciklov je modeliranje razvoja gozdov pomemben sestavni del upravljanja gozdov. Sestojni modeli so bili prepoznani kot primerni za podporo odločanju pri upravljanju z gozdovi. Primer takega modela je švicarski model SiWaWa, ki smo ga preizkusili v pričujoči raziskavi. Na štirih vzorcih po 50 stalnih vzorčnih ploskev v negospodarjenih in gospodarjenih čistih bukovih in čistih smrekovih enomernih sestojih smo izvedli simulacije razvoja gozdov za obdobje 10 let, nato pa smo primerjali dejanske vrednosti in modelske napovedi za sestojno temeljnico G, število dreves N in srednje temeljnični premer Dg. Napovedovanje razvoja čistih bukovih gozdov je bilo zadovoljivo točno; v negospodarjenih sestojih je celotna napaka RMSE za sestojno temeljnico znašala 2,35 m²/ha, v gospodarjenih sestojih pa 3,42 m²/ha ob upoštevanju le posekanih dreves in 4,35 m²/ha ob upoštevanju celotne mortalitete. Enako ne moremo trditi za napovedovanje razvoja čistih smrekovih sestojev. Pri slednjih so bile mere točnosti znatno slabše, saj so RMSE za napovedano sestojno temeljnico znašali 8,94 m²/ha za negospodarjene in 6,13 m²/ha ter 6,11 m²/ha za gospodarjene sestoje ob upoštevanju poseka oziroma celotne mortalitete. Model SiWaWa, ki je parametriziran za švicarske gozdove, se zdi uporaben za simuliranje razvoja čistih bukovih gozdov brez simuliranega ukrepanja (poseka) ali z njim. Zanesljive simulacije razvoja čistih smrekovih sestojev pa model zaenkrat še ne omogoča.

Ključne besede: model razvoja gozdov, gozdni sestoj, gozdna inventura, simulacije razvoja gozdov, sestojna temeljnica, število dreves, srednje temeljnični premer

Abstract:

Forest development models predict development of trees and forest stands according to tree, stand, site, and forest management factors. Due to complex nature of forest ecosystems and long production cycles, forest development modelling is an important feature of forest management. Stand models have been identified as suitable for decision support in forest management, an example of such a model is the Swiss model SiWaWa, which was tested in Slovenian forests in the present study. Forest development simulations for 10-y periods were performed on four samples of 50 permanent sample plots in unmanaged and managed pure beech and pure spruce stands. Afterwards, we compared the actual and modelled values of stand basal area G, number of trees N, and mean squared diameter Dg. Predicting the development of pure beech forests was fairly accurate, the root mean square error RMSE for G was 2,35 m²/ha for unmanaged, and 3,42 m²/ha and 4,35 m²/ha for managed stands considering only harvesting or entire mortality, respectively. We cannot claim the same for the development of pure spruce stands. Measures of accuracy were significantly worse, the RMSE was 8,94 m²/ha for unmanaged stands, and 6,13 m²/ha and 6,11 m²/ha for managed stands considering only harvesting or entire mortality, respectively. The SiWaWa model, parameterized for Swiss forests, seems to be applicable for simulating the development of pure beech forests without or with simulated fellings, but the model does not yet provide reliable simulations for pure spruce stands.

Key words: forest development model, forest stand, forest inventory, forest development simulations, stand basal area, number of trees, mean quadratic diameter, European beech, Norway spruce

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Večna pot 83, 1000 Ljubljana, Slovenija

* dopisni avtor: matija.klopccic@bf.uni-lj.si

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Vanclay (1994) je model razvoja gozdov označil kot abstrakten prikaz naravne dinamike gozdnega ekosistema, ki obsega rast, razvoj, mortaliteto in spremembe preostalih komponent gozdnega ekosistema. Modeliranje razvoja gozdov je torej poenostavljen prikaz sprememb gozdnih sestojev zaradi procesov v gozdnem ekosistemu, kot so rast, mortaliteta, pomladitev in vrast drevja (Pretzsch, 2010). Modeli razvoja gozdov napovedujejo razvoj dreves in gozdnih sestojev glede na drevesne, sestojne, rastiščne in gozdnogospodarske dejavnike. Pri modeliranju razvoja gozdov so lahko upoštevani različni vplivni dejavniki, kot so gospodarjenje z gozdovi in okoljski dejavniki. Praviloma so modeli sestavljeni iz sistema enačb in algoritmov, ki temeljijo na empiričnih relacijah med znaki posameznega drevesa ali sestoja in/ali matematični kvantifikaciji različnih ekofizioloških procesov v in med rastlinami (drevesi).

Modele razvoja gozdov glede na koncept njihove izgradnje delimo na empirične, mehanistične (procesne) in hibridne. Empirični modeli temeljijo na empirično dognanih alometrijskih ali funkcijskih zvezah med drevesnimi oziroma sestojnimi parametri, ki jih praviloma izračunajo z obsežnimi zbirkami časovnih serij podatkov, kot so nacionalne gozdne inventure ali stalne raziskovalne ploskve. Prvi znani empirični modeli razvoja gozdov so bile donosne (sestojne) tablice (Porté in Bartelink, 2002). Najpreprostejše najdemo že v 18. stoletju, npr. Réaumurjeve iz leta 1721, najstarejše nemške segajo v leto 1795 (Paulsen), med starejšimi so znane še Hartigove (1795) in Cottine (1821) tablice ter poznejše Schwapachove tablice (1903). Veljavne so za čiste enomerne sestojne izbrane drevesne vrste, razvite pa so bile tudi za mešane sestojne, a se slednje niso splošno uveljavile v gozdarski praksi, saj je drevesna sestava gozdnih sestojev preveč raznolika, da bi tablice lahko zajele vse možnosti (Pretzsch, 2010). Sredi 20. stoletja so raziskovalci začeli razvijati prve »prave« empirične modele (Fontes in sod., 2010), ki so že bili računalniško podprti. Pozneje so raziskovalci začeli razvijati mehanistične ali procesne modele, v katerih algoritmi temeljijo na matematični kvantifikaciji ekofizioloških pro-

cesov, pogosto pa ne upoštevajo rastiščnih razmer posameznih dreves (npr. kompeticije). Zadnje razviti so bili hibridni modeli razvoja gozdov, ki smiselno združujejo elemente empiričnih in procesnih modelov (Fontes in sod., 2010).

Modele lahko delimo glede na osnovno celico modeliranja. Porté in Bartelink (2002) sta modele razvoja gozdov razdelila na sestojne (angl. *stand models*) in drevesne modele (angl. *individual-tree models*). Slednje ista avtorja glede na potrebe modelov po vhodnih podatkih in upoštevanja razmerij med drevesi delita še na modele, ki potrebujejo prostorsko določene podatke (angl. *distance-dependent models*), ki jih pri simulacijah uporabijo za npr. izračune različnih indeksov kompeticije in upoštevanje konkurence pri rasti dreves, in tiste, ki tega ne potrebujejo (angl. *distance-independent models*). Poleg omenjenih delitev poznamo delitve modelov še glede na njihov namen, podrobnost simulacije in drugo (npr. Vanclay, 1994; Franc in sod., 2001; Peng, 2000). V tujini najdemo veliko modelov razvoja gozdov. Nekateri so bili razviti le za znanstvene namene, precej pa jih je bilo izdelanih za podporo nacionalni ali mednarodni (npr. EU) gozdni politiki (npr. EFISCEN, Nabuurs in sod., 2001; CBM-CFS, Kurz in sod., 2009) in upravljanju gozdov (npr. SYLVA, Pretzsch, 2010; MOSES, Hasenauer, 1994; PICUS, Lexer and Hönninger, 2001; SiWaWa, Rosset in sod., 2013). V Sloveniji je bil doslej razvit le matrični model za simulacijo razvoja raznomernih gozdov (Ficko in sod., 2016).

Zaradi kompleksne narave gozdnih ekosistemov je modeliranje razvoja gozdov pomemben sestavni del upravljanja gozdov. V gozdarstvu daje velik pomen modeliranju tudi dejstvo, da so za gospodarjenje z gozdovi značilni dolgi proizvodni cikli in velika odvisnost njihovega razvoja od gospodarjenja ter drugih vplivnih (okoljskih) dejavnikov (Pretzsch, 2010). Različni scenariji razvoja gozdov glede na različno ukrepanje so zato temeljna podlaga za boljše odločanje in zmanjševanje tveganj pri gospodarjenju z gozdovi. Z modeliranjem lahko kvantificiramo scenarije, kar je izhodišče za argumentirano odločanje pri usmerjanju razvoja gozdov in izbiri ukrepov. Od samih začetkov načrtnega gospodarjenja so opazna prizadevanja za izdelavo modelov, ki so

bili orodje za boljše odločanje in gospodarjenje. Že sami osnovni tipi modelov, konkretni modeli razvoja gozdov pa še bolj, pa se med seboj bistveno razlikujejo v njihovi uporabnosti pri upravljanju gozdov (Fontes in sod., 2010; Klopčič in sod., 2020).

Sestojni modeli so bili prepoznani kot primerni in učinkoviti pri podpori odločanju pri upravljanju z gozdovi (Klopčič in sod., 2020). Omenjeni modeli so bili praviloma izdelani na podlagi obsežne vhodne podatkovne zbirke z več zaporednimi meritvami sestojev (npr. nacionalne gozdne inventure, stalne raziskovalne ploskve), s katerimi so razvijalci modelov praviloma razvili sistem diferencialnih enačb, ki je služil izračunu sprememb osnovnih sestojnih parametrov (npr. število dreves, sestojna temeljnica) kot funkcijo časa, ki je pretekel od začetne časovne točke t_0 , in začetnih vrednosti (opazovanih) sestojnih parametrov (Lynch in Moser, 1986). Na podlagi empirično izračunanih funkcijskih povezav med sestojnimi parametri so nato izračunali še preostale sestojne parametre. Večina sestojnih modelov je razvitih za čiste enomerne sestoje (Porté in Bartelink, 2002), obstajajo pa tudi modeli, ki omogočajo izračune sestojnih parametrov glede na mešanost drevesnih vrst in raznomernost (slednje redko) (Peng, 2000).

Primer prostorsko neodvisnega sestojnega modela je model razvoja gozdov SiWaWa (Schütz in Zingg, 2007; Rosset in sod., 2013). Model z enostavnimi, lahko merljivimi vhodnimi podatki na sestojni ravni simulira razvoj čistega enomernega sestoja izbrane drevesne vrste. Trenutno model omogoča simulacijo razvoja čistih bukovih (*Fagus sylvatica* L.), smrekovih (*Picea abies* (L.) Karst.) in jesenovih (*Fraxinus excelsior* L.) sestojev. Model SiWaWa uporabljajo v praktičnem gozdarstvu v nekaterih delih Švice (Rosset, 2019, ustni vir), objavljenih preverjanj in testiranj modela pa skoraj ni. Večina testiranj se je nanašala na preverjanje uspešnosti simulacije debelinske strukture sestojev (Rosset in sod., 2018; Schütz in Rosset, 2020), algoritem se je v enomernih sestojih izkazal za uspešnega.

V Sloveniji sta najpogostejši drevesni vrsti bukev in smreka, zato je iskanje ustreznega modela razvoja gozdov, s katerim bi lahko korektno

napovedovali prihodnji razvoj gozdov teh dveh drevesnih vrst, pomembna naloga gozdarske stroke. Model SiWaWa so razvili v Švici in ker so v Srednji Evropi gozdovi Švice po strukturi in sestavi še najbolj primerljivi z našimi, smo se odločili, da strokovni javnosti predstavimo omenjeni model in preverimo uporabnost ter primernost tega modela v njegovi izvorni različici za simulacijo razvoja čistih bukovih in smrekovih sestojev v Sloveniji.

2 METODE

2 METHODS

2.1 Model razvoja gozdov SiWaWa

2.1 Forest development model SiWaWa

Model SiWaWa je primer empiričnega modela povprečij. Ti modeli opisujejo sestoj in izvedejo simulacijo razvoja gozdov le z osnovnimi sestojnimi parametri, kot so število dreves, sestojna temeljnica, lesna zaloga, višine srednjega drevesa ali zgornja višina ipd. (Porté in Bartelink, 2002). Z modelom SiWaWa lahko z osnovnimi, lahko merljivimi sestojnimi (npr. število dreves, sestojna temeljnica, sestojna višina, drevesna vrsta) in rastiščnimi spremenljivkami (npr. rastiščni indeks) simuliramo razvoj čistih enomernih sestojev (Schütz in Zingg, 2007; Rosset in sod., 2013). Model je bil parametriziran na podlagi podatkov s trajnih raziskovalnih ploskev v bukovih, smrekovih in jesenovih sestojih v Švici. Skupno s ponovitvami so bile meritve opravljene od leta 1936 do 2009 na 276 ploskvah, velikosti 0,02 do 0,83 ha, kjer je delež ene drevesne vrste v sestojni temeljnici presegal 80 %, uporabljene so bile tudi švicarske sestojne tablice (EAFV, 1968). Posledično je model veljaven le za čiste enomerne sestoje bukve, smreke in velikega jesena na celotnem območju države, ne pa nujno, da tudi zunaj nje. Vhodni podatki za zagon modela so drevesna vrsta, sestojna temeljnica G (m^2/ha), število dreves N (n/ha) in rastiščni indeks pri referenčni starosti 50 let SI_{50} .

Model je zgrajen iz petih modulov (čeprav jih avtorji modela in simulatorja ne obravnavajo tako; Rosset in sod., 2013). Prva dva določata stanje obravnavanega sestoja, naslednji trije pa njegovo dinamiko. Prvi modul obsega generiranje debelinske strukture sestoja s pomočjo triparametrsk

Weibullove porazdelitvene funkcije števila dreves v sestoji iz le dveh osnovnih vhodnih parametrov G in N (Schütz in Rosset, 2020). Pri tem se upoštevata iz teh podatkov izračunan premer srednje temeljničnega drevesa D_g in sestojna zarast, ki je določena prek SI_{50} in sestojnih tablic. Oba parametra prek funkcijske povezave določata maksimalno zarast (G_{max}), ki pa naprej določa indeks SDI (angl. *stand density index*; Kotar, 2005, s. 260). Na podlagi ugotovljenih povezav med sestojnimi parametri in koeficienti Weibullove porazdelitvene

funkcije modul generira Weibullovo funkcijo, iz katere potem določi število dreves v posamezni debelinski stopnji, široki 1 cm.

Drugi modul izračunava višine in volumne posameznih dreves v sestoji glede na generirano Weibullovo porazdelitev. Pri izračunu višine drevesa model upošteva vrstno specifično funkcijsko povezavo med višino (h) in premerom drevesa (d) ter zgornjo sestojno višino (h_{dom}), določeno z rastiščnim indeksom, D_g in dominantnim sestojnim premerom (D_{dom}) (enačba 1):

Enačba / Equation 1

$$h = h_{dom} - [(\ln(D_{dom}) + \ln(d)) (k_{sp,0} + k_{sp,1} \cdot \ln(D_g))]$$

Podobno je izračun volumna deblovine vrstno specifičen na podlagi funkcijske povezave z višino (h) in prsnim premerom (d) drevesa (enačba 2):

Enačba / Equation 2

$$v = A_t \cdot \exp(k_{sp,1} \cdot \ln(d) + k_{sp,2} \cdot \ln(d)^2 + k_{sp,3} \cdot \ln(h) + k_{sp,4} \cdot \ln(h)^2)$$

V obeh enačbah se vrstno specifični koeficienti k pridobijo empirično s podatki.

Naslednji modul omogoča izračun debelinskega prirastčanja dreves. Na podlagi izračunane porazdelitve števila dreves po debelinskih stopnjah modul za vsako drevo posebej izračuna vsoto temeljnic dreves, debelejših od njega (G_{cum}), ki je

mera konkurence v sestoji. Najdebelejše drevo ali drevesa imajo G_{cum} enako 0. Debelinski prirastki so nato funkcijsko določeni za vsako drevo, pri čemer so upoštevani G_{cum} , in dosežena G na ravni drevesa ter D_g , D_{max} in starost na ravni sestoja (enačbe 3–6):

Enačba / Equation 3

$$i_d = \alpha + \beta \cdot G_{cum}^\gamma$$

Enačba / Equation 4

$$\alpha = a_{sp,0} + a_{sp,1} \cdot \frac{G}{G_{max}} + a_{sp,2} \cdot \ln\left(\frac{G}{D_g}\right) + a_{sp,3} \cdot \left(\frac{D_{max}-D_g}{D_g}\right) + a_{sp,4} \cdot \text{starost}$$

Enačba / Equation 5

$$\gamma = c_{sp,0} + c_{sp,1} \cdot \frac{G}{D_g}$$

Enačba / Equation 6

$$\beta = \frac{-\alpha}{G_{cum,ext}^\gamma} = \frac{-\alpha}{(b_{sp,0} + b_{sp,1} \cdot (D_{max} - D_g) + b_{sp,2} \cdot G_{max})^\gamma}$$

kjer so α , β , γ koeficienti osnovne formule za izračun debelinskega prirastka dreves, $a_{sp,0}$ - $a_{sp,4}$, $b_{sp,0}$ - $b_{sp,2}$, $c_{sp,0}$ - $c_{sp,1}$ pa vrstno specifični koeficienti za izračun osnovnih koeficientov.

Starost sestoja (enačba 7) je podobno funkcijsko izračunana na podlagi lahko merljivih ali določljivih sestojnih parametrov SI_{50} , D_g , G in G_{max} , ki je določena v naslednjem modulu:

Enačba / Equation 7

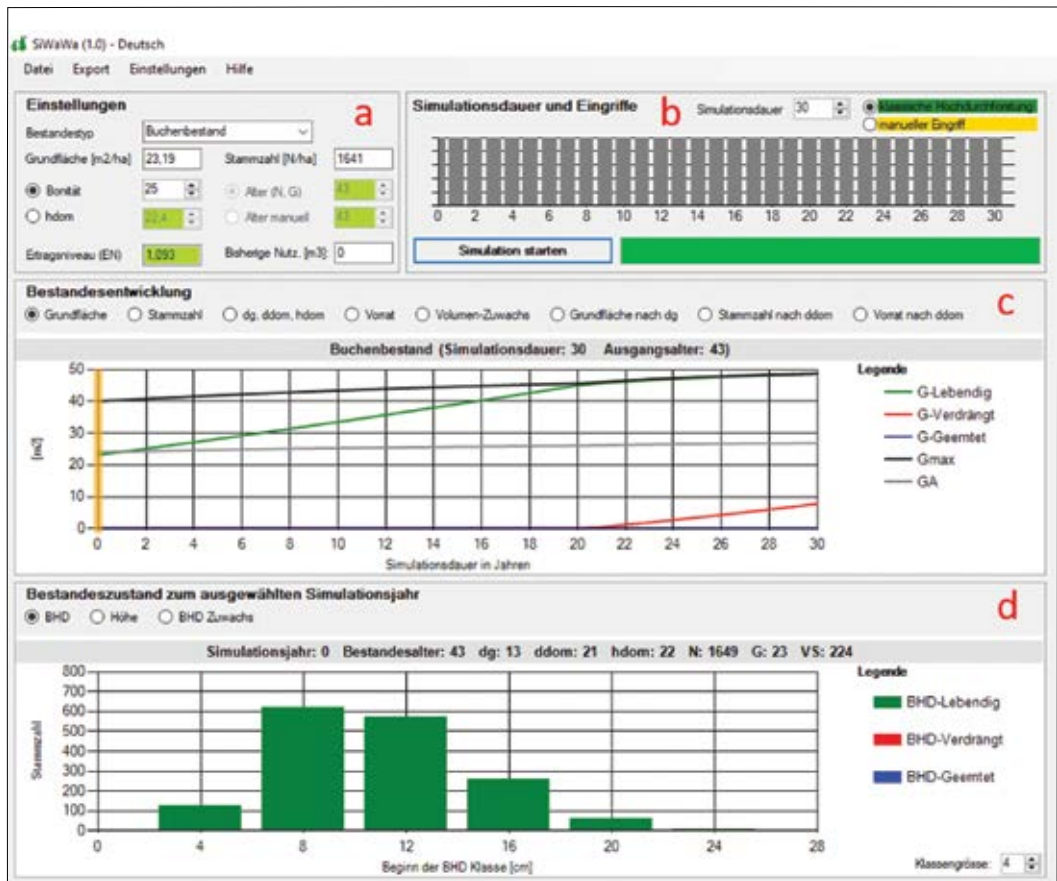
$$\text{starost} = k_{sp,0} + k_{sp,1} \cdot SI_{50} + k_{sp,2} \cdot D_g + k_{sp,3} \cdot \frac{G}{D_g} + k_{sp,4} \cdot \frac{G}{G_{max}}$$

V četrtem modulu je izračunana mortaliteta, ki je dokaj enostavno izražena kot razlika med maksimalno temeljnico (G_{max}) in dejansko simulirano temeljnico G_{sim} . G_{max} je vrstno specifična in empirično izračunana za sestoje določene vrste.

Peti modul je namenjen simulaciji ukrepov. Trenutna različica simulatorja omogoča avtomatsko simulacijo klasičnega visokega redčenja, ki glede na izbrano jakost ukrepanja (izraženo v % sestojne temeljnice) proporcionalno iz Weibullove porazdelitve »odstrani« določeno število dreves določenih dimenzij iz sestoja, in ročni vnos porazdelitve »odstranjenih« dreves določenih dimenzij.

Model je vključen v simulator SiWaWa 1.0, ki je prosto dostopen na spletu (www.siwawa.org) (slika 1). Trenutno je na voljo v nemški ali fran-

coski jezikovni različici. Vnos vhodnih podatkov poteka prek vnosnega polja (slika 1, okvirček a), enako tudi vnos značilnosti ukrepanja (okvirček b). Omogočeno je tudi ukrepanje v več različnih letih. Model simulira razvoj izbranega sestoja za poljubno obdobje; priporočeno obdobje simulacije je 30 let, za empirične modele je generalno priporočeno obdobje 30–50 let (Pretzsch, 2010). Za vsako posamezno leto je simulirana debelinska struktura, G , N , lesna zaloga, volumenski prirastek, D_g , D_{dom} in H_{dom} . Razvoj vseh izhodnih parametrov je mogoče izrisati na grafikonih na grafičnem vmesniku (okvirčka c in d). Simulator omogoča izvoz simuliranih parametrov v MS Excelovi datoteki.



Slika 1: Prikaz grafičnega vmesnika simulatorja SiWaWa 1.0 z izvedeno simulacijo za eno izmed analiziranih stalnih vzorčnih ploskev

Figure 1: The SiWaWa interface showing a simulated forest stand development for a stand on one of the permanent sampling plots

2.2 Objekt raziskave in podatki

2.2 Study area and data

V raziskavi smo uporabili podatke s stalnih vzorčnih ploskev (SVP) Zavoda za gozdove Slovenije, ki vsebuje podatke, merjene v obdobju 2009–2018 (ZGS, 2019). Najprej smo celotno podatkovno zbirko ($n = 97.590$) skrčili na SVP, ki predstavljajo čiste bukove in smrekove sestoj (delež vrste v skupni lesni zalogi 100 %). Podatkovno zbirko smo tako skrčili na 5.572 čistih bukovih SVP in 2.587 čistih smrekovih SVP. Podatkovno zbirko smo nato glede na prisotnost poseka v zadnjem inventurnem obdobju razdelili na negospodarjene in gospodarjene sestoj. Simulacije smo želeli izvesti v sestojih, ki so bili čim bolj polnoporasli (negospodarjeni sestoji) ali vsaj čim bližje temu (gospodarjeni sestoji). Zato smo izbrali le SVP z gostoto vsaj 200 dreves/ha, hkrati pa smo tako poskušali zagotoviti tudi zadostno število dreves na ploskvi za nemoteno izvedbo simulacij. Končno smo iz te podatkovne zbirke slučajnostno izbrali po 50 SVP v čistih bukovih negospodarjenih in gospodarjenih sestojih ter 50 SVP v čistih smrekovih gospodarjenih in negospodarjenih sestojih. Vzorec le 200 SVP smo izbrali zaradi zamudnosti dela s simulacijami razvoja gozdov za posamezni sestoj z veliko »ročnega« dela. Heterogenost rastišč smo zajeli z dokaj velikim razponom rastiščnih

indeksov SI_{50} , povprečni SI_{50} pa se med obravnavanimi stratumi statistično značilno niso razlikovali (Kruskal-Wallisov test, $p > 0,05$). Osnovne lastnosti vzorčnih SVP so zbrane v preglednici 1.

2.3 Simulacije

2.3 Simulations

Vhodni podatki v simulator SiWaWa 1.0 so bili: drevesna vrsta, sestojna temeljnica ob predzadnji meritvi (G_0), število dreves ob predzadnji meritvi (N_0) in rastiščni indeks (SI_{50}). G_0 in N_0 smo izračunali s podatki na SVP. V Sloveniji za bukev in smreko določamo SI pri referenčni starosti 100 let, t.j. SI_{100} (Kotar, 2005). Te SI_{100} smo za vsako SVP glede na prevladujočo asociacijo v odseku, v kateri je posamezna SVP, pridobili iz publikacije Kadunc in sodelavci (2013). Nato smo SI_{100} na podlagi bonitetnega sistema, ki prikazuje razvoj zgornjih sestojnih višin pri posameznih SI_{100} (Kotar, 2003), pretvorili v SI_{50} . Dodatno smo pretvorjene SI_{50} preverili še s švicarskimi sestojnimi tablicami (EAFV, 1968).

Nato smo simulirali razvoj gozdov za obdobje 10 let. V gospodarjenih sestojih smo simulirali tudi posek z jakostjo, ki smo jo predhodno izračunali za vsako SVP posebej. Izračunali smo jakost le dejanskega poseka (posek) in jakost celotne mortalitete (mortaliteta), kjer smo upoštevali

Preglednica 1: Osnovni sestojni parametri izbranih SVP v čistih bukovih in smrekovih sestojih (LZ lesna zaloga, G sestojna temeljnica, N število dreves, SI_{100} rastiščni indeks pri referenčni starosti 100 let)

Table 1: Some basic stand parameters from the analysed permanent sampling plots in pure beech and spruce stands (LZ growing stock; G basal area; N number of trees; SI_{100} site index at the reference age of 100 y)

	Čisti bukovii sestoji		Čisti smrekovii sestoji	
	gospodarjeni	negospodarjeni	gospodarjeni	negospodarjeni
n	50	50	50	50
LZ (m³/ha)	369	317	316	252
min - maks	151–618	94–587	14–616	11–460
G (m²/ha)	31,7	27,4	30,8	23,0
min - maks	10,8–48,2	6,4–45,3	2,1–61,7	2,2–36,4
N (n/ha)	543	415	825	409
min - maks	60–1420	40–1270	100–2350	100–1150
SI_{100}	29	29	31	29
min - maks	21–34	21–34	22–41	22–41

posekano in odmrlo drevje. Pri jakostih poseka (ali mortalitete) do 60 % smo simulacijo poseka izvedli kot klasično izbiralno redčenje, kjer je bilo drevje za posek izbrano na podlagi Weibullove porazdelitvene funkcije. V primeru jakosti poseka več kot 60 % ali $D_{\text{dom}} \geq 50$ cm pa smo izvedli ročni izbor drevja za posek, in sicer smo »posek« usmerili v (naj)debelejše drevje (simulacija obnovitvenih sečenj), v primeru dodatnega odmrlega drevja (jakost mortalitete > jakost poseka) smo pri drobnejšem drevju simulirali še približen posek po Weibullovi porazdelitvi. V nekaterih primerih izračunano (visoko) jakost poseka ali mortalitete ni bilo mogoče simulirati, saj naj bi v sestoji ostalo premalo dreves za nadaljnjo ustrezno simulacijo razvoja sestoja. V takih primerih smo s poskušanjem simulirali največjo mogočo jakost poseka, ki pa nikoli ni bila nižja od 75 % sestojne temeljnice. Težava pri simulacijah poseka na SVP je, da ne vemo, kdaj natančno v inventurnem obdobju je bil posek izveden. Zato smo za izvedbo simulacij razvoja takih gozdov vsaki SVP naključno določili leto izvedbe poseka od 1 do 10.

Izhodne podatke za vsako SVP smo izvozili kot Excelovo datoteko, ki je vsebovala podatke o razvoju G, N, volumna oziroma lesne zaloge (LZ), D_g , D_{dom} in H_{dom} . V primeru simuliranega ukrepanja (poseka) v sestoji poda tudi G, LZ in N posekanih dreves, v primeru naravne mortalitete pa tudi G, LZ in N odmrlih dreves. Simulator na podlagi vhodnih podatkov izračuna tudi okvirno starost sestoja in zgornjo sestojno višino, določi pa tudi optimalno ali priporočeno G_A in maksimalno G_{max} , na njeni podlagi pa še raven proizvodnosti (nem. *Ertragsniveau*) kot razmerje med maksimalno G za sestoj in maksimalno G za sestoj izbrane vrste.

2.4 Validacija

2.4 Validation

Validacijo simulacij modela smo naredili na 100 SVP v čistih bukovich in 92 SVP v čistih smrekovich sestojih (osem iniciacij sestojev je bilo neuspešnih). Pri validaciji smo najprej preverjali ustreznost za švicarske gozdove parameterizane Weibullove porazdelitvene funkcije pri iniciaciji začetnega stanja v čistih sestojih bukve in smreke, osredotočili smo se na parametre G, N in D_g . Primerjali smo dejanske vrednosti, izračunane iz izmerjenih

podatkov na SVP, in z modelom generirane začetne vrednosti. Pri tem smo uporabili okularno metodo razsevnega diagrama, na katerem smo primerjali dejanske in simulirane vrednosti opazovanih sestojnih parametrov, in več mer uspešnosti prileganja napovedanih vrednosti dejanskim vrednostim: povprečna napaka ME (ang. *mean error*, enačba 8), povprečna absolutna napaka MAE (ang. *mean absolute error*, enačba 9), celotna napaka RMSE (ang. *root mean square error*, enačba 10), povprečna absolutna odstotna napaka MAPE (ang. *mean absolute percentage error*, enačba 11), Pearsonov korelacijski koeficient med dejanskimi in simuliranimi vrednostmi r_{Pearson} ter indeks ujemanja d (ang. *Index of agreement*; Willmott, 1981; enačba 12):

Enačba / Equation 8

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{sim}} - x_{\text{dej}})}{n}$$

Enačba / Equation 9

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{\text{sim}} - x_{\text{dej}}|}{n}$$

Enačba / Equation 10

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{sim}} - x_{\text{dej}})^2}{n}}$$

Enačba / Equation 11

$$MAPE = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{\text{sim}} - x_{\text{dej}}}{x_{\text{dej}}} \right|}{n}$$

Enačba / Equation 12

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{dej}} - x_{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (|x_{\text{sim}} - \bar{x}_{\text{dej}}| + |x_{\text{dej}} - \bar{x}_{\text{dej}}|)^2}$$

kjer x_{sim} pomeni simulirano vrednost parametra, x_{dej} dejansko vrednost istega parametra in n število vzorčnih enot.

V drugem delu validacije smo analizirali uspešnost modela pri simuliranju razvoja gozdov. Z identičnimi metodami smo primerjali simulirane vrednosti G, N in D_g ob koncu 10-letnega obdobja simulacij z dejanskimi izmerjenimi vrednostmi na SVP.

3 REZULTATI

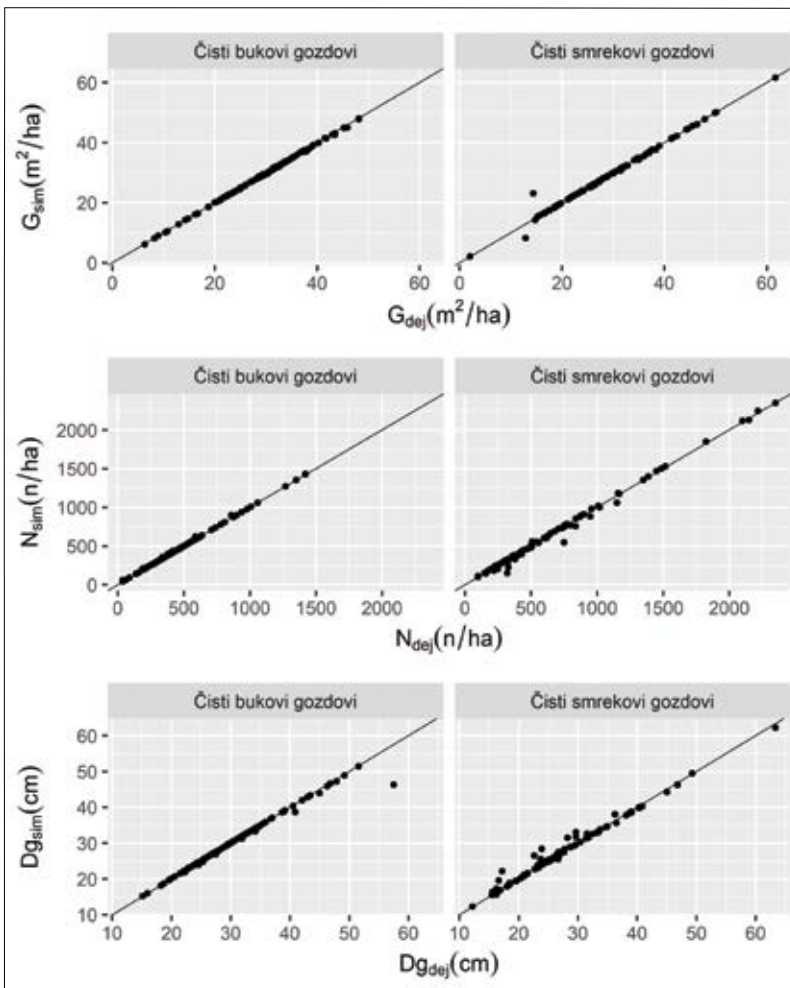
3 RESULTS

3.1 Inicijacija sestojnih parametrov

3.1 Initiation of forest stand parameters

Model SiWaWa je precej točno generiral začetne vrednosti G_0 in N_0 ter posledično tudi $D_{g,0}$ tako za čiste bukove kot smrekove sestoje (slika 2), kar dokazuje ustreznost parametrizacije. Mere točnosti napovedi vse nakazujejo izredno dobro ujemanje simuliranih vrednosti z dejanskimi. Tako je RMSE za G_0 v čistih bukovih sestojih znašal le 0,32 m²/ha

in MAPE 0,87 %. V smrekovih sestojih sta bili obe napaki le nekoliko večji, in sicer RMSE 1,06 m²/ha in MAPE 1,16 %, a še vedno zadovoljivi. Statistično značilnih razlik v odstopanjih G , N in D_g med gospodarjenimi in negospodarjenimi sestoji praviloma nismo ugotovili ($p > 0,05$), izjema so bila le odstopanja števila dreves v čistih bukovih sestojih, kjer pa je bila razlika minimalna (povprečno odstopanje 1,1 drevo za negospodarjene in -2,6 dreves za gospodarjene sestoje), a statistično značilna ($p = 0,012$).



Slika 2: Primerjava dejanskih in simuliranih vrednosti (točke) začetne sestojne temeljnice G_0 (zgoraj), števila dreves N_0 (sredina) in srednje temeljničnega premera (spodaj) za čiste bukove in smrekove sestoje (združeni so negospodarjeni in gospodarjeni sestoji); v idealnih primerih bi bile točke razmeščene po izrisanih diagonalah.
 Figure 2: Comparison of actual and simulated stand basal areas G_0 (above), number of trees N_0 (middle), and mean quadratic diameter (below) for pure beech and spruce stands; ideally, points would be located on the drawn diagonal

V določenih primerih simulator ni uspel ustrezno generirati začetnega stanja sestojev, najpogosteje se je to zgodilo v primeru zelo nizke začetne G_0 ($<10 \text{ m}^2/\text{ha}$) in višjem N_0 in/ali visokem SI_{50} . V bukovih sestojih takšnih primerov ni bilo, v smrekovih sestojih pa sedem v negospodarjenih in eden v gospodarskih sestojih.

3.2 Validacija simulacij razvoja negospodarjenih sestojev

3.2 Validation of simulated development of unmanaged forest stands

Simulacije razvoja vzorčnih čistih bukovih in smrekovih gozdov za obdobje 10 let so nakazale različno napovedno moč modela SiWaWa. Razsevni diagram za negospodarjene bukove sestoje prikazuje dokaj dobro sovpadanje simuliranih vrednosti sestojne temeljnice in števila dreves z dejanskimi vrednostmi (slika 3). Prav tako so mere točnosti za napovedano sestojno temeljnico ob koncu simuliranega obdobja G_1 ugodne (preglednica 2) in nakazujejo sprejemljivo napovedovanje razvoja bukovih gozdnih sestojev. Analiza D_g pa je pokazala, da je $D_{g, \text{sim}}$ v 66 % sestojev precenjen (slika 4), a RMSE (2,6 cm), ME (0,1 cm) in MAE (1,6 cm) niso velike.

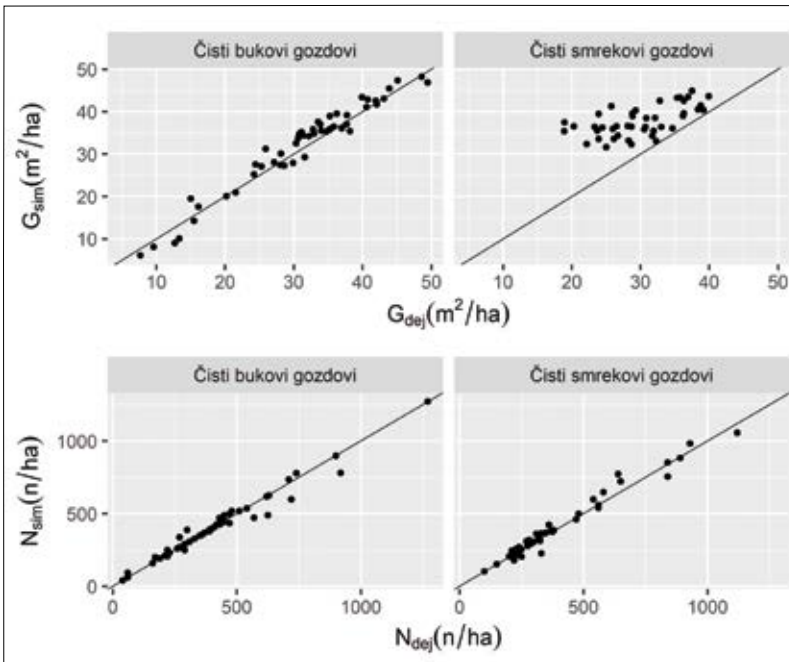
Nasprotno pa se je izkazalo pri simulacijah čistih smrekovih sestojev, pri katerih razsevni diagram prikazuje sistematično precenjevanje dejanske sestojne temeljnice in premera srednje temeljničnega drevesa D_g , ne velja pa to za število

dreves. To pomeni, da model ustrezno simulira razvoj števila dreves, debelinska struktura pa očitno v dokajšnji meri odstopa od dejanske, kar pa je zaradi majhne površine SVP pričakovano. Posledično so tudi mere točnosti za negospodarjene smrekove sestoje najslabše; MAPE za $G_{1, \text{sim}}$ je kar 4,4-krat višja od MAPE za čiste negospodarjene bukove gozdove. V povprečju (ME) je bila simulirana $G_{1, \text{sim}}$ višja za kar 7,76 m^2/ha . Zaznana pa so bila večja relativna odstopanja pri SVP z nižjo dejansko G_1 (slika 3), pri čemer bi lahko sklepali, da model slabše simulira rast mlajših sestojev. A to ne velja povsem, saj analiza N_0 in $D_{g,0}$ ne nakazujeta takšnega vzorca. Vrednosti $D_{g,0}$ na SVP z odstopanji v sestojni temeljnici $> 10 \text{ m}^2/\text{ha}$ so na primer zavzemale interval 16–34 cm, kar nakazuje mlajše do srednje stare sestoje (drogovnjake in mlajše debeljake). Pri simulaciji števila dreves $N_{1, \text{sim}}$ velja opozoriti, da je bila nezanesljivost napovedi pri SVP z večjo gostoto oziroma večjim številom dreves večja, je pa pri tem treba upoštevati tudi malo testiranih SVP. Ker je bil kljub temu $N_{1, \text{sim}}$ dokaj ustrezno simuliran, lahko sklepamo, da je v modelu predvidena rast smreke oziroma smrekovih sestojev intenzivnejša kot dejanska rast smreke v Sloveniji, svoj delež pa k odstopanjem doprinesejo že omejene razlike v debelinski strukturi. To izkazuje tudi $D_{g1, \text{sim}}$, ki je bil podcenjen ali pravilno ocenjen na le dveh ploskvah, na preostalih 41 (95 %) pa precenjen.

Preglednica 2: Mere točnosti napovedane sestojne temeljnice G_1 ob koncu simuliranega obdobja 10 let za čiste bukove in smrekove negospodarjene in gospodarske gozdove; pri slednjih so mere točnosti ločeno prikazane za simulacije, ki so upoštevale posek in celotno mortaliteto (posek + odmrlo drevje)

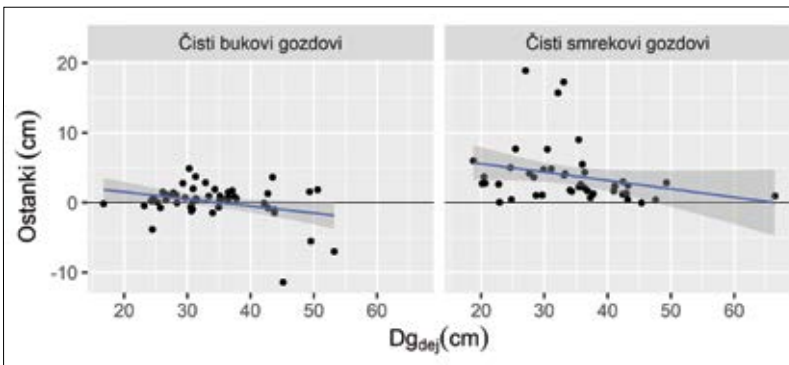
Table 2: Accuracy measures for final stand basal area G_1 at the end of simulated 10 y period for pure beech and spruce unmanaged and managed stands; at later measures are separately given for simulations considering harvesting and total mortality (harvesting + natural mortality)

	Čisti bukov negospodarjeni gozdovi	Čisti bukov gospodarjeni gozdovi		Čisti smrekovi negospodarjeni gozdovi	Čisti smrekovi gospodarjeni gozdovi	
		posek	mortaliteta		posek	mortaliteta
ME	0,90	0,15	-1,15	7,76	2,26	1,36
MAE	1,98	2,74	3,24	7,76	5,05	4,85
RMSE	2,35	3,42	4,35	8,94	6,13	6,11
MAPE (%)	6,34	10,88	12,84	27,96	18,08	17,71
rPearson	0,978	0,964	0,936	0,614	0,853	0,840
d	0,986	0,978	0,963	0,694	0,936	0,917



Slika 3: Primerjava dejanskih in simuliranih vrednosti (točke) končne sestojne temeljnice G_1 (zgoraj) in števila dreves N_1 (spodaj) za čiste negospodarjene bukove in smrekove sestoje; v idealnem primeru bi bile vse točke razmeščene po izrisani diagonalni.

Figure 3: Comparison of the actual and simulated values of the final stand basal area G_1 (above) and number of trees N_1 (below) for pure unmanaged beech and spruce stands; ideally, points would be located on the drawn diagonal



Slika 4: Raztros ostankov simuliranih premerov srednje temeljničnega premera sestoja D_{g1} za čiste bukove in smrekove negospodarjene sestoje ob koncu opazovanega obdobja s prikazano linearno regresijo in standardno napako

Figure 4: Residuals scatterplot of mean quadratic diameter D_{g1} for pure beech and spruce unmanaged stands at the end of 10y simulation period with linear regression curves and standard error of mean

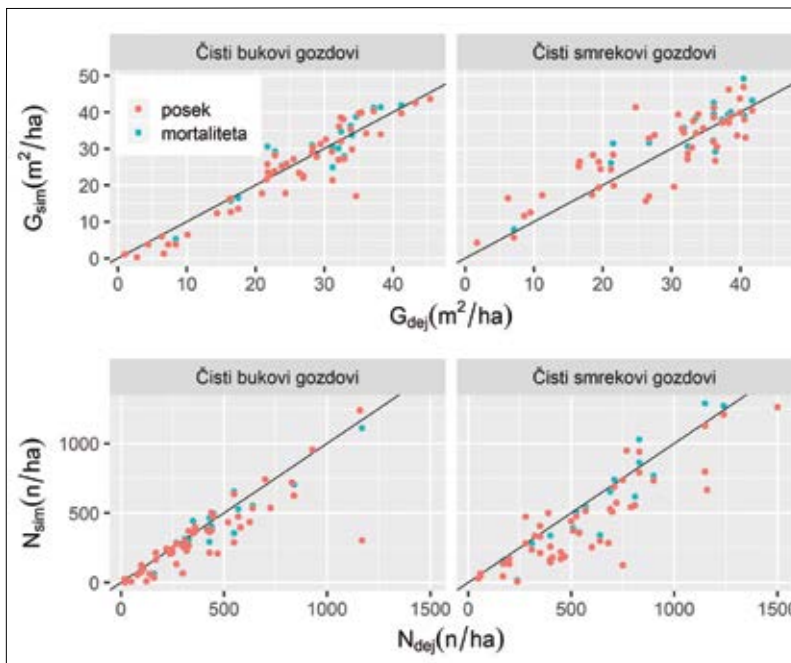
3.3 Validacija simulacij razvoja gospodarjenih sestojev

3.3 Validation of simulated development of managed forest stands

Simulacije razvoja gospodarjenih čistih bukovih sestojev so pokazale podobno dobro prileganje dejanskim vrednostim kot za negospodarjene bukove sestoje (slika 5), podobno so nakazale tudi mere točnosti napovedovanja tako ob upoštevanju poseka kot celotne mortalitete, so pa bile le-te vseeno nekoliko višje kot v primeru simulacij za negospodarjene gozdove (preglednica 2). Nasprotno pa simulacije razvoja gospodarjenih čistih smrekovih sestojev kažejo drugačno sliko kot simulacije negospodarjenih sestojev. V slednjem primeru je bila točnost napovedi bistveno boljša, ne glede na to, ali smo upoštevali samo posek ali

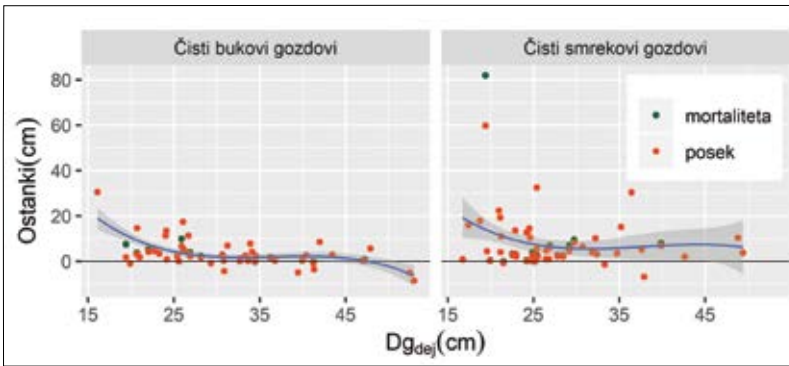
celotno mortaliteto. Povprečna absolutna odstotna napaka MAPE je bila za približno 10 % nižja kot v negospodarjenih sestojih. Je pa pri simulaciji števila dreves v obeh tipih sestojev pri znatnem deležu sestojev vidno podcenjevanje števila dreves po poseku, podcenjevanje pa je očitnejše v čistih smrekovih sestojih.

Nasprotno pa raztros ostankov v analizi D_g (slika 6) nakazuje sistematično precenjevanje tega parametra tako v bukovih kot smrekovih sestojih, a pri slednjih je precenjevanje nekoliko večje. Ob upoštevanju poseka je v čistih smrekovih sestojih ME pri simulaciji D_g znašala 8,0 cm, MAE 8,4 cm, RMSE 13,4 cm in MAPE 30,4 %, v čistih bukovih sestojih so številke nižje, in sicer ME 3,3 cm, MAE 4,6 cm, RMSE 7,5 cm in MAPE 14,7 %.



Slika 5: Primerjava dejanskih in simuliranih vrednosti (točke) končne sestojne temeljnice G_1 (zgoraj) in števila dreves N_1 (spodaj) za čiste gospodarjene bukove in smrekove sestoje; pri simulacijah »posek« je upoštevana jakost dejanskega poseka, pri točkah »mortaliteta« pa jakost celotne mortalitete (posek + odmrlo drevje), slednje so izrisane le v primerih, ko je bila naravna mortaliteta dreves v času med zadnjima inventurama prisotna na SVP; v primeru idealnega napovedovanja razvoja gozdov bi bile točke razmeščene po izrisani diagonalni.

Figure 5: Comparison of the actual and simulated values of the final stand basal area G_1 (above) and number of trees N_1 (below) for pure managed beech (left) and spruce (right) stands; the simulations »posek« take into account the intensity of the actual harvests, and the simulations »mortality« the intensity of the total mortality (harvests + dead trees), the latter are plotted only for plots on which natural mortality of trees was present; ideally points would be located on the drawn diagonal



Slika 6: Raztros ostankov simuliranih premerov srednje temeljničnega premera sestoja D_q za čiste bukovne in smrekove gospodarjene sestoje ob upoštevanju jakosti poseka in celotne mortalitete (posek + odmrla drevja) s prikazano gladilno krivuljo, izračunano z zlepkami, in standardno napako

Figure 6: Residuals scatterplot of mean quadratic diameter D_q for pure beech and spruce managed stands; the simulations „posek“ take into account the intensity of the actual harvests, and the simulations „mortality“ the intensity of the total mortality (harvests + dead trees), the latter are plotted only for plots on which natural mortality of trees was present

4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Model SiWaWa se je v raziskavi že v svoji osnovni različici (Rosset in sod., 2013), parametrizirani za švicarske gozdove, izkazal kot uporaben pripomoček. Inicijacija začetne strukture gozdov se je izkazala za zelo dobro v obeh raziskovanih tipih gozdov. To nakazuje ustreznost algoritma za izračun debelinske strukture gozdov, kar je bilo potrjeno tudi za švicarske gozdove (Schütz in Rosset, 2020). Izjema so bili sestoji, ki so izkazali neenovršno porazdelitev števila dreves glede na debelino, kjer je bila točnost napovedovanja bistveno manjša (Rosset in sod., 2013), a takšne porazdelitve praviloma niso značilne za enomerne sestoje, ampak npr. za dvoslojne ali druge oblike raznomernih sestojev.

Validacija simulacij je podala nekoliko drugačne rezultate. V raziskavi je bilo napovedovanje razvoja vzorčnih čistih bukovih gozdov dokaj točno, lahko celo zaključimo, da sprejemljivo z vidika neposredne uporabe modela pri upravljanju z gozdovi v Sloveniji. Rezultati validacije simuliranih vrednosti G in N so bili dobri tako v vzorčnih negospodarjenih kot gospodarjenih sestojih. Raztrosi ostankov analiziranih sestojnih parametrov so bili naključni in zato blizu normalne porazdelitve (okularna ocena).

Nasprotno lahko trdimo za uporabo modela v vzorčnih čistih smrekovih sestojih, kjer rezultati niso enosmerni. Odstopanja so bistveno večja kot pri simulacijah razvoja bukovih sestojev, predvsem je neugodno večinsko precejevanje sestojne temeljnice, v veliko primerih tudi precejevanje števila dreves v negospodarjenih sestojih. V gospodarjenih sestojih so bili rezultati bistveno ugodnejši. Vzroke za to je težko določiti, a najverjetnejši vzrok temu je bilo večinsko podcejevanje števila dreves v gospodarjenih sestojih ob koncu simuliranega obdobja. Manj dreves je kompenziralo precejšeno stopnjo rasti (le-ta je vidna v simulacijah razvoja negospodarjenih sestojev), kar je na koncu dalo dokaj točne rezultate simulirane sestojne temeljnice. Verjeten vzrok manjšemu številu dreves je način izračuna debelinske strukture sestojev in način izbora dreves za posek oziroma odstranitev iz nadaljnje simulacije. Oboje temelji na izračunani Weibullovi porazdelitvi, ki ni nujno, da se idealno prilega dejanski debelinski strukturi. Pogosto je zaradi majhnosti ploskve precej različna.

Morebiten vzrok bi lahko iskali tudi v nekoliko drugačni strukturi negospodarjenih in gospodarjenih smrekovih sestojev (preglednica 1). A ker je razpon osnovnih sestojnih parametrov podoben in je večina ploskev v negospodarjenih in gospodarjenih izkazovala podobne in primer-

ljive vrednosti sestojih parametrov, tak vpliv ne bi smel biti izrazit in ključen. Mogoče je tudi, da je določitev jakosti poseka oziroma mortalitete neposredno iz stanja na ploskvi na nek način izničila (precenjevalni) učinek prirastne funkcije za smrekove sestoje. Morebiten vzrok diskrepance je tudi morebitna predhodna poškodovanost sestojev, ki pa iz podatkov, zbranih na SVP, ni razvidna, lahko pa bi vplivala na nižjo stopnjo priraščanja sestoja. Vsekakor bodo potrebne dodatne raziskave v sodelovanju z avtorji modela, da bomo model ustrezno izpopolnili ali pa v model vgradili prirastne funkcije, razvite na podlagi podatkov iz gozdne inventure čistih smrekovih gozdov v Sloveniji.

Pri simuliranju razvoja smrekovih gozdov je težava tudi, da model v nekaterih primerih na podlagi realnih vhodnih podatkov ni uspel ustrezno iniciirati začetnega stanja. Največkrat je težava nastala ob nizki začetni sestojni temeljnici G_0 in hkratnem dokaj velikem številu dreves N_0 in/ali visokem rastiščnem indeksu SI_{50} . To se je zgodilo na osmih SVP v razvojno mlajših sestojih, kjer je bil v vseh G_0 10 ali manj (ena SVP 15) m^2/ha , D_g pa praviloma manj kot 20 cm.

Pomemben vidik uporabe SVP je tudi spreminjanje števila dreves (in sestojne temeljnice) med dvema meritvama zaradi vraščanja in preraščanja dreves. Model teh procesov ne simulira, zato lahko nastajajo napake in odstopanja. V raziskavi smo uporabili izračunane vrednosti na celotni površini SVP (upoštevali smo obe krožni ploskvi). Mogoče bi bilo pri uporabi modela bolje uporabiti vrednosti, izračunane le na manjši 2-arski ploskvi, na kateri so izmerjena vsa drevesa. Tako bi se izognili spremembi števila dreves in sestojne temeljnice zaradi preraščanja, ne pa tudi zaradi vraščanja. Ustrezno upoštevanje slednjega ostaja vprašanje, ki še čaka na ustrežno rešitev, ki je pomembna predvsem za simuliranje razvoja tanjših drogovnjakov, kjer je vrast praviloma znatna in pomembno vpliva k spremembam sestojnih parametrov.

Za zanesljivejše zaključke bi bilo nujno poznati vpliv analiziranega vzorca SVP. Vzorec SVP je bil dokaj majhen, a je bil izbran naključno izmed vseh potencialnih SVP. Ugotovitve tako veljajo le za izbrani vzorec, a delno lahko rezultate

analize tudi posplošimo; za posplošitev na vse čiste bukove in smrekove sestoje bi bil potreben večji vzorec. Posledično je treba pri interpretaciji prikazanih rezultatov upoštevati določeno mero dvoma. V analizah in rezultatih je (v negativnem smislu) izstopal predvsem vzorec čistih gozdarjenih smrekovih gozdov. Mogoče je, da bi bili z drugačnim vzorcem rezultati validacije usmerjeni drugače. Ker je treba simulacije za vsak sestoj izvesti ročno, rezultate simulacije izvoziti in izdelati skupno podatkovno zbirko, kar vzame precej časa, se v raziskavi nismo lotili simulacij razvoja gozdov za dodaten vzorec SVP v čistih smrekovih gozdovih. Vsekakor pa je pred uporabo simulatorja za namene gospodarjenja s smrekovimi gozdovi takšno dodatno preverjanje modela nujno. Preizkus je mogoče izvesti na novem (večjem) vzorcu SVP, lahko pa bi uporabili podatke nacionalne gozdne inventure (GIS, 2020) ali pa podatke iz stalnih raziskovalnih ploskev, ki pa jih v Sloveniji žal ni veliko.

Pri analizi smo se osredotočili le na nekatere sestojne parametre, sestojno temeljnico, število dreves in premer srednje temeljničnega drevesa, ki je z njima neposredno povezan, nismo pa opazovali prileganja npr. simuliranih debelinskih struktur po posameznih sestojih, sestojne višine, dominantnega premera. Debelinska struktura in dominantni premer sta pogosto ključna podatka, na podlagi katerih se gozdar odloča o vrsti ukrepa v sestoju in pozneje odkazilu drevja. Pri iniciaciji debelinske strukture sestojev lahko nastanejo precejšnja odstopanja od dejanskega stanja (Schütz in Rosset, 2016), a metoda, vgrajena v modul za izračun debelinske strukture sestoja, se je izkazala za precej zanesljivo (Schütz in Rosset, 2020). Metoda omogoča dokaj zanesljivo napovedovanje β koeficienta triparametrne Weibullove porazdelitvene funkcije iz sestojnega parametra D_g , preostala parametra α in γ pa sta nato iz β izračunana s t.i. metodo *parameter recovery* (Siipilehto in Mehtätalo, 2013). V analizi nismo namenjali pozornosti ne debelinski strukturi ne dominantnemu premeru sestoja. Smiselno pa bi bilo, da bi ju v nadaljnjih raziskavah preizkušanja modela podrobneje raziskali, kar v naši raziskovalni skupini že deloma izvajamo.

V slovenskih gozdovih so dali rezultati validacijske raziskave modela SiWaWa oprijemljive pozitivne rezultate, ki nakazujejo možnost neposredne in takojšnje uporabe modela pri gospodarjenju s čistimi enomernimi gozdovi. Publikacij o podobnih testiranjih modela v Švici ali drugje nismo našli, preizkusi algoritma za izračun debelinske strukture sestoja iz sestojne temeljnice in števila dreves pa so algoritem označili za zelo natančnega, testiranja so dala dobre rezultate (Rosset in sod., 2018; Schütz in Rosset, 2020).

Lahko zaključimo, da je model SiWaWa v prosto dostopni različici, ki je parametriziran za švicarske gozdove, uporaben za simuliranje razvoja čistih bukovih gozdov brez ukrepanja (poseka) ali z njim, a pri interpretaciji simulacij mora biti uporabnik vseeno previden in pridobljene rezultate ustrezno pretehtati. Če je le mogoče, predlagamo preizkus točnosti modela na lokalnih podatkih in interpretacijo simulacij glede na rezultate te analize. SiWaWa zaenkrat še ne omogoča zanesljive simulacije razvoja čistih smrekovih sestojev v Sloveniji, potrebna so dodatna preverjanja. Verjetno bo za dovolj zanesljivo napovedovanje potrebna parametrizacija modela. Vsekakor velja poudariti, da je glede na uporabnost in enostavnost modela smiselno investirati v dodatne preizkuse, pa tudi nadgradnjo (parametrizacijo) modela s funkcijskimi povezavami, izračunanimi na podlagi podatkov iz naših gozdnih inventur, ali še bolje investirati v izgradnjo podobnega lastnega modela razvoja gozdov. Takšen model razvoja gozdnih sestojev je lahko pomembno orodje v procesu odločanja o ukrepanju v posameznih sestojih, primeren je tudi za simulacije razvoja gozdov na manjših do srednje velikih zasebnih gozdnih posestih (ob ne prevelikem številu sestojev, pogoj so enomerni čisti sestoji). Manj primeren pa je za strateško in konkretno odločanje na večji prostorski ravni, npr. na ravni rastiščnogojitvenega razreda, gozdnogospodarske enote ali večje gozdne posesti. Zaradi pogostih raznodobnih in raznomernih sestojev in rastiščne heterogenosti pa je smiselno razmišljati tudi o modelu, ki bi zanesljivo napovedoval razvoj tudi omenjenih gozdnih sestojev.

5 POVZETEK

Modeliranje razvoja gozdov je poenostavljen prikaz sprememb gozdnih sestojev zaradi procesov v gozdnem ekosistemu, kot so rast, mortaliteta, pomladitev in vrast drevja. Zaradi kompleksne narave gozdnih ekosistemov je modeliranje razvoja gozdov pomemben sestavni del upravljanja gozdov. Simuliranje različnih scenarijev razvoja gozdov glede na različno ukrepanje je temeljna podlaga za boljše odločanje in zmanjševanje tveganj pri gospodarjenju z gozdovi. Sestojni modeli so bili pogosto prepoznani kot učinkovito orodje pri podpori odločanju pri upravljanju z gozdovi. Primer prostorsko neodvisnega sestojnega modela je model razvoja gozdov SiWaWa (Schütz in Zingg, 2007; Rosset in sod., 2013), ki z enostavnimi, lahko merljivimi vhodnimi podatki na sestojni ravni simulira razvoj čistega enomernega sestoja izbrane drevesne vrste (bukev, smreka, veliki jesen). Cilj raziskave je bil preveriti uporabnost in primernost tega modela v njegovi izvorni različici za simulacijo razvoja čistih bukovih in smrekovih sestojev v Sloveniji.

V raziskavi smo uporabili podatke s stalnih vzorčnih ploskev (SVP) Zavoda za gozdove Slovenije. Iz zbirke smo naključno izbrali 50 SVP v čistih bukovih negospodarjenih in gospodarjenih sestojih ter 50 SVP v čistih smrekovih gospodarjenih in negospodarjenih sestojih, katerih gostota je bila vsaj 200 dreves/ha. Vhodni podatki v simulator SiWaWa 1.0 so bili: drevesna vrsta, sestojna temeljnica ob predzadnji meritvi (G_0), število dreves od predzadnji meritvi (N_0) in rastiščni indeks (SI_{50}). Razvoj vsakega sestoja na SVP smo simulirali za obdobje 10 let. V gospodarjenih sestojih smo simulirali razvoj sestoja ob upoštevanju i) jakosti dejanskega poseka in ii) jakosti celotne mortalitete, kjer smo upoštevali posekano in odmrlo drevje. Validacijo simulacij modela smo naredili na 100 SVP v čistih bukovih sestojih in 92 SVP v čistih smrekovih (osem iniciacij sestojev je bilo neuspešnih). Pri validaciji smo najprej preverjali ustreznost za švicarske gozdove parametrizane Weibullove porazdelitvene funkcije pri iniciaciji začetnega stanja v čistih sestojih bukve in smreke, osredotočili smo se na parametre G , N in D_g . V drugem delu validacije smo analizirali

uspešnost modela pri simuliranju razvoja gozdov, primerjali smo simulirane vrednosti G , N in D_g ob koncu 10-letnega obdobja simulacij z dejanskimi izmerjenimi vrednostmi na SVP. Okularno smo z razsevnimi diagrami primerjali dejanske in simulirane vrednosti opazovanih sestojnih parametrov in izračunali več mer točnosti.

Model SiWaWa je precej točno generaliziral začetne vrednosti G_0 in N_0 ter posledično tudi $D_{g,0}$ za čiste bukove sestojne in tudi smrekove. Tako je RMSE za G_0 v čistih bukovih sestojih znašal le 0,32 m²/ha in MAPE 0,87 %. V smrekovih sestojih sta bili obe napaki le nekoliko večji, in sicer RMSE 1,06 m²/ha in MAPE 1,16 %.

Simulacije razvoja čistih bukovih in smrekovih gozdov za obdobje 10 let so nakazale različno napovedno moč modela SiWaWa. Razsevni diagrami dejanskih in napovedanih vrednosti G_1 ter mere točnosti za napovedano sestojno temeljnico ob koncu simuliranega obdobja G_1 so nakazali sprejemljivo napovedovanje razvoja bukovih gozdnih sestojev. Nasprotno pa se je izkazalo pri simulacijah čistih smrekovih sestojev. Mere točnosti za negospodarjene smrekove sestojne se so izkazale za precej slabše; MAPE za $G_{1,sim}$ je bila kar 4,4-krat višja od MAPE za čiste negospodarjene bukove gozdove. $D_{g,sim}$ je bil precenjen na 95 % ploskev.

Simulacije razvoja gospodarjenih čistih bukovih sestojev so pokazale podobno dobro prilaganje dejanskim vrednostim kot za negospodarjene sestojne, nasprotno pa simulacije razvoja gospodarjenih čistih smrekovih sestojev kažejo drugačno sliko kot simulacije negospodarjenih sestojev. Točnost napovedi je bila bistveno boljša ne glede na to, ali smo upoštevali samo posek ali celotno mortaliteto. Povprečna absolutna odstotna napaka MAPE je bila približno 10 % manjša kot v negospodarjenih sestojih. Raztros ostankov v analizi D_g je nakazal pogosto precenjevanje tega parametra tako v bukovih kot smrekovih sestojih.

Model SiWaWa se je v raziskavi že v svoji osnovni različici, parametrizirani za švicarske gozdove, izkazal kot uporaben pripomoček. Napovedovanje razvoja vzorčnih čistih bukovih gozdov je bilo dokaj točno, lahko celo zaključimo, da sprejemljivo z vidika neposredne uporabe modela pri upravljanju z gozdovi v Sloveniji. Ne moremo pa enako zaključiti glede uporabe

modela v vzorčnih čistih smrekovih sestojih, kjer rezultati niso bili enosmerni. Odstopanja so bila bistveno večja kot pri simulacijah razvoja bukovih sestojev; predvsem je neugodno večinsko precenjevanje sestojne temeljnice, v veliko primerih tudi precenjevanje števila dreves v negospodarjenih sestojih. Izpostavljeni in komentirani so mogoči razlogi takšnih rezultatov. Poudariti pa velja, da je glede na uporabnost in enostavnost modela smiselno investirati v dodatne preizkuse, pa tudi nadgradnjo (parametrizacijo) modela s funkcijskimi povezavami, izračunanimi na podlagi podatkov iz naših gozdnih inventur, ali investirati v izgradnjo podobnega lastnega modela razvoja gozdov.

5 SUMMARY

The modelling of forest development is a simplified presentation of changes in forest stands due to the processes in forest ecosystem, e.g. growth, mortality, regeneration, and ingrowth of trees. Due to the complex nature of forest ecosystems, the modelling of forest development represents an important component of forest management. The simulation of diverse forest development scenarios concerning the diverse actions is the base for a better decision making and reducing the risks in forest management. The stand models were often recognized as an effective tool for support in decision making in forest management. An example of a spatially independent stand model is the SiWaWa forest development model (Schütz and Zingg, 2007; Rosset et al., 2013), which simulates the development of pure even-aged stands of selected tree species (beech, spruce, common ash) using simple and easy-to-measure input data. The goal of the study was to test the applicability and appropriateness of this model in its original variant for simulating development of pure beech and spruce stands in Slovenia.

In our research, we applied the data from permanent sampling plots (SVP/PSP) of the Slovenia Forest Service. From the collection, we randomly selected 50 PSPs in pure beech unmanaged and managed stands and 50 PSPs in pure spruce managed and unmanaged stands, whose density was at least 200 trees/ha. The input

data into the SiWaWa 1.0 simulator were: tree species, basal area at the penultimate measurement (G_0), number of trees at the penultimate measurement (N_0) and site index (SI_{50}). In the managed stands, we simulated the stand development considering i) intensity of the actual felling and ii) intensity of the total mortality, where we considered the harvested and naturally dead trees. We performed the validation of the model simulations on a 100 PSPs in pure beech stands and 92 PSPs in pure spruce stands (eight stand initiations were unsuccessful). We first checked the appropriateness of the parametrized Weibull distribution function for initializing the penultimate state in pure beech and spruce stands; we focused on the G , N and D_g parameters. In the second part of the validation, we analyzed the successfulness of the model in forest development simulations; we compared the simulated values G , N , and D_g at the end of the 10-year simulation period with the actual measured values on the PSPs. We compared the actual and simulated values of the monitored stand parameters using the dispersion diagrams and several calculated accuracy measures.

The SiWaWa model generated the initial values G_0 and N_0 and, consequently, also $D_{g,0}$ rather accurately for pure beech stands and for the spruce ones. Thus, RMSE for G_0 in pure beech stands amounted to only 0.32 m²/ha and MAPE 0.87 %. In the spruce stands, both errors were only somewhat bigger, i.e. RMSE 1.06 m²/ha and MAPE 1.16 %. The development simulations in pure beech and spruce forests for the 10-year period indicated a different SiWaWa model predictive power. The scatterplot of the actual and predicted values G_1 and the corresponding accuracy measures indicated an acceptable prediction of the beech forest stands' development. The accuracy measures for the unmanaged spruce stands proved to be much worse; MAPE for the $G_{1,sim}$ was 4.4 times higher than MAPE for pure unmanaged beech forests. $D_{g,sim}$ was overestimated on 95 % of plots.

The simulations of the managed pure beech stands' development showed a similar good fitting to the accurate values as for the unmanaged stands; on the contrary, the simulations of the managed

pure spruce stands showed different results as the simulations of the unmanaged stands. The accuracy of the prediction was substantially better regardless of considering only harvested trees or total mortality. The mean absolute percentage error MAPE was around 10 % lower than in unmanaged stands. The residual scatterplot of D_g indicated a frequent overestimation of this parameter both in beech and spruce stands.

The SiWaWa model proved to be a useful tool for forest management already in its basic version, parametrized for Swiss forests. Predictions for the sampled pure beech forests were rather accurate, which enables us to conclude that SiWaWa might be acceptable for its direct use when managing beech forests in Slovenia. However, we cannot draw the same conclusion for applying the model in pure spruce forests, where the results were not single-sided. The deviations were significantly bigger than in the development simulations of beech stands. Above all, the majority overestimation of the stand basal area, in numerous cases also overestimation of the number of trees in the unmanaged stands, are unfavorable. Possible reasons for such results are highlighted and commented. In conclusion, we emphasize that regarding the model's applicability and simplicity it is reasonable to invest in additional tests and also upgrading (parametrization) of the model with equations, calculated using the data from our forest inventories, or even more to invest into the development of a similar forest development model of our own.

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGEMENT

Raziskavo sta finančno omogočila Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano ter Agencija za raziskovalno dejavnost s financiranjem ciljnega raziskovalnega projekta Pregled in presoja modelov razvoja gozdov za gozdnogospodarsko načrtovanje na različnih prostorskih ravneh (V4-1821). Zahvaljujem se doc. dr. Andreju Ficku za pripombe k osnutku članka, Zavodu za gozdove Slovenije za omogočeno uporabo podatkov s stalnih vzorčnih ploskev in recenzentu za izčrpano in konstruktivno recenzijo članka.

7 VIRI

7 REFERENCES

- EAFV. 1968. Ertragstafeln für die Fichte, Tanne und Buche in der Schweiz. 1968. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, ZH.
- 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 (4): 412–421.
- Fontes L., Bontemps J.-D., Bugmann H., Van Oijen M., Gracia C., Kramer K., Lindner M., Rötzer T., Skovsgaard J.P. 2010. Models for supporting forest management in a changing environment. *Forest Systems*, 19: 8–29.
- Franc A., Laroussinie O., Karjalainen T. 2001. Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management at the Forest Management Unit Level. *EFI Proceedings No. 38*. Joensuu, European Forest Institute.
- GIS. 2020. Spletna stran Gozdarskega inštituta Slovenije: Nacionalna gozdna inventura. [Url: http://www.gozdis.si/novice/nacionalna-gozdna-inventura-2018-07-19/](http://www.gozdis.si/novice/nacionalna-gozdna-inventura-2018-07-19/) (13. 8. 2020)
- Hasenauer H. 1994. Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstliche Schriftreihe. Österreichische Gesellschaft für Waldökosystemforschung und experimentelle Baumforschung. Universität für Bodenkultur, Wien.
- Kadunc A., Poljanec A., Dakskobler I., Rozman A., Bončina A. 2013. Ugotavljanje proizvodne sposobnosti gozdnih rastišč v Sloveniji. Vsebinsko poročilo o realizaciji projekta. Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Ljubljana.
- Klopčič M., Ficko A., Šmidovnik T., Grošelj P. 2020. Pregled in ocena tipov modelov razvoja gozdov glede primernosti za upravljanje gozdov v Evropi (izsledek D2). Ciljni raziskovalni projekt V4-1821. Pregled in presoja modelov razvoja gozdov za gozdnogospodarsko načrtovanje na različnih prostorskih ravneh. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 33 s.
- Kotar M. 2003. *Gozdarski priročnik*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 414 str.
- Kotar, M., 2005. *Zgradba, rast in donos gozda na ekoloških in fizioloških osnovah*. Ljubljana, Zveza gozdarskih društev Slovenije: 500 str.
- Kurz W.A., Dymond C.C., White T.M., Stinson G., Shaw C.H., Rampley G.J., Smyth C., Simpson B.N., Neilson E.T., Tyofymow J.A., Metsaranta J., Apps M.J. 2009. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecol. Model.* 220: 480–504.
- Lexer M.J., Honninger K. 2001. A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. *Forest Ecology and Management* 144: 43–65.
- Lynch T. B., Moser J.W. Jr. 1986. A growth model for mixed species stands. *Forest Science*, 32 (3): 697–706.
- Nabuurs G.-J., Päivinen R., Schanz H. 2001. Sustainable management regimes for Europe's forests - a projection with EFISCEN until 2050. *Forest Policy and Economics* 3: 155–173.
- Peng C. 2000. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management* 132: 259–279.
- Porté A., Bartelink H.H. 2002. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling* 150: 141–188.
- Pretzsch H. 2010. *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Heidelberg, Springer.
- Rosset C., Schütz J.-P., Lanz A., Menk J., Gollut C., Weber D. 2013. SiWaWa: Waldwachstumssimulationsmodell der neuen Generation - Das Waldwachstum für den Praktiker leicht gemacht. Schlussbericht. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wald, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, 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). *Raport Final*. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Bern.

- Schütz J.-P., Rosset C. 2016. Des modèles de production et d'aide à la décision sur smartphones. *Rev For Fr* 68: 427–439.
- Schütz J-P., Rosset C. 2020. Performances of different methods of estimating the diameter distribution based on simple stand structure variables in monospecific regular temperate European forests. *Annals of Forest Science*, doi: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00951-3>
- Schütz J-P., Zingg A. 2007. Zuwachsprognose nach der sozialen Hierarchie im Entwicklungs- und Wuchsmodell SiWaWa. Conference paper: Jahrestagung 2007 Deutscher Verband forstl. Forschungsanstalten; Sektion Ertragskunde, At Alsfeld, Volume 2007.
- Siipilehto J., Mehtätalo L. 2013. Parameter recovery vs. parameter prediction for the Weibull distribution validated for scots pine stands in Finland. *Silva Fennica* 47: 1–22.
- Vanclay J. K. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. CAB International, Department of Economics and Natural Resource, Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, Denmark, Wallingford, UK.
- Willmott C. J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2: 184–194.
- ZGS. 2019. Podatkovna zbirka stalnih vzorčnih ploskev. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije.