

ANALIZA IZBRANIH DREVESNIH MODELOV RAZVOJA GOZDOV, PRIMERNIH ZA MODELIRANJE NA VELIKOPROSTORSKI RAVNI, IN MOŽNOSTI NJIHOVE UPORABE V SLOVENIJI

ANALYSIS OF SELECTED SINGLE-TREE GROWTH MODELS SUITABLE FOR LARGE-SCALE MODELLING AND THEIR POTENTIAL USE IN SLOVENIA

Jernej JEVŠENAK¹, Boštjan MALI², Mitja SKUDNIK³

- (1) Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za načrtovanje in monitoring gozdov in krajine, jernej.jevsenak@gozdis.si
Tehniška univerza v Münchnu, Oddelek za ekologijo in upravljanje z ekosistemi
- (2) Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za načrtovanje in monitoring gozdov in krajine, bostjan.mali@gozdis.si
- (3) Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za načrtovanje in monitoring gozdov in krajine, mitja.skudnik@gozdis.si
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire

IZVLEČEK

Prispevek obravnava drevesne modele razvoja gozdov, ki so pomembno orodje pri odločanju, upravljanju in strateških odločitvah na področju gospodarjenja z gozdovi. V Sloveniji smo šele v zadnjih letih pričeli s sistematičnim razvojem področja modeliranja gozdov, ki vključuje razvoj matričnega populacijskega modela, testiranje izbranih modelov iz tujine ter razvoj posameznih komponent modelov. Namen prispevka je predstaviti področje empiričnih drevesnih modelov za modeliranje razvoja gozdov na velikoprostorski ravni. Podrobneje predstavljamo uveljavljene metode za modeliranje posameznih komponent drevesnih modelov, kot so debelinska in višinska rast, razvoj krošnje, mortaliteta ter vrast in pomlajevanje. Opravili smo presojno primernosti izbranih drevesnih modelov z vidika možnosti njihove uporabe v Sloveniji. Ugotovljamo, da imajo modeli SILVA, WEHAM, MASSIMO in CALDIS največje možnosti za uporabo v Sloveniji, saj so vsi primerni za različne gozdne tipe in mešane gozdove z raznomerno zgradbo, ki prevladujejo v Sloveniji. Poleg testiranja obstoječih modelov predlagamo razvoj novih modelov, prilagojenih raznomernim in mešanim sestojem v Sloveniji. Predlagamo tudi razširitev nabora kazalnikov pri gozdnih inventurah ter dodatne meritve značilnosti dreves, npr. lastnosti krošenj, ki bi razširile možnosti modeliranja razvoja gozdov v Sloveniji. V zaključkih razpravljamo tudi o možnosti uporabe strojnega učenja na področju modeliranja razvoja gozdov, saj bi tovrstni modeli lahko predstavljali naslednjo generacijo modelov.

Ključne besede: modeliranje, razvoj gozda, velikoprostorska gozdna inventura, stalne vzorčne ploskve, simulator razvoja gozdov, napovedovanje, gozdarska politika

ABSTRACT

This article discusses single-tree growth models, which have become an important tool for decision-making, management and strategic decisions in the field of forest management. In Slovenia, we have only recently begun systematic development in the field of forest modelling, which includes the development of a matrix population model, testing selected models from abroad and the development of individual model components. The goal of our work is to introduce the field of empirical single-tree models for modelling forest development on a larger scale. We provide a detailed overview of established methods for modelling individual components of tree models, such as radial and height growth, crown recession, mortality, and recruitment and regeneration. We evaluated the suitability of the selected models from the perspective of their applicability in Slovenia. We conclude that the SILVA, WEHAM, MASSIMO and CALDIS models have the greatest potential for use in Slovenia, as they are all suitable for the different forest types and mixed forests with different structure that prevail in Slovenia. In addition to testing the existing models, we propose the development of new models adapted to the heterogeneous and mixed stands in Slovenia. We also propose expanding the set of indicators in forest inventories and measuring additional tree characteristics, such as canopy characteristics, which would expand forest modelling opportunities in Slovenia. In the conclusions, we also discuss the potential use of machine learning in forest development modelling, as this type of model could represent the next generation of forest models.

Key words: modelling, forest development, large-scale forest inventory, permanent sample plots, forest development simulator, forecasting, forest policy

GDK 524.63+524.6:903(045)=163.6

DOI 10.20315/ASetL.130.1

Prispelo / Received: 06. 11. 2022

Sprejeto / Accepted: 07. 02. 2023



1 UVOD

1 INTRODUCTION

Modeli razvoja gozdov so orodje, ki omogoča odgovore na praktična in temeljna raziskovalna vprašanja gozdarske stroke o ključnih procesih v gozdovih (Packalen in sod., 2014). V praksi modele uporabljamo za napovedovanje ključnih komponent razvoja gozdov, kot so prirastek, lesna zaloga, vitalnost, drevesna sestava in pomlajevanje (Von Gadow in Hui, 2013), za presojo izbire različnih pristopov in intenzitete gospodarjenja z gozdovi (Taylor in sod., 2009), ovrednotenje posledic naravnih motenj (de Groot in Ogris, 2019), izračun manjkajočih podatkov v gozdnih inventurah (McRoberts in sod., 2010) in preverjanje trajnosti (Pretzsch in sod., 2002). V zadnjih desetletjih se vse več pozornosti namenja tudi študiji vplivov negativnih posledic podnebnih sprememb in ponoru ogljika v gozdovih, zato postaja modeliranje dinamičnih komponent gozdnih ekosistemov ključno za razumevanje trajnosti tudi v prihodnje (Wallman in sod., 2005).

Začetki prvih modelov razvoja gozdov segajo v konec 18. stoletja (Hartig, 1795), ko so gozdarji razvili prve donosne tablice, ki pa so uporabne predvsem za vrstno čiste enomerne gozdove. Podrobnejši modeli razvoja gozdov pa so se razmahnilo šele v zadnjih desetletjih – sočasno z razvojem informacijske tehnologije, ki danes omogoča zahtevne analize in obdelovanje podatkov ter poganjanje kompleksnih simulacij (Shugart in sod., 2015). V literaturi lahko tako zasledimo številne modele razvoja gozdov in tudi različna združevanja le teh v skupine (Fabrika in Pretzsch, 2013). *Empirični modeli* so zgrajeni na podlagi zakonitosti, ki temeljijo na podatkovnih zbirkah in preteklih opazovanjih procesov (Thürig in sod., 2005), medtem ko *procesni modeli* temeljijo na poznavanju mehanističnih enačb ključnih ekofizioloških procesov (Mäkelä in sod., 2000). *Hibridni modeli* združujejo pristope empiričnih in procesnih modelov (Valentine in Mäkelä, 2005). Med ključne značilnosti modelov sodi objekt modeliranja (Lischke, 2001; Fabrika in Pretzsch, 2013), ki je lahko drevo, sestoj, gozdni tip, ali širše. Prostorska raven je eden ključnih atributov modelov razvoja gozdov, ki vpliva na podrobnost vhodnih podatkov, zahtevano procesorsko moč računalnika, skupno napako in končno uporabno vrednost modela. *Sestojni modeli* imajo najdaljšo tradicijo, so najstarejši in zaradi svoje enostavnosti tudi med najpogosteje uporabljenimi. Namen teh modelov je modeliranje povprečnih drevesnih in sestojnih parametrov, kot so srednja temeljnica, srednji premer, starost, lesna zaloga; običajno v odvisnosti od rastiščnega indeksa (Hasenauer, 2006). Njihova omejitev je, da so uporabni predvsem v enomernih in enodobnih

sestojih, kjer prevladuje ena drevesna vrsta. Sestojni modeli so običajno izpeljani iz empiričnih regresijskih modelov, ki najpogosteje temeljijo na ravnih krivuljah (Fabrika in sod., 2019). V zadnjih desetletjih pa se vse bolj uveljavljajo *drevesni modeli*, pri katerih je osnovna enota modeliranja drevo. Te podrobneje predstavljamo v tem prispevku.

V Sloveniji smo v zadnjih letih pričeli sistematično razvijati področje modeliranja gozdov v okviru CRP-projekta Pregled in presoja modelov razvoja gozdov za gozdnogospodarsko načrtovanje na različni ravneh (Klopčič in sod., 2021), v okviru katerega sta bili opravljeni evalvacija in presoja izbranih modelov z vidika njihove možnosti uporabe v Sloveniji (Ficko in sod., 2016; Klopčič, 2021). Poleg tega je bilo v Sloveniji v preteklosti testiranih le nekaj izbranih modelov, kot sta SLOMATRIX (Ficko in sod., 2016) in EFISCAN (Verkerk in sod., 2016). V zadnjem času smo pričeli tudi z razvojem samostojnih komponent razvoja gozdov, kot so debelinski in temeljnični prirastek (Ficko in Trifković, 2021; Jevšenak in Skudnik, 2021) in višine dreves (Bončina in sod., 2021; Skudnik in Jevšenak, 2022).

Nekoliko več aktivnosti je bilo na področju razvoja posameznih modulov, razvoja modelov na regionalni ravni in uporabe že obstoječih modelov razvoja gozdov za modeliranje rasti izbranih gozdnih tipov. Tako so npr. Ficko in sod. (2016) razvili matrični populacijski model za sestoj poljubne zgradbe (Roessiger in sod., 2016) za tri rastišča z jelko v Sloveniji. Hudernik (2016) je preizkusil avstrijski model MOSES na izbranih jelovo-bukovih sestojih in zaključil, da model daje zanesljive rezultate in ga je mogoče uporabiti kot orodje pri načrtovanju. Klopčič (2021) je testiral model SiWaWa (Schütz in Zingg, 2007) za simuliranje razvoja čistih bukovih in smrekovih enomernih sestojev v Sloveniji, pri čemer je poročal o boljšem delovanju za bukovke gozdove.

Razvitih je bilo tudi nekaj modelov, ki napovedujejo le posamezne komponente razvoja gozdov, npr. lesno zalogo (Debeljak in sod., 2014), temeljnični prirastek (Jevšenak in Skudnik, 2021), debelinski prirastek (Ficko in Trifković, 2021), vrast (Trifković in sod., 2023), model napovedovanja višin (Skudnik in Jevšenak, 2022) ter temeljnični in višinski prirastek (Klopčič in Bončina, 2010; Bončina in sod., 2021). Slednje raziskave utegnejo biti ključnega pomena pri razvoju samostojnega modela razvoja gozdov, prilagojenega našim gozdovom.

Cilj prispevka je predstaviti značilnosti in sestavne dele empiričnih drevesnih modelov razvoja gozdov, ki so primerni za modeliranje na velikoprostorski ravni in temeljijo na podatkih velikopovršinskega gozdnega

monitoringa oz. nacionalne gozdne inventure. Podrobneje predstavljamo uveljavljene metode za modeliranje ključnih komponent drevesnih modelov, kot so debelinska rast, napovedovanje višin dreves, razvoja krošnje, mortalitete in obnove gozda. Predstavljamo prednosti in slabosti izbranih drevesnih modelov, ki se največkrat uporabljajo v primerljivih evropskih državah, in razpravljamo o možnosti njihove uporabe v Sloveniji. V zaključkih podajamo oceno o možnosti razvoja novega modela za Slovenijo, tudi na podlagi algoritmov strojnega učenja, in poudarjamo pomen periodičnega zbiranja podatkov ter vrednotenja modelov razvoja gozdov.

2 DREVESNI MODELI

2 INDIVIDUAL-TREE MODELS

Zaradi prehoda na malopovršinsko gospodarjenje z gozdovi v razvitejšem delu sveta, pospeševanja mešanih sestojnih struktur in zasledovanja cilja trajnosti so drevesni modeli postali nov standard za modeliranje rasti in prirasti na področju modeliranja razvoja gozdov. Zaradi svoje fleksibilnosti lahko natančno opišejo rast posameznih dreves v odvisnosti od njegovih dimenzij, gostote sestoj, kompeticije in rastišča. Drevesni modeli so posebej primerni za modeliranje razvoja mešanih in raznomernih gozdov, saj so kompeticija med posameznimi drevesi ter vplivi naravnih in umetnih motenj bolje zajeti. Poznamo prostorsko odvisne in prostorsko neodvisne drevesne modele. Pri prostorsko odvisnih je za vsako drevo upoštevana tudi njegova lokacija in s tem so lahko izračuni kompeticije realnejši (Burkhart in Tomé, 2012).

Težava pri drevesnih modelih je zahtevnost njihovega razvoja, saj potrebujemo natančne in podrobne podatke o posameznih drevesnih vrstah, poleg tega pa zaradi hierarhične strukture podatkov obstaja tudi večja verjetnost za kopičenje napak (Weiskittel in sod., 2011). Drevesne modele pogosto uporabimo tudi za preučevanje razvoja sestojev, pri čemer združujemo učinek posameznih dreves na raven sestoj. Pri teh modelih je torej vsak sestoj sestavljen iz mozaika posameznih dreves, za katere se simulira njihove interakcije v prostorsko-časovnem sistemu (Pretzsch in sod., 2006). Pomembna razlika med različnimi drevesnimi modeli je način modeliranje mortalitete, pri čemer podrobnejši modeli vključujejo možnost odmrtnosti posameznih delov dreves, večina drevesnih modelov pa predpostavlja odmrtnost celotnega drevesa hkrati (Weiskittel in sod., 2011).

Najpomembnejši atributi pri razlikovanju drevesnih modelov so prostorska odvisnost, korak simulacije, vrsta kalibracije (lokalna ali splošna), možnost

uporabe v mešanih sestojnih tipih, zahteve glede vhodnih podatkov, upoštevanje klime in vrsta izhodnih spremenljivk. V nadaljevanju predstavljamo ključne komponente drevesnih modelov in najpogostejše metodološke pristope pri njihovem modeliranju.

2.1 Pregled glavnih komponent drevesnih modelov

2.1 Overview of the main components of individual-tree models

Med glavne modelne komponente, ki so običajno vgrajene v drevesne modele, sodijo prirastne funkcije (debelinska in višinska rast), indeksi kompeticije, modeli razvoja krošnje (razvoj razmerja krošenj), modeli mortalitete in modeli obnove (vrasti) (Hasenauer, 2006). Višinska in debelinska rast sta ključni komponenti modelov razvoja gozdov (Vospersnik, 2017), medtem ko sta mortaliteta in obnova precej stohastične narave in je predvsem pomembno, da so napovedane vrednosti realne (Hülsmann in sod., 2017). Rast dreves vključuje rast krošnje in vej, korenin, skorje in ksilema na deblu, vendar gozdarje običajno zanimata debelinska in višinska rast, ki največ prispevata k volumenski produkciji (Mäkinen in sod., 2002). Višinska rast je v veliki meri odvisna od dedne zasnove in rastiščnega potenciala, medtem ko je debelinska rast v večji meri povezana z asimilacijskim aparatom in kompeticijskim stanjem posameznega drevesa (Tapeiner II in sod., 2015; Jevšenak in Skudnik, 2021).

2.1.1 Debelinska rast

2.1.1 Radial growth

Natančno napovedovanje debelinskega prirastka v modelih je ključno, saj je le-ta pogosto najpomembnejši parameter za izračun volumenskega prirastka. Drevesa pri mlajših starostih v debelino navadno rastejo hitreje, medtem ko se v odrasli dobi prirastek stabilizira in na medletni ravni variira predvsem v odvisnosti od klimatskih in sestojnih dejavnikov (Black in sod., 2008; Trifković in sod., 2022). Debelinska rast se pri drevesih nikoli ne konča, saj mora drevo zagotoviti rast ksilema in floema, ki sta nujna za preživetje (Jevšenak in sod., 2022).

Debelinski prirastek se lahko izrazi na več načinov, in sicer kot sprememba: 1) premera (Huang in Titus, 1995), 2) temeljnice (Jevšenak in Skudnik, 2021; Bončina in sod., 2023) ali 3) relativna sprememba premera oz. kot prirastni odstotek (Hanssen in sod., 2018). Mnenja o najprimernejšem načinu si niso enotna (Cole in Stage, 1972; West, 1980) in je izbira načina izražanja običajno subjektivna odločitev razvijalca modela. V splošnem lahko ločimo dva koncepta pri modeliranju

debelinske rasti (Weiskittel in sod., 2011): 1) določitev maksimalnega debelinskega prirastka, ki se nato zmanjša na podlagi korekcijskega faktorja, in 2) neposredno napovedovanje na podlagi izbrane metode.

Pristop s korekcijskim faktorjem je prvi predlagal Newnham (1964) in se pogosto uporablja v modelih vrzeli (Bugmann, 2001). Glavna prednost tega pristopa je, da debelinski prirastek nikoli ne bo nerealno visok, vendar pa je maksimalni potencialni prirastek pogosto težko oceniti. Slednjega sta Hahn in Leary (1979) ocenila na podlagi posebej razvitega regresijskega modela, medtem ko je Moore (1989) razvil enačbe za potencialni debelinski prirastek na podlagi podatkov o rasti dreves na prostem. Korekcijski faktor navadno temelji na omejujočih okoljskih in sestojnih dejavnikih ter upoštevajo kompeticijski status drevesa. Pri končnem izračunu debelinskega prirastka se lahko upoštevajo vsi omejujoči dejavniki, ali pa samo tisti, ki je v relativnem smislu najbolj omejujoč.

Neposredno modeliranje debelinskega prirastka je pogostejši pristop in najpogosteje temelji na izbrani enačbi ter neodvisnih spremenljivkah, ki jih lahko razvrstimo v tri skupine: 1) mere drevesa, 2) kompeticija, in 3) rastiščne značilnosti (Wykoff, 1990). Pomembna razlika pri tovrstnih modelih izhaja iz uporabe ali neuporabe starosti kot neodvisne spremenljivke. Starost je v mešanih raznomernih sestojih težje določljiva, zato se uporablja predvsem v enomernih in enodobnih sestojih.

Spremenljivke, ki opisujejo mere drevesa, praviloma pojasnijo največ variabilnosti v modelih za debelinsko priraščanje, druga najpomembnejša kategorija spremenljivk so mere kompeticije (Monserud in Sterba, 1996; Cienfiala in sod., 2016; Jevšenak in Skudnik, 2021). Najobičajnejša opisna spremenljivka za velikost dreves je premer debla na prsni višini (Monserud in Sterba, 1996). Pogosto se za opis značilnosti posameznih dreves uporablja tudi višinski delež krošenj (*ang. crown ratio*), ki pomeni razmerje med višino krošnje in višino drevesa (Hasenauer in Monserud, 1996; Mäkelä in Valentine, 2006). Uveljavljene so še druge mere, ki opisujejo značilnosti krošnje, npr. premer krošnje (Van Laar in Akça, 2007; Buchacher in Ledermann, 2020), vendar se le te redkeje uporabljajo, saj zahtevajo časovno zamudno izmero dodatnih atributov vzorčenih dreves.

Kompeticija sodi med najpomembnejše dejavnike, ki odločilno vplivajo na rast posameznih dreves in sestoja (Curtis, 1970). Glede na pomen ločimo enosmerno in dvosmerno kompeticijo (Weiner, 1990). O enosmerni kompeticiji govorimo, kadar večja drevesa vplivajo na manjša in obratni vpliv ni opredeljen, med-

tem ko se dvosmerna kompeticija izračuna na ravni sestoja in ima enak vpliv na vsa drevesa. Največkrat uporabljena mera enosmerne kompeticije je temeljnica debelejših dreves (*BAL, ang. basal area in large trees*) (Ledermann in Eckmüller, 2004), ki je seštevek posameznih temeljnic za vsa drevesa na ploskvi, ki imajo večji premer kot izbrano drevo. Predlagane so bile različne variacije *BAL*, npr. BAL^2 , $BAL/\text{temeljnica}$ in $BAL/\ln(\text{premer} + k)$, pri čemer k ponazarja korekcijski faktor, ki omogoča boljše prilaganje podatkom (Hann in Hanus, 2002), vendar so z uporabo izpeljank le v določenih primerih poročali o boljših rezultatih (Wykoff, 1990; Kiernan in sod., 2008). Pukkala in sod. (2009) so izračunali *BAL* po posameznih drevesnih vrstah in pokazali učinkovitost takšnega pristopa. Slabost kazalca je njegova predpostavka, da imajo vsa drevesa z istim premerom enak vpliv in ne upošteva značilnosti krošenj, ki so še posebej pomembne v mešanih, raznomernih gozdovih, prevladujočih v Sloveniji (Bončina in sod., 2022). V mešanih gozdovih se tako pogosto uporabljata kompeticijski faktor krošenj (*CCF, ang. crown competition factor*) (Ritchie in Hann, 1985), zastrtost krošenj višjih dreves (*CCH, ang. crown closure in higher trees*) (Weiskittel in sod., 2011) in zastrtost krošnje drevesa na 66 % višine (CC_{66} , *ang. crown closure at 66 %*) (Wensel in sod., 1987). Glavna težava teh kazalcev je, da zahtevajo dodatne meritve krošenj, ki so časovno zahtevne in povezane z dodatnimi stroški. Poleg enosmernih mer kompeticije se uporabljajo tudi dvosmerne, kamor sodijo sestojna temeljnica in njene transformacije, kompeticijski faktor krošenj (Krajčec in sod., 1961), število dreves na hektar ter indeks gostote sestoja (*SDI, ang. stand density index*).

Za opis rastiščnih značilnosti se največkrat uporablja rastiščni indeks, čeprav običajno pojasni le manjši del variabilnosti debelinskega prirastka (Monserud in Sterba, 1996) in je primernejši za enodobne in enomerne sestoje. V mešanih, raznodobnih in raznomernih sestojih se pogosto uporabljajo habitatni tip (Wykoff, 1990), značilnosti tal (Rohner in sod., 2018; Bončina in sod., 2023), razpoložljivi dušik (Laubhann in sod., 2009; Skudnik, 2016) in geografska širina (Andreassen in Tomter, 2003) oziroma se rastišče opredeli s topografskimi spremenljivkami, kot so nadmorska višina, naklon in ekspozicija (Mina in sod., 2018).

Podnebne spremenljivke so prav tako pogosto vključene v modele za napovedovanje debelinskega priraščanja (Kindermann, 2010; Rohner in sod., 2016), vendar navadno pojasnijo manjši del variabilnosti (npr. Trifković in sod., 2022) ali zaradi povezanosti s topografskimi značilnosti celo izpadejo iz modelov (Jevšenak in Skudnik, 2021). Med preostale spremenljiv-

ke, ki so pogosto del modelov za napovedovanje rasti, sodijo spremenljivke, ki opredelijo verjetnost pojava večjih poškodb drevja (biotskih in/ali abiotskih) ter višino poseka (Hann in Hanus, 2002).

2.1.2 Višinska rast

2.1.2 Height growth

Višinska rast ima pri večini drevesnih vrst običajno obliko sigmoidne krivulje: v juvenilni fazi je višinska rast hitrejša in pogosto eksponentna, sledi obdobje maturacije, kjer je višinska rast približno linearna, medtem ko v pozni starosti višina doseže svojo asimptoto in praktično miruje. V primerjavi z debelinskim prirastkom je višinski prirastek težje modelirati, saj je ta bolj odvisen od lokalnih rastiščnih razmer in ima večjo napako meritev (Hasenauer in Monserud, 1997) ter navadno manjši vzorec izmerjenih dreves (Skudnik in Jevšenak, 2022). Tako kot pri debelinskem prirastku se tudi pri višinskem uporabljata dva pristopa za neposredno napovedovanje: 1) na podlagi korekcijskega faktorja, in 2) neposredno s pomočjo regresijskega modela. Poleg tega pa se precej pogosto uporablja tudi posredno napovedovanje višinskega prirastka, ki se izračuna kot razlika v višinah med posameznimi obdobji, pri čemer višine napovedujemo z izbrano višinsko krivuljo, ki ponazarja regresijsko odvisnost med premerom (starostjo) in višino (Mehtätalo in sod., 2015). Korekcijski faktor se pri višinskih prirastkih uporablja pogosteje kot pri debelinskih, saj je potencialno višino enostavno oceniti na podlagi enačb za dominantno višino (Bravo-Oviedo in sod., 2008). Enačbe za oceno dominantne višine lahko vključujejo starost, ki se večinoma uporablja v enodobnih sestojih, medtem ko v mešanih in raznomernih sestojih, ki prevladujejo v Sloveniji, enačbe za napovedovanje višine temeljijo na rastiščnih indeksih (Hann in Ritchie, 1988), kot prilagoditev pa se lahko upošteva tudi gostota dreves (Weiskittel in sod., 2009). V drugem koraku se potencialni višinski prirastek zmanjša na podlagi modifikatorja, ki običajno temelji na dejanski sestojni višini (enodobni gozd) oziroma merah kompeticije in značilnostih krošenj (raznodobni sestoji) (Hann in Hanus, 2002).

Neposredno napovedovanje višinskega prirastka je podobno neposrednemu napovedovanju debelinskega prirastka, pri čemer imajo nekateri modeli različne enačbe za tanjše in debelejša drevja (Crookston in Dixon, 2005). Najpogostejši pristopi vključujejo logaritemsko-linearni (Uzoh in Oliver, 2008) ali nelinearni (Huang in Titus, 1999) model, medtem ko nabor možnih spremenljivk zajema individualne značilnosti dreves (višina, premer, debelinski prirastek, socialni razred), sestojne značilnosti (gostota dreves in sestojna

temeljnica) ter rastiščne značilnosti (rastiščni indeks, nadmorska višina, naklon in ekspozicija).

2.1.3 Rast in razvoj krošnje

2.1.3 Growth and crown development

Značilnosti krošenj pomembno prispevajo k pojasnjevanju variabilnosti rasti dreves (Cole in Lorimer, 1994) in so pogosto vključene v enačbe za napovedovanje višinske in debelinske rasti, zato je sprememba višin krošenj praviloma vključena v drevesne modele razvoja gozdov. Najpogostejši pristop je uporaba statičnih enačb, ki izražajo spremembo višinskega deleža krošnje (CR, *ang. Crown ratio*) ali spremembo višine dna krošnje (HCB, *ang. Height-to-crown-base*) (Hann in Hanus, 2004). CR ali HCB se izračunata za posamezna inventurna obdobja, zaporedne razlike pa predstavljajo ΔCR ali ΔHCB . Neposredno napovedovanje ΔHCB je manj pogost pristop, čeprav se navadno izkaže za natančnejšega (Hann in Hanus, 2004). Uporabljajo se tako linearni kot nelinearni pristopi, z in brez uporabe starosti in prostorske informacije posameznih dreves (Weiskittel in sod., 2011). Podrobnejši pristopi modeliranja rasti in razvoja krošenj potekajo na ravni vej. Weiskittel in sod. (2007) so razvili model za napovedovanje mortalitete posameznih vej v odvisnosti od velikosti, lokacije v drevesu, velikosti krošnje in gostote sestoja, s katerim so izboljšali napoved ΔCR za 15 %. Čeprav so meritve krošenj manj pogoste in modul za spremembe krošenj ni nujno del drevesnih modelov razvoja gozdov, izsledki dosedanjih raziskav jasno kažejo, da je vključevanje modelov za napovedovanje ΔCR ali ΔHCB pomembno in vpliva na natančnost simulacij (Hann in sod., 2006).

2.1.4 Mortaliteteta

2.1.4 Mortality

Mortaliteteta je redek pojav, ki pa ima pomemben vpliv na dolgoročni razvoj sestoja. Razlogi, ki pripeljejo do odmrta posameznega drevesa, so različni in večinoma težko predvidljivi zaradi stohastične narave drevesa (Bugmann in sod., 2019). Povprečna 5-letna stopnja mortalitete na ravni sestoja običajno znaša do 10 % v mlajših razvojnih fazah in največ 1 % v starejših debeljakih (Hasenauer, 2006). Ločimo dva tipa mortalitete: 1) redna mortaliteteta, ki je povezana predvsem s sestojno gostoto in kompeticijo in navadno povzroči odmrta manjšega števila drevesa, ter 2) izredna mortaliteteta, ki je neodvisna od sestojne gostote in je rezultat zunanjih dejavnikov, kot so gradacije podlubnikov, požari, vetrolom in drugi abiotski in biotski dejavniki, ki najpogosteje povzročijo odmrta večjega števila dreves hkrati.

Za določanje redne mortalitete na ravni sestoja se običajno uporablja enačba, ki opisuje odvisnost med številom dreves (N/ha) in srednje kvadratičnim premerom (KSP), pri čemer a_0 in b_0 ponazarjata vrstno specifična parametra (Reineke, 1933; Pretzsch in Biber, 2005): $\log(N) = a_0 - b_0 \cdot \log(KSP)$. Za ocenjevanje obeh parametrov se uporabljajo različni pristopi (Weiskittel in sod., 2011), ki praviloma zahtevajo velik nabor ploskev z gostotami, ki so blizu naravne mortalitete. Alternativni pristop za ovrednotenje mortalitete na ravni sestoja je uporaba algebrične diferenčne enačbe, s katero opišemo spremembo števila dreves v času ali pri različni starosti (Diéguez-Aranda in sod., 2005). Slednji pristop pogosto vključuje rastiščni indeks (Zhao in sod., 2007). Pogosta težava pri diferenčnih enačbah za modeliranje sestojne mortalitete je precejšnja stopnja umrljivosti, zato je Woollons (1998) razvil dvostopenjski pristop, pri katerem se v prvi stopnji izračuna verjetnost, da se bo mortaliteta v sestoji zgodila, v drugi stopnji pa se nato uporabi izbrano enačbo. Za modeliranje mortalitete na ravni posameznega drevesa se navadno uporablja logistična regresija, s katero ocenimo verjetnost, da bo posamezno drevo odmrlo. Najpomembnejša neodvisna spremenljivka za napovedovanje verjetnosti za odmrtnje posameznega drevesa je premer (Wykoff in sod., 1982), medtem ko se kot dodatne spremenljivke pogosto uporabljajo prirastni odstotek (Pretzsch, 2002), razmerje krošnje in kompeticija (Monserud in Sterba, 1999), sestojna temeljnica (Pukkala in sod., 2009) in rastiščni indeks (Bravo in sod., 2001). V nekaterih primerih mortaliteta temelji na preprostih teoretičnih izhodiščih. Npr. Valentine in Mäkelä (2005) sta predpostavili, da drevo umre, ko se delež živega dela krošnje zmanjša pod 10 %. Pri mehanističnih pristopih modeliranje mortalitete za posamezna drevesa najpogosteje temelji na bilanci ogljika (Hartmann, 2015) ali na konceptu prirastne učinkovitosti (Manusch in sod., 2012). Nekateri procesni modeli za določanje mortalitete prav tako upoštevajo Reinekejevo pravilo, ki se potem kaže na mortaliteti najtanjših (zaostalih) dreves v skupini.

2.1.5 Obnova gozda in vrast

2.1.5 Forest regeneration and recruitment

Modeliranje pomlajevanja ter števila vraslih dreves (drevesa, ki presežejo meritveni prag) je podobno kot modeliranje mortalitete zahtevno in zato pogosto ni neposredno vključeno v modele razvoja gozdov (Arseneault in sod., 2008). Kljub temu pa je ustrezno ovrednotenje vrasti zelo pomembno pri dolgoročnih simulacijah predvsem gozdov z naravnim pomlajevanjem, medtem ko je vrast pri modeliranju razvoja nasadov

manj pomembna. Podatkovne baze o razširjenosti in razvoju mladja so redke, zato se večina modelov osredotoča na vrast, ki običajno temelji na dveh ločenih pristopih: 1) statično, in 2) dinamično modeliranje vrasti.

Statični pristopi vključujejo konstantno vrast dreves, ki večinoma ponazarja dolgoročno povprečje (Mendoza in Setyarso, 1986), negativno korelacijo s sestojno temeljnico (Liang, 2010) ali neposredno povezanost z mortaliteto (Bosch, 1971). Dinamični pristopi veljajo za bolj učinkovite in napovedujejo vrast kot funkcijo sestojne gostote, kompeticije, rastiščnega indeksa, drevesne sestave in poseka (Trifković in sod., 2023). Ti modeli so lahko eno- ali dvo-stopenjski. Pri enostopenjskih se vrast napove neposredno na podlagi izbrane enačbe (Shifley in sod., 1993), pri dvostopenjskih pa se v prvem koraku z logistično regresijo izračuna verjetnost za vrast, v drugem koraku pa se nato napove število novih dreves (Adame in sod., 2010). Podoben pristop vključuje tudi uporabo *zero-inflated* modelov (Fortin in DeBlois, 2007).

Kadar modeliramo le skupno število vraslih dreves v mešanih sestojih, je poseben izziv modeliranje drevesne sestave vraslih dreves. Drevesna sestava je lahko določena stohastično (Ferguson in sod., 1986), ohranja dejansko razmerje kot v izhodiščnem letu (Vanclay, 1992), ali pa z uporabo posebnih enačb, kjer kot neodvisne spremenljivke vstopajo kompeticija, maksimalni premer posameznih drevesnih vrst in drugi faktorji (Hasenauer in Kindermann, 2002). V zadnjih letih se pri drevesni sestavi vraslih dreves upoštevajo tudi napovedi spremembe drevesne sestave, ki upoštevata globalno segrevanje (Lexer in sod., 2002).

3 PREGLED IZBRANIH EMPIRIČNIH DREVESNIH MODELOV RAZVOJA GOZDOV

3 OVERVIEW OF SELECTED EMPIRICAL SINGLE-TREE GROWTH MODELS

V literaturi je opisanih več kot 50 različnih modelov razvoja gozdov (Pretzsch in sod., 2015), kar kaže na pomembnost teh orodij za razumevanje prihodnosti gozdov glede na različne predpostavke. V tej študiji smo se osredotočili predvsem na nacionalne modele razvoja gozdov (Preglednica 1), ki so lahko parameterizirani na podlagi podatkov s trajnih vzorčnih ploskev, vzpostavljenih v okviru nacionalnih gozdnih inventur (NGI) ali za potrebe gozdnogospodarskega načrtovanja (stalne vzorčne ploskve – SVP). Izpostavljeni so velikoprostorski modeli, ki so bili razviti in se uporabljajo predvsem v Evropi.

Modeli se med seboj razlikujejo glede na zahtevane vhodne podatke, za kakšen tip gozda so parameterizirani, ali je mogoče vključiti različne načine gospodarje-

nja z gozdovi, kakšen je njihov časovni korak, ali imajo možnost vključevanja različnih podnebnih scenarijev in na kakšnem prostorskem nivoju se lahko prikažejo rezultati.

Na podlagi vseh naštetih kriterijev, s poudarkom na tipu gozda za možnost parametrizacije modela (mešani in raznomerni gozdovi), bi bilo smiselno za slovenske razmere podrobneje preučiti predvsem modele SILVA, WEHAM, MASSIMO in CALDIS.

Od naštetih je model SILVA edini prostorsko odvisen simulator razvoja gozdov, kar pomeni, da pri modeliranju rasti upošteva indekse kompeticije, ki zahtevajo natančno lokacijo za vsako drevo. Vhodni podatki za razvoj modela so bili zbrani na raziskovalnih ploskvah in ploskvah gozdne inventure v Nemčiji. Večina ploskev leži na območju kolinskih oz. nižinskih gozdov. Ko so model testirali za švicarske gozdove, so ugotovili, da je zelo primeren za nižinske gozdove, medtem ko so napake v alpskem območju bistveno večje (Schmid in sod., 2006). Njegova pomanjkljivost je tudi, da model trenutno še ne omogoča vključevanja informacij o različnih podnebnih scenarijih, ki so pomemben dejavnik pri napovedovanju razvoja gozdov v luči podnebnih sprememb (Härkönen in sod., 2019). Hkrati potrebuje model zelo natančne informacije o rastiščih, ki pri nas niso povsod na voljo.

WEHAM je prostorsko neodvisen simulator rasti gozdov, ki je namenjen napovedovanju razvoja lesnih zalog in ocenjevanju prihodnjih in potencialnih zalog lesnih sortimentov. Model je bil razvit v Nemčiji na podlagi podatkov nacionalne gozdne inventure (Bösch in sod., 2016). Prihodnje napovedi na splošno vključujejo pričakovano gospodarjenje z gozdovi. Način gospodarjenja se določi na nivoju regije (ki ustrezajo zveznim deželam Nemčije), lastništva in drevesne vrste. Parametri za vrsto redčenja, intervale in vrsto poseka so opredeljeni pred simulacijo. V primeru mešanih gozdnih sestojev se uporabi režim gospodarjenja za vrste z največjim deležem (Sterba, 1987). WEHAM vključuje tri glavne module, in sicer za rast, mortaliteto (samo za homogene enomerne sestoje), gospodarjenje z gozdovi in razvrščanje lesnih sortimentov. Podobno kot pri drugih empiričnih modelih, ki temeljijo na rasti posameznih dreves, je tudi pri modelu WEHAM možno naknadno združevanje rezultatov po ploskvah, sestojih, območjih in deželah ter glede na drevesne vrste, starostne razrede in kombinacijah le-teh. Nova različica modela omogoča tudi ocenjevanje zalog ogljika in ponora v nadzemni biomasi ter biomase poseka v skladu z metodami za potrebe poročanja UNFCCC. Slabost simulatorja je, da ni klimatsko občutljiv, poleg tega pa je modul za mortaliteto primeren samo za homogene

in enomerne gozdove, kar je v Sloveniji redkost. Obstaja možnost, da se krivulje naravnega redčenja prilagodijo razmeram na slovenskem.

MASSIMO je empirični, stohastični in dinamični simulator rasti drevja, ki temelji na podatkih o drevesih in sestojnih značilnostih zbranih na stalnih vzorčnih ploskvah švicarske NGI. Simulator je empirični, ker so bili podatki iz NGI-ploskev uporabljeni za parametrizacijo modelov rasti drevja, poškodb zaradi ujm, poseka, mortalitete in obnove; stohastični, saj so drevesa, ki so odstranjena iz podatkovne baze živih dreves zaradi poseka ali umrljivosti izbrana slučajnostjo glede na verjetnost odstranitve; in dinamični, ker simulator spremlja spremembe stanja posameznih dreves in vzorčnih ploskev skozi čas (Stadelmann in sod., 2019). Zaradi vsega naštetega bi bil zelo primeren tudi za napovedovanje razvoja slovenskih gozdov. Pomanjkljivost aktualne verzije simulatorja so, da še ne vključuje vplivov klime in atmosferskega useda dušika na rast, mortaliteto in pomlajevanje gozdov.

CALDIS je prostorsko neodvisen simulator rasti gozdov in ima možnost vključevanja vpliva podnebnih sprememb (Ledermann in sod., 2017). Simulator je nadgradnja programa PROGNAUS (Ledermann, 2006). Glavni sestavni deli simulatorja so model temeljničnega (Kindermann, 2010) in višinskega prirastka, model mortalitete zaradi konkurence, model vrasti in sanitarnega poseka (Ledermann, 2017). Poleg glavnih sestavnih delov simulator vsebuje še model spremembe razmerja krošenj (Hasenauer in Monserud, 1996) in širine krošnje (Buchacher in Ledermann, 2020). Modeli so parametrizirani na podlagi podatkov o drevesih in ploskvah NGI. V primerjavi z modelom MASSIMO je slabost modela CALDIS ta, da je bil razvit na podatkih gozdne inventure v Avstriji, kjer so gozdovi v primerjavi s slovenskimi bistveno bolj enomerni in v njih prevladujejo iglavci. Prednost modela CALDIS je kalibracija na daljšem časovnem nizu podatkov, poleg tega pa so bile narejene tudi nekatere izboljšave same strukture modela (Kindermann, 2010).

4 UPORABA MODELOV RAZVOJA GOZDOV NA VELIKOPROSTORSKI RAVNI ZA POTREBE GOZDARSKE POLITIKE V SLOVENIJI

4 APPLICATION OF LARGE-SCALE FOREST DEVELOPMENT MODELS FOR FOREST POLICY NEEDS IN SLOVENIA

V Sloveniji smo pričeli s sistematičnim razvojem področja modeliranja gozdov na nacionalni in regionalni ravni šele v zadnjih desetih letih. Na nacionalni ravni je bil prvi poskus uporaba matričnega modela EFDN-NEAF (*European Forest Dynamic Model – non-even*

Preglednica 1: Pregled značilnosti izbranih drevesnih modelov razvoja gozdov. Okrajšave pri vhodnih podatkih so sledeče: drevesna vrsta (DV), prsni premer drevesa ($d_{1,3}$), višina drevesa (h), nadmorska višina (NMV), razmerje krošnje (CR), temeljnica debelih dreves (BAL), kompeticijski faktor krošnji (CCF), višina drevesa minus višina dmišča krošnje (HCB), nacionalna gozdna inventura (NGI), stalne vzorčne ploskve (SVP).

Table 1: Overview of the characteristics of selected single-tree growth models. Abbreviations for input data are as follows: tree species (DV), tree diameter at breast height ($d_{1,3}$), tree height (h), altitude (NMV), crown ratio (CR), basal area in larger trees (BAL), crown competition factor (CCF), total tree height minus height to crown base (HCB), national forest inventory (NGI), permanent sampling plots (SVP).

Ime (glavni vir)	Vhodni podatki				Tip gozda parametricizacija	Določitev scenarija gospodarjenja	Država razvoja	Časovni korak simulacije	Glavne komponente	Klimatsko občutljiv	Prostorski nivo napovedi		
	NGI/SVP	Pomembnejši podatki o drevesih	Prostorska odvisnost	Pomembnejši podatki o ploskvi ali sestoji							Struktura sestoja	Mešanost/Gl. drev. vrst	Država
PROGNAUS (Ledermann, 2006; Monserud in Sterba, 1996)	NGI	DV, $d_{1,3}$, h, CR, BAL, CCF.	Ne	NMV, naklon, ekspozicija, globina tal, debelina humusnega horizonta, vlažnost tal, tip tal, tip vegetacije, starost.	Enomerni in raznomerni	Igl./list.	Avstrija	5 let	Temeljnični in višinski prirastek dreves, model mortalitete, model vrasti.	Ne	X	X	X
CALDIS (Ledermann, 2017)	NGI	DV, $d_{1,3}$, h, HCB.	Ne	Naklon, ekspozicija, relief, tip tal, tip vegetacije, NMV, vlažnost tal, globina tal, rastiščni indeks, povprečna temperatura in količina padavin, starost.	Enomerni in raznomerni	Igl./list.	Avstrija	1 leto	Temeljnični in višinski prirastek dreves, model mortalitete, model vrasti, model sanitarnega poseka, model CR in CW.	Da	X	X	X
MOSES (Hasenauer in sod., 2006)	SVP, raziskovalne ploskve	DV, $d_{1,3}$, h, HCB, CR, koordinate drevesa.	Da	Rastiščni indeks.	Enomerni in raznomerni	Igl./list.	Avstrija/Švica	5 let	Debelinski in višinski prirastek, dinamični model krošnje, model mortalitete.	Ne	X	(X)	-
MASSIMO (Stadelmann in sod., 2019)	NGI	DV, $d_{1,3}$, h.	Ne	NMV, naklon, globina tal, smer nagnjena, starost, druge lastnosti tal, rastiščni indeks.	Enomerni in raznomerni	Igl./list.	Švica	5/10 let	Debelinski in višinski prirastek, poškodbe zaradi ujm, posek, mortaliteta, obnova in vrast.	(Da)*	-	X	X
BWIN-Pro (Nagel in Schmidt, 2006)	SVP	DV, $d_{1,3}$, h, starost, višina dmišča krošnje, širina krošnje.	Ne	NMV, temperatura, kvaliteta rastišča.	Enomerni in raznomerni	Igl./list.	Nemčija	5 let	Debelinski in višinski prirastek, model kakovosti sortimentov, model mortalitete.	Ne	X	X	X
SILVA (Pretzsch, 2002)	SVP, raziskovalne ploskve	DV, $d_{1,3}$, h, HCB, premer krošnje, koordinate drevesa.	Da	Rastiščni indeks, hranila v tleh, koncentracija NOx in CO2, trajanje vegetacijske periode, povprečna temperatura, sušni indeks, količina padavin, vlažnost tal.	Enomerni in raznomerni	Igl./list. (smreka, jelka, rdeči bor, bukev, graden).	Nemčija	5 let	Debelinski in višinski prirastek, sortimentacija, indeksi strukture sestoja.	(Da)*	X	X	-
WEHAM (Bösch in sod., 2016)	NGI	DV, $d_{1,3}$, h, socialni položaj drevesa, starost.	Ne	Kvaliteta rastišča, zaščitenost.	Raznomerni	Igl./list.	Nemčija	5 let	Prirastni model, model mortalitete za enomerne gozdove, model poseka.	Ne	X	X	X
HEUREKA (RegWi-se) (Wikström in sod., 2011)	NGI/ALS	DV, $d_{1,3}$, h, utež za preračun na hektar, starost, možnost podrobnih podatkov o drevesih iz 3D oblaka točk.	Ne	Site indeks, temperaturna vsota, tip vegetacije, starost, tip in globina tal, vlažnost tal, topografske razmere, razdalja do obale, NMV, ekspozicija.	Enomerni, raznomerni	Rdeči bor, smreka in breza.	Švedska	5 let	Prirastni model, model mortalitete in vrasti.	(Da)*	-	X	X

Ime (glavni vir)	Vhodni podatki			Tip gozda parametricizacija		Določitev scenarija gospo-darjenja	Država razvoja	Časovni korak simulacije	Glavne komponente	Klimatsko občutljiv	Prostorski nivo napovedi		
	NGI/SVP	Pomembnejši podatki o drevesih	Prostorska odvisnost	Pomembnejši podatki o ploskvi ali sestoji	Struktura sestoja						Mešanost/Gl. drev. vrst	Sestoj/parcela	Regija
MELA (Hirvelä in sod., 2017; Hynynen in sod., 2002)	NGI	DV, d _{1,3} , h, starost, CR.	Ne	NMV, temperatura, raba tal, vrsta tal, rastiščni indeks.	Enomerni	Rdeči bor, smreka in breza.	Finska	5 let	Debelinski in višinski prirastek dreves, model vrasti, model mortalitete.	Ne	X	X	X
ORGANON (Hann, 2013)	NGI/SVP	DV, d _{1,3} , h, CR, 5-letni debelinski prirastek.	Ne	Rastiščni indeks, starost sestoja, gostota sadnje.	Enomerni	Igl./list.	ZDA	5 let	Debelinski in višinski prirastek, mortaliteta.	Ne	X	X	-
TASS (Mitchell, 1975)	NGI/SVP	DV, d _{1,3} , drevesna višina, HCB.	Da	Rastiščni indeks, NMV, naklon, ekspozicija, globina tal ter debelina humusnega horizonta, vlažnost tal, talni tip, tip vegetacije.	Enomerni	Igl.	Kanada	1 leto	Debelinski in višinski prirastek, model razvoja krošnji, kompeticija in mortaliteta, sortimentacija.	/	X	X	X

* Vpliv napovedi spremembe klime se upošteva posredno prek npr. korekcijskih faktorjev prirastnih modelov glede na različne klimatske scenarije

ALS – zračni podatki LiDAR

X – napoved je mogoča, (X) – omejena napoved, (-) – napoved ni mogoča

aged forests»), ki sta ga Skudnik in Mali (2015) testirala z uporabo podatkov, zbranih na 760 trajnih vzorčnih ploskvah velikoprostorskega monitoringa gozdov in gozdnih ekosistemov (MGGE), ki so bili zbrani na sistematični mreži 4 km x 4 km prek Slovenije v letih 2000, 2007, 2012 in 2018 (Skudnik in sod., 2021). Simulacija je bila ponovljena za dve skupini gozdov, in sicer za gozdove, razpoložljive za oskrbo z lesom (FAWS; *forests available for wood supply*), in gozdove, nerazpoložljive za oskrbo z lesom (FNAWS; *forests not-available for wood supply*), ter skupaj s 23 evropskimi državami, objavljena v Vauhkonen in sod. (2019). Kot izhodiščno obdobje za simuliranje razvoja gozdov so uporabili leto 2012 in na podlagi sprememb v obdobju 2007–2012 do leta 2040 napovedali razvoj lesne zaloge, poseka in nadzemnih zalog ogljika. Več pozornosti je v preteklosti dobilo področje modeliranja ponorov ogljika, kjer so Jevšenak in sod. (2020) uporabili model CBM (*Carbon Budget Model*) za napovedovanje ponorov glede na predpostavke o različni jakosti poseka na nacionalni ravni. Lindeskog in sod. (2019) so z uporabo izboljšane procesnega modela LPJ-GUESS pripravili napoved razvoja gozdov in emisij ogljika v Sloveniji do leta 2100 po osmih rastiščnih tipih in različnih podnebnih in upravljaljskih scenarijih. Vsekakor se zdi smiselno še naprej ohranjati in spodbujati aktivnosti na področju modeliranja ogljika, ki zaradi globalnega segrevanja ostaja eden izmed ključnih izzivov naše civilizacije.

5 ZAKLJUČEK

5 CONCLUSIONS

5.1 Razvoj novega ali prilagoditev katerega od obstoječih modelov razvoja gozdov?

5.1 Development of a new forest development model or adaptation of an existing one?

Modeliranje razvoja gozdov v Sloveniji je praktično na začetku, saj smo se šele v zadnjem desetletju pričeli resneje ukvarjati z modeliranjem razvoja gozdov, medtem ko so v Severni Ameriki in srednji Evropi že v devetdesetih letih prejšnjega stoletja razvijali samostojne modele. Narejenih je bilo že veliko primerjalnih študij (Vospornik, 2017), ki so ključne pri vrednotenju posameznih modelov. Pri drevesnih modelih je nujno, da evalvacija zajema več ravni, tako individualno drevesno kot tudi sestojno. Pri slednji združimo posamezna drevesa na raven sestoja in preverimo, ali se napovedane vrednosti dobro ujemajo z izmerjenimi. Slednje je še posebej pomembno, kadar nas zanimajo simulacije na višjih ravneh.

Glede na pregled literature se zdi razvoj slovenskega nacionalnega modela razvoja gozdov ustrezna rešitev, vendar sta za ta namen potrebna čas in potr-

pežljivost financerjev. Pri modelih, kot sta MASSIMO in CALDIS, so pričeli z razvojem že pred več kot 20 leti in so rezultat večletnega usmerjenega dela večjih raziskovalnih skupin. Slovenski gozdovi so precej raznoliki in zajemajo tako alpska kot mediteranska, panonska in dinarska rastišča. Čeprav vseh modelov nismo testirali, je malo verjetno, da bi kateri od obstoječih dobro deloval na vseh teh različnih gozdnih tipih brez dodatne parametrizacije. Zato bi bilo smiselno, da začnemo z razvojem novega, za naše razmere optimalnega modela, v tem času pa dobro spoznamo še druge in se učimo na podlagi izkušenj z njimi. Ena izmed možnih poti bi bila tudi, da bi nam v tesnem sodelovanju z avtorji modelov, kot sta MASSIMO ali pa CALDIS, uspelo na podlagi slovenskih podatkov iz velikoprostorskih gozdnih inventur parametrizirati njihove modele rasti, vrasti in mortalitete dreves. S tem bi se kvaliteta napovedi in uporabnost modelov bistveno izboljšali.

5.2 Ključne podatkovne baze za razvoj nacionalnega modela razvoja gozdov

5.2 Key databases for the development of a new national forest development model

Za razvoj lastnih ali parametrizacijo obstoječih simulatorjev razvoja gozdov potrebujemo kvaliteten in redno vzdrževan informacijski sistem za gozdove, ki temelji na rednem zbiranju podatkov o rasti dreves in stanju gozdov na vzorčnih ploskvah, katerih lokacija izpolnjuje pogoje statističnega vzorčenja na območju celotne države. Za razvoj parcialnih modelov, kot so modeli napovedovanja rasti, mortalitete in poseka, potrebujemo podatkovno bazo vzorčnih ploskev, ki zajema vsaj dvakrat ponovljene meritve dreves za modeliranje debelinskega priraščanja, zadostno število meritev višin dreves in krošenj za razvoj višinskih krivulj ter število odmrlih, posekanih in vraslih dreves. V Sloveniji smo z velikoprostorskim monitoringom gozdov, imenovanim Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov (MGGE), pričeli leta 2000 in od takrat opravili tri ponovitve (2007, 2012 in 2018) (Skudnik in sod., 2021). MGGE je potekal na trajnih vzorčnih ploskvah, ki so locirane na sistematični vzorčni mreži 4 km x 4 km prek celotne Slovenije (približno 760 ploskev). Žal podatki niso bili zajeti v enakomernih obdobjih (5-7 let), kar je manj primerno za ocenjevanje petletne stopnje mortalitete in vrasti. Z vidika razvoja modela ta nekonsistentnost pomeni težavo in velik potencial sodobnega vira podatkov vidimo v prestrukturiranju oziroma potencialni umestitvi sistema MGGE v nacionalno gozdno inventuro (NGI), ki se je začela opravljati leta 2020 na neuravnani sistematični mreži 2 km x 2 km prek Slovenije (Skudnik in sod., 2020). Sistem NGI

je zasnovan kot kontinuiran panelni sistem (Gschwanner in sod., 2022), in sicer so ploskve na vzorčni mreži razdeljene v štiri panele. Vsako leto se izmerijo ploskve enega panela, ki prekriva celotno državo in podatki so tako reprezentativni za tekoče leto. Po štirih letih se inventurni cikel konča in po petih letih se ponovno izmeri ploskve prvega panela (Skudnik in Hladnik, 2018). Z uvedbo takšnega sistema smo pridobili informacijski sistem za gozdove, s pomočjo katerega lahko letno zagotavljamo informacijo o stanju gozdov in vzorčni napaki na državni ravni (približno 750 ploskev). Po zaključku inventurnega cikla pa lahko združimo podatke vseh panelov in zagotovimo informacije o stanju gozdov in vzorčni napaki tudi na regionalni ravni (približno 3000 ploskev).

Za potrebe gozdnogospodarskega načrtovanja (GGN) imamo na slovenskem, tako kot v številnih drugih evropskih državah, ločeno od sistema NGI, vzpostavljen sistem gozdne inventure. Namen slednjega je pridobiti podatke o gozdovih, redno na deset let, za potrebe načrtovanja oziroma upravljanja z njimi. Tako Zavod za gozdove Slovenije (ZGS) letno obnovi 1/10 sestojnih kart in ponovi snemanje na približno 1/10 SVP. Posodobitev informacij poteka stratificirano glede na meje gozdnogospodarskih enot (GGE), ki jim je po desetih letih veljavnost načrta potekla. Na podlagi podatkov se obnovijo načrti GGE in hkrati, s pomočjo nove sestojne karte, pridobijo podatki za obnovo gozdnogojitvenih načrtov. ZGS ima na voljo veliko število SVP, leta 2007 pa se je na območju celotne Slovenije začelo opravljati ponovitevno snemanje podatkov (Matijašič in sod., 2010). S tem so bile ploskve za nekatere GGE do danes izmerjene že tretjič. V primeru, da so podatki na SVP po enotni metodologiji konsistentno in skrbno zbrani na terenu, bi lahko bili pomemben vir podatkov za razumevanje rasti slovenskih gozdov, vendar pa so kot vhodni podatek za napovedi razvoja gozdov na nacionalni ravni manj primerni. Glavni razlogi so predvsem v tem:

- da so podatki SVP zbrani stratificirano glede na GGE in le ti niso izbrani naključno, kar pomeni, da letna informacija ni nujno reprezentativna za stanje gozdov na ravni Slovenije, ampak samo na ravni GGE;
- lokacije SVP, ki so v tekočem letu vključene v izmero, ležijo na med seboj neuskkljenih vzorčnih mrežah (izhodišče vzorčenja in gostota mreže);
- časovni intervali med snemanji iste ploskve so deset let kar pomeni, da je na voljo ažuren letni podatek o stanju in spremembah gozdov samo za 1/10 ploskev, medtem ko je za 1/10 ploskev podatek star že devet let.

Z vidika uporabnosti podatkovne baze za nacionalno in regionalno modeliranje oziroma napovedovanje razvoja gozdov, ki jih potrebuje gozdarska politika, bi bilo treba prednostno uporabiti podatke NGI, ki so zbrani v kratkem časovnem intervalu na enotni, dovolj gosti mreži vzorčnih ploskev. Za parametrizacijo nekaterih procesov v modelih in uporabo modelov razvoja gozdov, ki bi delovali na ravni GGE pa so primerni tudi podatki SVP.

V obeh primerih bi bilo za potrebe izboljšanja natančnosti modelov razvoja gozdov v sisteme gozdnih inventur vključiti še druge kazalce, ki bistveno prispevajo k natančnosti napovedi rasti dreves, npr. višine dreves. Zato so bile v letu 2018 na mreži MGGE prvič, z dovolj velikim vzorcem, izmerjene tudi višine dreves in višine krošenj (Skudnik in Jevšenak, 2022). Kazalec se je obdržal tudi v sistemu NGI in predlagamo, da se tovrstna praksa nadaljuje, saj so kvalitetni podatki o višinah in značilnostih krošenj ključnega pomena za razvoj natančne simulacije rasti dreves v prihodnje.

Največjo vrzel vidimo v dodatnih podatkih o krošnjah, ki se običajno zahtevajo v modelih razvoja gozdov (*crown ratio*, *crown length*, HCB) (Buchacher in Ledermann, 2020). Pridobitev teh podatkov bi lahko potekala na terenu. Poleg tega obstaja velik potencial v povezavi natančnih lokacij ploskev s podatki daljinskega zaznavanja predvsem s podatki LiDAR-skih snemanj. S pomočjo teh podatkov bi lahko na nivoju ploskve in drevesa prišli do objektivno prevzetih meritev, potrebnih za izboljšanje modelov rasti dreves.

Pri modeliranju rasti dreves se je kompeticija med drevesi pokazala kot ključna informacija (Jevšenak in Skudnik, 2021). Številni indeksi kompeticije temeljijo na izračunavanju razdalj med drevesi (Kuehne in sod., 2019). Ena izmed trenutnih omejitev pri ploskvah NGI je velikost ploskve, saj smo pri izračunih indeksov kompeticije pogosto hitro omejeni z robnimi drevesi, za katere nimamo na terenu izmerjenih informacij o njihovih konkurentih (Hynynen in Ojansuu, 2003). Te težave se lahko rešujejo s korekcijami vzorčenja, vendar ocenjujemo, da se bodo s pomočjo različnih tehnik daljinskega zaznavanja odprle nove možnosti za zajem podatkov o drevesih na večji površini in s tem tudi zunanaj ploskve, kar bo izboljšalo informacijo o kompeticiji med drevesi.

Na področju modeliranja razvoja gozdov je velika priložnost tudi strojno učenje, ki je še praktično neraziskano na področju modeliranja razvoja gozdov in je bilo do sedaj aplicirano le za modeliranje posameznih komponent razvoja gozdov (Newnham, 1964; Kindermann, 2011; Jevšenak in Skudnik, 2021). Razvili smo model za temeljnični prirastek, relativno hitro bi lahko

razvili še modele strojnega učenja za preostale komponente, kot so višina, mortaliteta in vrast.

6 POVZETEK

6 SUMMARY

The research article is focused on the field of single-tree growth modelling, introducing key modelling components and analysing the selected models and their potential applicability for Slovenian forests. The field of forest development modelling abroad has a long tradition, starting at the end of 18th century when foresters developed the first yield tables for even-aged single-tree species forest stands. More complex forest simulators have been developed in recent decades, alongside the expansion of information technology. The field of forest modelling in Slovenia started to receive more attention in the last 10 years or so. Previous studies include the development of a matrix population model, individual tests of selected models from abroad and partial modelling of specific processes of forest development, i.e. radial and height growth and recruitment. However, to better understand the underlying growth process, carbon balance, future mortality and regeneration, growth and response to environmental changes, it is necessary to improve and adjust the modelling approaches so that they are applicable to all forest ecosystems in Slovenia, enabling long-term projections of forest development at the national scale. Such simulations would be of great benefit to policymakers and decision support systems in forest management.

The objective of our study is to introduce the field of single-tree forest development modelling, focusing on the review of empirical single-tree models and their key components. We focused on models whose input data originate from large-scale forest monitoring or a national forest inventory. The main components of single-tree forest development models are radial and height growth, crown recession, mortality, recruitment and regeneration. Accurate modelling of radial and height growth is of key importance to properly account for changes in wood volume or biomass over time. Both radial and height growth can be modelled 1) as a maximum potential increment multiplied by a modifier or 2) based on a unified equation that predicts realized increment directly. Tree size is commonly found to be the most important variable to explain tree growth, while others are competition, site and topographic characteristics, and climate. Crown recession is difficult to estimate accurately, partly due to limited data with measurement errors, and crown recession is inherently stochastic. Regular tree mortality is relatively rare event, but it has an important effect

on long-term simulations. It can be modelled as a function of stand density, or directly with logistic regression. Forest ingrowth or recruitment is defined as the number of trees that periodically grow into the smallest measured size class of a forest stand. Ingrowth is considered to be a very stochastic process that follows a Poisson distribution, and it is crucial to realistically simulate a long-term forest development of natural forests with continuous forest cover.

We have evaluated the selected individual tree forest development models in terms of their applicability in Slovenian forests. In Table 1, we present their key characteristics in terms of the required input data, the forest types for which they can be parameterized, the possibilities of different forest management methods, spatial and temporal scales, and the inclusion of climate and harvesting scenarios. We concluded that the SILVA, WEHAM, MASSIMO and CALDIS models have the greatest potential to be tested in Slovenia, since all of them are suitable for diverse forest types with mixed tree species and dynamic forest compositions.

In conclusion, we identified the need to develop a new model that would be tailored to the diverse and complex forest types in Slovenia. We also need to be aware of available data, which originates from different sources and has therefore different spatial resolution and revisit frequency. We urge the expansion of existing databases and the collection of additional tree attributes, such as crown characteristics, which would enable more complex modelling approaches with potentially higher accuracy. However, the development of new models is a long-term task; the most widely used models today have been under development for several years. Finally, the development of new model could also be based on the principles of machine learning, i.e. learning from data. It has already been shown that machine learning algorithms can increase the accuracy of predicting individual attributes of trees, and when combined, a machine learning forest simulator could be the next generation of forest modelling.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Študija je bila financirana s strani Agencije Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost v okviru ciljnega raziskovalnega projekta "Razvoj modelov za gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji" (V4-2014), ERA-NET ForestValue projekta ValoFor: "Small Forests – Big Players" in Programske skupine "Gozdna biologija, ekologija in tehnologija" (P4-0107). Zahvaljujemo se recenzentoma za vse konstruktivne predloge in komentarje.

VIRI

REFERENCES

- Adame P., Del Rio M., Canellas I. 2010. Ingrowth model for pyrenean oak stands in north-western Spain using continuous forest inventory data. *European Journal of Forest Research*, 129, 4: 669-678. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0368-1>
- Andreassen K., Tomter S.M. 2003. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. *Forest Ecology and Management*, 180, 1: 11-24. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00560-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00560-1)
- Arseneault J.E., Kershaw J.A. Jr., McCarter J.B., MacLean D.A. 2008. Forest vegetation simulator ingrowth tool: incorporating ingrowth tree lists into forest vegetation simulator growth projections. *Northern Journal of Applied Forestry*, 25, 3: 158-160. <https://doi.org/10.1093/njaf/25.3.158>
- Black B.A., Colbert J.J., Pederson N. 2008. Relationships between radial growth rates and lifespan within North American tree species. *Ecoscience*, 15, 3: 349-357. <https://doi.org/10.2980/15-3-3149>
- Bončina A., Klopčič M., Trifković V., Ficko A., Simončič P. 2023. Tree and stand growth differ among soil classes in semi-natural forests in central Europe. *Catena*, 222: 106854. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106854>
- Bončina A., Trifković V., Bončina Ž. 2021. Modeliranje višinske in debelinske rasti dominantnih dreves ter ocenjevanje indeksov produktivne sposobnosti gozdnih rastišč. *Acta Silvae et Ligni*, 125: 1-12. <https://doi.org/10.20315/ASetL.125.1>
- Bončina Ž., Trifković V., Rosset C., Klopčič M. 2022. Evaluation of estimation methods for fitting the three-parameter Weibull distribution to European beech forests. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 15, 6: 484-490.
- Bösch B., Kändler G., Polley H., Hennig P., Schmitz F., Schadauer K. 2016. WEHAM II - Modelle und Algorithmen Fachkonzept zur Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung. Freiburg. 38 str.
- Bosch C. 1971. Redwoods: A population model. *Science*, 172, 3981: 345-349.
- Bravo-Oviedo A., Tome M., Bravo F., Montero G., Del Rio M. 2008. Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 9: 2348-2358.
- Bravo F., Hann D.W., Maguire D.A. 2001. Impact of competitor species composition on predicting diameter growth and survival rates of Douglas-fir trees in southwestern Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 12: 2237-2247.
- Buchacher R., Ledermann T. 2020. Interregional Crown Width Models for Individual Trees Growing in Pure and Mixed Stands in Austria. *Forests*, 11, 1: 114.
- Bugmann H. 2001. A Review of Forest Gap Models. *Climatic Change*, 51, 3: 259-305.
- Bugmann H., Seidl R., Hartig F., Bohn F., Brūna J., Cailleret M., François L., Heinke J., Henrot A.-J., Hickler T., Hülsmann L., Huth A., Jacquemin I., Kollas C., Lasch-Born P., Lexer M. J., Merganič J., Merganičová K., Mette T., Miranda B. R., Nadal-Sala D., Rammer W., Rammig A., Reineking B., Roedig E., Sabaté S., Steinkamp J., Suckow F., Vacchiano G., Wild J., Xu C., Reyser C.P.O. 2019. Tree mortality submodels drive simulated long-term forest dynamics: assessing 15 models from the stand to global scale. *Ecosphere*, 10, 2: e02616.
- Burkhardt H.E., Tomé M. 2012. Indices of individual-tree competition. V: Modeling forest trees and stands. Dordrecht, Springer Netherlands: 201-232.
- Cienciala E., Russ R., Šantrůčková H., Altman J., Kopáček J., Hůnová I., Štěpánek P., Oulehle F., Tumajer J., Stáhl G. 2016. Discerning environmental factors affecting current tree growth in Central Europe. *Science of the Total Environment*, 573: 541-554.

- Cole D., Stage A. 1972. Estimating future diameters of Lodgepole Pine trees. USDA Forest Service research paper INT, 131: 20 str.
- Cole W.G., Lorimer C.G. 1994. Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwood stands. *Forest Ecology and Management*, 67, 1-3: 159-175.
- Crookston N.L., Dixon G.E. 2005. The forest vegetation simulator: a review of its structure, content, and applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49, 1: 60-80.
- Curtis R.O. 1970. Stand density measures: an interpretation. *Forest Science*, 16, 4: 403-414.
- de Groot M., Ogris N. 2019. Short-term forecasting of bark beetle outbreaks on two economically important conifer tree species. *Forest Ecology and Management*, 450: 117495.
- Debeljak M., Poljanec A., Ženko B. 2014. Modelling forest growing stock from inventory data: A data mining approach. *Ecological Indicators*, 41: 30-39.
- Diéguez-Aranda U., Castedo-Dorado F., Álvarez-González J. G., Rodríguez-Soalleiro R. 2005. Modelling mortality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in the northwest of Spain. *European Journal of Forest Research*, 124, 2: 143-153.
- Fabrika M., Pretzsch H. 2013. Forest ecosystem analysis and modelling. Technical university of Zvolen, Department of forest management and geodesy: 619.
- Fabrika M., Valent P., Merganičová K. 2019. Forest modelling and visualisation – state of the art and perspectives. *Central European Forestry Journal*, 65, 3-4: 147.
- Ferguson D.E., Stage A.R., Boyd R.J. 1986. Predicting regeneration in the grand fir-cedar-hemlock ecosystem of the northern Rocky Mountains. *Forest Science*, 32, suppl_1: a0001-z0001.
- 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: An International Journal of Forest Research*, 89, 4: 412-421.
- Ficko A., Trifković V. 2021. Primerjava različnih regresijskih modelov za napovedovanje debelinskega priraščanja jelke. *Acta Silvae et Ligni*, 126: 61-76.
- Fortin M., DeBlois J. 2007. Modeling tree recruitment with zero-inflated models: The example of hardwood stands in southern Quebec, Canada. *Forest Science*, 53, 4: 529-539.
- Gschwantner T., Alberdi I., Bauwens S., Bender S., Borota D., Bosela M., Bouriaud O., Breidenbach J., Donis J., Fischer C., Gasparini P., Heffernan L., Hervé J.-C., Koložs L., Korhonen K.T., Koutsias N., Kováčevics P., Kučera M., Kulbokas G., Kuliešis A., Lanz A., Lejeune P., Lind T., Marin G., Morneau F., Nord-Larsen T., Nunes L., Pantić D., Redmond J., Rego F.C., Riedel T., Šebeň V., Sims A., Skudnik M., Tomter S.M. 2022. Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonisation. *Forest Ecology and Management*, 505: 119868.
- Hahn J.T., Leary R.A. 1979. Potential diameter growth functions. A generalized forest growth projection system applied to the Lake States region: 22-26.
- Hann D. 2013. ORGANON user's manual edition 9.1 [computer manual]. Oregon State University, Department of Forest Resources, Corvallis.
- Hann D.W., Hanus M.L. 2002. Enhanced diameter-growth-rate equations for undamaged and damaged trees in southwest Oregon. (Research contribution, 39). Oregon State University, College of Forestry, Forest Research Laboratory. <https://cips.forestry.oregonstate.edu/sites/cips/files/Hann%20and%20Hanus%2C%20rc39.pdf> (3. 4. 2023)
- Hann D.W., Hanus M.L. 2004. Evaluation of nonspatial approaches and equation forms used to predict tree crown recession. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 10: 1993-2003.
- Hann D.W., Marshall D.D., Hanus M.L. 2006. Reanalysis of the SMC-ORGANON equations for diameter-growth rate, height-growth rate, and mortality rate of Douglas-fir. (Research contribution, 49). Oregon State University, College of Forestry, Forest Research Laboratory. <http://hdl.handle.net/1957/7886>
- Hann D.W., Ritchie M.W. 1988. Height growth rate of Douglas-fir: a comparison of model forms. *Forest Science*, 34, 1: 165-175.
- Hanssen K.H., Fløistad I.S., Granhus A., Sjøgaard G. 2018. Harvesting of logging residues affects diameter growth and pine weevil attacks on Norway spruce seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33, 1: 40-49.
- Härkönen S., Neumann M., Mues V., Berninger F., Bronisz K., Cardellini G., Chirici G., Hasenauer H., Koehl M., Lang M., Merganicova K., Mohren F., Moiseyev A., Moreno A., Mura M., Muys B., Olschofsky K., Del Perugia B., Rørstad P.K., Solberg B., Thivolle-Cazat A., Trotsiuk V., Mäkelä A. 2019. A climate-sensitive forest model for assessing impacts of forest management in Europe. *Environmental Modelling & Software*, 115: 128-143.
- Hartig G.L. 1795. Anweisung zur Taxation der Forste, oder zur Bestimmung des Holzertrags der Wälder: Ein Beytrag zur höheren Forstwissenschaft: Nebst einer illuminirten Forst-Charte und mehreren Tabellen. Giessen, Heyer. <https://www.digitale-sammlungen.de/en/view/bsb10295671?page=1> (3. 4. 2023)
- Hartmann H. 2015. Carbon starvation during drought-induced tree mortality—are we chasing a myth? *Journal of Carbon Hydraulics*, 2, e005. <https://doi.org/10.20870/jph.2015.e005>
- Hasenauer H. 2006. Sustainable forest management: growth models for Europe. Springer.
- Hasenauer H., Kindermann G. 2002. Methods for assessing regeneration establishment and height growth in uneven-aged mixed species stands. *Forestry*, 75, 4: 385-394.
- Hasenauer H., Kindermann G., Steinmetz P. 2006. The tree growth model MOSES 3.0. V: Sustainable forest management. Springer: 64-70. https://doi.org/10.1007/3-540-31304-4_5
- Hasenauer H., Monserud R.A. 1996. A crown ratio model for Austrian forests. *Forest Ecology and Management*, 84, 1-3: 49-60.
- Hasenauer H., Monserud R.A. 1997. Biased predictions for tree height increment models developed from smoothed 'data'. *Ecological Modelling*, 98, 1: 13-22.
- Hirvelä H., Härkönen K., Lempinen R., Salminen O. 2017. MELA2016 reference manual. Helsinki, Luke. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-358-1> (3. 4. 2023)
- Huang S., Titus S.J. 1995. An individual tree diameter increment model for white spruce in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 9: 1455-1465.
- Huang S., Titus S.J. 1999. An individual tree height increment model for mixed white spruce-aspen stands in Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 123, 1: 41-53.
- Hudernik J. 2016. Validacija rastnega modela MOSES v jelovo-bukovih gozdovih v Sloveniji: magistrsko delo - 2. stopnja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 49 str. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=115253> (3. 4. 2023)
- Hülsmann L., Bugmann H., Brang P. 2017. How to predict tree death from inventory data — lessons from a systematic assessment of European tree mortality models. *Canadian Journal of Forest Research*, 47, 7: 890-900.
- Hynynen J., Ojansuu R. 2003. Impact of plot size on individual-tree competition measures for growth and yield simulators. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 33, 3: 455-465.
- Hynynen J., Ojansuu R., Hökkä H., Siipilehto J., Salminen H., Haapala P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Vantaa, Vantaa research center. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1815-X> (3. 4. 2023)

- Jevšenak J., Gričar J., Rossi S., Prislán P. 2022. Modelling seasonal dynamics of secondary growth in R. *Ecography*, 2022, 9: e06030.
- Jevšenak J., Klopčič M., Mali B. 2020. The Effect of Harvesting on National Forest Carbon Sinks up to 2050 Simulated by the CBM-CFS3 Model: A Case Study from Slovenia. *Forests*, 11, 10: 1090.
- Jevšenak J., Skudnik M. 2021. A random forest model for basal area increment predictions from national forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 479: 118601.
- Kiernan D.H., Bevilacqua E., Nyland R.D. 2008. Individual-tree diameter growth model for sugar maple trees in uneven-aged northern hardwood stands under selection system. *Forest Ecology and Management*, 256, 9: 1579-1586.
- Kindermann G. 2010. A climate sensitive refining of the basal area increment model in PrognAus. *Austrian Journal of Forest Science*, 127, 3/4: 147-178.
- Kindermann G.E. 2011. The development of a simple basal area increment model. *Nature Precedings*. <https://doi.org/10.1038/npre.2011.6301.1>
- Klopčič M. 2021. Preverjanje uporabnosti modela SiWaWa za simuliranje razvoja čistih bukovih in smrekovih enomernih sestojev v Sloveniji. *Gozdarski vestnik*, 1, 79: 3-20.
- Klopčič M., Bončina A. 2010. Patterns of tree growth in a single tree selection silver fir-European beech forest. *Journal of Forest Research*, 15, 1: 21-30.
- Klopčič M., Bončina A., Ficko A., Grošelj P., Guček M., Jevšenak J., Mali B., Poljanec A., Skudnik M., Bončina Ž., Šmidovnik T., Trifković V. 2021. Pregled in presoja modelov razvoja gozdov za gozdnogospodarsko načrtovanje na različnih prostorskih ravneh: zaključno vsebinsko poročilo CRP projekta V4-1821. Ljubljana, Biotehniška fakulteta. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=126922> (3. 4. 2023)
- Krajčicek J.E., Brinkman K.A., Gingrich S.F. 1961. Crown competition—a measure of density. *Forest Science*, 7, 1: 35-42.
- Kuehne C., Weiskittel A.R., Waskiewicz J. 2019. Comparing performance of contrasting distance-independent and distance-dependent competition metrics in predicting individual tree diameter increment and survival within structurally-heterogeneous, mixed-species forests of Northeastern United States. *Forest Ecology and Management*, 433: 205-216.
- Laubhann D., Sterba H., Reinds G.J., De Vries W. 2009. The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. *Forest Ecology and Management*, 258, 8: 1751-1761.
- Ledermann T. 2006. Description of PrognAus for Windows 2.2. V: Sustainable forest management: growth models for Europe. Hasenauer H. (ur.). Berlin, Heidelberg, Springer: 71-78.
- Ledermann T. 2017. Ein Modell zur Abschätzung der Zufallsnutzungen in Österreich. V: Beiträge zur Jahrestagung 2017 in Untermarchtal/Baden-Württemberg. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde. Freiburg, DVFFA: 9-19.
- Ledermann T., Eckmüllner O. 2004. A method to attain uniform resolution of the competition variable Basal-Area-in-Larger Trees (BAL) during forest growth projections of small plots. *Ecological Modelling*, 171, 1-2: 195-206.
- Ledermann T., Kindermann G., Gschwantner T. 2017. National woody biomass projection systems based on forest inventory in Austria. V: Forest inventory-based projection systems for wood and biomass availability. Barreiro S., Schelhaas M.J., McRoberts R.E., Kändler G. (ur.). Switzerland, Springer International Publishing: 79-95.
- Lexer M.J., Hönninger K., Scheifinger H., Matulla C., Groll N., Kromp-Kolb H., Schadauer K., Starlinger F., Englisch M. 2002. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 162, 1: 53-72.
- Liang J. 2010. Dynamics and management of Alaska boreal forest: An all-aged multi-species matrix growth model. *Forest Ecology and Management*, 260, 4: 491-501.
- Lindeskog M., Ficko A., Smith B., Poljanec A. 2019. Estimation of future carbon pools in Slovenian forests. V: Prilagojeni režimi upravljanja z gozdovi, vključno z oceno tveganja zaradi potencialnih podnebnih sprememb za oblikovanje političnih odločitev (SUMFOREST ERA-NET): zaključno poročilo o rezultatih opravljenega raziskovalnega dela na projektu FOREXCLIM v okviru iniciative ERA-NET SUMFOREST (31. 3. 2017–31. 3. 2020). Ficko A. (ur.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta UL, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=132287> (3. 4. 2023)
- Lischke H. 2001. New development in forest modeling: convergence between applied and theoretical approaches. *Natural Resource Modeling*, 14, 1: 71-102.
- Mäkelä A., Landsberg J., Ek A.R., Burk T.E., Ter-Mikaelian M., Ågren G.I., Oliver C.D., Puttonen P. 2000. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology*, 20, 5-6: 289-298.
- Mäkelä A., Valentine H.T. 2006. Crown ratio influences allometric scaling in trees. *Ecology*, 87, 12: 2967-2972.
- Mäkinen H., Nöjd P., Isomäki A. 2002. Radial, height and volume increment variation in *Picea abies* (L.) Karst. stands with varying thinning intensities. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17, 4: 304-316.
- Manusch C., Bugmann H., Heiri C., Wolf A. 2012. Tree mortality in dynamic vegetation models – A key feature for accurately simulating forest properties. *Ecological Modelling*, 243: 101-111.
- Matijašič D., Pisek R., Devjak T., Kotnik A., Podgornik M., Gartner A., Kozorog E., Bogovič B., Udovič M. 2010. Navodila za snemanje na stalnih vzorčnih ploskvah. Ljubljana. Zavod za gozdove Slovenije. http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/OBVES-TILA_SLO/Narocila_male_vrednosti/2013/Navodila_snemanje_staln_vzorcnih_ploskvah.pdf (3. 4. 2023)
- McRoberts R.E., Tomppo E.O., Næsset E. 2010. Advances and emerging issues in national forest inventories. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25, 4: 368-381.
- Mehtätalo L., de-Miguel S., Gregoire T.G. 2015. Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 7: 826-837.
- Mendoza G., Setyarso A. 1986. A transition matrix forest growth model for evaluating alternative harvesting schemes in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 15, 3: 219-228.
- Mina M., Huber M.O., Forrester D.I., Thürig E., Rohner B. 2018. Multiple factors modulate tree growth complementarity in Central European mixed forests. *Journal of Ecology*, 106, 3: 1106-1119.
- Mitchell K.J. 1975. Dynamics and simulated yield of Douglas-fir. *Forest Science*, 21, suppl_1: 1-39.
- Monserud R.A., Sterba H. 1996. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 80, 1: 57-80.
- Monserud R.A., Sterba H. 1999. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *Forest Ecology and Management*, 113, 2-3: 109-123.

- Moore A.D. 1989. On the maximum growth equation used in forest gap simulation models. *Ecological Modelling*, 45, 1: 63-67.
- Nagel J., Schmidt M. 2006. The silvicultural decision support system BWINPro. V: Sustainable forest management: growth models for Europe. Hasenauer H. (ur.). Berlin, Heidelberg: 59-63. https://doi.org/10.1007/3-540-31304-4_4
- Newnham R.M. 1964. The development of a stand model for Douglas fir: dissertation. University of British Columbia: 201 str. <http://hdl.handle.net/2429/38329>
- Packalen T., Sallnaes O., Sirkia S., Korhonen K., Salminen O., Vidal C., Robert N., Colin A., Belouard T., Schadauer K., Berger A., Rego F., Louro G., Camia A., Rätty M., San-Miguel-Ayanz J. 2014. The European forestry dynamics model: concept, design and results of first case studies. Luxembourg, Publication Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/153990>
- Pretzsch H. 2002. Application and evaluation of the growth simulator SILVA 2.2 for forest stands, forest estates and large regions. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 121: 28-51.
- Pretzsch H., Biber P. 2005. A re-evaluation of Reineke's rule and stand density index. *Forest Science*, 51, 4: 304-320.
- Pretzsch H., Biber P., Durský J., von Gadow K., Hasenauer H., Kändler G., Kenk G., Kublin E., Nagel J., Pukkala T., Skovsgaard J. P., Sotke R., Sterba H. 2006. Standardizing and categorizing tree growth models. V: Sustainable forest management: growth models for Europe. Hasenauer H. (ur.). Berlin, Heidelberg, Springer: 39-57. https://doi.org/10.1007/3-540-31304-4_3
- Pretzsch H., Biber P., Durský J., von Gadow K., Hasenauer H., Kändler G., Kenk G., Kublin E., Nagel J., Pukkala T., Skovsgaard J. P., Sotke R., Sterba H. 2002. Recommendations for standardized documentation and further development of forest growth simulators. *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch*, 121, 3: 138-151.
- Pretzsch H., Forrester D.I., Rötzer T. 2015. Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, 313: 276-292.
- 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.
- Reineke L. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638. *Journal of agricultural research*, 46: 627-638.
- Ritchie M.W., Hann D.W. 1985. Equations for predicting basal area increment in Douglas-fir and grand fir. (Research bulletin, 51). Oregon State University, College of Forestry, Forest Research Laboratory. <http://hdl.handle.net/1957/7944>
- Roessiger J., Ficko A., Clasen C., Griess V.C., Knoke T. 2016. Variability in growth of trees in uneven-aged stands displays the need for optimizing diversified harvest diameters. *European Journal of Forest Research*, 135, 2: 283-295.
- Rohner B., Waldner P., Lischke H., Ferretti M., Thürig E. 2018. Predicting individual-tree growth of central European tree species as a function of site, stand, management, nutrient, and climate effects. *European Journal of Forest Research*, 137, 1: 29-44.
- Rohner B., Weber P., Thürig E. 2016. Bridging tree rings and forest inventories: How climate effects on spruce and beech growth aggregate over time. *Forest Ecology and Management*, 360: 159-169.
- Schmid S., Zingg A., Biber P., Bugmann H. 2006. Evaluation of the forest growth model SILVA along an elevational gradient in Switzerland. *European Journal of Forest Research*, 125, 1: 43-55.
- Schütz J.-P., Zingg A. 2007. Zuwachsprognose nach der sozialen Hierarchie im Entwicklungs- und Wuchsmodell SiWaWa. *Jahrestagung*: 180-187.
- Shifley S.R., Ek A.R., Burk T.E. 1993. A generalized methodology for estimating forest ingrowth at multiple threshold diameters. *Forest Science*, 39, 4: 776-798.
- Shugart H.H., Asner G.P., Fischer R., Huth A., Knapp N., Le Toan T., Shuman J.K. 2015. Computer and remote-sensing infrastructure to enhance large-scale testing of individual-based forest models. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13, 9: 503-511.
- Skudnik M. 2016. Mahovi kot kazalci vnosa dušikovih spojin v naravne ekosisteme Slovenije in primerjava z nekaterimi drugimi metodami bioindikacije = Mosses as indicators of nitrogen input into the natural ecosystems of Slovenia and comparison with some other methods of bioindication. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=115374> (3. 4. 2023)
- Skudnik M., Grah A., Guček M., Kušar G., Pintar A.M., Pisek R., Planinšek Š., Poljanec A., Žlogar J. 2020. Nacionalna gozdna inventura: interna navodila za terensko delo (ver. 02/2020). Skudnik M. (ur.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije. <https://dirros.openscience.si/IzpisGradiva.php?id=15132> (4. 3. 2023)
- Skudnik M., Hladnik D. 2018. Predlog o organiziranju nacionalne gozdne inventure za mednarodno in domače poročanje o trajnostnem gospodarjenju z gozdovi = Suggestion for Organizing National Forest Inventory for International and National reports on Sustainable Forest Management. *Gozdarski vestnik*, 76, 7-8: 319-331.
- Skudnik M., Jevšenak J. 2022. Artificial neural networks as an alternative method to nonlinear mixed-effects models for tree height predictions. *Forest Ecology and Management*, 507: 120017.
- Skudnik M., Jevšenak J., Poljanec A., Kušar G. 2021. Condition and changes of Slovenian forests in the last two decades - results of the State and changes large-scale spatial forest monitoring. *Gozdarski vestnik*, 79, 4: 151-170.
- Skudnik M., Mali B. 2015. SC15 EFDM Country Report Slovenia. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije.
- Stadelmann G., Temperli C., Rohner B., Didion M., Herold A., Rösler E., Thürig E. 2019. Presenting MASSIMO: A management scenario simulation model to project growth, harvests and carbon dynamics of Swiss forests. *Forests*, 10, 2: 94.
- Sterba H. 1987. Estimating potential density from thinning experiments and inventory data. *Forest Science*, 33, 4: 1022-1034.
- Tappeiner II J.C., Bailey J.D., Harrington T.B., Maguire D.A. 2015. Silviculture and ecology of western US forests. Oregon State University Press.
- Taylor A.R., Chen H.Y.H., VanDamme L. 2009. A Review of Forest Succession Models and Their Suitability for Forest Management Planning. *Forest Science*, 55, 1: 23-36.
- Thürig E., Kaufmann E., Frisullo R., Bugmann H. 2005. Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model. *Forest Ecology and Management*, 204, 1: 53-68.
- Trifković V., Bončina A., Ficko A. 2022. Analyzing asymmetries in the response of European beech to precipitation anomalies in various stand and site conditions using decadal diameter censuses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327: 109195.
- Trifković V., Bončina A., Ficko A. 2023. Recruitment of European beech, Norway spruce and silver fir in uneven-aged forests: optimal and critical stand, site and climatic conditions. *Forest Ecology and Management*, 529: 120679.
- Uzoh F.C.C., Oliver W.W. 2008. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model. *Forest Ecology and Management*, 256, 3: 438-445.
- Valentine H.T., Mäkelä A. 2005. Bridging process-based and empirical approaches to modeling tree growth. *Tree Physiology*, 25, 7: 769-779.
- Van Laar A., Akça A. 2007. Forest mensuration. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5991-9>

- Vanclay J.K. 1992. Modelling regeneration and recruitment in a tropical rain forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 9: 1235-1248.
- Vauhkonen J., Berger A., Gschwantner T., Schadauer K., Lejeune P., Perin J., Pitchugin M., Adolt R., Zeman M., Johannsen V.K., Kopper-Rojas S., Sims A., Bastick C., Morneau F., Colin A., Bender S., Kováčevics P., Solti G., Kolozs L., Nagy D., Nagy K., Twomey M., Redmond J., Gasparini P., Notarangelo M., Rizzo M., Makovskis K., Lazdins A., Lupikis A., Kulbokas G., Antón-Fernández C., Rego F.C., Nunes L., Marin G., Calota C., Pantić D., Borota D., Roessiger J., Bosela M., Šebeň V., Skudnik M., Adame P., Alberdi I., Cañellas L., Lind T., Trubins R., Thürig E., Stadelmann G., Ditchburn B., Ross D., Gilbert J., Halsall L., Lier M., Packalen T. 2019. Harmonised projections of future forest resources in Europe. *Annals of Forest Science*, 76, 3: 79.
- Verkerk P., Schelhaas M., Immonen V., Hengeveld G., Kiljunen J., Lindner M., Nabuurs G., Suominen T., Zudin S. 2016. Manual for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 4.1). European Forest Institute: 49 str. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/tr_99.pdf (3. 4. 2023)
- Von Gadow K., Hui G. 2013. Modelling forest development. (*Forestry Sciences*, 57). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4816-0>
- Vospernik S. 2017. Possibilities and limitations of individual-tree growth models—A review on model evaluations. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 68, 2: 103-112.
- Wallman P., Svensson M.G.E., Sverdrup H., Belyazid S. 2005. ForSAFE—an integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments. *Forest Ecology and Management*, 207, 1: 19-36.
- Weiner J. 1990. Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 5, 11: 360-364.
- Weiskittel A.R., Hann D.W., Hibbs D.E., Lam T.Y., Bluhm A.A. 2009. Modeling top height growth of red alder plantations. *Forest Ecology and Management*, 258, 3: 323-331.
- Weiskittel A.R., Hann D.W., Kershaw Jr J.A., Vanclay J.K. 2011. *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119998518>
- Weiskittel A.R., Maguire D.A., Monserud R.A. 2007. Response of branch growth and mortality to silvicultural treatments in coastal Douglas-fir plantations: Implications for predicting tree growth. *Forest Ecology and Management*, 251, 3: 182-194.
- Wensel L., Meerschaert W., Biging G. 1987. Tree height and diameter growth models for northern California conifers. *Hilgardia*, 55, 8: 1-20.
- West P. 1980. Use of diameter increment and basal area increment in tree growth studies. *Canadian Journal of Forest Research*, 10, 1: 71-77.
- Wikström P., Edenius L., Elfving B., Eriksson L., Lämås T., Sonesson J., Öhman K., Wallerman J., Waller C., Klintebäck F. 2011. The Heureka forestry decision support system: an Overview. *International journal of mathematical and computational forestry & natural-resource sciences*, 3, 2: 87-95.
- Woollons R. 1998. Even-aged stand mortality estimation through a two-step regression process. *Forest Ecology and Management*, 105, 1-3: 189-195.
- Wykoff W.R. 1990. A Basal Area Increment Model for Individual Conifers in the Northern Rocky-Mountains. *Forest Science*, 36, 4: 1077-1104.
- Wykoff W. R., Crookston N. L., Stage A. R. 1982. *User's Guide to the Stand Prognosis Model*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: 112 str.
- Zhao D., Borders B., Wang M., Kane M. 2007. Modeling mortality of second-rotation loblolly pine plantations in the Piedmont/Upper Coastal Plain and Lower Coastal Plain of the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 252, 1-3: 132-143.