

Določanje prostornine dreves s krivuljami za opis oblike debla (KOOD)

Determining Tree Volume Using Taper Functions

Luka KRAJNC¹, Gal KUŠAR¹

Izvleček:

Krivulje za opis oblike debla (KOOD) (ang. t.i. »taper functions«) zvezno opisujejo odnos med višino drevesa in premerom debla na ravni posameznega drevesa, od tal do vrha drevesa. Z njihovo uporabo lahko na katerikoli višini od tal (ali od vrha drevesa) določimo premer debla in tako lahko npr. pri izračunih prostornine drevesa ali sortimentov izberemo poljuben zgornji najmanjši premer, izračunamo srednje premere posameznih sortimentov ali izračunamo prostornino posameznih poljubno izbranih delov debla. Kar potrebujemo za izračun prostornin kot vhodni podatek, je drevesna vrsta, prsni premer ter višina (izmerjena ali izračunana iz višinske krivulje) ter KOOD. Na primeru smreke predstaviva prednosti in omejitve omenjenih krivulj ter narediva primerjavo izdelane slovenske KOOD za smreko in obstoječih nemških KOOD. Rezultati določanja prostornine dreves po obeh KOOD so primerljivi. S pomočjo sekcijskih meritev premerov, bodisi ročnih ali optičnih, lahko tuje KOOD lokalno prilagodimo za slovenske razmere. Z uporabo KOOD izboljšamo zanesljivost določanja prostornine dreves in omogočimo nove preračune prostornin potencialnih sortimentov.

Ključne besede: taper krivulje, krivulje za opis oblike debla (KOOD), izračun prostornine drevesa, smreka

Abstract:

Taper functions continuously describe the relationship between the tree height and the trunk diameter at the level of an individual tree from the ground to the top of the tree. Using them, we can determine the trunk diameter at any height from the ground (or top of the tree) and can, e.g., calculate the volume of the tree or assortment, select an optional upper minimum diameter, calculate median diameters of individual assortments, or calculate the volume of individual optionally selected trunk parts. Tree species, diameter at breast height, height (measured or calculated from the height function), and taper function are the input data we need for calculating the volumes. In the example of spruce, we present the advantages and limitations of the mentioned functions and compare our own taper functions with existing German taper functions. The results of determining tree volume by both taper functions are comparable. Using section measurements of the diameters, manual or optical ones, we can locally adapt foreign taper functions for the Slovenian situation. Using taper functions, we improve the reliability of tree volume determination and enable new calculations of the potential assortments' volumes.

Key words: taper functions, calculation of tree volume, spruce

1 UVOD

1.1 Splošno o krivuljah za opisovanje oblike debla (KOOD)

Krivulje za opis oblike debla (KOOD) (ang. t.i. »taper functions«) zvezno opisujejo odnos med višino drevesa in premerom debla na ravni posameznega drevesa, od tal do vrha drevesa (Slika 1). Z njihovo uporabo lahko na katerikoli višini od tal (ali od vrha drevesa) ugotovimo premer debla. Natančnost napovedanega premera je odvisna od razpona in količine vhodnih sekcijskih meritev, na podlagi katerih je bila izdelana KOOD, ter od uporabljene vrste krivulje. Natančnost napovedi

premerov vzdolž debla je deloma odvisna od tega, na kateri višini napovedujemo premer, se pa natančnost napovedi giblje 0,6 cm na polovici višine drevesa in v povprečju čez celotno višino znaša okrog 0,5 cm, kot je bilo ugotovljeno v Kanadi na vzorcu 34 000 dreves (James in Kozak, 1984). Na splošno KOOD uporabljamo predvsem za izračun prostornine stoječih dreves, kjer je njihova točnost primerljiva z bolj tradicionalnimi metodami izračuna prostornine (npr. volumenske funkcije). Hkrati nudijo več prilagodljivosti kot volumenske funkcije na ravni sestoja ali posameznih dreves ter tudi več različnih načinov uporabe (McTague in Wiskittel, 2021). Z njimi

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija.

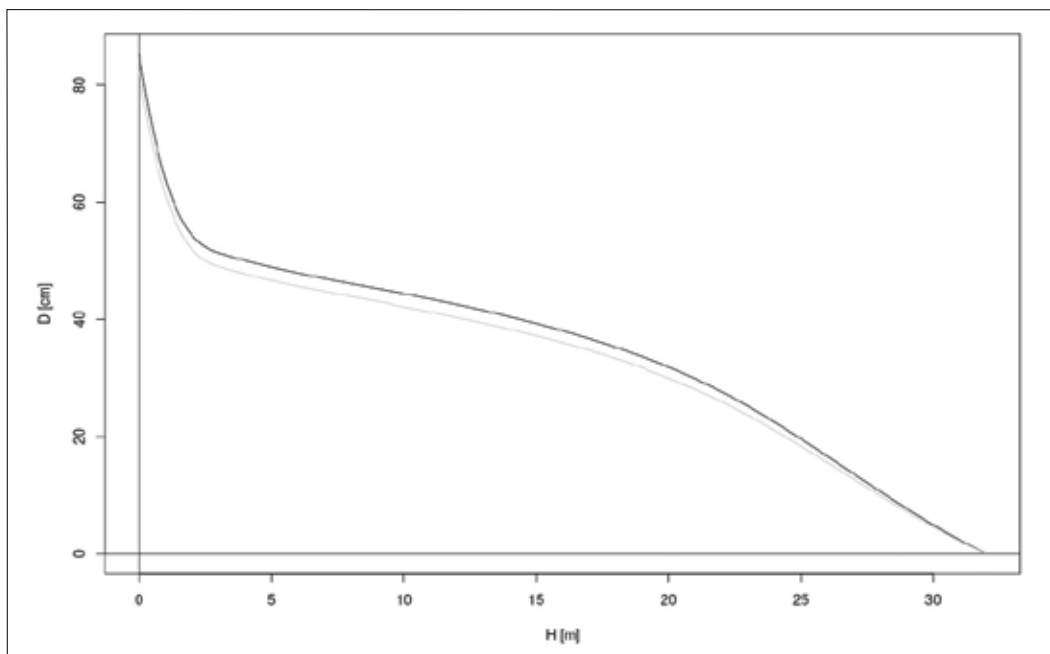
lahko npr. pri izračunih prostornine drevesa ali sortimentov izberemo poljuben zgornji najmanjši premer, izračunamo srednje premere posameznih sortimentov ali izračunamo prostornino posameznih poljubno izbranih delov debla. Vse, kar potrebujemo za izračun prostornin kot vhodni podatek, so drevesna vrsta, prsni premer ter višina (izmerjena ali izračunana iz višinske krivulje) ter KOOD. Le-te po navadi izdelamo na ravni posameznih drevesnih vrst in jih po potrebi lokalno prilagodimo (kalibriramo). Pri uporabi izbrane KOOD je treba biti pozoren, ali je v izračunano prostornino vključena skorja debela ali ne. Pri uporabi večine že razvitih KOOD lahko poleg omejitve zgornjih in spodnjih premerov s skorjo ali brez nje poljubno v izračun prostornine vključimo tudi skorjo.

V tujini so gozdarski strokovnjaki razvoju in uporabi KOOD namenili več desetletij ali v posameznih primerih celotne kariere (Kozak, 2004). Dober pregled zgodovine, razvoja in uporabe KOOD nudi pregledni prispevek avtorjev McTague in Wiskittel (2021). Njihova uporaba v vsakdanji praksi je tako odraz prepoznane uporabnosti in

posledično količine vloženega truda pri razvoju. KOOD uporabljajo v gozdarstvu po vsem svetu (npr. Kanada, ZDA in Nemčija) in jih neprestano razvijajo za nove drevesne vrste ali regije (Marchi in dr., 2020). Razvoj lokalnih KOOD se je začel tudi v Sloveniji (npr. Rebula, 1995), a se je v zadnjih dveh desetletjih skoraj povsem zaustavil. Verjetno predvsem zato, ker slovenska gozdarska stroka in posledično financerji niso prepoznali potencialne uporabnosti KOOD, kar velja pripisati nepoznavanju prednosti in omejitev uporabe teh krivulj v vsakdanjem delu. Eden od namenov tega članka je prav zato predstaviti uporabnost KOOD za izboljšanje ocenjevanja določenih znakov dreves (npr. prostornina debela, oblika debela).

1.2 Primerjava uporabe KOOD z obstoječimi izračuni prostornine, prednosti in pomanjkljivosti

Najbolj zanesljive, točne in natančne metode za ugotavljanje prostornine dreves so: (i) metoda ksilometriranja, (ii) metode debelnih sekcij in (iii) metode rotacijskih teles funkcij vzdolžnih oblik



Slika 1: Primer KOOD, drevo smreke s prsnim premerom 60 cm in višine 32 m. Črna črta je premer s skorjo, siva pa brez nje. Za izračun je uporabljena nemška KOOD za smreko, podrobnosti funkcije so predstavljene v nadaljevanju v sekciji 2.3 (Vonderach in dr., 2021).

debla oziroma KOOD. Najbolj točna metoda je ksilometriranje (merjenje prostornine z izpodirvanjem tekočine), ki je zelo zahtevna, časovno potratna, draga in destruktivna, ker jo je mogoče izvesti le na podrtém drevju. Metodo debelnih sekcij sicer lahko izvedemo tudi na stoječem deblu, kjer pa jo je zelo težko izvesti ali pa je manj zanesljiva (Husch in dr., 2003; Kušar, 2007). Metoda KOOD je v svoji osnovi izboljšana metoda debelnih sekcij.

Pri metodi določanja prostornine z uporabo KOOD – podobno kot pri metodi sekcij – deblo razdelimo na čim manjše sekcije in s pomočjo vrtenine integralne funkcije izračunamo prostornino debla (Husch in dr., 2003). Pomembno je, da uporabljena krivulja čim bolje opiše obliko debla. Tako lahko izračunamo prostornino celotnega debla ali po poljubno izbranih sekcijah. Lahko izberemo zgornji ali spodnji premer hlodovine, pri izračunu prostornine upoštevamo skorjo ali pa jo izločimo iz rezultata. Predvsem možnost izbire je ključna prednost pred bolj tradicionalnimi metodami določanja prostornine drevesa ali delov debla. Izpostaviti velja tudi prilagodljivost same KOOD; npr. ob vključitvi dodatne meritve premera lahko občutno izboljšamo točnost izračuna prostornine posameznega drevesa. Z upoštevanjem dodatnega (zgornjega) premera, poleg prsnega premera in višine, bistveno izboljšamo zanesljivost volumenskih funkcij, saj z upoštevanjem dodatnega premera namreč bistveno bolje pojasnimo obliko debla in zmanjšamo variabilnost prostornin dreves enakih prsnih premerov in višin (Kaufmann, 2001), ki se lahko med sabo razlikujejo tudi do 15 %, v ekstremnih primerih tudi 25 % (Kušar, 2007).

Ena izmed prednosti vrstno specifičnih KOOD je predvsem njihova enostavna uporaba, kjerkoli se ta drevesna vrsta pojavlja. Potrebna je le preveritev že razvite KOOD na manjšem lokalnem ali regionalnem vzorcu dreves ter morebitna lokalna ali regionalna prilagoditev (kalibracija) same krivulje. Še najlažje je to storiti neposredno ob sečnji, kjer lahko na nekaj deset drevesih izmerimo zgornje premere, njihovo oddaljenost od panja ter izračunamo prostornino dreves. Pozoren pa je treba biti, da vzorec odkazanih (in posekanih) dreves dobro predstavlja celotno populacijo dreves, iz

katere je bil izbran in za katero izdelujemo KOOD. Število potrebnih dreves za lokalno preveritev je odvisno od števila izmerjenih premerov na posameznih drevesih, uporabljenih KOOD ter zahtevane vzorčne napake. Uporabo metode KOOD v vsakdanjem gozdarstvu je v preteklosti omejevala predvsem računska zahtevnost. Tako je za izračun prostornine drevesa ali premerov na poljubnih višinah ob znanih merah drevesa potreben računalnik (tablica, mobilni telefon), kar pa za sodobnega gozdarja ob pospešeni digitalizaciji (slovenske) gozdarske terenske operative dandanes verjetno ni več bistvena ovira.

1.3 Izdelava KOOD

Eno izmed pomembnejših vprašanj pri razvoju KOOD za posamezne drevesne vrste je potrebno število dreves, na katerih opravimo sekcijske meritve. Tuji avtorji (Subedi in dr., 2011; Stängle in dr., 2016; Saarinen in dr., 2019) poročajo o najmanjšem številu od 40 do 85 dreves, kjer je bilo opravljenih od 10 do 20 meritev premera na drevo (dolžina posamezne sekcije je torej od 1 do 2 metrov). Sekcijske meritve nato uporabimo za opis absolutnega ali relativnega zmanjšanja premera glede na lokacijo znotraj drevesa. Z ravni posameznega drevesa nato preidemo na raven populacije s pomočjo regresijskega modela, ki opiše povprečno zmanjšanje premera na ravni vseh izmerjenih dreves. Lahko uporabimo veliko različnih regresijskih modelov, ki lahko poleg prsnega premera in višine za modeliranje zmanjšanja premera zajamejo tudi druge vplivne dejavnike, npr. drevesno vrsto, nadmorsko višino in regijo. Pri uporabi KOOD je zato potrebna pozornost glede razpona podatkov in vplivnih dejavnikov, ki so bili upoštevani pri izvirnem razvoju krivulje. Za več informacij bralca usmerjava na že omenjeni pregledni članek avtorjev McTague in Wiskittel (2021). Kot primer naj navedeva, da so bile različne volumenske funkcije konstruirane na podlagi meritev tudi nekaj tisoč izmerjenih dreves. Tako so npr. dvovhodne deblovnice (Kotar, 2003) izdelane na podlagi sekcijskih meritev 12 180 dreves za bukev (Grundner-Horn, 1898), 6 069 dreves za hrast (Schwappach, 1905), 240 dreves za jesen (Emrović idr.), 6 307 dreves za črni bor (Bohmerle,

1893), 17 000 dreves za rdeči bor (Schwappach, 1890), 5 450 dreves za jelko (Schuberg, 1891), 818 dreves za macesen (Schiffel) in 22 680 dreves za smreko (Baur, 1890).

KOOD je mogoče razviti tudi brez podiranja dreves. Tako lahko premer na več višinah izmerimo z različnimi metodami oziroma inštrumenti. Za ugotavljanje oblike drevesa si pomagamo z meritvami zgornjega premera na relativni ali na absolutni višini drevesa. Inštrumenti za meritev dodatnega premera so lahko zelo zahtevni (optični dendrometri) ali preprostejši (finska premerka, lestev in premerka ali merski trak). Težava meritev zgornjih premerov je v tem, da so zahtevne, relativno zamudne, težavne (mlajši, vejnati, gosti sestoji iglavcev), potencialno nezanesljive in drage (Kušar, 2007). K nezanesljivosti optičnih meritev lahko vpliva tudi morebitna ovalnost debla, ki se ji pri merjenju lahko izognemo z merjenjem obsega z merskim trakom. Pri primerjavah različnih metod (inštrumentov) za meritve dodatnih premerov so ugotovili, da sta najzanesljivejši metodi metoda finske premerke in dendrometra Barr in Stroud; uporaba Bitterlichovega relaskopa pa daje dva do trikrat večje napake (Schmid in dr., 1971). Za opis oblike debla je že mogoča tudi uporaba t.i. terestičnega LIDAR-ja (Saarinen in dr., 2019). Z njegovim razvojem in širšo uporabo bo mogoče pridobiti ogromno količino podatkov na nedestruktiven način ter na relativno enostaven način kalibrirati, razviti ali dopolniti (obstoječe) KOOD. Uporaba terenskih LIDAR-jev za določanje oblike in prostornine drevesa se vedno bolj širi iz raziskovalnega področja v operativno gozdarstvo, npr. COST Akcija CA20118 (2021), *Three-dimensional forest ecosystem monitoring and better understanding by terrestrial-based technologies (3DForEcoTech)*, tako da je širša uporaba te tehnologije samo še vprašanje časa.

Pred razvojem lastnih KOOD je treba pregledati in preveriti že obstoječe krivulje, ki so jih razvili v tujini za drevesne vrste, ki rastejo tudi pri nas in v podobnih rastiščnih razmerah. Tako je za Slovenijo na voljo uporaba nemških KOOD (Vonderach in dr., 2021), ki so bile prvič objavljene leta 1988 in od takrat že večkrat posodobljene (Kublin 2003; Kublin in dr., 2013). Razvili so jih

na podlagi sekcijskih meritev več kot 30 000 dreves za veliko večino drevesnih vrst, ki rastejo tudi pri nas. S pomočjo sekcijskih meritev premerov, bodisi ročnih ali optičnih, lahko ob upoštevanju izbranih dejavnikov (npr. višinski pasovi, ekološke regije, starost dreves, bonitete rastišč) že razvite tuje KOOD lokalno prilagodimo (kalibriramo) za slovenske razmere. Z uporabo KOOD izboljšamo zanesljivost določanja prostornine dreves in omogočimo nove preračune prostornin potencialnih sortimentov. Kot vir podatkov o premerih dreves je mogoča tudi uporaba podatkov procesorskih glav harvesterjev, seveda odvisno od natančnosti in točnosti njihovih meritev.

1.4 Določanje prostornine dreves v slovenski gozdarski praksi

Na Slovenskem za določanje prostornin dreves v praksi uporabljamo prilagojene enotne francoske tarife za osem skupin drevesnih vrst (Čokl, 1956; 1957; 1959; 1980; Kotar, 2003; Kušar, 2007). Gre za 60 različnih tarifnih krivulj, saj uporabljamo tri vrste tarif (za enodobne, za prebiralne in za sestoje vmesnih oblik), ki so razdeljene na 20 tarifnih razredov. Natančnost prilagojenih enotnih francoskih tarif je ocenjena na 7 % (Čokl, 1957). Na ravni posameznih dreves ali izbranih skupin dreves pa pri izračunih prostornin dreves s tarifami lahko nastane do 15 % napake (Čokl, 1957; Kušar, 2007). V istih skupinah drevesnih vrst (osem skupin drevesnih vrst), za katero je določena enaka tarifa, so tako npr. rdeči in črni bor, macesen in zelena duglazija (skupina drevesnih vrst »iglavci«); dob in pravi kostanj (skupina drevesnih vrst »hrasti«); gorski javor in lipi (skupina drevesnih vrst »plemeniti listavci«); črni gaber, beli gaber in cer (skupina drevesnih vrst »trdolesni listavci«) ali pa navadna breza, črna jelša in topol (skupina drevesnih vrst »mehkolesni listavci«). Z nemškimi dvovhodnimi deblovnicami (Kotar, 2003; Puhek, 2003) za primer drevesa premera 30 cm in višine 20 m izračunamo naslednje prostornine: črni bor 0,67 m³, rdeči bor 0,65 m³, zelena duglazija 0,62 m³ in macesen 0,60 m³. V odsekih, kjer npr. rasteta črni bor in macesen, z enako tarifo (skupina drevesnih vrst »iglavci«), ki bi bilo pravilno izbrana za črni bor, prostornino

macesna podcenimo za 0,07 m³ oziroma 10 %. S tarifo, ki bi bila pravilna izbrana za macesen, pa precenimo prostornino črnega bora za 0,07 m³ oziroma 12 %. Še večje razlike, kar za 0,20 m³ oziroma 35 %, opazimo, če npr. primerjamo prostornine navadne breze, 0,58 m³, črne jelše, 0,70 m³, in črnega topola, 0,78 m³, ki so vsi v isti skupini drevesnih vrst »mehkolesni listavci«.

Do neke stopnje zanesljivosti sicer velja, da če je tarifa (na ravni odseka) za posamezno drevesno vrsto (in ne skupino drevesnih vrst) korektno določena, se odstopanja posameznih dreves izravnavajo in v povprečju ugotovimo pravo vrednost (Kušar in dr., 2013). Vendar je v prevladujoči drobnoposestni strukturi slovenskih gozdov, kjer je povprečni odsek velik okoli 22 ha, povprečna gozdna posest pa velika 3,2 ha (ZGS, 2021), določitev tarif na ravni odseka vseeno pregroba. Po podatkih MGGE (GIS, 2018) je le 32 % ploskev glede na zgradbo uvrščenih med enomerne (enodobne) gozdove. V sestojnih in strukturnih razmerah slovenskih gozdov, kjer torej prevladujejo raznodobni in raznomerni sestoji, ki jih sestavljajo različno stara in različno debela drevesa, je nerazumljivo, da so za določanje prostornine dreves in s tem posledično izračunavanja lesne zaloge sestojev še vedno v rabi tarife, določene na odsečni ravni in za osem skupin drevesnih vrst. Posebno še, če upoštevamo heterogenost rastišč, pestre mikrorastiščne razmere, ko se lahko dve sosednji drevesi enakih premerov razlikujeta v višini tudi do 10 m oziroma za tri tarifne razrede (Kušar in Hočevar, 2006).

Popravljanje oziroma ažuriranje tarif, ki jih ob obnovi enot GGN vsakih deset let izvaja ZGS, je korak v pravo smer, še vedno pa ne izboljšuje ocene prostornine drevesa na drevesni ravni. Tako so lahko ocene lesne zaloge, največjega mogočega poseka, odkazila in nenazadnje tudi poseka na ravni posamezne posesti, v istem odseku, nezanesljive. Ob tem je treba izpostaviti, da mora vsaka sprememba tarif ob obnovi načrtov temeljiti na preverjeni metodi, reprezentativnih meritvah (višin, premerov) zadostnega števila reprezentativnih vzorčnih dreves (20-40) za vsako drevesno vrsto in korektno določenih sestojnih lastnosti (zgradba, tip) prevladujočega sestojnega

tipa v odseku (Kušar, 2007). Poudariti je treba, da je s spremembo tarif povezan tudi popravek ocen prirastka in prejšnje lesne zaloge, pridobljene na podlagi zaporednih meritev na stalnih vzorčnih ploskvah, če želimo uporabiti Biolleyev (1920) koncept kontrolne metode.

1.5 Namen/cilji

Glavni namen prispevka je predstavitev KOOD, opis njihovih glavnih prednosti in omejitev. Na vzorcu dreves slovenske smreke predstavlja primer razvoja in preveritev takšne krivulje ter primerjavo tako izračunanih prostornin z obstoječimi načini izračuna. Nameni in cilji opravljene raziskave so:

- preveriti zanesljivost nemških KOOD,
- primerjati zanesljivost različnih volumenskih funkcij,
- preveriti možnost konstruiranja slovenskih KOOD,
- ugotoviti, koliko dreves je potrebnih za zanesljiv razvoj KOOD,
- predlog metodologije za oblikovanje KOOD za drevesne vrste, ki zavzemajo večinski delež v lesni zalogi slovenskih sestojev.

2 METODE

2.1 Uporabljeni podatki za razvoj in preveritev KOOD

Podatki za 87 smrek, ki sva jih uporabila v tem prispevku, izvirajo iz raziskave o zanesljivosti ugotavljanja prostornine dreves in lesne zaloge (Kušar, 2007). Premere debla sva izmerila sekcijsko vsaka dva metra, dodatno pa še na 0,3 m (sečnja višina) in 1,3 m (prsni premer). Pravo prostornino dreves, vključno s skorjo (prostornina debla in vej do 7 cm, brez vrha in panja), sva izračunala po Smalianovi metodi sekcij. Drevesa izhajajo iz dveh razvojnih faz: drogovnjaka in debeljaka iz dveh enomernih in enovrstnih sestojev na Pokljuki (Preglednica 1).

Preglednica 1: Podatki o drevesih sekcijskih meritev na Pokljuki

N	Razvojna faza	Starost	Prsni premer	Višina	Prostornina
		(let)	(cm)	(m)	(m ³)
60	Drogovnjak	68 (40–95)	22,6 (11,0–36,0)	22,6 (13,3–31,3)	0,51 (0,09–1,70)
27	Debeljak	146 (95–175)	47,2 (31,0–66,0)	33,4 (27,1–39,8)	2,75 (1,05–5,05)

*Opomba: V preglednici so navedene srednje vrednosti, v oklepaju pa najmanjša in največja vrednost (razpon) znaka.

2.2 Uporabljene metode izračuna prostornin

Za primerjavo različnih metod izračuna prostornine sva izračunala prostornine po prilagojenih enotnih francoskih tarifah (Kotar, 2003), nemških dvovhodnih deblovnica (Puhek, 2003) in švicarskih trovhodnih volumenskih funkcijah (Hoffmann, 1984, cit. po Kaufmann, 2001).

Prostornine prilagojenih enotnih francoskih tarif (Kotar, 2003) in nemških dvovhodnih deblovnica (Puhek, 2003) vključujejo debeljad s skorjo

(deblo in veje, debelejšje od 7 cm) brez panja in vrha. Švicarske trovhodne volumenske funkcije (Hoffmann, 1984, cit. po Kaufmann, 2001) pa za razliko od prej navedenih prilagojenih enotnih francoskih tarif in nemških dvovhodnih deblovnica poleg prostornine debeljadi s skorjo vključujejo tudi prostornino panja in vrha. Pri uporabi nemških KOOD (Vonderach in dr., 2021) sva pri izračunu prostornine debeljadi s skorjo upoštevala debeljad od višine panja 0,3 metra nad tlemi do premera debla 7 centimetrov.

Preglednica 2: Drevesne vrste, za katere so razvite nemške KOOD (Vonderach in dr., 2021)

Slovensko ime	Latinsko ime	Slovensko ime	Latinsko ime
Smreka	<i>Picea abies</i>	Hrasti (dob/graden)	<i>Quercus spp.</i>
Sitka	<i>Picea sitchensis</i>	Rdeči hrast	<i>Quercus rubra</i>
Bela jelka	<i>Abies alba</i>	Topoli	<i>Populus spp.</i>
Orjaška jelka	<i>Abies grandis</i>	Balzamični topol	<i>Populus balsamifera</i>
Rdeči bor	<i>Pinus sylvestris</i>	Veliki jesen	<i>Fraxinus excelsior</i>
Črni bor	<i>Pinus nigra</i>	Javorji	<i>Acer spp.</i>
Zeleni bor	<i>Pinus strobus</i>	Gorski javor	<i>Acer pseudoplatanus</i>
Duglazija	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Ostrolisti javor	<i>Acer platanoides</i>
Macesni	<i>Larix spp.</i>	Maklen	<i>Acer campestre</i>
Evropski macesen	<i>Larix decidua</i>	Breze	<i>Betula spp.</i>
Japonski macesen	<i>Larix kaempferi</i>	Lipe in lipovci	<i>Tilia spp.</i>
Orjaški klek	<i>Thuja plicata</i>	Jelše	<i>Alnus spp.</i>
Zahodna čuga	<i>Tsuga heterophylla</i>	Češnja	<i>Prunus avium</i>
Drugi iglavci	<i>Omnibus aliis coniferis arboribus</i>	Bresti	<i>Ulmus spp.</i>
Bukev	<i>Fagus sylvatica</i>	Robinija	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Beli gaber	<i>Carpinus betulus</i>	Brek	<i>Sorbus torminalis</i>
Drugi listavci	<i>Omnibus aliis deciduis arboribus</i>	Kostanj	<i>Castanea sativa</i>
Jerebika	<i>Sorbus aucuparia</i>	Vrbe	<i>Salix spp.</i>

2.3 Nemške KOOD

Kot primerjavo za izračun prostornin z obstoječimi metodami sva vključila tudi prostornine, izračunane na podlagi nemških KOOD, ki so od leta 2021 dostopne v okviru programskega okolja R kot knjižica rBDAT (Vonderach in dr., 2021). Krivulje imajo že dolgo zgodovino, saj so jih prvič objavili v letu 1988. V začetku so za razvoj uporabili originalne podatke iz razvoja dvovhodnih deblovnic iz začetka 20. stoletja, potem pa so jih dopolnjevali za potrebe nemške nacionalne gozdne inventure. Več podrobnosti, kako so bile osnovane, in shematski prikaz je na voljo v člankih Kublina (2003; 2013), ki jih je tudi originalno razvil. Iz KOOD posameznega drevesa izračunamo prostornino prek integriranja posamezne krivulje. Skupno je na voljo 36 različnih KOOD za različne drevesne vrste oziroma njihove skupine, navedene v (Preglednici 2). Brez osnovnega znanja programiranja je njihova uporaba otežena, zato smo na Gozdarskem inštitutu Slovenije razvili enostaven spletni vmesnik za njihovo uporabo, ki je dostopen na spletnem naslovu <http://gozdis.si/volumni>.

Kot zanimivost naj izpostaviva, da originalne nemške dvovodne deblovnice dajo enak rezultat kot nemške KOOD, če kot vhodna podatka v KOOD vstopata samo prsni premer in višina drevesa. Pri tem je treba omeniti, da sicer dvovhodne deblovnice, ki jih uporabljamo na Slovenskem (Kotar, 2003), ne dajo enakih rezultatov kot originalne nemške deblovnice. Naše dvovhodne deblovnice so nepravilno predelane izvirne dvovhodne deblovnice, ki so bile izvirno izdelane ločeno za mlajše in starejše sestoje (Hladnik in Kobal, 2012; Kušar in dr., 2013).

2.4 Razvoj slovenske KOOD za smreko

Za razvoj KOOD je poleg podatkov sekcijskih meritev treba izbrati tudi funkcijo, s katero bomo modelirali zmanjšanje premera glede na relativno višino posameznega drevesa. V našem primeru sva izbrala t.i. B-zlepek (bazni zlepek) polinomskih funkcij, ki se lomijo na vnaprej določenih vozliščih. Izpeljava te krivulje je računsko dokaj zahtevna, saj se zlepek prilagodi tudi s pomočjo statističnih t.i. mešanih modelov za modeliranje

premera med drevesi. Seveda pa velja poudariti, da je dandanes vse modeliranje enostavno dostopno v programskem okolju R, in sicer konkretno v programski knjižici TapeR. Vozlišča fiksni delov modela na podlagi polinoma 4. stopnje sva privzela iz privzetih nastavitev knjižice, t.j. na 0 %, 10 %, 75 % in 100 % relativne višine dreves. Vozlišča zleпка, t.i. »random effects«, so bila nastavljena na 0 %, 10 % in 100 % višine. Dobljeni model ima preveč parametrov (poleg vrednosti fiksni parametrov še tri kovariatne matrike) za enostaven prikaz, zato ga ne prikazujeva neposredno, temveč samo prek modeliranih krivulj padca premera za izbrana drevesa. Vsi parametri dobljenega modela so dostopni pri avtorjih prispevka.

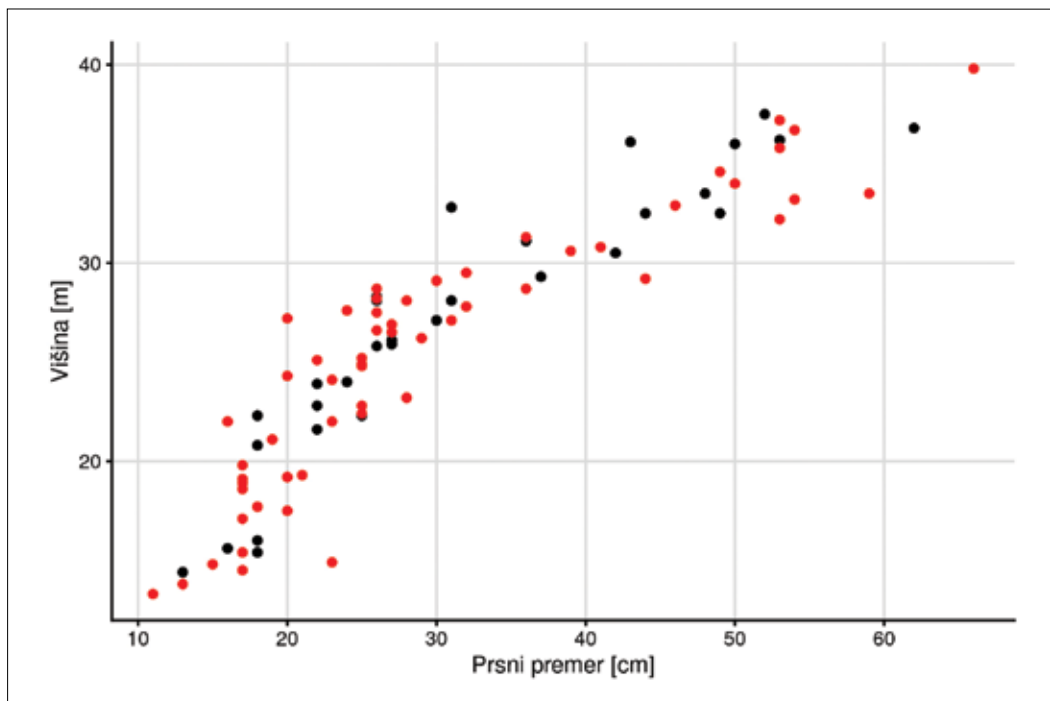
Podatke sva uvozila v odprtokodno programsko okolje R (R Core Team, 2021). Iz podatkov za drogovnjak (60 dreves) in debeljak (27 dreves) na Pokljuki sva pripravila dva niza podatkov:

- a) naključno izbranih 30 dreves, ki so služila kot kontrolni vzorec pri razvoju slovenske KOOD,
- b) preostanek (57 dreves) sva uporabila pri razvoju slovenske KOOD za smreko (t.i. osnovni vzorec).

Odvisnost višine dreves od prsnega premera prikazuje Slika 2. Z rdečo barvo so prikazana drevesa osnovnega vzorca (57 dreves), s črno pa drevesa kontrolnega vzorca (30 dreves).

Vsa programska koda, uporabljena pri razvoju in preveritvi KOOD, je na voljo pri avtorjih prispevka.

Na podlagi osnovnega vzorca dreves ($N = 57$) sva razvila slovensko KOOD za drevesa smreke. Tako razvito krivuljo lahko uporabimo za poljubno izbrano drevo z znano višino in prsnim premerom, ki predstavljajo mesta, kjer se bo krivulja prilagodila. Če tako razvito krivuljo zavrtimo okrog horizontalne osi, izračunamo prostornino celotnega drevesa. Če pa bi radi izračunali samo prostornino določenega dela drevesa ali sortimenta, lahko krivuljo poljubno omejimo (npr. do 7 cm premera, med 3 in 7 metri višine itn.).



Slika 2: Višina in prsni premer dreves, vključenih v raziskavo. Osnovni vzorec (rdeče, 57 dreves) in kontrolni vzorec (črno, 30 dreves).

2.3 Vpliv vhodnega števila dreves na točnost napovedi prostornine

Pri razvoju slovenske KOOD sva testno preverila tudi vpliv števila dreves na natančnost napovedi prostornine. Preizkusila sva razvoj modela s 30, 40, 50 in 57 drevesi. Pri vseh sva ugotovila enake vrednosti zanesljivosti določanja prostornine, kar je bilo glede na prejšnje raziskave o najmanjšem številu dreves za razvoj KOOD pričakovano. Preizkusila sva tudi razvoj modela KOOD s samo 20 drevesi, a je bilo to premalo za to metodo in sva naletela na računske težave, saj model ni konvergirala na končno obliko krivulje. V skladu s prej omenjeno literaturo tako lahko potrdiva, da za razvoj lokalne KOOD zadostujejo že meritve od 30 do 40 dreves. Seveda pa je pri tem treba upoštevati, da gre za povsem lokalno prilagojeno KOOD smreke na Pokljuki in jo je treba pred uporabo preveriti na drevesih z drugačnimi razponi premerov, višin in koničnosti debla, ki so lahko posledice različnih dejavnikov (npr. razvojna faza, starost drevesa, socialni položaj, boniteta rastišča, nadmorska višina, ekološka regija).

3 REZULTATI

3.1 Primerjava različnih metod izračuna prostornine dreves

Primerjava izračuna prostornine dreves za celoten vzorec 87 vključenih smrek po različnih obstoječih metodah prikazuje Slika 3. Uporabila sva prilagojene enotne francoske tarife (Kotar, 2003), nemške dvovhodne deblovnice (Puhek, 2003), švicarske trovhodne volumenske funkcije (Hoffmann, 1984, cit. po Kaufmann, 2001) ter nemške KOOD za smreko (Vonderach in dr., 2021). Pri prilagojenih enotnih francoskih tarifah sva v obeh enomernih sestojih uporabila tarifo V7/8 (35), ki jo je določil ZGS na ravni odseka.

Medtem ko so prilagojene enotne francoske tarife najmanj natančne, je uporaba nemške KOOD dala najbolj točne in natančne prostornine dreves. Natančnost se še posebno izboljša, če v izračun prostornine poleg prsnega premera in višine drevesa vključimo še en dodaten premer nad prsno višino na znani višini. Na Sliki 3 prikazuje vpliv vključitve dodatnega premera na 5 in 7 metrih,

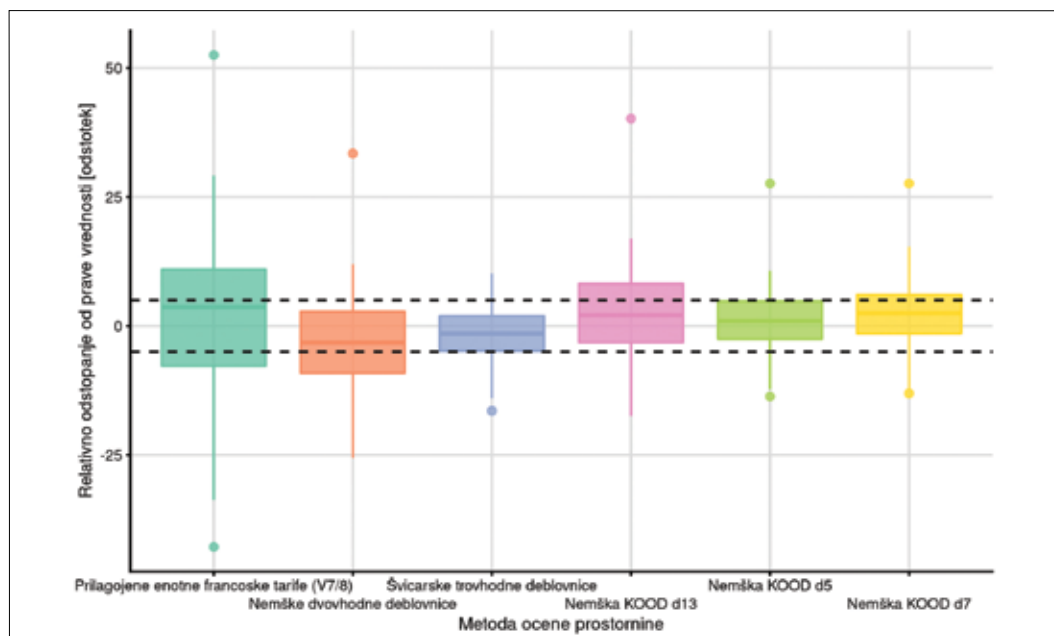
zaradi prilagodljivosti KOOD pa bi lahko vključila premer na katerikoli znani višini. Višina meritve dodatnega premera se med drevesi lahko razlikuje, za razliko od npr. trovhodnih volumenskih funkcij, pri katerih je potreben premer na znani in nespremenljivi višini (npr. 7 m pri švicarskih trovhodnih volumenskih funkcijah).

Razlike do prave vrednosti sva izračunala kot razliko med referenčno (izmerjeno) in teoretično prostornino, deljeno z referenčno prostornino.

Tako negativne vrednosti (Slika 3 in Preglednica 3) prikazujejo precenjevanje, pozitivne pa podcenjevanje prostornine debeljadi. Pri švicarskih trovhodnih volumenskih funkcijah je navidezno precenjevanje pričakovano, saj za razliko od preostalih le-te vključujejo tudi prostornino panja in vrha, ki nista upoštevana v naši referenčni prostornini (samo debeljad). Rezultate natančnosti prikazujeva ločeno tudi v Preglednici 3 za lažjo ponazoritev.

Preglednica 3: Podatki o povprečni natančnosti, interkvartilnem razmiku in razponu različnih metod določanja prostornine stoječih dreves smreke, N = 87.

Metoda	Vhodni podatki	Povprečje in mediana natančnosti [%]		Interkvartilni razmik [%]		Razpon natančnosti [%]	
<i>Prilagojene enotne francoske tarife (V7/8)</i>	$d_{1,3}$ in tarifa	+ 1,7	+ 3,6	- 7,8	+ 11,0	- 42,8	+ 52,5
<i>Nemške dvovhodne debl.</i>	$d_{1,3}$ in h	- 3,1	- 3,2	- 9,1	+ 2,8	- 25,5	+ 33,4
<i>Švicarske trovhodne volumenske funkcije</i>	$d_{1,3}$, d_7 in h	- 1,6	- 1,5	- 4,8	+ 1,9	-16,5	+ 10,2
<i>Nemška KOOD $d_{1,3}$</i>	$d_{1,3}$ in h	+ 2,6	+ 2,1	- 3,2	+ 8,2	-17,5	+ 40,2
<i>Nemška KOOD $d_{1,3}$ in d_5</i>	$d_{1,3}$, d_5 in h	+ 1,3	+ 1,0	- 2,5	+ 4,8	-13,7	+ 27,6
<i>Nemška KOOD $d_{1,3}$ in d_7</i>	$d_{1,3}$, d_7 in h	+ 2,3	+ 2,4	- 1,4	+ 6,0	- 13,1	+ 27,6



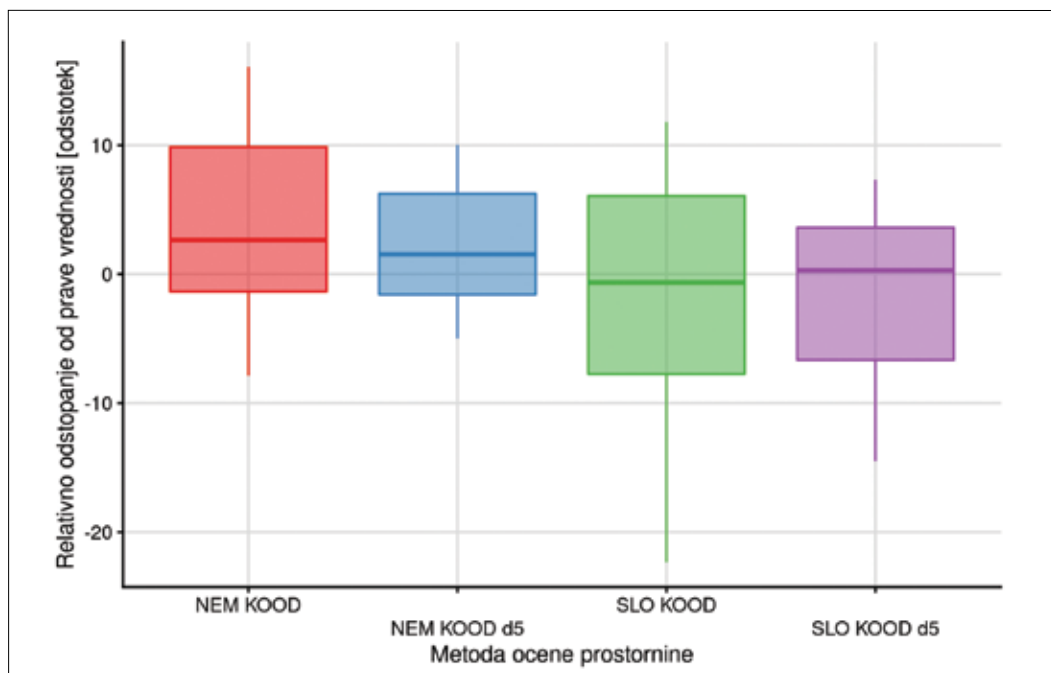
Slika 3: Primerjava metode ocene prostornine: prilagojene enotne francoske tarife (V7/8), nemške dvovhodne deblonvice, švicarske trovhodne volumenske funkcije ter nemške KOOD za smreko. Predzadnji stolpec kot vhodni podatek poleg prsnega premera (d_{13}) in višine drevesa vsebuje še dodatni premer na 5 metrih (d_5), zadnji pa dodaten premer na 7 metrih (d_7). S črtkano črto prikazujeva +5 % in -5 % odstopanje za lažjo oceno natančnosti.

V povprečju daje najbolj natančne rezultate določanja prostornine nemška KOOD z dodatnim premerom na višini petih metrov. Pri določanju prostornine po prilagojenih enotnih francoskih tarifah sta vzrok za posamezna relativna velika odstopanja lahko tudi določena vrsta (vmesne) in razred tarif (V7/8 oz. 35), ki je bil določen na ravni obeh odsekov in ne odraža nujno vzorca odkazanih in posekanih dreves.

Posamezna drevesa smreke, ki na Sliki 3, Preglednici 3 zelo odstopajo glede natančnosti, so drevesa z relativno majhnim prsnim premerom glede na preostala drevesa v vzorcu. Natančnost je najslabša pri prilagojenih enotnih francoskih tarifah pri drevesih s premeri 11, 18, 23 in 28 cm in posledično relativno majhno prostornino (izmerjene prostornine: 0,09; 0,17; 0,32 in 0,57 m³; tarifne prostornine: 0,04; 0,23; 0,45 in 0,75 m³) ter posledično velikim relativnim odstopanjem. Drevo s prsnim premerom 11 cm in višino drevesa 13,3 m zelo odstopa tudi pri izračunanih prostorninah po drugih uporabljenih metodah.

3.2 Primerjava ocene prostornine novo razvite slovenske KOOD in obstoječih nemških KOOD

Novo razvito slovensko KOOD za vključena smrekova drevesa sva primerjala z že razviti nemškimi krivuljami (Slika 4). Primerjavo sva naredila na podatkih kontrolnega vzorca (N = 30), katerega drevesa niso bila vključena v razvoj lokalne KOOD. Tako pri nemških kot slovenski KOOD se natančnost napovedi prostornine zveča pri vključitvi dodatnega premera. Medtem ko nemški KOOD podcenjuje prostornino, ga osnovna slovenska KOOD rahlo precenjuje, slovenska KOOD z dodatnim premerom na petih metrih pa rahlo podcenjuje. Točnost KOOD je odvisna predvsem od zajetega razpona vhodnih podatkov, zato nastajajo razlike med odstopanji od prave vrednosti prostornine. Hkrati je ponovno treba poudariti, da so nemško KOOD razvili na izjemno velikem vzorcu dreves, nova slovenska KOOD pa je zgolj lokalna in temelji na neprimerljivo manjšem vzorcu dreves. To je tudi najverjetnejši vzrok za večji razpon natančnosti pri slovenski KOOD.



Slika 4: Primerjava različnih metod določanja prostornin s KOOD; kontrolni vzorec (N = 30).

4 DISKUSIJA

KOOD so alternativa obstoječim načinom določanja prostornine stoječih dreves. KOOD so manj dostopne za uporabo kot že obstoječe metode določanja prostornin, kar pa bova poskušala v prihodnosti spremeniti. Omogočajo namreč oceno prostornine drevesa s primerljivo ali boljšo natančnostjo kot s trenutno uporabljenimi metodami. Poleg tega jih lahko uporabimo za določanje premerov kjerkoli na deblu, kar je uporabna vrednost predvsem pri potencialnem določanju sortimentov na stojećem drevju (poljubne omejitve premerov sortimentov, npr. določitev prostornine hlodovine od 60 do 10 cm premera) ali pri določanju poljubnega zgornjega premera pri računanju prostornin. Poleg razvoja lastnih je mogoča in smiselna tudi preveritev že obstoječih krivulj. KOOD omogočajo poljubne omejitve premerov pri določanju prostornine in so zato uporabne pri sortimentaciji stoječih dreves. Na omejenem vzorcu smrek s Pokljuke sva preverila natančnost obstoječe nemške KOOD ter poskusno razvila lokalno krivuljo z uporabo obstoječih računalniških orodij. KOOD je relativno enostavno razviti, težje pa je zbrati dovolj velik in reprezentativen vzorec dreves za izdelavo krivulje za posamezno drevesno vrsto, ki bi bila uporabna na ravni celotne države.

Eno izmed pomembnejših vprašanj pri razvoju KOOD za posamezne drevesne vrste je potrebno število dreves, na katerih opravimo sekcijske meritve. Tuji avtorji (Subedi in dr., 2011; Stångle in dr., 2016; Saarinen in dr., 2019; McTague in Wiskittel, 2021) poročajo o najmanj 40 do 85 drevesih, kjer je bilo opravljenih od 10 do 20 meritev premera na drevo (dolžina posamezne sekcije je torej od 1 do 2 metrov). Za kalibracijo ali lokalno prilagoditev že izdelane krivulje za opisovanje oblike debla je potrebno manj dreves (30 do 40), kar sva v tem prispevku potrdila na primeru vključenih smrek.

Zanesljivost ocene prostornine posameznega drevesa in s tem tudi ocene lesne zaloge na manjši prostorski ravni kot je odsek, bi lahko pridobili z uporabo KOOD. Glede na analizo prilagajanje krivulje za opisovanje oblike debla pri drevesni vrsti smreka lahko potrdimo, da vključitev dodatnega

premera na 5 ali 7 metrih višine občutno izboljša natančnost določene prostornine. Za lokalno prilagoditev (kalibracijo) že razvite krivulje je potrebno občutno manj meritev kot za razvoj nove; poleg višine in prsnega premera potrebujemo meritev še vsaj enega dodatnega premera nad prsno višino, ki ga najpogosteje merimo nad prsno višino in znotraj prvih 30 % višine drevesa. Z na tak način prilagojeno krivuljo za opisovanje oblike debla lahko izračunamo prostornine dreves na ravni posameznega drevesa bistveno zanesljiveje kot z enovhodnimi volumenski funkcijami (tarifami).

Kako torej do KOOD za slovenske drevesne vrste? Kot sva predstavila, lahko razvijemo lastne KOOD, potrebujemo samo sekcijske meritve premerov. Zbiranje novih podatkov je dokaj počasno in stroškovno potratno, bolj smiselna je ponovna uporaba že zbranih sekcijskih meritev ali preveritev že razvitih KOOD (npr. nemških) za drevesne vrste, ki rastejo pri nas. Uporaba tehnologije LIDAR bo sicer v bližnji prihodnosti bistveno poenostavila razvoj, preveritev in prilagoditev KOOD, a zaenkrat še ni dovolj dostopna in raziskana. Na drugi strani se meritev (ročna ali optična) dodatnega premera za potrebe preveritve že obstoječih KOODj kaže kot dober kompromis med vloženim trudom in končnim rezultatom.

5 POVZETEK

Prispevek obravnava uporabo krivulj za opis oblike debla (KOOD) (ang. t.i. »taper functions«) za izračunavanje prostornin drevesa ali delov drevesa. Uporaba KOOD je predstavljena na podatkih 87 smrekovih dreves dveh enomernih sestojev dveh različnih razvojnih faz (drogovnjak, debe-ljak) s Pokljuke. KOOD zvezno opisujejo odnos med višino drevesa in premerom debla na ravni posameznega drevesa. Z njihovo uporabo lahko na katerikoli višini od tal (ali od vrha drevesa) pridobimo ocenjen premer debla. Na splošno so v rabi predvsem za izračune prostornine stoječih dreves, kjer je njihova točnost primerljiva z bolj tradicionalnimi metodami izračuna prostornine (npr. volumenske funkcije). Hkrati omogočajo več prilagodljivosti kot volumenske funkcije na ravni sestoja ali posameznih dreves in tudi več različnih načinov uporabe.

Primerjala sva izračune prostornine dreves za celoten vzorec 87 smrek po različnih metodah (Kušar, 2007). Uporabila sva prilagojene enotne francoske tarife (Kotar, 2003), nemške dvovhodne deblovnice (Puhek, 2003), švicarske trovhodne deblovnice (Hoffmann, 1984, cit. po Kaufmann, 2001) ter nemške KOOD za smreko (Vonderach in dr., 2021), ki so bile prvič objavljene leta 1988 in od takrat že večkrat posodobljene. Razvili so jih na podlagi sekcijskih meritev več kot 30 000 dreves za veliko večino drevesnih vrst, ki rastejo pri nas. Medtem ko so enovhodne deblovnice najmanj natančne, je uporaba nemških KOOD dala najbolj točne in natančne prostornine dreves. Natančnost se še posebno izboljša, če poleg prsnega premera in višine drevesa vključimo še en dodaten premer na znani višini.

Za izračun prostornin s pomočjo KOOD kot vhodni podatek potrebujemo drevesno vrsto, prsni premer in višino (izmerjena ali izračunana iz višinske krivulje) ter seveda KOOD. Pri metodi določanja prostornine z uporabo KOOD podobno kot pri metodi sekcij deblo razdelimo na čim manjše sekcije in s pomočjo vrtenine integralne funkcije izračunamo prostornino debla (Husch in dr., 2003). Pomembno je, da uporabljena krivulja čim bolj opiše obliko debla. Tako lahko izračunamo prostornino celotnega debla ali po poljubno izbranih sekcijah. Prilagodimo lahko tako zgornji kot spodnji premer hlodovine, pri izračunu prostornine upoštevamo skorjo ali pa jo izločimo iz rezultata. Predvsem je taka prilagodljivost ključna prednost pred bolj tradicionalnimi metodami določanja prostornine drevesa ali delov debla. Izpostaviti velja tudi prilagodljivost same krivulje, npr. ob vključitvi dodatne meritve premera lahko občutno izboljšamo točnost izračuna prostornine posameznega drevesa. Ena izmed prednosti vrstno specifičnih KOOD je predvsem njihova uporaba, kjerkoli se drevesna vrsta pojavlja. Potrebni sta le preveritev že razvite KOOD na manjšem vzorcu dreves (od 30 do 40) in morebitna lokalna prilagoditev (kalibracija) same krivulje.

Izdelava vrstno specifične KOOD je enostavna, če imamo na voljo dovolj sekcijsko izmerjenih dreves iste vrste. KOOD je mogoče razviti tudi brez podiranja dreves. Tako lahko premer na

več višinah (sekcijah) izmerimo z različnimi metodami oziroma inštrumenti. Za ugotavljanje oblike drevesa si pomagamo z meritvami zgornjega premera na relativni ali na absolutni višini drevesa. Eno izmed pomembnejših vprašanj pri razvoju KOOD za posamezne drevesne vrste je potrebno število dreves, na katerih opravimo sekcijske meritve. Tuji avtorji (Subedi in dr., 2011; Stängle in dr., 2016; Saarinen in dr., 2019; McTague in Wiskittel, 2021) poročajo o najmanj 40 do 85 dreves, na katerih je bilo opravljenih od 10 do 20 meritev premera na drevo (dolžina posamezne sekcije je torej od 1 do 2 metrov). Za kalibracijo ali lokalno prilagoditev že izdelane krivulje za opisovanje oblike debla je potrebno manj dreves (30 do 40), kar sva v tem prispevku potrdila na primeru vključenih smrek.

Za razvoj slovenske KOOD sva podatke o 87 smrekah uvozila v odprtokodno programsko okolje R (R Core Team, 2021), 57 dreves sva uporabila pri razvoju testnih slovenskih KOOD za smreko (t.i. osnovni vzorec), 30 dreves pa sva uporabila kot kontrolni vzorec. Uporabila sva pristop Kublin-a (2013) ter R knjižico TapeR istega avtorja. Privzeta vozlišča krivulje četrtega reda sva v skladu z navodili avtorja metode nastavila na 0 %, 10 %, 75 % in 100 % višine, saj je to eden izmed osnovnih vhodnih podatkov za izdelavo KOOD.

Poleg vpliva števila dreves na razvoj KOOD sva preverila tudi vpliv različnih vhodnih podatkov (dodatni premer) na razvito krivuljo glede ocene prostornin. Iz primerjave je razvidno, da vključitev dodatnega premera izboljša napoved prostornine ne glede na višino, kjer ga izmerimo.

Novo razvito lokalno slovensko KOOD za vključena drevesa smreke sva primerjala z že razvitimi nemškimi KOOD. Pri obeh se natančnost napovedi prostornine zveča pri vključitvi dodatnega premera, med samima krivuljama pa glede zanesljivosti ni razlike, saj sta obe enako natančni pri napovedi prostornine.

Za razvoj lastnih KOOD potrebujemo dovolj sekcijskih meritev premerov. Zbiranje novih podatkov je dokaj počasno in stroškovno potratno, bolj smiselna je ponovna uporaba že zbranih sekcijskih meritev ali preveritev že razvitih krivulj za drevesne vrste, ki so prevladujoče pri nas. Na drugi strani se meritev (ročna ali optična)

dodatnega premera za potrebe preveritve že obstoječih KOOD kaže kot dober kompromis med vloženim trudom in končnim rezultatom.

6 ZAHVALA

Prispevek je bil pripravljen v okviru ciljnega raziskovalnega projekta Izboljšanje konkurenčnosti slovenske gozdno-lesne verige v kontekstu podnebnih sprememb in prehoda v nizkoogljično družbo (V4-2017). Dodatno sta ga podprli programska skupina Gozdno-lesna veriga in podnebne spremembe: prehod v krožno biogospodarstvo (P4-0430) in programska skupina Gozdna biologija, ekologija in tehnologija (P4-0107), ki ju finančno podpira ARRS. Delno sofinanciranje je bilo tudi iz naloge JGS4 Razvoj in izvajanje nacionalne gozdne inventure, ki jo financira MKGP.

Avtorja se zahvaljujeva recenzentu za konstruktivno recenzijo in številne pripombe.

7 VIRI

- COST Akcija CA20118. 2021. <https://www.cost.eu/actions/CA20118/> (6. 12. 2021).
- Čokl, M. 1956. Inventarizacija kmečkih gozdov po novih enotnih tarifah. *Gozdarski vestnik*, 14: 1–12.
- Čokl, M. 1957. Prirejene Alganove in Schafferjeve tarife ter njihova raba pri inventarizaciji sestojev = Zugerichtete Algan'sche und Schaeffer'sche Tarife und deren Verwendung bei der Inventarisierung von Waldbeständen. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 2: 165–195.
- Čokl, M. 1959. Tarife za sestoje prehodnih oblik = Massentarife für Übergangsbestände. *Gozdarski vestnik*, 17: 221–228.
- Čokl, M. 1980. *Gozdarski in lesnoindustrijski priročnik*. Tablice. 5. izdaja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za gozdarstvo: 374 str.
- GIS, 2018. Podatkovna zbirka MGGE
- James, C. A., Kozak, A., 1984. Fitting Taper Equations from Standing Trees. *The Forestry Chronicle* 60, 157–161. <https://doi.org/10.5558/tfc60157-3>.
- Hladnik, D., Kobal, M. 2012. Ocenjevanje natančnosti deblovcin in volumenskih funkcij. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, številka 98, str. 3–14.
- Husch B., Beers T.W., Kershaw J.A. 2003. *Forest Mensuration*. 4th edition. New York, John Wiley & Sons. 443 str.
- Kaufmann, E. 2001. *Estimation of Standing Timber, Growth and Cut*. V: *Swiss National Forest Inventory: Methods and Models of the Second Assessment*. Brassel P. (ed.), Lischke H. (ed.). Birmensdorf, WSL Swiss Federal Research Institute: 162–196.
- Kotar, M. 2003. *Gozdarski priročnik*. 7. izdaja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 414 str.
- Kozak, A., 2004. My last words on taper equations. *The Forestry Chronicle* 80, 507–515. <https://doi.org/10.5558/tfc80507-4>
- Kušar, G. 2007. *Zanesljivost ugotavljanja volumna dreves in lesne zaloge sestojev z enoparametrijskimi funkcijami in stratifikacijo: doktorska disertacija/doctoral dissertation*. Ljubljana, samozaložba. 243 str.
- Kušar, G., Hladnik, D., Hočevnar, M. 2013. Zanesljivost volumenskih funkcij na primeru drevesne vrste smreke v Sloveniji. *Acta Silvae et Ligni* 102 (2013), 43–54.
- Kušar, G., Hočevnar, M. 2006. Zanesljivost ugotavljanja lesne zaloge s tarifami na primeru smreke v mikrorastiščno pestrem gozdu. *Zbgil* 80 (2006), s. 81–96.
- Kublin, E., 2003. Einheitliche Beschreibung der Schaftform - Methoden und Programme -BDATPro. A Uniform Description of Stem Profiles - Methods and Programs -BDATPro. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122, 183–200. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0337.2003.00183.x>
- Kublin, E., Breidenbach, J., Kändler, G., 2013. A flexible stem taper and volume prediction method based on mixed-effects B-spline regression. *Eur J Forest Res* 132, 983–997. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0715-0>.
- Marchi, M., Scotti, R., Rinaldini, G., Cantiani, P., 2020. Taper Function for Pinus nigra in Central Italy: Is a More Complex Computational System Required? *Forests* 11, 405. <https://doi.org/10.3390/f11040405>
- McTague, J. P., Weiskittel, A., 2021. Evolution, history, and use of stem taper equations: a review of their development, application, and implementation. *Can. J. For. Res.* 51, 210–235. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0326>
- Puhek, V. 2003. Regresijske enačbe za volumen dreves po dvovhodnih deblovcin. V: *Gozdarski priročnik*. 7. izdaja. Kotar M. (ur.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 46–48 str.
- R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rebula, E. 1995. Tablice oblikovnega števila, debeljadi in koločine izdelanih sortimentov za jelko = Table of the Form Height Number, Timber and the Quantity of assortments prepared for the European Fir. *Gozdarski vestnik*, 53, 10: 402–425.
- Saarinen, N., Kankare, V., Pyörälä, J., Yrttimaa, T., Liang, X., Wulder, M. A., Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M., 2019. Assessing the Effects of Sample Size on Parametrizing a Taper Curve Equation and the Resultant Stem-Volume Estimates. *Forests* 10, 848. <https://doi.org/10.3390/f10100848>.

- Schmid, P., Roiko-Jokela, P., Mingard, P., Zobeiry, M. 1971. The Optimal Determination of the Volume of Standing Trees. Wien, Mitteilung der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, 91: 33–54.
- Stängle, S. M., Weiskittel, A. R., Dormann, C. F., Brüchert, F., 2016. Measurement and prediction of bark thickness in *Picea abies* : assessment of accuracy, precision, and sample size requirements. Can. J. For. Res. 46, 39–47. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0263>.
- Subedi, N., Sharma, M., Parton, J., 2011. Effects of sample size and tree selection criteria on the performance of taper equations. Scandinavian Journal of Forest Research 26, 555–567. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.583677>.
- Vonderach, C., Kublin, E., Bösch, B., Kändler, G., 2021. rBDAT: Implementation of BDAT tree taper fortran functions (manual).
- ZGS, 2021 https://www.youtube.com/watch?v=JHbjS_kUSEw&t=111s (6. 12. 2021).