

Ocena lesne zaloge sestojev iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja

Growing stock estimation based on airborne laser scanning data

Milan KOBAL¹

Izvleček:

Kobal, M.: Ocena lesne zaloge sestojev iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja. *Gozdarski vestnik*, 72/2014, št. 5–6. V slovenščini z izvlečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit., 40. Prevod avtor in Breda Misja, jezikovni pregled angleškega besedila Breda Misja, slovenskega besedila Marjetka Šivic.

Poleg površine je lesna zaloga najpogosteje ocenjevan podatek o gozdovih. Prvi podatki o lesnih zalogah so temeljili na osnovi okularnih ocen, sledile so polne premerbe, dandanes je v rabi statistično vzorčenje. V tujini se je že dodobra uveljavilo ocenjevanje lesne zaloge iz podatkov laserskega skeniranja površja oziroma lidarskih podatkov. V tem prispevku je predstavljena možnost take ocene lesne zaloge na primeru raznomernih dinarskih jelovo-bukovih gozdov. Podobno kot v primerljivih raziskavah je tudi ta raziskava potrdila možnost rabe omenjene tehnologije. Z upoštevanjem povprečne višine dreves in sestojnega sklepa na ploskvi pojasnimo 82 % variabilnosti lesne zaloge, koren srednje kvadratne napake RMSE znaša 55,2 m³/ha oz. 8,6 %.

Ključne besede: zračno lasersko skeniranje, lidar, lesna zaloga, dinarski jelovo-bukovi gozdovi

Abstract:

Kobal, M.: Growing stock estimation based on airborne laser scanning data. *Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry)*, 72/2014, vol. 5-6. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 40. Translated by author and Breda Misja, proofreading of the English text Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

In addition to forest area, growing stock is one of the most often measured data about forests. The first data on growing stock in forests were based on the basis of ocular estimates. Nowadays statistical sampling is used. In the foreign countries, evaluation of growing stock based on airborne laser scanning and lidar data is already well established. In this paper, the possibility of such estimates of growing stock in case of uneven aged Dinaric silver fir-European beech forests is presented. Similarly as in comparable studies on the evaluation of the growing stock based on laser scanning data, we confirmed this possibility also in this study. Considering the average tree height and canopy transparency on the plot level in the model, we explained 82% of the variability of growing stock, root mean square error RMSE is 55.2 m³/ha or 8.6%.

Keywords: airborne laser scanning, lidar, growing stock, Dinaric silver fir-European beech forests

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Poleg površine gozdov je lesna zaloga najpogosteje ocenjevan podatek v okviru nacionalnih gozdnih inventur (McRoberts s sod., 2013). Tako za oceno površine gozdov (glej Hladnik in Žižek, 2012) kot za oceno lesne zaloge (glej Kušar, 2007) se uporablja statistično vzorčenje (na sistematičnih vzorčnih mrežah različnih gostot), kjer opazovanja na *n* lokacijah pomenijo delno realizacijo slučajnega procesa v prostoru, na podlagi katere naredimo statistično oceno. Dodatno v procesu gozdnogospodarskega načrtovanja zbiramo podatke o stanju gozdov (tudi o lesni zalogi) pri opisih sestojev, delitev na posamezne

sestoje pa je odvisna od kakovosti zajema, na katero vpliva tudi usposobljenost popisovalca (Matijašič, 2007). Prostorsko je lesna zaloga bolj ali manj natančno ocenjena na ravni posameznega sestoja oziroma odseka.

Če so prvotni podatki o lesnih zalogah v gozdovih temeljili na osnovi okularnih ocen, pa so gozdarski urejevalci za oceno lesne zaloge kmalu začeli uporabljati zanesljivejše metode. Za zdajšnji čas je skoraj nepredstavljivo, da so npr. že leta 1912 opravili polno izmero vseh dreves za več revirjev na območju Snežnika (glej Gašperšič, 1967). Na

¹ Dr. M. Kobal, univ. dipl. inž. gozd., Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

Odbitek	Odbitek	Površina ha	Drevesne vrste	ŠTEVILO DREVJA PO DEBELINSKIH STOPNJEH																
				2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Skupaj	
				6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
23	o	33,21	Igljavec	je	1443	881	851	765	879	826	754	517	242	63	5	1		7.227		
				sm	2236	1049	747	570	489	380	323	159	87	20	7				6.067	
				ti		5	2													
				bo		2		3				1								13
				Σ	3686	1932	1604	1335	1368	1206	1078	676	329	63	12		1			13.307
				na 1 ha	111	58	48	40	41	36	33	20	10	2	1					400
			Listavec	bu	1684	668	522	394	277	191	101	42	22	3	2		2			3.908
				ja	158	167	210	176	75	43	20	5	2							856
				o.l.	108	95	110	81	45	18	8	4				1				470
				xi	1950	930	842	651	397	252	129	51	24	4	2		2			5.234
				Σ	5636	2862	2443	1986	1765	1458	1207	787	353	87	14		3			18.541
				na 1 ha	170	86	73	60	53	44	37	22	11	2	1					599

Slika 1: Podatki polne premerbe za odsek 23c iz gozdnogospodarskega načrta GGE Leskova dolina za obdobje 1954–1963 (Gozdnogospodarski načrt ..., 1954).

Figure 1: Data of full calipering for forest compartment 23c in Forest management plan for FMU Leskova Dolina for the period 1954–1963 (Gozdnogospodarski načrt ..., 1954).

sliki 1 je primer podatkov polne premerbe za odsek 23c iz gozdnogospodarskega načrta GGE Leskova dolina za obdobje 1954–1963, kjer so takratno lesno zalogo po drevesnih vrstah izračunali na nivoju odseka (za rastiščnogojitvene razrede na rastiščih *Omphalodo-Fagetum* s. lat. je bilo na površini 2.381 ha izmerjenih 1.296.361 dreves – glej Kobal, 2011). Polno premerbo sta nadomestila statistično vzorčenje in uporaba različnih načinov izmere dreves na ploskvah, npr. metode šestih dreves, Bitterlichova kotnoštevna metoda, koncentrične vzorčne ploskve. Za začetek vzorčne inventure šteje leto 1972 (Grilc, 1972); za podrobnejši pregled glej Hladnik (2000) ter Kovač in Hočevar (2009).

Natanko deset let potem, ko se je v Sloveniji začela vzorčna inventura gozdov, je Arp s sodelavci (1982) objavil prvo uporabo zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu na primeru tropskih gozdov. Namen prve uporabe je bil merjenje višine in vrstne sestave gozdov (Nelson in sod., 1984; Aldred in Bonnor, 1985). Hkrati je Maclean (1982) objavil raziskavo, v kateri je pokazal, da lesna zaloga korelira s površino vertikalnega prereza vegetacije ($0.67 < R^2 < 0.79$), ki pa ga ni ocenil iz podatkov laserskega skeniranja, ampak

na podlagi stereoploterja. To spoznanje sta potem na podatkih laserskega skeniranja uporabila Maclean in Krabill (1986). Lesno zalogo so iz podatkov zračnega laserskega skeniranja torej začeli ocenjevati v sredini osemdesetih let (Maclean, 1988; Nelson s sod., 1988), do danes pa so razvili mnoge algoritme in metode (glej Nilson, 1996; Næsset 1997; Hollaus s sod., 2007; Hollaus s sod., 2009). Pregled nekaterih metod je podrobneje prikazan v Lindberg in Hollaus (2012).

Namen prispevka je preveriti uporabnost zračnega laserskega skeniranja površja za oceno lesne zaloge v raznomernih in mešanih sestojih. Raziskavo smo opravili v dinarskih jelovo-bukovih gozdovih *Omphalodo-Fagetum* s. lat. GGE Leskova dolina, kjer smo leta 2009 opravili zračno lasersko skeniranje površja in terenske meritve dreves na vzorčnih ploskvah.

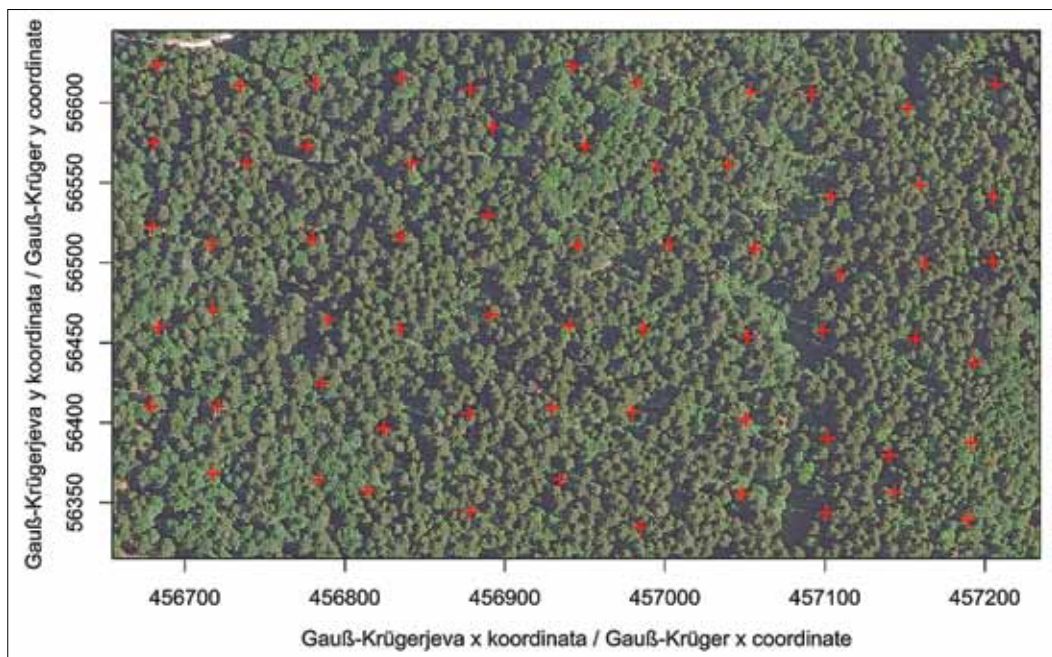
2 METODE DELA

2 METHODS

2.1 Splošen opis območja

2.1 General description of the study area

Raziskava je potekala v oddelku 34 v GGE Leskova dolina. Oddelek je razdeljen na dva



Slika 2: Izsek iz digitalnega ortofotoposnetka z označenimi središči vzorčnih ploskev. Prikazano je območje v GGE Leskova dolina, oddelek 34. Kartografija: Milan Kobal.

Figure 2: Section of digital orthophoto image with marked centers of sampling plots. An area in FMU Leskova Dolina, forest compartment 34, is presented. Cartography: Milan Kobal.

odseka; odsek A s površino 24,8 ha in odsek B s površino 19,3 ha. Raztezata se na nadmorski višini od 820 m do 880 m. V odseku A prevladuje subasociacija *Omphalodo-Fagetum mercuriale-tosum* (80 %), sledita subasociaciji *Omphalodo-Fagetum typicum* (15 %) in *Omphalodo-Fagetum homogynetosum* (5 %). V odseku B prevladuje *Omphalodo-Fagetum typicum* (89 %), preostala površina odseka je uvrščena v subasociacijo *Omphalodo-Fagetum mercuriale-tosum*. Reliefno je površina precej razgibana, s številnimi večjimi in manjšimi vrtačami, gledano v celoti pa ima oddelek lastnost večje vrtače, kjer je opazen mraziščni značaj. Prevladuje apnenec, ponekod dolomitiziran apnenec (Gozdnogospodarski načrt ..., 2004).

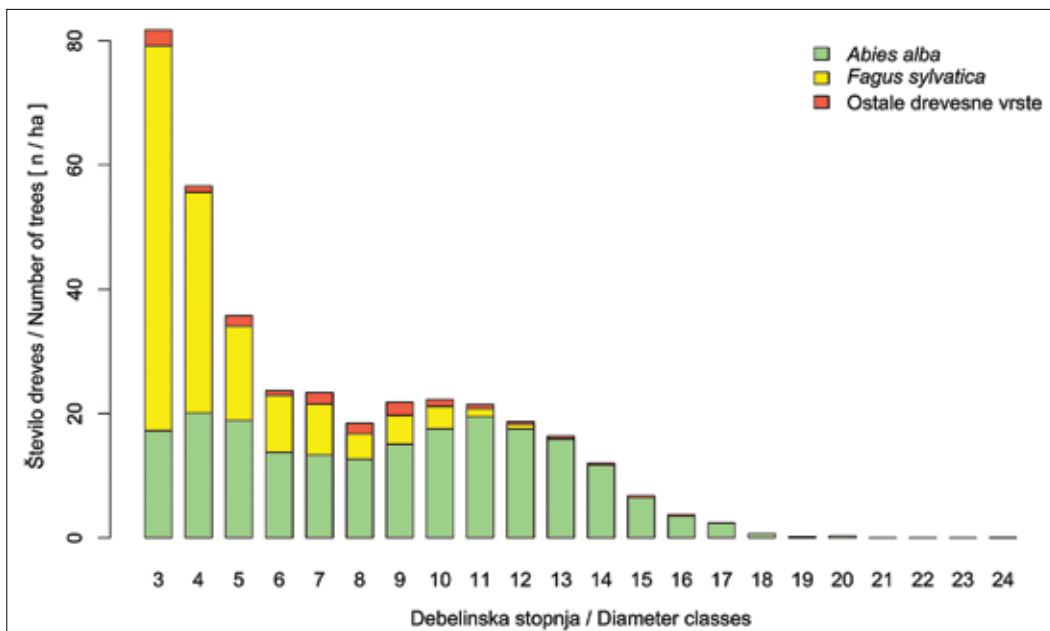
2.2 Meritve na terenu

2.2 Field measurements

Izbor središč vzorčnih ploskev je na terenu potekal v dveh fazah. V prvi smo na sistematični vzorčni mreži 50 × 50 m postavili 65 krožnih vzorčnih GozdV 72 (2014) 5-6

ploskev, velikosti 500 m² (polmer = 12,62 m), ter izmerili prsni premer (DBH) vseh dreves (DBH ≥ 10 cm). Nato smo izbrali tretjo najdebelejšo jelko, ki je bila potem središče vzorčne ploskve (Slika 2), velikosti 2000 m² (polmer = 25,23 m), na kateri smo vsem drevesom (DBH ≥ 10 cm) izmerili DBH, njihovo višino, polarne koordinate (azimut in horizontalno razdaljo) ter določili drevesno vrsto. Azimute smo izmerili z busolo Sunnto KB-14/360, razdalje pa z laserskim merilnikom Vertex IV, Haglöf - Sweden.

Frekvenčna porazdelitev premerov jelke (*Abies alba*), bukve (*Fagus sylvatica*) ter drugih drevesnih vrst na vzorčnih ploskvah raziskovalnega objekta ima obliko, značilno za prebiralne gozdove (Slika 3), vendar je takšna oblika porazdelitve predvsem posledica velikega števila dreves bukve s prsnim premerom, manjšim od 35 cm. Slednja so zelo pogosta zlasti v spodnjih socialnih plasteh pod dominantnimi jelkami in ne tvorijo večjih skupin, ki bi lahko nastale v vrzelih ob prehodu sestojev v obnovo.



Slika 3: Frekvenčna porazdelitev dreves na vzorčnih ploskvah raziskovalnega objekta v oddelku 34, GGE Leskova dolina.

Figure 3: Frequency distribution of trees DBH on sampling plots of the study object in forest compartment 34, FMU Leskova Dolina.

2.3 Zračno lasersko skeniranje površja

2.3 Airborne laser scanning

Zračno lasersko skeniranje površja je opravilo podjetje Flycom, d. o. o., s helikopterjem Eurocopter EC 120B, opremljenim z laserskim skenerjem Riegl LM5600 z relativno horizontalno natančnostjo 10 cm in relativno vertikalno natančnostjo 3 cm ter frekvenco oddanih laserskih impulzov 180 kHz, ki je letel na višini od 400 do 600 m nad površjem. Za določitev natančne trajektorije in orientacije poti helikopterja sta bila uporabljena GPS-sprejemnik Novatel OEV/OEM4, ki omogoča GPS meritve položaja s frekvenco 10 Hz, ter optični INS IMU-IIe. Za potrebe obdelave podatkov so med snemanjem potekale zvezne meritve s sprejemnikoma GPS na referenčnih geodetskih točkah omrežja SIGNAL. Snemanje je bilo opravljeno oktobra 2009. Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/m², odtis žarka pa 30 cm. Posneti oblak točk vsebuje skupno 1.800 milijonov točk na površini 5.212,15 ha. Obdelave so bile opravljene v programskih paketih Microstation v2004 (Bentley) in

Terrasolid. Obdelavo GPS-podatkov smo izvedli v programih Grafnav in IGI Aerooffice. Za klasifikacijo točk smo uporabili algoritem podjetja TerraSolid, ki omogoča izračun modela površja na podlagi znanih odbojev od tal (Axelsson, 1999). Na tak način smo uspešno odstranili gozd, ne da bi pri tem izgubili topografske podrobnosti reliefa.

2.4 Obdelava podatkov

2.4 Data processing

2.4.1 Izračun lesne zaloge na ploskvah

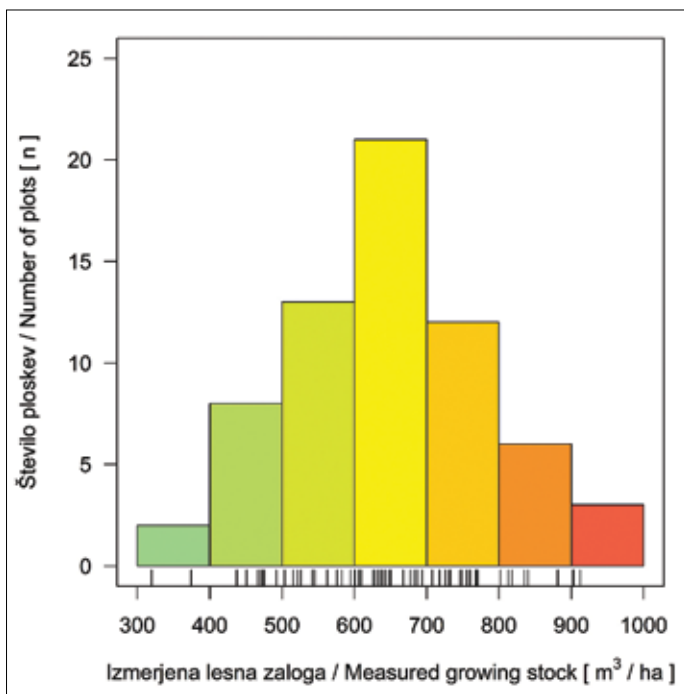
2.4.1 Calculation of growing stock on the plot level

Lesno zalogo na ploskvi smo izračunali kot seštevek vseh volumnov dreves, kjer je DBH ≥ 10 cm. Ta podatek torej predstavlja lesno zalogo dreves, debelejših od 10 cm, kar je tudi sicer praksa v Sloveniji. Volumen dreves smo izračunali prek Puhkovih dvovhodnih deblovnice za jelko, smreko in bukev (Puhek, 2003). Za gorski javor in gorski brest smo za izračun volumna uporabili regresijske koeficiente za bukev.

Na raziskovalnem objektu je pet drevesnih vrst. Prevladujoča drevesna vrsta je jelka s 85,4

Slika 4: Frekvenčna porazdelitev lesne zaloge na vzorčnih ploskvah raziskovalnega objekta v oddelku 34, GGE Leskova dolina.

Figure 4: Frequency distribution of growing stock on sampling plots of the study area in forest compartment 34, FMU Leskova Dolina.



% lesne zaloge na vzorčnih ploskvah. Povprečna lesna zaloga znaša $642,4 \pm 32,8$ m³/ha (Slika 4). Bukev v lesni zalogi zavzema 10,5 %. Smreka (1,9 %), gorski javor (2,0 %) in gorski brest (0,2 %) pa v lesni zalogi vzorčnih ploskev zavzemajo manjši delež.

2.4.2 Razvoj modelov in izračun pojasnjevalnih spremenljivk

2.4.2 Development of models and calculation of predictor variables

Za izračun lesne zaloge smo uporabili linearni model regresije (Enačba 1), ki ga zapišemo kot:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_p \cdot x_p + \varepsilon_i$$

Enačba 1

pri čemer je y = odvisna spremenljivka, x_1, x_2, \dots, x_p so neodvisne (pojasnjevalne) spremenljivke, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ so parametri modela (koeficienti enačb), p = število neodvisnih spremenljivk, ε_i pa je napaka, ki je slučajna spremenljivka.

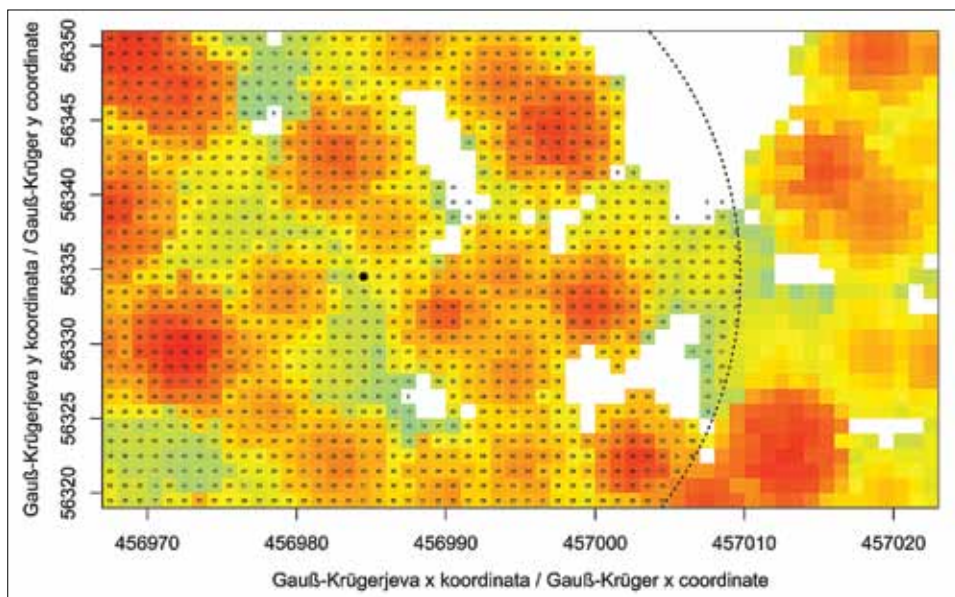
V modelih ocene lesene zaloge smo iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja izračunali pet različnih pojasnjevalnih spremenljivk, ki so

vsebinsko smiselne. To so največja višina strehe sestoja na ploskvi (celMax), mediana višine strehe sestoja na ploskvi (celMed), povprečna višina strehe sestoja na ploskvi (celMea), seštevek višin strehe sestoja na ploskvi (celSum) ter seštevek višin strehe sestoja, tehtan s sestojnim sklepom (canClo). Slednji v modelu zmanjša pomen volumna krošenj (Slika 6). Pri izračunih pojasnjevalnih spremenljivk smo upoštevali le tiste vrednosti rastrskih celic, kjer je višina strehe sestoja višja od 9,6 m; to je namreč povprečna višina dreves z DBH = 10 cm. Na sliki 5 je shematski prikaz izračuna pojasnjevalnih spremenljivk.

2.4.3 Primerjava modelov ocenjevanja lesne zaloge

2.4.3 Comparison of models for growing stock estimation

Modele smo med seboj primerjali na podlagi velikosti koeficienta determinacije R^2 (Enačba 2), absolutne (Enačba 3) in relativne (Enačba 4) velikosti srednje kvadratne napake RMSE ter na podlagi absolutne (Enačba 5) in relativne (Enačba 6) velikosti sistematične napake BIAS. R^2 , RMSE in BIAS smo izračunali po naslednjih enačbah:



Slika 5: Shematski prikaz izračuna pojasnjevalnih spremenljivk. Prikazan je izsek iz DMK, črna točka predstavlja središče vzorčne ploskve, črtkana črta označuje njen rob. Rastrske celice (1×1 m) so obarvane glede na višino strehe sestoja. Števila, ki so prikazana na sliki, predstavljajo vrednost rastrskih celic, torej v primeru DMK višino strehe sestoja, in so bila vključena v izračun celMax, celMed, celMea, celSum ter canClo. Bela barva označuje območja, kjer je DMK $< 9,6$ m (DBH < 10 cm), zato ta območja niso bila upoštevana pri modelski oceni lesene zaloge. Kartografija: Milan Kobal.

Figure 5: Schematic presentation of predictor variables calculation. Section from CHM is presented; the black dot represents the center of the sampling plot, dotted line marks its edge. Raster cells (1×1 m) are colored with regard to the height of the stand canopy. The numbers presented in the image represent value of raster cells, i.e. in the case of CHM the height of the stand canopy, and have been included into the calculation of celMax, celMed, celMea, celSum and canClo. White color marks areas with CHM < 9.6 m (DBH < 10 cm), therefore these areas have not been taken into account in model estimation of growing stock. Cartography: Milan Kobal.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Enačba 2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{Enačba 3}$$

$$RMSE\% = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad \text{Enačba 4}$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad \text{Enačba 5}$$

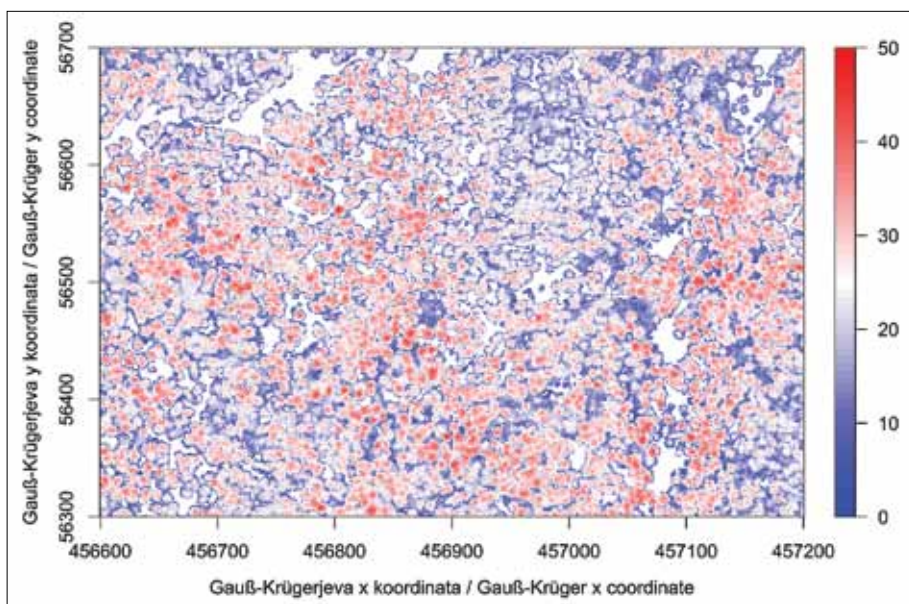
$$BIAS\% = 100 \times \frac{BIAS}{\bar{y}} \quad \text{Enačba 6}$$

kjer je y_i na terenu izmerjena lesna zaloga na ploskvi i , \hat{y}_i = z modelom ocenjena lesna zaloga na ploskvi i , \bar{y} = povprečna vrednost na terenu izmerjenih vrednosti lesne zaloge na vseh ploskvah, n = število ploskev. Obdelave smo izvedli v programskem okolju R (R Core Team, 2014).

3 REZULTATI

3 RESULTS

V Preglednici 1 so prikazani statističnih kazalci modelov, ki smo jih preverili, v preglednici 2 pa koeficienti enačb modelov. Najprej smo kot pojasnjevalno spremenljivko lesne zaloge testirali najvišjo višino strehe sestoja na ploskvi (celMax; model 1) – ta pojasni 29 % variabilnosti lesne zaloge, koren srednje kvadratne napake RMSE pa znaša $110,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ oz. 17,2 %. Večji delež ($R^2 = 0,53$) variabilnosti lesne zaloge pojasni mediana višine strehe sestoja na ploskvi (celMed, model 2), koren srednje kvadratne napake RMSE znaša $89,6 \text{ m}^3/\text{ha}$ oz. 13,9 %. Nekoliko večji delež variabilnosti pojasni povprečna višina strehe sestoja na ploskvi (celMea, model 3). Še večji delež ($R^2 = 0,64$) variabilnosti lesne zaloge pojasnimo, če v model vključimo seštevek višin strehe sestoja



Slika 6: Izsek iz digitalnega modela višin strehe sestoja, tehtane s sestojnim sklepom (canClo) 1×1 m, narejena iz podatkov laserskega skeniranja površja. Modra barva nakazuje manjše vrednosti višine drevja, rdeča večje (v m). Prikazano je območje v GGE Leskova dolina, oddelek 34. Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/m². Kartografija: Milan Kobal.

Figure 6: Section from the digital canopy height model CHM, weighed with canopy closure (canClo) 1×1 m, prepared on the basis of airborne laser scanning. The blue color indicates lower values of tree height, the red one the higher values (in m). An area in FMU Leskova Dolina, forest compartment 34, is presented. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/m². Cartography: Milan Kobal.

Preglednica 1: Statistični kazalci posameznih modelov, ki smo jih preverili za ocenjevanje lesne zaloge iz podatkov laserskega skeniranja površja na primeru 65-ih ploskev v GGE Leskova dolina. Zvezdica (*) nakazuje statistično značilnost spremenljivke v modelu (** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$).

Table 1: Statistical indicators of individual models tested for growing stock estimation on the basis of the data on airborne laser scanning on the example of 65 plots in FMU Leskova Dolina. Asterisk (*) indicates statistical feature of a variable in the model (** = $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$). Cartography: Milan Kobal.

Model	R ²	RMSE	RMSE %	BIAS	BIAS %	p	Pojasnjevalne spremenljivke / Explanatory variable
1	0,29	110,7	17,2	0,0	0,0	0,000 ***	celMax
2	0,53	89,6	13,9	0,0	0,0	0,000 ***	celMed
3	0,55	87,8	13,7	0,0	0,0	0,000 ***	celMea
4	0,64	79,1	12,3	0,0	0,0	0,000 ***	celSum
5	0,53	89,5	13,9	0,0	0,0	0,000 ***	celMax, celMed
6	0,55	87,8	13,7	0,0	0,0	0,000 ***	celMax, celMea
7	0,69	72,6	11,3	0,0	0,0	0,000 ***	celMax, celSum
8	0,55	87,8	13,7	0,0	0,0	0,000 ***	celMed, celMea
9	0,81	57,2	8,9	0,0	0,0	0,000 ***	celMed, celMax
10	0,79	60,5	9,4	0,0	0,0	0,000 ***	celMea, celSum
11	0,55	87,7	13,7	0,0	0,0	0,000 ***	celMax, celMed, celMea
12	0,81	56,8	8,8	0,0	0,0	0,000 ***	celMax, celMed, celSum
13	0,79	60,2	9,4	0,0	0,0	0,000 ***	celMax, celMea, celSum
14	0,81	56,3	8,8	0,0	0,0	0,000 ***	celMax, celMed, celMea, celSum
15	0,82	55,2	8,6	0,0	0,0	0,000 ***	celMed, canClo

Preglednica 2: Enačbe modelov, ki smo jih preverili za ocenjevanje lesne zaloge iz podatkov laserskega skeniranja površja na primeru 65-ih ploskev v GGE Leskova dolina. Zvezdica (*) nakazuje statistično značilnost spremenljivke v modelu (***) = $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$).

Table 2: Equations of the models checked for growing stock estimation on the basis of the data on airborne laser scanning on the example of 65 plots in FMU Leskova Dolina. Asterisk (*) indicates statistical feature of a variable in the model (***) = $p < 0.001$; ** = $p < 0.01$; * = $p < 0.05$).

Model	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
1	-255.87	22.63 ***			
2	-529.12 ***	43.64 ***			
3	-678.15 ***	51.27 ***			
4	-165.25 *	0.02 ***			
5	-537.95 ***	0.72 ***	42.90 ***		
6	-661.42 ***	-2.09 ***	53.85 ***		
7	-496.20 ***	10.98 **	0.01 ***		
8	-659.76 ***	8.40	41.80		
9	-699.70 ***	27.82 ***	0.01 ***		
10	-734.10 ***	31.21 ***	0.01 ***		
11	-645.24 ***	-1.97	7.85	44.85	
12	-664.10 ***	-3.07	30.79 ***	0.01 ***	
13	-712.30 ***	-2.75	34.55 ***	0.01 ***	
14	-623.90 ***	-2.08	4.51 **	-18.88	0.01 ***
15	-650.70 ***	29.59 ***	0.01 ***		

na ploskvi (celSum, model 3). Pri tem modelu RMSE znaša 79,1 m³/ha oz. 12,3 %.

Sledijo modeli (od 5 do 14), kjer smo v analizi upoštevali kombinacije več pojasnjevalnih spremenljivk. Če v modelu upoštevamo najvišjo višino strehe sestoja na ploskvi ter mediano višine strehe sestoja na ploskvi (celMax + celMed, model 9), pojasnimo 81 % variabilnosti lesne zaloge na vzorčnih ploskvah. V tem primeru koren srednje kvadratne napake RMSE znaša 57,2 m³/ha oz. 8,9 %.

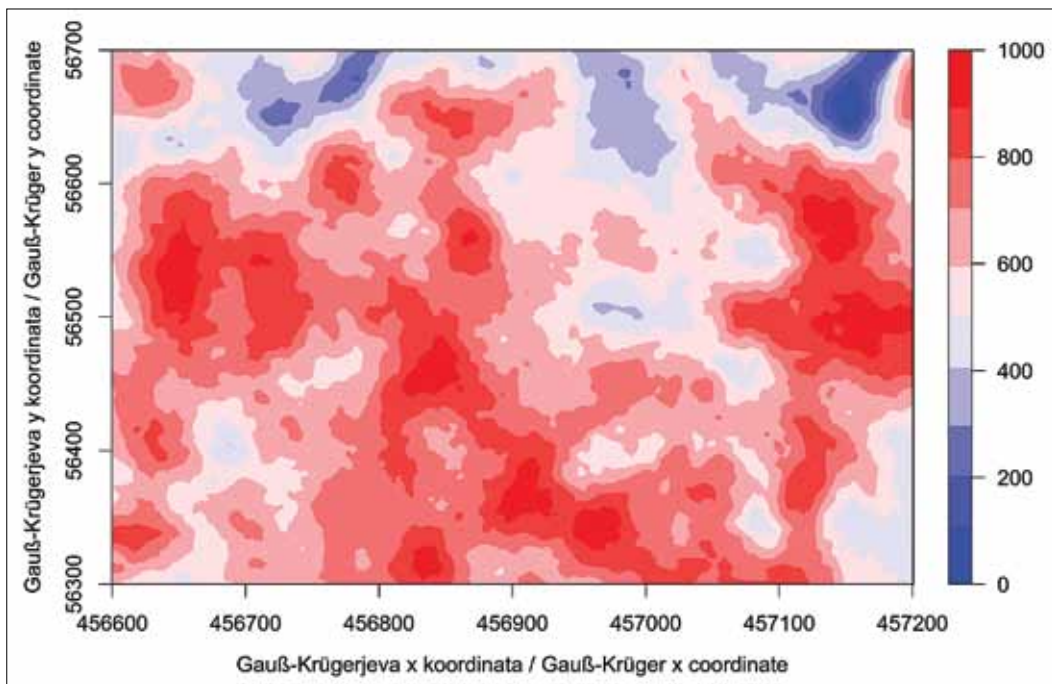
Najnatančnejši je model, ki poleg mediane višine strehe sestoja na ploskvi (celMed), vključuje še seštevek višin strehe sestoja na ploskvi, tehtan s sestojnim sklepom (canClo, model 15). V tem primeru koren srednje kvadratne napake RMSE znaša 55,2 m³/ha oz. 8,6 %. Na sliki 7 je prikazana karta lesne zaloge, izračuna na podlagi modela 15, na sliki 8 pa ujemanje ocenjene lesne zaloge iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja z izračunano lesno zalogo na ploskvi na podlagi na terenu izmerjenega premera in višin ter Puhkovih dvovhodnih deblovnice. Noben od preverjenih modelov ni pristranski (BIAS = 0 m³/ha).

4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Podobno kot v preostalih raziskavah o ocenjevanju lesne zaloge na podlagi laserskega skeniranja površja (Nilson, 1996; Næset, 1997; Popescu s sod., 2003; Hollaus s sod., 2009) smo tudi v tej raziskavi ugotovili, da lesno zalogo lahko zanesljivo (RMSE% < 10 %) ocenjujemo iz podatkov zračnega laserskega skeniranja. Že najvišja višina strehe sestoja na ploskvi (model 1), ki v ohranjenih odraslih sestojih nakazuje rastiščne razmere, pojasni 29 % variabilnost lesne zaloge. Ocena regresijskega modela se znatno izboljša, če v regresijski model vključimo bodisi mediano višine strehe sestoja (model 2) bodisi povprečno višino strehe sestoja na ploskvi (model 3). V obeh primerih pojasnjevalni spremenljivki nakazujeta povprečne vertikalne značilnosti sestoja na ploskvi. Dodatno oceno modela izboljšamo, če v model vključimo seštevek višin strehe sestoja na ploskvi (model 4).

Od treh modelov, kjer je delež pojasnjene variabilnosti lesne zaloge večji ali enak 0,8 (modeli 9, 12 in 14), je najpreprostejši model 9, ki kot

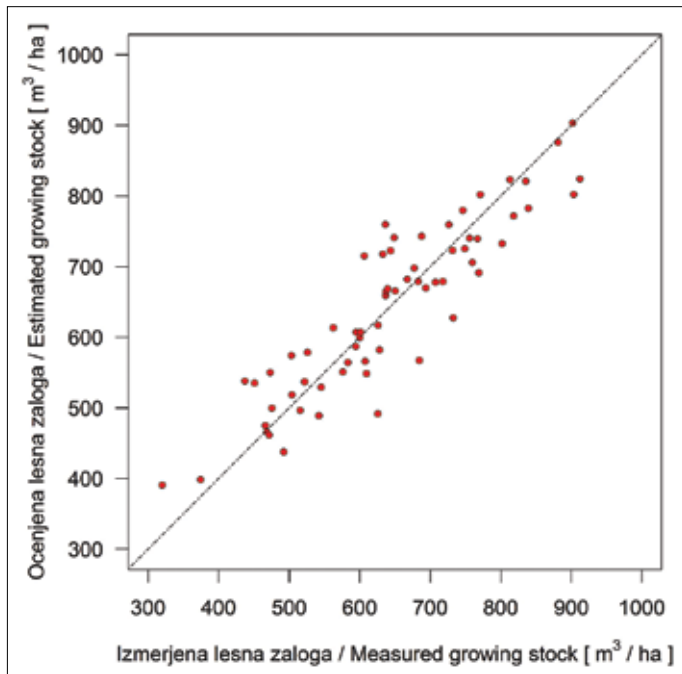


Slika 7: Izsek iz digitalnega modela lesne zaloge 1 × 1 m, narejenega iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja. Modra barva nakazuje manjše vrednosti lesne zaloge, rdeča večje (v m³/ha). Prikazano je območje v GGE Leskova dolina, oddelek 34. Kartografija: Milan Kobal.

Figure 7: Section from the digital model of growing stock 1 × 1 m, prepared on the basis of the data of airborne laser scanning. The blue color indicates lower values of growing stock, the red one the higher values (in m³/ha). An area in FMU Leskova Dolina, forest compartment 34, is presented. Cartography: Milan Kobal.

Slika 8: Primerjava med ocenjeno lesno zalogo iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja in izmerjenimi vrednostmi na terenu, kjer so bili izmerjeni premeri in višine, volumni pa izračunani z uporabo Puhkovih dvovhodnih deblovnic (2003).

Figure 8: Comparison between estimation of growing stock on the basis of the data from airborne laser scanning and values measures in the field, where diameters and heights were measured and volumes calculated using two-entry volume tables by Puhek (2003).





Slika 9: Primer ortofoto posnetka visoke resolucije (velikost slikovne celice je 7×7 cm) z območja GGE Leskova dolina, ki je bilo posneto aprila 2014. Razpoznati je mogoče ceste, vlake ter poškodbe krošenj dreves in izrita drevesa. Kartografija: Milan Kobal.

Figure 9: An example of high resolution orthophoto image (image cell size is 7×7 cm) from the GGE Leskova Dolina area; the image was recorded in April 2014. Roads, skidding trails, damages to tree crowns and uprooted trees are discernible. Cartography: Milan Kobal.

vhodni podatek za oceno lesne zaloge terja zgolj največjo višino strehe sestoja ter mediano višine strehe sestoja na ploskvi. V tem primeru srednja kvadratna napaka znaša $57,2 \text{ m}^3/\text{ha}$ oz. $8,9 \%$. Tako povprečna (npr. Næset, 1997; Drake s sod., 2002; Andreson s sod., 2006; Nord-Larsen in Schumacher, 2012) kot maksimalna višina sestoja (npr. Lefsky s sod., 1999; Kankare s sod., 2013) sta pogosto vhodna parametra v raznih modelih za ocenjevanje lesene zaloge oz. nadzemne biomase. Najnatančnejši je model 15, kjer je v izračunu posredno upoštevan tudi sestojni sklep.

Pri presoji natančnosti ocene lesne zaloge je treba upoštevati, da poleg napak, ki nastanejo pri samem merjenju premerov in višin stoječega drevja, so tudi dvovhodne deblovnice (lahko) vir odstopanja od prave lesne zaloge. Raziskava, ki smo jo izvedli na istem raziskovalnem objektu o

natančnosti deblovnice in volumenskih funkcij za jelko (Hladnik in Kobal, 2012), kaže, da se volumni posameznih dreves razlikujejo glede na metodo izračuna; koeficient determinacije med pravim volumnom (za pravi volumen smo predpostavili, da velja volumen, izračunan na podlagi sekcijske izmere podrtih dreves) in volumnom, izračunanim prek dvovhodnih deblovnice, znaša $0,93$, odstopanje pa $7,6 \%$ (Hladnik in Kobal, 2012).

Poleg statističnega modela, ki vpliva na natančnost ocene lesne zaloge iz podatkov zračnega laserskega skeniranja, je pomemben dejavnik tudi gostota snemanja odbojev laserskih pulzov (Jakubowski s sod., 2013; Watt s sod., 2013) ter zgradba gozda (Wulder s sod., 2008). V našem primeru je bila gostota snemanja $27,5 \pm 0,1$ točke/ m^2 . Prav povečanje gostote snemanja (ob dostopnejši zmogljivejši

strojni in programski opremi) verjetno predstavlja prihodnji razvoj laserskega skeniranja in njegove uporabe v gozdarstvu, še posebno v raznomernih gozdovih, kakršni so bili predmet te raziskave, kjer je največja težava prepoznavanje podstojnih dreves (predvsem bukve) in njihovo vključevanje v izračunu lesne zaloge. Poleg večje gostote snemanja se povečuje uporaba kombinacij laserskega skeniranja in optičnih sistemov visoke resolucije, predvsem hiperspektralnih (npr. Laurin s sod., 2014; Dalponte s sod., 2014). Primer ortofotoposnetka visoke resolucije je prikazan na sliki 9.

Model smo razvili na 65-ih vzorčnih ploskvah, velikosti 0,2 ha, na katerih smo skupno izmerili 4763 dreves. Hollaus s sodelavci (2009) je semiempirični model razvil na podatkih nacionalne gozdne inventure, in sicer na 103 ploskvah na območju Montafona, kjer prevladuje alpski smrekov gozd (96 % smreka, lesna zaloga $423,4 \pm 243,4 \text{ m}^3/\text{ha}$). Drevesom, ki so bila na ploskvi izbrana s kotnoštevno metodo, so izmerili prsni premer (DBH $\geq 10 \text{ cm}$), na podvzorcju tudi višino. Za preostala drevesa so višino izračunali prek višinskih krivulj. Srednja kvadratna napaka ocenjene lesne zaloge je znašala $91,4 \text{ m}^3/\text{ha}$ oz. 21,5 %, vendar je pri tem treba opozoriti, da je bila gostota snemanj 2,7 točke/ m^2 . V okolici Belopeških jezer so s podobno gostoto snemanja ($2,8 \text{ točke}/\text{m}^2$) raziskavo o oceni sestojnih parametrov na podlagi laserskega skeniranja v smrekovih ter mešanih gozdovih (smreka, jelka, bukev) opravili Alberti s sodelavci (2013). Model za oceno lesne zaloge so razvili na devetnajstih koncentričnih ploskvah polmera 4 m (merjena vsa drevesa DBH $< 7,5 \text{ cm}$) oz. 13 m (merjena vsa drevesa DBH $\geq 7,5 \text{ cm}$). Merili so DBH ter na podvzorcju višino dreves, za preostala drevesa so višino izračunali prek višinskih krivulj. Z modelom (potenčna zveza) so na podlagi povprečne višine strehe sestoja pojasnili 80 % variabilnosti lesne zaloge. Z identično metodologijo smo prek povprečne višine strehe sestoja na našem objektu pojasnili 66 % variabilnosti lesne zaloge, kar pomeni, da so bili sestoji, zajeti v tej raziskavi, opazneje bolj raznomerni (Slika 3) in z vidika daljinskega zaznavanja zahtevnejši kljub dejstvu, da je bila gostota snemanja večja.

5 SUMMARY

In addition to forest area, growing stock is one of the most often measured data on forests. The first data on growing stock in forests were based on the basis of ocular estimates. Nowadays statistical sampling is used. First attempt to evaluate growing stock from airborne laser scanning was done in middle 1980 (Maclean, 1988; Nelson et al., 1988) and since then many algorithms and methods for the assessment of growing stock (see Nilson, 1996; Naeset 1997; Hollaus et al., 2007; Hollaus et al., 2009) have been developed. An overview of some methods is shown in detail in Lindberg and Hollaus (2012). The aim of this study is to test the capability of lidar data for estimating growing stock in uneven-aged Dinaric silver fir-European beech forests.

The study was conducted in the forest compartment 34, Leskova Dolina FMU which is dominated by *Omphalodo-Fagetum* forest site. The altitude ranges between 820 m and 880 m a.s.l. Relief is rugged with many sinkholes, both large and small. Within the research site (area is 18 ha), 65 circular sample plots of 500 m^2 in size were installed on a $50 \times 50 \text{ m}$ grid. In each plot we selected the third largest silver fir tree based on DBH. Neighboring trees were identified for each silver fir tree, where silver fir tree represented a new center of the sample plots. All trees (DBH $\geq 10 \text{ cm}$) within a radius of 25.23 m (area 2000 m^2) were evaluated by measuring their diameter at breast height (DBH) and their polar coordinates (azimuth and horizontal distance from the plot center), and by identification of the tree species. Volume of a tree was calculated using two-entry volume tables (Puhek, 2003). In the study area, silver fir is the dominant tree species (86 % in growing stock). Average growing stock is $642.4 \pm 32.8 \text{ m}^3/\text{ha}$. Also Norway spruce and European beech are present.

LiDAR data was acquired by Flycom company using helicopter Eurocopter EC 120B flying at 400 and 600 m above ground and a full-waveform laser scanner Riegl LM5600 using 180kHz frequency of laser impulses and resulting in 10 cm horizontal and 3 cm vertical accuracy. Trajectory and orientation of the helicopter were determined using Novatel OEV/OEM4 GPS (10Hz frequency of measurements) and optical

INS IMU-IIe. Laser point density was 27 points/m² with 30 cm laser footprint. Scanning was carried out on October 2009. Data was processed using Microstation v2004 (Bentley) in Terrasolid programming packages. For point classification we used TerraSolid algorithm. This successfully removed forest canopy without affecting topographic details. From ground points we created DEM in raster format with the basic cell size 1 × 1 m for an area of 5,212.15 ha.

Five different explanatory variables, calculated from the lidar data (maximum canopy height per plot, mean canopy height per plot, median canopy height per plot, sum of all cell values of canopy height per plot and mean canopy transparency per plot) were related to growing stock using (multiple) linear regression. Model performances were compared using coefficient of determination R², root mean square error RMSE (absolute and relative value) and bias (absolute and relative value). Coefficient of determination for all 15 tested ranges from 0.29 to 0.82 and root mean square error ranges from 110.7 m³/ha (17.2 %) to 55.2 m³/ha (8.6 %). Bias is equal to zero for all models. Considering the average tree height and canopy transparency on the plot level in the model, we explained 82 % of the variability of growing stock, root mean square error RMSE is 55.2 m³/ha or 8.6%. This study reveals that a strong correlation between lidar based stand variables and growing stock exist in the Dinaric Silver fir – European beech forests. However, detection and consideration of suppressed trees below dominant trees is difficult and present a part of the unexplained variability in growing stock.

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGEMENT

Delo je nastalo v sklopu mednarodnega projekta NewFor – NEW technologies for a better mountain FORest timber mobilization, program financiranja Alpine Space. Podatki so bili zbrani v okviru projekta CRP V4-0541 Pomen talnih lastnosti in mikroklimatskih razmer za proizvodno sposobnost jelke na rastiščih dinarskih jelovo-bukovih

gozdov v času programa Mladi raziskovalci, ki ga financira ARRS, ter programske skupine P4-0107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija. Za recenzijo in nasvete pri pripravi prispevka se zahvaljujem doc. dr. Alešu Kaduncu.

7 VIRI

7 REFERENCES

- Alberti, G., Boscutti, F., Pirotti, F., Bertacco, C., De Simon, G., Sigura, M., Cazorzi, F., Bonfanti, P., 2013. A LiDAR-based approach for a multi-purpose characterization of Alpine forests: an Italian case study. *iForest - Biogeosciences & Forestry*, 6, 3: 156–168.
- Aldred, A. H., in Bonnor, G. M., 1985. Application of airborne lasers to forest surveys, Information Report PI-X-51, Petawawa National Forestry Institute, 62 str.
- Anderson, J., Martin, M. E., Smith, M. L., Dubayah, R. O., Hofton, M. A., Hyde, P., Peterson, B. E., Blair, J. B., Knox, R. G., 2006. The use of waveform lidar to measure northern temperate mixed conifer and deciduous forest structure in New Hampshire. *Remote Sensing of Environment*, 105, 3: 248–261.
- Arp, H., Griesbach, J. and Burns, J., 1982: Mapping in tropical forests: a new approach using the laser APR. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48: 91–100.
- Axelsson, P. E., 1999. Processing of laser scanner data-algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 2/3: 138–147.
- Dalponte, M., Ørkab, H. O., Eneb, L. T., Gobakken, T., Næsset, E., 2014. Tree crown delineation and tree species classification in boreal forests using hyperspectral and ALS data. *Remote sensing of environment*, 140, 306–317.
- Drake, J. B., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Knox, R. G., Blair, J. B., Hofton, M. A., Chazdon, R. L., Weishampel, J. F., Prince, S., 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 79, 2/3: 305–319.
- Gašperšič, F., 1967. Razvojna dinamika mešanih gozdov jelke-bukve na Snežniku v zadnjih 100 letih. *Gozdarski vestnik*, 7/8: 202–237.
- Gozdnogospodarski načrt gozdnogospodarske enote Leskova dolina 1954–1963. *Gozdno Gospodarstvo Postojna*, Postojna
- Gozdnogospodarski načrt gozdnogospodarske enote Leskova dolina 2004–2013. *Zavod za gozdove Slovenije*, OE Postojna, Ljubljana.

- Grilc, J., 1972. Gozdno gospodarstvo Bled urejuje gozdove po metodi stalnih vzorčnih ploskev. *Gozdarski vestnik*, 31: 128–137.
- Hladnik, D., 2000. Razvoj koncepta gozdnih inventur na Slovenskem. V: Potočnik, I. (ur.). *Nova znanja v gozdarstvu – prispevek visokega šolstva*. Zbornik referatov študijskih dni, Kranjska gora, Ljubljana, BF, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, str. 105–126.
- Hladnik, D., Kobal, M., 2012. Ocenjevanje natančnosti deblovnice in volumenskih funkcij. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 98, 3–14.
- Hladnik, D., Žižek, L., 2012. Ocenjevanje gozdnosti v zasnovi gozdne inventure na Slovenskem. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 97: 31–42.
- Hollaus, M., Wagner, W., Maier, B., Schadauer, K., 2007. Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment. *Sensors*, 7(8), 1559–1577.
- Hollaus, M., Wagner, W., Schadauer, K., Maier, B., Gabler, K., 2009. Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 39: 1387–1400.
- Jakubowski, M. K., Guo, Q., Kelly, M., 2013. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. *Remote Sensing of Environment* 130: 245–253.
- Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Rätty, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P., Viitala, R., 2013. Retrieval of Forest Aboveground Biomass and Stem Volume with Airborne Scanning LiDAR. *Remote Sensing*, 5: 2257–2274
- Kobal, M., 2011. Vpliv sestojnih, talnih in mikrorastiščnih razmer na rast in razvoj jelke (*Abies alba* Mill.) na visokem krasu Snežnika: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 148 str.
- Kobler, A., 2011. Nove metode za obdelavo podatkov letalskega laserskega skenerja za monitoring gozdnih ekosistemov: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 131 str.
- Kovač, M., Hočevar, M., 2009. Kratek oris razvoja gozdnih inventur in kontrolne vzorčne metode po svetu in v Sloveniji. V: Planinšek Š. (ur.). *Kontrolna vzorčna metoda v Sloveniji – zgodovina, značilnosti in uporaba*: 7–10.
- Kušar, G., 2007. Zanesljivost ugotavljanja volumna dreves in lesne zaloge sestojev z enoparametrijskimi funkcijami in stratifikacijo: doktorska disertacija. Ljubljana: [G. Kušar], 2007. XXI, 243 str.
- Laurin, G. V., Chen, Q., Lindsell, J. A., Coomes, D. A., del Frate, F., Guerriero, L., Pirotti, F., Valentini, R., 2014. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with lidar and hyperspectral data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89, 49–58.
- Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G. G., Shugart, H. H., 1999. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67, 1: 83–98.
- Lindberg, E., Hollaus, M., 2012. Comparison of Methods for Estimation of Stem Volume, Stem Number and Basal Area from Airborne Laser Scanning Data in a Hemi-Boreal Forest. *Remote Sensing*, 4(4), 1004–1023.
- Maclean, G., 1982. Timber volume estimation using cross-sectional photogrammetric and densitometric methods, MSc thesis, University of Wisconsin, Madison, 227 str.
- Maclean, G. A., 1988. Estimation of foliar and woody biomass using an airborne lidar system, Ph.D. thesis, University of Wisconsin, Madison, 229 str.
- Maclean, G., Krabill, W., 1986. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne lidar system. *Canadian Journal of Remote Sensing* 12, 7–18.
- Matijašič, D., 2007. Sodobna orodja kontrolne metode v gozdnogospodarskem načrtovanju. Posvet ob stoletnici uvedbe kontrolne metode v snežniških gozdovih, Postojna 12. december 2007. (<http://www.zgs.si/slo/aktualno/novice/arhiv/article/267/230/index.html>)
- McRoberts, R. E., Næsset, E., Gobakken, T., 2013. Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume. *Remote Sensing of Environment*, 128: 268–275.
- Næsset, E., 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61, 2: 246–253.
- Nelson, R., Krabill, W., Maclean, G., 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 15: 201–212.
- Nelson, R., Krabill, W., Tonelli, J., 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data, *Remote Sensing of Environment*, 24: 247–267.
- Nilsson, M., 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 56, 1: 1–7.
- Nord-Larsen, T., Schumacher, J., 2012. Estimation of forest resources from a country wide laser scanning

- survey and national forest inventory data. *Remote Sensing of Environment* 119: 148–157.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., Nelson, R. F., 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 29,5: 564–577.
- Puhek, V., 2003. Regresijske enačbe za volumen dreves po dvovhodnih deblovnica. V: Kotar M. (ur.). *Gozdarski priročnik*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 46–48.
- R Development Core Team., 2014. *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Watt, M. S., Adams, T., Gonzalez Aracil, S., Marshall, H., Watt, P., 2013. The influence of LiDAR pulse density and plot size on the accuracy of New Zealand plantation stand volume equations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 43, 1: 1–10.
- Wulder, M. A., Bater, C. W., Coops, N. C., Hilker, T., White, J. C., 2008. The role of LiDAR in sustainable forest management. *The Forestry Chronicle*, 84, 6: 807–826.