Izvorni znanstveni rad – Original scientific paper
Šumarski list 150 (9–10): 397–412, 2026

Rani proaktivni pristup oblikovanju sjemenskih sastojina hrasta lužnjaka – utjecaj intenziteta prorede na elemente strukture

An Early Proactive Approach to the Development of Pedunculate Oak Seed Stands – Effects of Thinning Intensity on Stand Structural Elements

Vladimir Novotny[1], Saša Bogdan[2]*, Mladen Ivanković[1], Luka Novotny[3], Stjepan Dekanić[2]

[1] Hrvatski šumarski institut, Jastrebarsko, Hrvatska
[2] Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zagreb, Hrvatska
[3] CROATEL d.o.o., Zagreb, Hrvatska
* Dopisni autor: Saša Bogdan, e-mail: sasa.bogdan@gmail.com

SAŽETAK

Cilj istraživanja bio je procijeniti mogućnost primjene ranog i proaktivnog pristupa oblikovanju budućih sjemenskih sastojina hrasta lužnjaka (Quercus robur L.) te utvrditi učinak različitih intenziteta individualizirane prorede na razvoj odabranih strukturnih obilježja ciljnih stabala. Za razliku od tradicionalnog pristupa izdvajanja već formiranih sjemenskih sastojina, istraživani pristup temelji se na ranoj fenotipskoj selekciji kvalitetnih ciljnih stabala i njihovu postupnom oslobađanju od konkurencije, pri čemu se intenzitet zahvata određuje prema početnoj razvijenosti krošnje i potencijalnom prostoru potrebnom za njezin daljnji razvoj. Istraživanje je provedeno na tri trajne pokusne plohe u mladim i srednjedobnim sastojinama hrasta lužnjaka na području UŠP Bjelovar i UŠP Sisak. Na svakoj plohi primijenjene su četiri varijante tretmana: kontrola te slabi, srednji i jaki intenzitet prorede. Učinci tretmana procijenjeni su na temelju promjene opsega, srednjeg polumjera krošnje i ukupne visine stabala tijekom osmogodišnjeg razdoblja, od 2016. do 2024. godine, uz primjenu analize kovarijance i usporedbu procijenjenih marginalnih sredina. Intenzitet prorede statistički je značajno utjecao na razvoj opsega stabala na svim istraživanim plohama. Najizraženiji odgovor utvrđen je u najmlađoj sastojini, gdje je procijenjeni opseg porastao s 18,7 cm na kontrolnoj plohi do 22,1 cm pri jakoj proredi, uz statistički značajne razlike između svih tretmana. U sastojini trećeg dobnog razreda procijenjeni opseg iznosio je 27,8 cm na kontroli i 29,7 cm pri jakoj proredi, dok je u najstarijoj sastojini vrijednost porasla s 36,0 cm na kontroli na 37,2 cm pri jakoj proredi. Razvoj krošnje također je pokazao pozitivan odgovor na proredu, osobito u sastojini trećeg dobnog razreda, gdje je srednji polumjer krošnje pri jakoj proredi iznosio 5,18 m, u usporedbi s 3,32 m na kontrolnoj plohi. U najmlađoj sastojini utvrđena je značajna interakcija početne razvijenosti krošnje i intenziteta prorede, što upućuje na važnost pravodobnog odabira ciljnih stabala. Nasuprot tome, povećanje intenziteta prorede nije rezultiralo većim završnim visinama stabala; najveće procijenjene visine uglavnom su zabilježene na kontrolnim plohama. Dobiveni rezultati pokazuju da rana fenotipska selekcija ciljnih stabala i individualizirana proreda mogu usmjeravati razvoj opsega i krošanja te stvarati povoljnije strukturne uvjete za buduće sjemenske sastojine hrasta lužnjaka. Međutim, budući da tijekom istraživanja nisu izravno praćeni cvatnja, urod žira ni kvaliteta šumskog reprodukcijskog materijala, rezultati ne omogućuju izravan zaključak o povećanju reproduktivnog potencijala. Dugoročnije praćenje potrebno je za procjenu može li se ovakvim proaktivnim pristupom ostvariti i mjerljiv učinak na buduću rodnost i reproduktivnu funkciju sjemenskih sastojina.

Ključne riječi:
fenotipska selekcija, hrast lužnjak (*Quercus robur* L.), individualizirana proreda, ciljna stabla, razvoj krošnje, struktura sastojine, sjemenske sastojine

DOI:
https://doi.org/10.31298/sl.150.9-10.1

Kako citirati / How to Cite:
Novotny, V. i dr., 2026: Rani proaktivni pristup oblikovanju sjemenskih sastojina hrasta lužnjaka – utjecaj intenziteta prorede na elemente strukture. Šumarski list 150 (9–10): 397–412. https://doi.org/10.31298/sl.150.9-10.1

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

UVOD

INTRODUCTION

Klimatske promjene, učestaliji ekstremni vremenski događaji i promjene uvjeta rasta sve snažnije utječu na stabilnost i razvoj šumskih ekosustava te povećavaju potrebu za prilagodbom načina gospodarenja šumama. U takvim okolnostima posebno dobiva na važnosti osiguranje kvalitetnog šumskog reprodukcijskog materijala i dugoročno očuvanje reproduktivne sposobnosti šumskih populacija. Proizvodnja sjemena kod hrastova prirodno je vrlo promjenjiva između godina, a klimatski čimbenici mogu značajno utjecati na intenzitet i uspješnost reprodukcije (Pérez-Ramos i dr. 2014, Bogdziewicz i dr. 2017). Najnovija istraživanja dodatno upozoravaju na moguće dugoročno smanjenje proizvodnje održivog sjemena šumskog drveća u uvjetima klimatskog zagrijavanja, pri čemu su kod hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) zabilježene osobito izražene promjene (Foest i dr. 2026).

Kod hrasta lužnjaka problem osiguranja sjemena dodatno je naglašen velikim međugodišnjim oscilacijama uroda žira. Na proizvodnju i kvalitetu žira utječu klimatske prilike, dob i struktura sastojine, položaj stabala u sastojini te individualna svojstva stabala (Gavranović Markić i dr. 2022, Rumiantsev i dr. 2023). Pri tome razvijenost krošnje predstavlja jedno od važnih obilježja povezanih s mogućnošću stabla da raspolaže dovoljnom količinom asimilata potrebnih za rast i reprodukciju. Novija istraživanja potvrđuju složenost procesa cvatnje i razvoja žira kod hrasta, pri čemu između cvatnje i konačnog uroda može doći do vrlo velikih gubitaka tijekom razvoja plodova (McClory i dr. 2024a). Također je dokazano da na uspješnost proizvodnje žira može utjecati i izvor peludi, što dodatno naglašava važnost sastojinske strukture i prostornog rasporeda reproduktivno sposobnih stabala (McClory i dr. 2024b).

U tradicionalnom pristupu sjemenske se sastojine uglavnom prepoznaju i odabiru među već formiranim odraslim sastojinama na temelju njihovih fenotipskih, proizvodnih i drugih poželjnih obilježja. Takav pristup omogućuje odabir kvalitetnih sastojina i stabala, ali je u velikoj mjeri pasivan jer se razvojna struktura sastojine i oblik krošanja u prethodnim fazama razvoja ne oblikuju primarno s ciljem buduće reproduktivne funkcije. U uvjetima klimatskih promjena i sve veće potrebe za kvalitetnim šumskim reprodukcijskim materijalom nameće se pitanje može li se dio tog procesa unaprijed usmjeriti odgovarajućim uzgojnim postupcima.

Jedan od mogućih pristupa jest rano i proaktivno oblikovanje budućih sjemenskih sastojina kroz individualizirani odabir stabala i stvaranje povoljnijih uvjeta za njihov razvoj. Proredom se mijenja raspoloživi vegetacijski prostor, intenzitet konkurencije i količina resursa dostupnih preostalim stablima, što može značajno utjecati na njihov prsni promjer, razvoj krošnje i druge elemente strukture sastojine. Istraživanja na hrastu lužnjaku potvrđuju da intenzitet prorede može utjecati na rast stabala, korištenje vode i produktivnost sastojine, pri čemu intenzivniji selektivni zahvati mogu biti osobito značajni u uvjetima povećane konkurencije za resurse (Niccoli i dr. 2020). Istodobno, veći prostor za razvoj krošnje ne mora nužno rezultirati proporcionalnim povećanjem svih dimenzijskih obilježja stabla, zbog čega odnos između intenziteta prorede, razvoja krošnje i visinskog prirasta zahtijeva posebno razmatranje.

Upravo se u tome ogleda osnovna pretpostavka ovoga istraživanja. Umjesto da se sjemenska sastojina oblikuje tek nakon što stabla dosegnu dob u kojoj je moguće pouzdano procijeniti njihova reproduktivna i fenotipska svojstva, predlaže se raniji, proaktivni pristup kojim se odabrana stabla tijekom razvoja usmjeravaju prema budućoj reproduktivnoj ulozi. Inovativnost takvog pristupa nije samo u primjeni različitih intenziteta prorede, nego u povezivanju fenotipske selekcije stabala, ciljanog prostora za razvoj njihovih krošanja i dugoročnog cilja oblikovanja sastojinske strukture pogodne za buduću proizvodnju kvalitetnog reprodukcijskog materijala. Pri tome se ne pretpostavlja da razvoj krošnje sam po sebi dokazuje povećanu reproduktivnost, već da predstavlja jedan od strukturnih preduvjeta koji mogu biti važni za buduću reproduktivnu funkciju stabala.

Ovakav pristup posebno je značajan u kontekstu potrebe za očuvanjem i učinkovitim korištenjem genetski vrijednog šumskog reprodukcijskog materijala. Očuvanje genetske raznolikosti i prilagodljivosti populacija hrasta lužnjaka predstavlja važan element budućeg gospodarenja, osobito u uvjetima promijenjenih klimatskih prilika (Popović i dr. 2023). Istodobno, novija istraživanja pokazuju da klimatski uvjeti mogu utjecati ne samo na vegetativni rast nego i na reproduktivne procese, zbog čega se buduće upravljanje sjemenskim sastojinama ne može promatrati odvojeno od pitanja vitalnosti i prilagodljivosti stabala (Foest i dr. 2026). U tom smislu povećanje prostora za razvoj odabranih stabala može imati višestruku funkciju: osim mogućeg poticanja razvoja krošnje i reproduktivnih preduvjeta, može pridonijeti i većoj individualnoj vitalnosti stabala kroz smanjenje konkurencije za svjetlo, vodu i hranjiva.

Cilj istraživanja bio je utvrditi utjecaj različitih intenziteta individualiziranih proreda na razvoj odabranih stabala hrasta lužnjaka te promjene temeljnih elemenata strukture sastojine, s posebnim naglaskom na prsni promjer, visinu stabala i razvoj krošanja. Uz to se nastojalo utvrditi može li se povećanjem prostora oko fenotipski odabranih stabala tijekom relativno rane razvojne faze postići povoljniji razvoj njihovih strukturnih obilježja i time stvoriti preduvjete za dugoročno oblikovanje budućih sjemenskih sastojina.

Pri interpretaciji rezultata potrebno je naglasiti da se u ovom istraživanju reproduktivna svojstva stabala nisu izravno pratila, odnosno nisu analizirani cvatnja, urod i kvaliteta žira. Stoga dobiveni rezultati predstavljaju procjenu utjecaja proreda na strukturne i razvojne pokazatelje stabala koji mogu biti povezani s njihovom budućom reproduktivnom funkcijom, a ne izravan dokaz povećanja proizvodnje sjemena. Upravo će dugoročno praćenje cvatnje, uroda žira i kvalitete proizvedenog šumskog reprodukcijskog materijala biti potrebno za konačnu procjenu učinkovitosti ovoga pristupa.

MATERIJAL I METODE

MATERIAL AND METHODS

Područje istraživanja i osnivanje trajnih pokusnih ploha

Study Area and the Establishment of Permanent Sample Plots

Istraživanje je provedeno u mladim i srednjedobnim sastojinama hrasta lužnjaka na području Uprava šuma podružnica

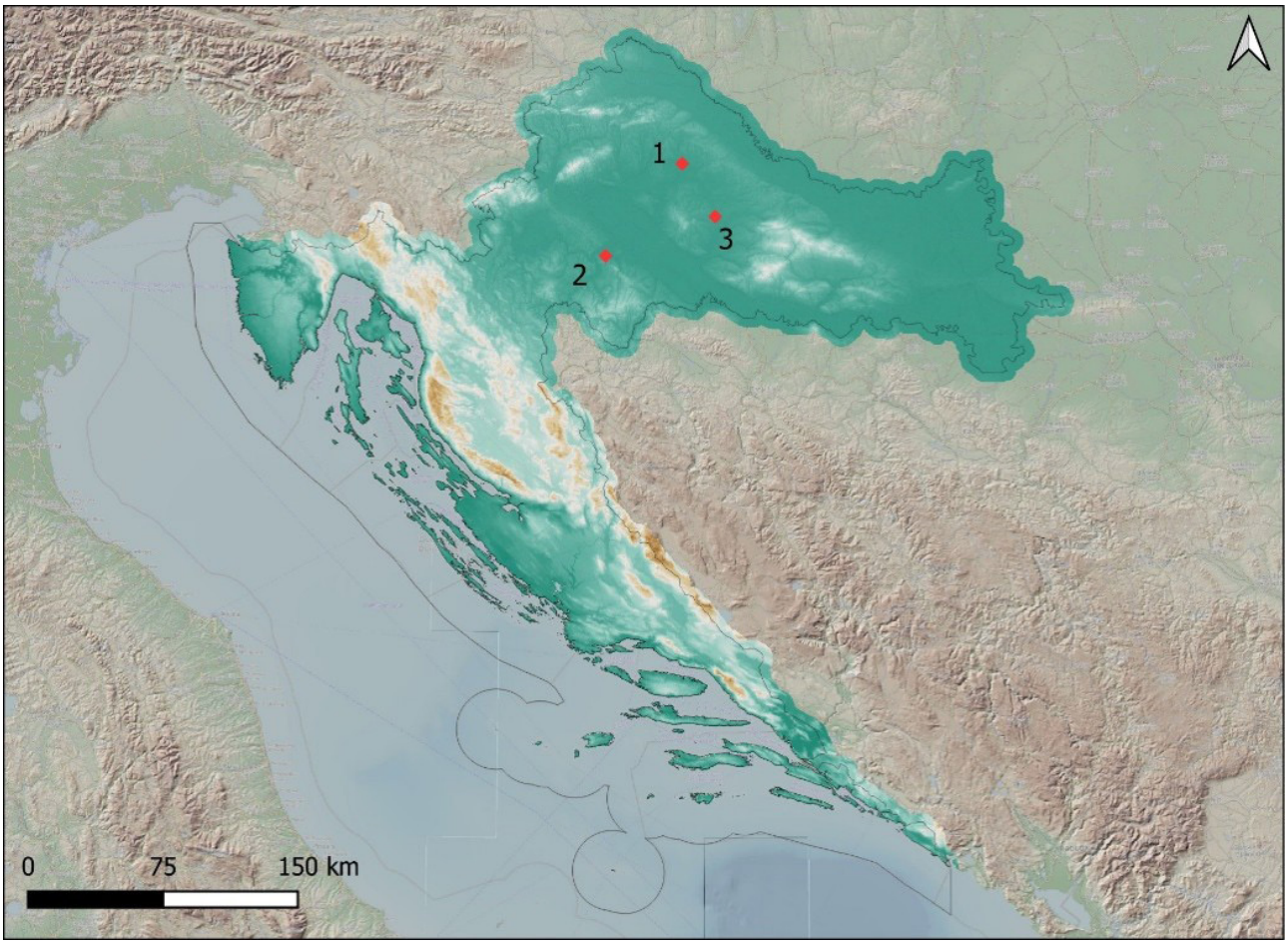
Bjelovar i Sisak. Sastojine su odabrane na temelju podataka iz važećih osnova gospodarenja, pri čemu su stvarne vrijednosti osnovnih strukturnih elemenata sastojina uspoređene s vrijednostima navedenima u prirasno-prihodnim tablicama za hrast lužnjak (Špiranec 1975b). Na temelju dobivenih rezultata analiza odabrane su sastojine dobre proizvodnosti i očuvane strukture koje pripadaju II., III. i IV. dobnom razredu.

Nakon terenskog obilaska odabranih sastojina izdvojene su tri lokacije za osnivanje trajnih pokusnih ploha (TPP), po jedna u svakom istraživanom dobnom razredu (Tablica 1). Pri odabiru lokacija uzeti su u obzir pravilan prostorni raspored stabala, očuvanost sastojinske strukture, vitalnost stabala te izražena fenotipska kvaliteta hrasta lužnjaka.

Položaj TPP-a prikazan je na karti Republike Hrvatske (Slika 1), a osnovni strukturni elementi TPP-a prije i poslije

Tablica 1. Osnovni podaci o trajnim pokusnim plohama.
Table 1 Basic characteristics of the permanent sample plots.

Uprava šuma Podružnica *Forest Management Branch Office*	**Šumarija** *Forest Office*	**Gospodarska jedinica** *Management Unit*	**Odjel/ Odsjek** *Compartment / Subcompartment*	**Godina osnivanja** *Year of establishment*	**Starost u godini osnivanja** *Age at establishment*	**Dobni razred** *Age class*
Bjelovar	Bjelovar	Bolčanski-Žabljački lug	38b	2016	66 godina	IV
	Veliki Grđevac	Trupinski-Pašijanski gaj	17c	2017	43 godine	III
Sisak	Petrinja	Vučjak-Tješnjak	17a	2016	28 godina	II



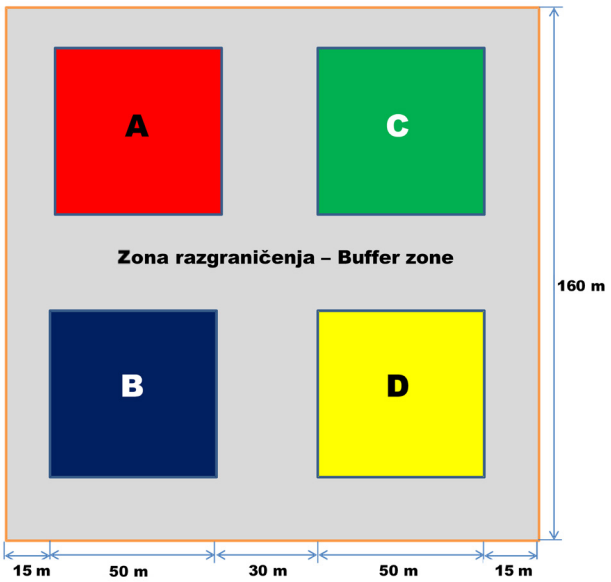
Slika 1. Položaj trajnih pokusnih ploha na karti Republike Hrvatske.
Figure 1 Location of permanent sample plots in the Republic of Croatia.

provedenih genetsko-meliorativnih zahvata različitih intenziteta u Tablici 2.

Na svakoj lokaciji osnovana je trajna pokusna ploha kvadratnog oblika, površine 2,56 ha i dimenzija 160 m × 160 m, orijentirana u smjeru sjever – jug. Svaka TPP podijeljena je na četiri podplohe dimenzija 50 m × 50 m, međusobno odvojene razgraničavajućim površinama radi smanjenja rubnog učinka i omogućavanja neovisnog praćenja razvoja sastojine. Podplohe su nasumično dodijeljene jednom od četiri tretmana: kontrolnom tretmanu (KONT), slabom

Tablica 2. Osnovni elementi strukture TPP-a prije i poslije provedenih sječa različitim intenzitetima.
Table 2 Basic structural characteristics of permanent sample plots before and after thinning at different treatment intensities.

Ploha *Plot*	Podploha *Subplot*	Prije zahvata – *Before treatment*			Zahvat *Treatment*	Poslije zahvata – *After treatment*		
		N	G	V		N	G	V
		kom./*No.*	m^2	m^3		kom./*No.*	m^2	m^3
1	A	241	8,00	98,70	SRI/MI	100	2,46	29,44
	B	231	8,26	103,43	JI/HI	87	2,54	31,09
	C	239	8,76	107,83	SLI/LI	98	3,45	45,74
	D	220	7,56	88,60	KONT/C	220	7,53	88,60
2	A	322	5,30	49,60	SRI/MI	101	1,63	15,21
	B	387	6,08	59,11	KONT/C	387	6,08	59,11
	C	386	5,57	49,81	JI/HI	76	1,10	9,96
	D	297	6,31	65,19	SLI/LI	132	2,91	30,27
3	A	342	6,29	64,89	SRI/MI	137	2,13	22,98
	B	312	6,92	72,41	SLI/LI	149	3,53	39,54
	C	306	7,31	79,91	JI/HI	99	1,74	18,58
	D	365	6,60	64,96	KONT/C	365	6,49	64,96



Slika 2. Izgled trajne pokusne plohe.
Figure 2 Layout of the permanent sample plot.

intenzitetu prorede (SLI), srednjem intenzitetu prorede (SRI) i jakom intenzitetu prorede (JI) (Slika 2).

Sve pokusne plohe pripadaju ekološko-gospodarskom tipu II-G-10, odnosno fitocenozi šume hrasta lužnjaka i običnoga graba na pseudogleju. Istraživano područje pripada umjereno kontinentalnom klimatskom području, koje karakteriziraju topla ljeta, hladne zime i oborinski režim bez izraženog sušnog razdoblja.

Terenske izmjere i prikupljanje podataka

Field Measurements and Data Collection

Na svim podplohama provedena je numeracija i prostorna evidencija svih stabala primjenom Field-Map sustava. Svakom stablu izmjeren je opseg na prsnoj visini (1,30 m) s milimetarskom točnošću, a mjesto izmjere trajno je označeno radi ponovljivosti mjerenja.

Na svim stablima hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) izmjerene su ukupna visina stabla, visina početka krošnje, visina najšireg dijela krošnje i horizontalna projekcija širine krošnje. Iste su visinske varijable izmjerene i na uzorku stabala običnoga graba (*Carpinus betulus* L.). Na temelju terenskih podataka izrađeni su digitalni prostorni modeli položaja stabala i horizontalnih projekcija krošanja primjenom GIS tehnologije.

Pokusne plohe dodatno su snimljene bespilotnom letjelicom radi izrade digitalnih modela i prostorne analize krošanja. Interpretacija zračnih snimaka provedena je u povezanosti s terenski evidentiranim položajem i vrstom stabala. Na svim podplohama provedeno je i sondiranje tla te uzorkovanje za laboratorijske analize.

Svaka od triju istraživanih ploha bila je podijeljena na četiri podplohe označene slovima A, B, C i D (Slika 2). Oznake A – D predstavljaju identifikacijske oznake podploha i ne označavaju iste strukturne elemente na različitim plohama. Pripadnost podploha tretmanima, kontrola (KONT), slabi intenzitet (SLI), srednji intenzitet (SRI) i jaki intenzitet (JI) proreda, definirana je za svaku plohu zasebno i istaknuta u tabličnim (Tablica 2.) i tekstualnim prikazima.

Analiza strukturnih elemenata sastojina

Analysis of Stand Structure Characteristics

Nakon osnivanja pokusnih ploha analizirano je početno stanje osnovnih strukturnih elemenata sastojina. Dobivene vrijednosti uspoređene su s normalnim stanjem sastojina, a gustoća istraživanih sastojina procijenjena je i u odnosu na liniju prirodnog izlučivanja za sastojine hrasta lužnjaka prema Dekaniću (2014):

$$ln(N) = 13{,}19921 - 2{,}02416 \times ln(ds_{SPS})$$

gdje je:
N – broj stabala po hektaru,
ds_{SPS} – promjer srednjeg plošnog stabla (cm).

Promjer srednjeg plošnog stabla izračunat je Curtis-Marshallovom formulom:

$$ds_{SPS} = \sqrt{\frac{G}{k \cdot N}}$$

gdje je:

k – koeficijent oblika (korekcijski koeficijent),

dok je za modeliranje visinskih krivulja korištena Mihailova funkcija:

$$h = b_0 \cdot e^{-b_1/d} + 1{,}30$$

gdje su:

b_0 i b_1 – parametri Mihailove funkcije procijenjeni na temelju izmjerenih podataka,

Volumen stabala izračunat je Schumacher-Hallovom jednadžbom uporabom parametara iz drvnogromadnih tablica (Špiranec 1975a):

$$v = a \cdot d^b \cdot h^c \cdot f$$

gdje su:

a, b i c – parametri Schumacher-Hallove jednadžbe

f – faktor odnosno koeficijent oblika stabla,

a prosječni je polumjer krošnje izračunat kao kvadratna aritmetička sredina izmjerenih polumjera krošanja prema Pretzschu (2009):

$$\bar{r}_q = \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 + \cdots + r_n^2)/n}.$$

Fenotipska selekcija i određivanje intenziteta proreda

Phenotypic Selection and Determination of Thinning Intensity

Na svim pokusnim plohama provedena je fenotipska procjena stabala hrasta lužnjaka prema unaprijed definiranom sustavu ocjenjivanja. Pri procjeni su uzeti u obzir položaj stabla u sastojini, kvaliteta forme debla, razvijenost i kvaliteta krošnje, usukanost debla te punodrvnost. Na temelju navedenih obilježja provedena je selekcija stabala koja su, s obzirom na fenotipsku kvalitetu i razvojni potencijal, određena kao ciljna stabla za buduću reproduktivnu ulogu.

Ukupna ocjena kvalitete pojedinačnog stabla izračunata je ponderiranjem ocjena kvalitete forme stabla, kvalitete krošnje i punodrvnosti prema izrazu:

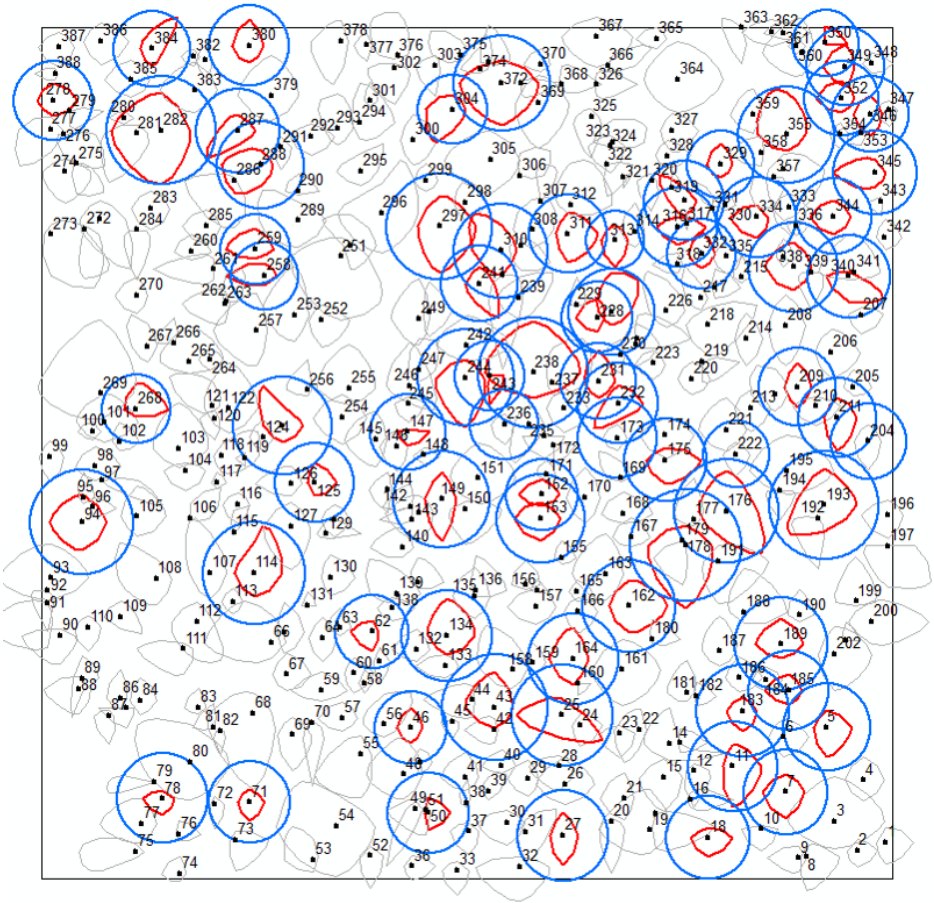
$$Ukupna\ ocjena = (KF \times 0{,}7) + (KK \times 0{,}2) + (PUD \times 0{,}1)$$

gdje je:

KF – kvaliteta forme stabla,

KK – kvaliteta krošnje,

PUD – punodrvnost.



Slika 3. Stvarne krošnje odabranih ciljnih stabala (crvene linije) u odnosu na potencijalni maksimalni polumjer krošnje prema Hasenaueru (1997) (plave linije) na podplohi 2C.
Figure 3 Actual crowns of the selected target trees (red lines) in relation to the potential maximum crown radius according to Hasenauer (1997) (blue lines) in subplot 2C.

Na temelju ukupne ocjene izdvojena su ciljna stabla hrasta lužnjaka koja su predstavljala osnovu za planiranje individualiziranih uzgojnih zahvata. Za razliku od klasičnog pristupa određivanju intenziteta prorede na razini sastojine, u ovom istraživanju intenzitet prorede određen je za svako ciljno stablo pojedinačno, uzimajući u obzir njegovu postojeću razvijenost krošnje i prostorni odnos prema konkurentskim stablima.

Za procjenu potencijalnog prostora potrebnog za razvoj krošnje primijenjen je model Hasenauera (1997) za procjenu potencijalnog maksimalnog promjera krošnje soliternih hrastovih stabala:

$$SK = 0{,}6721 \cdot ds^{0{,}7328} \cdot 1{,}019$$

gdje je *SK* širina krošnje, a *ds* prsni promjer stabla.

Na temelju odnosa stvarne i potencijalne razvijenosti krošnje definirani su indeks razvijenosti polumjera krošnje (IRKr) i indeks razvijenosti površine projekcije krošnje (IRKp). Ovi pokazatelji korišteni su za procjenu stupnja iskorištenosti potencijalnog prostora krošnje pojedinačnih ciljnih stabala te kao dodatna osnova za određivanje intenziteta prorede.

Za potrebe planiranja i provedbe doznake izrađeni su digitalni planovi horizontalnih projekcija krošanja. Na planove su unesene stvarne projekcije krošanja ciljnih i konkurentskih stabala te potencijalne projekcije krošanja ciljnih stabala dobivene primjenom Hasenauerova modela. Na temelju prostornog odnosa ciljnih stabala i njihovih potencijalnih projekcija krošanja određena su stabla koja je potrebno ukloniti u pojedinim tretmanima prorede (Slika 3).

Na svakoj TPP četiri su podplohe nasumično dodijeljene različitim intenzitetima prorede, pri čemu su definirani sljedeći tretmani:

- **Kontrolna ploha (KONT)** – na ovoj se podplohi ne provode nikakvi zahvati nego se samo provodi izmjera i monitoring razvoja elemenata strukture bez utjecaja uzgojnih zahvata.
- **Slabi intenzitet prorede (SLI)** – na ovoj se podplohi svakom odabranom ciljnom stablu uklanjaju samo neposredni konkurenti, tj. ona lužnjakova stabla čije se stvarne projekcije krošanja preklapaju/zadiru u stvarnu projekciju krošnje odabranog ciljnog stabla na koju se dodaje zona razgraničenja (*buffer* zona) od 50 centimetara. Uklanjaju se i stabla graba čija se projekcija krošnje preklapa s projekcijom stvarne krošnje odabranog ciljnog stabla (i zone razgraničenja od 50 cm), a čija je visina veća od 2/3 duljine debla odabranog ciljnog stabla hrasta lužnjaka.
- **Srednji intenzitet prorede (SRI)** – na ovoj se podplohi svakom odabranom ciljnom stablu uklanjaju svi konkurenti (stabla hrasta lužnjaka) čija stvarna projekcija krošnje zadire u njegovu potencijalnu projekciju krošnje. Uklanjaju se i stabla graba čija se projekcija krošnje preklapa s projekcijom potencijalne projekcije krošnje odabranog ciljnog stabla, a čija je visina veća od 2/3 duljine debla odabranog ciljnog stabla hrasta lužnjaka.
- **Jaki intenzitet prorede (JI)** – na ovoj se podplohi svakom odabranom ciljnom stablu uklanjaju sva konkurentska lužnjakova stabla čija potencijalna projekcija krošnje zadire u potencijalnu projekciju krošnje odabranog ciljnog stabla. Uklanjaju se i stabla graba čija se projekcija krošnje preklapa s projekcijom potencijalne krošnje odabranog ciljnog stabla, a čija je visina veća od 2/3 duljine debla odabranog ciljnog stabla hrasta lužnjaka.

Na taj je način uspostavljen eksperimentalni gradijent intenziteta prorede koji se nije temeljio samo na ukupnom udjelu uklonjenih stabala ili temeljnice, nego na individualnim prostornim odnosima ciljnih stabala i njihovih konkurenata te na potencijalnom prostoru potrebnom za razvoj krošnje. Takav pristup omogućio je usmjeravanje uzgojnih zahvata prema prethodno odabranim fenotipski kvalitetnim stablima i njihovu postupnom oslobađanju od konkurencije.

Primijenjena metodologija predstavlja rani, proaktivni pristup oblikovanju buduće strukture sjemenskih sastojina, pri čemu se razvoj odabranih stabala usmjerava prije njihova ulaska u fazu intenzivnog plodonošenja. Cilj nije bio neposredno procijeniti reproduktivnu sposobnost stabala, već stvoriti različite razine raspoloživog prostora i razvijenosti krošnje te pratiti njihov utjecaj na rast i razvoj odabranih strukturnih elemenata. Na taj je način osigurana podatkovna osnova za procjenu učinka različitih intenziteta prorede na razini pojedinačnog stabla i sastojine.

Terenska realizacija doznake i sječe doznačenih stabala na odabranim trajnim pokusnim plohama provedena je od siječnja do ožujka 2018. godine. Nakon provedbe uzgojnih zahvata pokusne su plohe ponovno izmjerene radi utvrđivanja početnog stanja nakon prorede i praćenja daljnjeg razvoja odabranih strukturnih elemenata.

Statistička obrada podataka

Statistical Data Analysis

Sve statističke analize provedene su u programskom okruženju R, verzija 4.5.2 (R Core Team 2026). Analizirana su tri strukturna obilježja pojedinačnih stabala hrasta lužnjaka: opseg stabla na prsnoj visini, srednji polumjer krošnje i ukupna visina stabla. Mjerenja provedena 2016. godine korištena su kao početno stanje prije provedbe eksperimentalnih zahvata, dok su mjerenja iz 2024. godine predstavljala završno stanje nakon osmogodišnjeg razdoblja razvoja sastojina s različitim intenzitetima prorede.

Za sva analizirana obilježja najprije su izračunati osnovni deskriptivni statistički pokazatelji. Za procjenu povezanosti početnih i završnih vrijednosti pojedinih obilježja izračunati su Pearsonovi koeficijenti korelacije. Budući da početne dimenzije stabala mogu značajno utjecati na njihove završne dimenzije, odnosno na veličinu promjene tijekom promatranog razdoblja, učinak različitih intenziteta prorede procijenjen je primjenom analize kovarijance (ANCOVA). U modele su početne vrijednosti pojedinih obilježja uključene kao kovarijate kako bi se učinak tretmana procijenio uz kontrolu početnih razlika među stablima.

Za analizu opsega stabala izrađen je globalni ANCOVA model u koji su uključeni početni opseg stabla, dobna skupina pokusne plohe, intenzitet prorede te interakcija dobi plohe i intenziteta prorede:

$$opseg2024 \sim opseg2016 + dob\ plohe + intenzitet\ prorede + dob\ plohe \times intenzitet\ prorede$$

Značajnost pojedinih čimbenika procijenjena je primjenom Type III sume kvadrata uz korištenje paketa *car*. Budući da je utvrđena statistički značajna interakcija između dobi plohe i intenziteta prorede, učinak tretmana na opseg stabala dalje je analiziran zasebno za svaku pokusnu plohu.

Za srednji polumjer krošnje i ukupnu visinu stabala prije konačne prilagodbe ANCOVA modela provjerena je pretpostavka homogenosti regresijskih nagiba između početne vrijednosti analiziranog obilježja i intenziteta prorede. U tu je svrhu testirana interakcija između početne vrijednosti obilježja i intenziteta prorede. Kada interakcija nije bila statistički značajna, primijenjen je standardni ANCOVA model s paralelnim regresijskim pravcima. U slučajevima u kojima je utvrđena statistički značajna interakcija, odnosno narušena pretpostavka homogenosti regresijskih nagiba, primijenjen je interakcijski model koji je uključivao interakcijski član početna vrijednost × intenzitet prorede.

Nakon prilagodbe odgovarajućih modela izračunate su procijenjene marginalne sredine (*Estimated Marginal Means* – EMM) korištenjem paketa *emmeans*. EMM vrijednosti omogućile su usporedbu završnih vrijednosti analiziranih obilježja između različitih intenziteta prorede uz istodobnu kontrolu početnih razlika među stablima. Razlike između tretmana testirane su Tukeyjevim post hoc testom uz korekciju za višestruke usporedbe.

Za opseg stabala, zbog utvrđene značajne interakcije između dobi plohe i intenziteta prorede, rezultati su interpretirani zasebno za svaku pokusnu plohu. Za srednji polumjer krošnje standardni ANCOVA model primijenjen je na plohama 1 i 3, dok je za plohu 2 primijenjen interakcijski model zbog narušene pretpostavke homogenosti regresijskih nagiba. Kod analize ukupne visine stabala interakcijski model primjenjen je na plohama 1 i 3, dok je na plohi 2 primijenjen standardni ANCOVA model. Radi međusobne usporedivosti, procijenjene marginalne sredine ukupne visine prikazane su za sve istraživane plohe.

Statistička značajnost svih analiza procjenjivana je pri razini $\alpha = 0,05$. Rezultati su prikazani kao procijenjene marginalne sredine s pripadajućim standardnim pogreškama, uz rezultate ANCOVA i Tukeyjevih post hoc usporedbi.

S obzirom na eksperimentalni dizajn, u kojem su različiti intenziteti prorede dodijeljeni podplohama unutar trajnih pokusnih ploha, rezultati su interpretirani prvenstveno kao učinak različitih režima prorede na razvoj odabranih stabala, uz uvažavanje početnih razlika među stablima. Posebna je pozornost posvećena interakciji dobi plohe i intenziteta prorede jer ona ukazuje da odgovor stabala na isti intenzitet prorede nije nužno jednak u različitim razvojnim fazama sastojine.

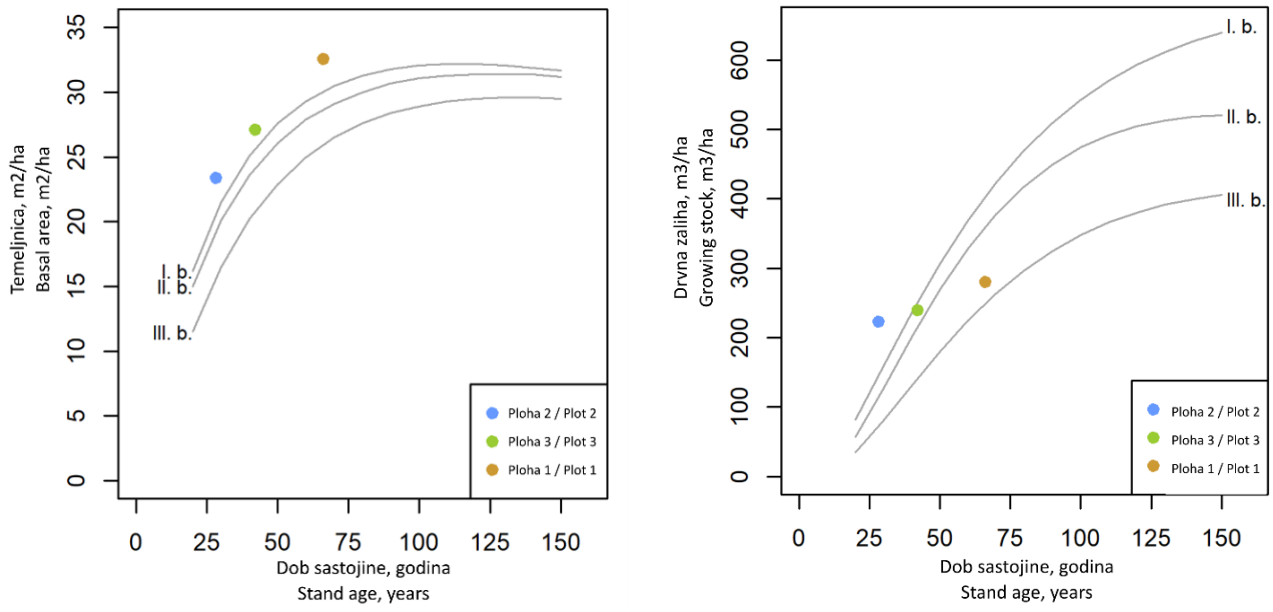
REZULTATI

RESULTS

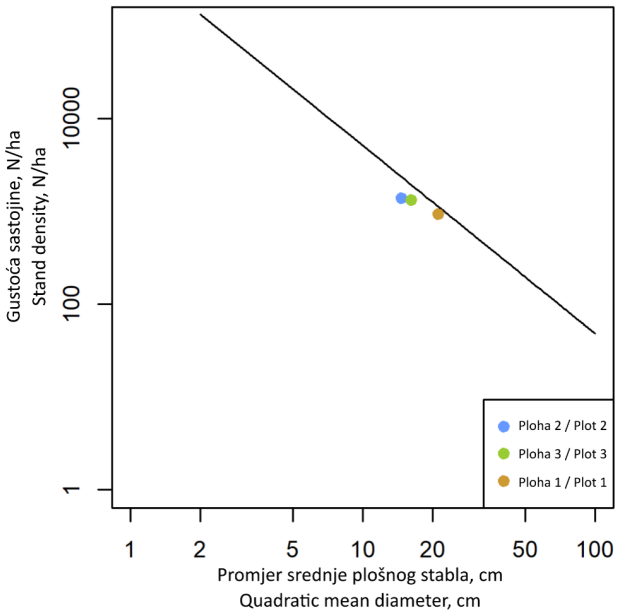
Analiza stvarnog i normalnog stanja istraživanih sastojina prikazana je kao usporedba stvarnih vrijednosti temeljnice i drvne zalihe po hektaru s odgovarajućim vrijednostima iz prirasno-prihodnih tablica prema Špirancu (1975b) (Slika 4).

Položaj istraživanih sastojina na trajnim pokusnim plohama u odnosu na graničnu liniju izlučivanja lužnjakovih sastojina u Republici Hrvatskoj prema Dekaniću (2014) prikazan je na Slici 5.

Nakon provedenih uzgojnih i genetsko-meliorativnih zahvata analizirana je struktura zahvata prema broju posječenih stabala i temeljnici. Za sve TPP izrađene su distribucije zahvata te 2D modeli postojećeg stanja sastojina i 2D modeli usporedbe stanja prije i nakon sječe.



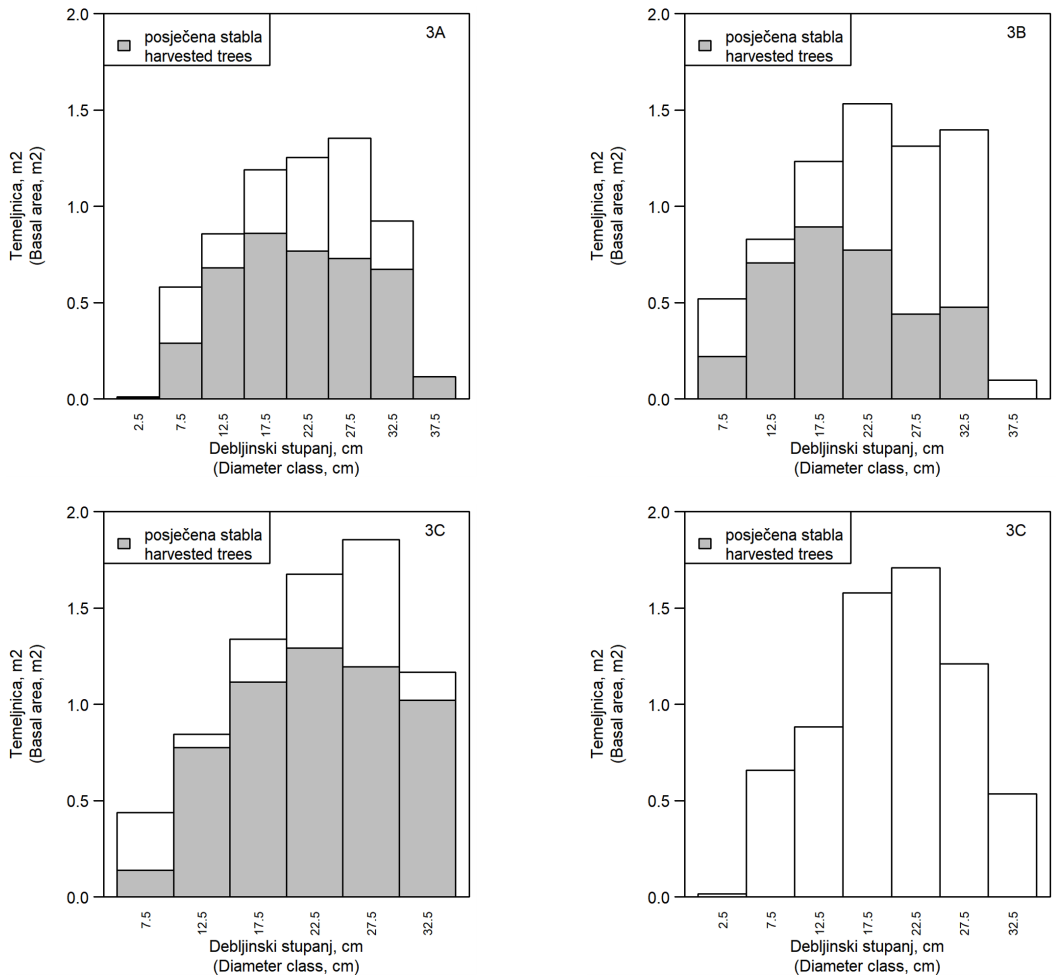
Slika 4. Usporedba temeljnice i drvne zalihe po hektaru trajnih pokusnih ploha s prirasno-prihodnim tablicama prema Špirancu (1975b).
Figure 4 Comparison of basal area and growing stock per hectare in permanent sample plots with the yield tables according to Špiranec (1975bvvv).



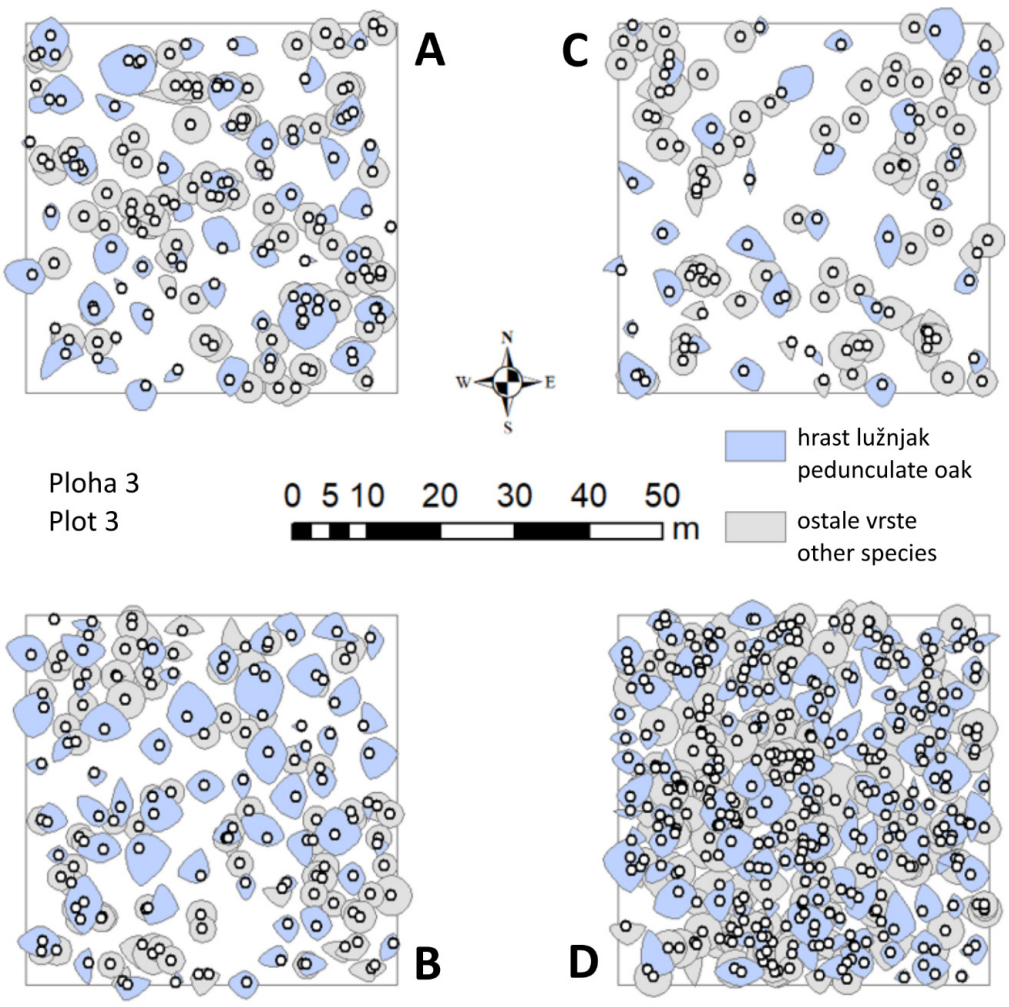
Slika 5. Usporedba položaja istraživanih sastojina trajnih pokusnih ploha u odnosu na graničnu liniju izlučivanja za lužnjakove sastojine u Republici Hrvatskoj prema Dekaniću (2014).
Figure 5 Comparison of the position of the studied stands on permanent sample plots relative to the stand delineation boundary for pedunculate oak stands in Croatia according to Dekanić (Dekanić 2014).

Primjer distribucije temeljnice posječenih stabala prikazan je za TPP 3 na Slici 6.

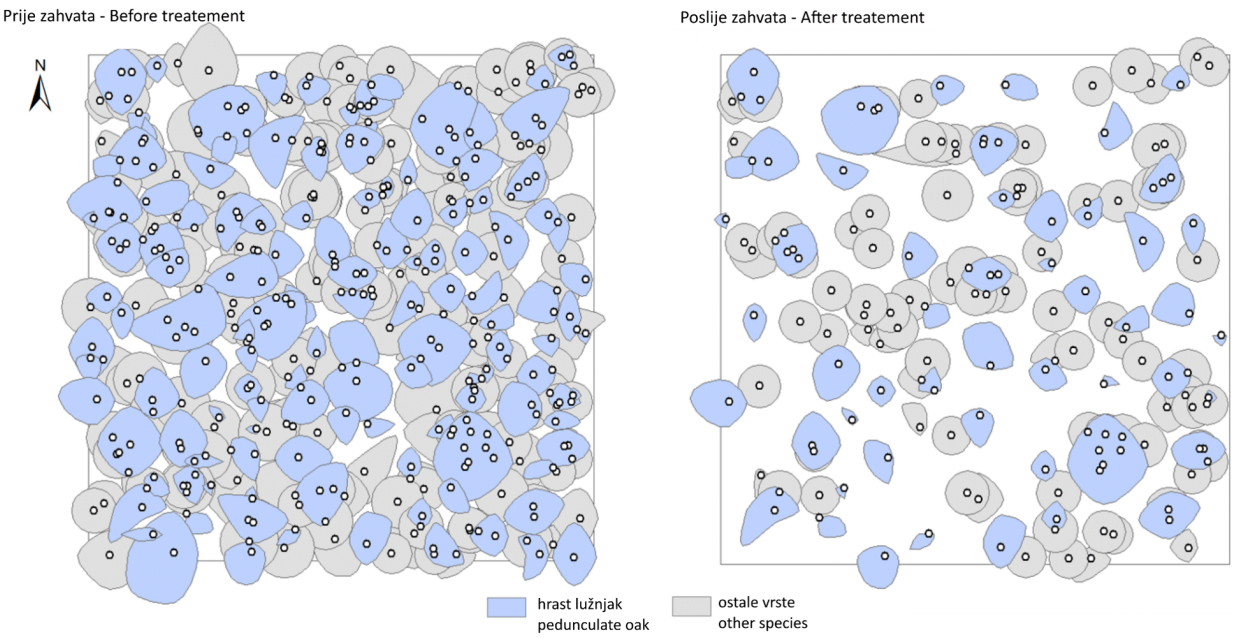
Primjer 2D modela postojećeg stanja sastojine na trajnoj pokusnoj plohi 3 prikazan je na Slici 7, dok je na Slici 8 prikazan primjer 2D modela usporedbe stanja prije i nakon sječe za podplohu 3A.



Slika 6. Distribucije temeljnice posječenih stabala svih vrsta drveća na TPP 3.
Figure 6 Basal area distribution of harvested trees of all tree species on PSP 3.



Slika 7. 2D model situacije sadašnjeg stanja TPP 3.
Figure 7 2D model of the current situation on PSP 3.



Slika 8. 2D model usporedbe stanja prije i nakon sječe stabala na podplohi 3A.
Figure 7 2D model comparing the stand conditions before and after tree harvesting on sublot 3A.

Razvoj opsega stabala

Development of Tree Circumference

Intenzitet prorede značajno je utjecao na razvoj opsega stabala na svim istraživanim plohama, pri čemu se veličina odgovora razlikovala među dobnim skupinama (Tablica 3, Slika 9). Najizraženiji učinak zabilježen je u najmlađoj sastojini (ploha 2), gdje je ANCOVA pokazala vrlo snažan utjecaj tretmana ($F = 146{,}12$; $p < 0{,}0001$). Na plohi III. dobnog razreda (ploha 3) učinak prorede također je bio značajan ($F = 23{,}33$; $p < 0{,}0001$), dok je u najstarijoj sastojini (ploha 1) zabilježen slabiji, premda statistički značajan odgovor prirasta opsega stabala na prorede ($F = 7{,}48$; $p = 0{,}00014$) (Tablica 3).

Procijenjene marginalne sredine (EMM) pokazale su različite obrasce odgovora među plohama (Tablica 4). U najstarijoj plohi (IV. dobni razred) su sva tri intenziteta prorede rezultirala većim opsegom stabala u odnosu na kontrolu, dok između pojedinih intenziteta prorede nisu utvrđene statistički značajne razlike. Opsezi stabala na prorijeđenim podplohama iznosili su 37,0 – 37,4 cm, dok je na kontrolnoj podplohi prosječna vrijednost iznosila 36,0 cm (Tablica 4).

Najmlađa ploha (II. dobni razred) pokazala je jasan gradijent odgovora na intenzitet prorede. Procijenjeni opseg stabala povećavao se od kontrole (18,7 ± 0,08 cm), preko slabe (19,6 ± 0,11 cm) i srednje prorede (20,6 ± 0,13 cm) do jake prorede (22,1 ± 0,16 cm). Sve međusobne usporedbe bile su statistički značajne, što ukazuje na progresivno povećanje učinka s intenzitetom prorede (Tablica 4).

Na plohi srednje dobi (III. dobni razred) najveće vrijednosti opsega zabilježene su na plohama sa srednje jakom (29,6 ± 0,21 cm) i jakom proredom (29,7 ± 0,27 cm), koje se međusobno nisu statistički značajno razlikovale, ali su obje imale značajno veće opsege od slabe prorede i kontrole. Slaba proreda nije se razlikovala od kontrolne plohe (Tablica 4).

Tablica 3. ANCOVA rezultati za prsni opseg stabala.
Table 3 ANCOVA results for tree breast-height circumference.

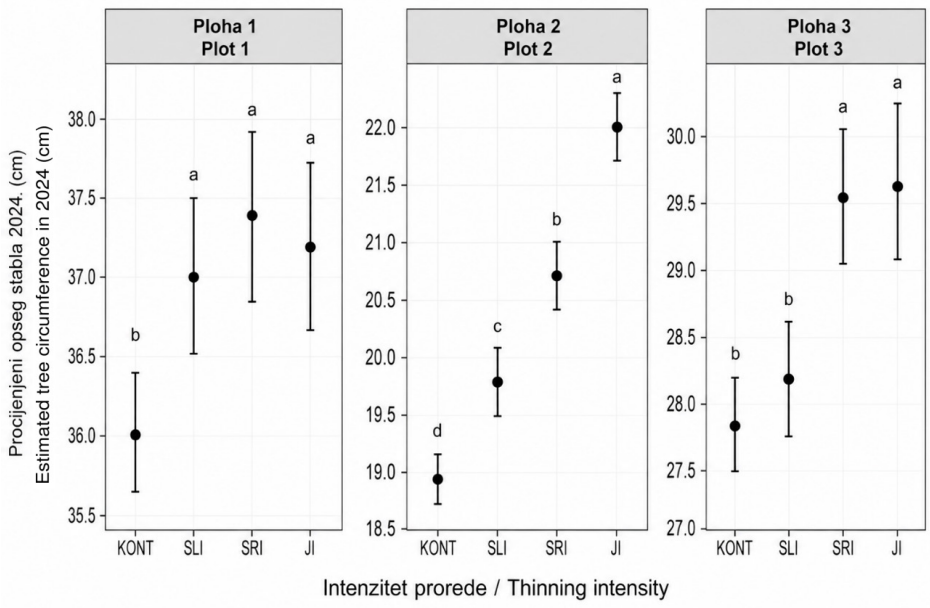
Ploha *Plot*	F (tretman) *F (treatment)*	p
1	7,48	0,00014
2	146,12	< 0,0001
3	23,33	< 0,0001

Prikazane su F-vrijednosti i pripadajuće razine značajnosti za učinak intenziteta prorede na prsni opseg stabala nakon uključivanja početnog prsnog opsega (2016.) kao kovarijate u ANCOVA model. Statistička značajnost određena je pri razini p < 0,05.
F-values and corresponding significance levels for the effect of thinning intensity on tree breast-height circumference are presented after accounting for initial breast-height circumference (2016) as a covariate in the ANCOVA model. Statistical significance was determined at p < 0.05.

Tablica 4. Procijenjene marginalne sredine (EMM) opsega stabala i Tukeyjeve grupe.
Table 4 Estimated marginal means (EMMs) of tree circumference and Tukey grouping.

Dob *Age*	Tretman prorede *Thinning treatment*	EMM ± SE (cm)	Grupa *Group*
1	SRI	37,4 ± 0,30	a
	JI	37,2 ± 0,30	a
	SLI	37,0 ± 0,22	a
	KONT	36,0 ± 0,18	b
2	JI	22,1 ± 0,16	a
	SRI	20,6 ± 0,13	b
	SLI	19,6 ± 0,11	c
	KONT	18,7 ± 0,08	d
3	JI	29,7 ± 0,27	a
	SRI	29,6 ± 0,21	a
	SLI	28,1 ± 0,18	b
	KONT	27,8 ± 0,15	b

EMM = procijenjena marginalna sredina; SE = standardna pogreška. Procijenjene marginalne sredine izračunate su iz ANCOVA modela nakon korekcije za početni opseg stabala (2016.). Sredine označene istim slovom unutar pojedine dobne skupine ne razlikuju se statistički značajno prema Tukeyjevom post hoc testu (p ≥ 0,05).
EMM = estimated marginal mean; SE = standard error. Estimated marginal means were derived from the ANCOVA model after adjusting for initial tree circumference (2016). Means followed by the same letter within an age class are not significantly different according to Tukey's post hoc test (p ≥ 0.05).



Slika 9. Procijenjene marginalne sredine (EMM ± 95 % CI) opsega stabala 2024. godine prema intenzitetu prorede u trima plohama različite dobi (II., III. odnosno IV. dobni razred). Različita slova označavaju statistički značajne razlike između tretmana unutar pojedine plohe prema Tukeyjevom post hoc testu (p < 0,05).
Figure 9 Estimated marginal means (EMMs ± 95% CI) of tree circumference in 2024 according to thinning intensity across three plots of different ages (2nd, 3rd, and 4th age classes, respectively). Different letters indicate statistically significant differences among treatments within each plot based on Tukey's post hoc test (p < 0.05).

Tablica 5. ANCOVA rezultati za srednji polumjer krošnje.
Table 5 ANCOVA results for mean crown radius.

Ploha *Plot*	F (tretman) *F (treatment)*	p	Interakcija *Interaction*
1	2,51	0,063	Ne / No
2	5,26	0,0014	Da / Yes (p = 0,0001)
3	117,45	< 0,0001	Ne / No

Prikazane su F-vrijednosti i pripadajuće razine značajnosti za učinak intenziteta prorede na srednji polumjer krošnje nakon uključivanja početnog polumjera krošnje (2016.) kao kovarijate u ANCOVA model. Interakcija označava statistički značajnu interakciju između početnog polumjera krošnje i intenziteta prorede. Statistički značajne vrijednosti definirane su pri razini p < 0,05.
F-values and corresponding significance levels for the effect of thinning intensity on mean crown radius are presented after accounting for initial crown radius (2016) as a covariate in the ANCOVA model. Interaction indicates a statistically significant interaction between initial crown radius and thinning intensity. Statistical significance was determined at p < 0.05.

Tablica 6. EMM polumjera krošnje i Tukey grupee.
Table 6 EMMs of crown radius and Tukey groups.

Dob *Age*	Tretman prorede *Thinning treatment*	EMM ± SE (m)	Grupa *Group*
1	JI	4,39 ± 0,14	a
	SLI	4,27 ± 0,11	a
	KONT	4,07 ± 0,09	a
	SRI	3,91 ± 0,15	a
3	JI	5,18 ± 0,09	c
	SRI	4,06 ± 0,07	b
	SLI	4,05 ± 0,06	b
	KONT	3,32 ± 0,05	a

EMM = procijenjena marginalna sredina; SE = standardna pogreška. Sredine označene istim slovom unutar pojedine dobne skupine ne razlikuju se statistički značajno prema Tukeyjevom post hoc testu (p ≥ 0,05).
EMM = estimated marginal mean; SE = standard error. Means followed by the same letter within an age class are not significantly different according to Tukey's post hoc test (p ≥ 0.05).

Razvoj srednjeg polumjera krošnje

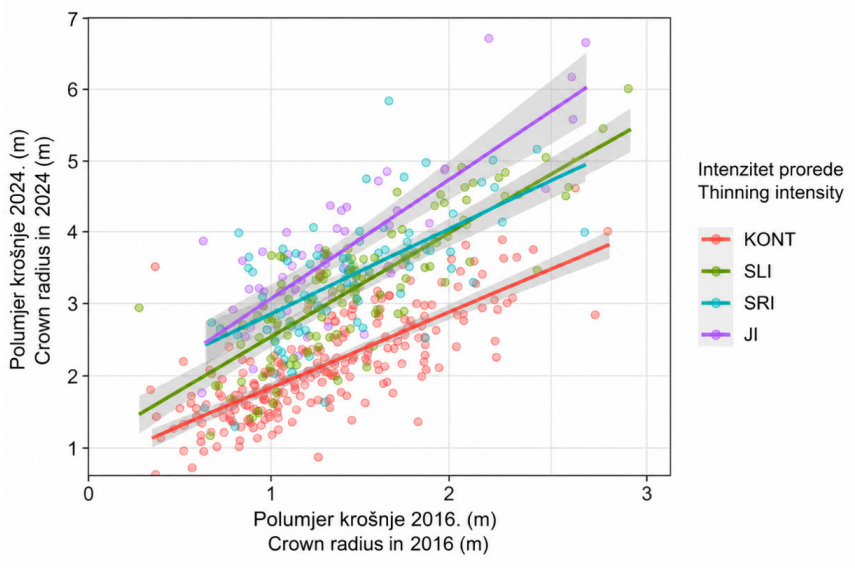
Development of Mean Crown Radius

Odgovor krošnje na proredu razlikovao se od odgovora opsega stabala (Tablica 5). U najstarijoj sastojini nije utvrđen statistički značajan učinak prorede na završni srednji polumjer krošnje (F = 2,51; p = 0,063). Procijenjene marginalne sredine kretale su se između 3,91 i 4,39 m, pri čemu nijedna usporedba između tretmana nije bila statistički značajna (Tablica 6).

Na najmlađoj plohi utvrđena je značajna interakcija između početnog srednjeg polumjera krošnje i intenziteta prorede (F = 7,20; p = 0,00010; Tablica 5, Slika 10). To pokazuje da učinak prorede nije bio jednak za sva stabla, nego je ovisio o početnoj razvijenosti krošnje. Analiza regresijskih odnosa pokazala je da su stabla s većim početnim krošnjama ostvarivala izraženiji odgovor na proredu od stabala s manjim početnim krošnjama (Slika 10).

Najizraženiji učinak prorede na razvoj krošnje zabilježen je u plohi 3 (III. dobni razred). ANCOVA je pokazala značajan učinak tretmana (F = 117,45; p < 0,0001; Tablica 5), a procijenjene marginalne sredine ukazuju na jasan obrazac JI > SRI = SLI > KONT (Tablica 6). Stabla na podplohi s jakom proredom ostvarila su prosječni polumjer krošnje od 5,18 m ± 0,09 m, što je bilo značajno više od svih ostalih tretmana. Srednje jaka i slaba proreda nisu se međusobno razlikovale, ali su obje rezultirale značajno većim krošnjama od kontrolne podplohe.

Usporedba rezultata za opseg i krošnju pokazuje da je učinak prorede bio najsnažniji u najmlađoj sastojini kada se promatra razvoj opsega stabala, dok je najveći odgovor krošnje zabilježen u sastojini III. dobnog razreda. Nasuprot tome, najstarija sastojina pokazala je relativno slab odgovor krošnje na proredu unatoč značajnom povećanju opsega stabala.



Slika 10. Odnos između početnog srednjeg polumjera krošnje (2016.) i srednjeg polumjera krošnje na kraju istraživanja (2024.) u najmlađoj sastojini (ploha 2) za različite intenzitete prorede. Točke predstavljaju pojedina stabla, a linije prikazuju regresijske pravce procijenjene linearnim modelom za svaki tretman. Zasjenjena područja označavaju 95 %-tne intervale pouzdanosti.
Figure 10 Relationship between the initial mean crown radius (2016) and the mean crown radius at the end of the study period (2024) in the youngest stand (Plot 2) under different thinning intensities. Points represent individual trees, while lines show regression relationships estimated by linear models for each treatment. Shaded areas indicate 95% confidence intervals.

Razvoj visina stabala

Tree Height Development

Povezanost između početne i završne visine stabala bila je vrlo slaba na razini cijelog uzorka ($r = -0{,}071$). Unutar ploha povezanost je bila nešto izraženija na plohi 2 ($r = 0{,}412$) i 3 ($r = 0{,}225$), dok na plohi 1 gotovo nije postojala ($r = -0{,}011$).

Provjera homogenosti regresijskih nagiba pokazala je značajnu interakciju između početne visine i intenziteta prorede na plohama 1 i 3, dok na plohi 2 ta interakcija nije bila značajna.

ANCOVA je pokazala statistički značajan učinak intenziteta prorede na završnu visinu stabala na sve tri plohe (Tablica 7). Međutim, obrasci odgovora razlikovali su se od onih utvrđenih za opseg stabala i polumjer krošnje.

Na najstarijoj plohi (ploha 1) najveća procijenjena završna visina utvrđena je na kontrolnoj plohi (30,4 m), dok je najmanja vrijednost zabilježena na plohi slabe prorede (29,5 m) (Tablica 8). Tukeyjev test pokazao je da se kontrola statistički razlikovala od slabe prorede, dok srednja i jaka proreda nisu bile statistički različite ni kod kontrole ni kod slabe prorede.

Na najmlađoj plohi (ploha 2) kontrolna podploha je također imala najveću procijenjenu završnu visinu (21,8 m). Sve tri varijante prorede imale su značajno manje procijenjene visine te se međusobno nisu razlikovale (Tablica 8).

Sličan obrazac utvrđen je i na plohi srednje dobi (ploha 3). Najveća procijenjena završna visina zabilježena je na kontrolnoj podplohi (26,0 m), dok su sve varijante prorede imale niže vrijednosti i činile jedinstvenu statističku grupu (Tablica 8).

Rezultati su prikazani na Slici 11, gdje je vidljivo da povećanje intenziteta prorede nije rezultiralo povećanjem završne visine stabala. Na plohama 2 (najmlađoj) i 3 (srednje dobi) statistički značajno najveće procijenjene visine zabilježene su na kontrolnim podplohama. Na plohi 1 (najstarijoj) je najviša procijenjena visina također bila na kontrolnoj plohi, premda se nije statistički značajno izdvajala.

Tablica 7. ANCOVA rezultati za visinu stabala.
Table 7 ANCOVA results for tree height.

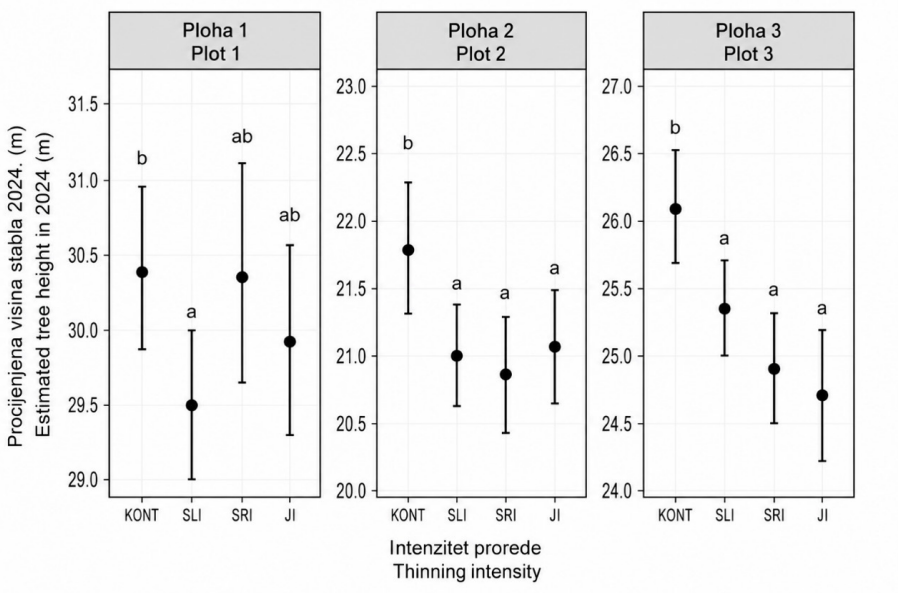
Ploha *Plot*	F tretman *F-treatment*	P tretman p-treatment	Interakcija *Interaction*
1	3,34	0,022	Da / Yes (p = 0,017)
2	18,70	< 0,0001	Ne / No (p = 0,866)
3	10,95	< 0,0001	Da / Yes (p = 0,023)

Prikazane su F-vrijednosti i razine značajnosti za učinak intenziteta prorede nakon uključivanja početne visine stabala (2016.) kao kovarijate u ANCOVA model. Interakcija označava statistički značajnu interakciju između početne visine i intenziteta prorede.
F-values and significance levels for the effect of thinning intensity are presented after accounting for initial tree height (2016) as a covariate in the ANCOVA model. Interaction indicates a statistically significant interaction between initial tree height and thinning intensity.

Tablica 8. Procijenjene marginalne sredine visine stabala.
Table 8 Estimated marginal means of tree height.

Ploha *Plot*	Tretman prorede *Thinning treatment*	EMM ± SE (m)	Grupa *Group*
1	KONT	30,4 ± 0,19	b
	SRI	30,3 ± 0,33	ab
	JI	29,9 ± 0,30	ab
	SLI	29,5 ± 0,23	a
2	KONT	21,8 ± 0,08	b
	JI	21,1 ± 0,18	a
	SLI	21,0 ± 0,12	a
	SRI	20,9 ± 0,15	a
3	KONT	26,0 ± 0,14	b
	SLI	25,4 ± 0,17	a
	SRI	24,9 ± 0,20	a
	JI	24,7 ± 0,27	a

Različita slova označavaju statistički značajne razlike između tretmana prorede unutar pojedine plohe prema Tukeyjevom post hoc testu ($p < 0{,}05$).
Different letters indicate statistically significant differences among thinning treatments within each plot according to Tukey's post hoc test ($p < 0.05$).



Slika 11. Procijenjene marginalne sredine (EMM ± 95 % CI) visine stabala 2024. godine prema intenzitetu prorede na trima plohama različite dobi. Različita slova označavaju statistički značajne razlike između tretmana unutar pojedine plohe prema Tukeyjevom post hoc testu ($p < 0{,}05$).
Figure 11 Estimated marginal means (EMMs ± 95% CI) of tree height in 2024 according to thinning intensity across three plots of different ages. Different letters indicate statistically significant differences among treatments within each plot based on Tukey's post hoc test ($p < 0.05$).

RASPRAVA

DISCUSION

Rezultati istraživanja pokazali su da je odgovor stabala hrasta lužnjaka na različite intenzitete individualizirane prorede bio izražen prvenstveno u razvoju opsega i krošnje, dok povećanje intenziteta prorede nije rezultiralo povećanjem završne visine stabala. Istodobno, intenzitet odgovora razlikovao se između istraživanih dobnih skupina, što upućuje na to da učinak prorede ovisi ne samo o intenzitetu zahvata nego i o razvojnoj fazi sastojine te početnim obilježjima pojedinačnih stabala. Takav rezultat potvrđuje važnost promatranja učinka prorede na razini pojedinačnog stabla, osobito kada se uzgojni cilj temelji na postupnom oslobađanju prethodno odabranih ciljnih stabala.

Najizraženiji odgovor na intenzitet prorede utvrđen je kod razvoja opsega stabala. Na svim istraživanim plohama stabla na tretiranim podplohama ostvarila su veći završni opseg od stabala na kontrolnim podplohama, iako se obrazac među intenzitetima razlikovao s obzirom na dob sastojine. U najmlađoj sastojini utvrđen je izrazit i gotovo linearan gradijent odgovora, od kontrolnog tretmana preko slabe i srednje do jake prorede. Razlike su bile statistički značajne između svih tretmana, što pokazuje da je povećanje intenziteta zahvata bilo praćeno postupnim povećanjem završnog opsega stabala. U sastojinama starijih dobnih razreda odgovor je bio slabije izražen i nije pokazivao jednako pravilan gradijent između svih intenziteta.

Dobiveni rezultati u skladu su s općim spoznajama o učinku smanjenja sastojinske konkurencije na debljinski rast preostalih stabala. Smanjenjem konkurencije povećava se raspoloživost resursa, a oslobođena stabla mogu ostvariti veći debljinski prirast (Assmann 1970, Pretzsch 2009). Za hrast lužnjak i hrast kitnjak Spiecker (1991) također navodi izražen pozitivan odgovor prsnog promjera nakon pravodobnog oslobađanja stabala od konkurencije, dok su Ward (2013), Ward i Wikle (2019) te Vogel i dr. (2022) pokazali da oslobađanje krošnje može dugoročno povećati debljinski prirast stabala. U ovom istraživanju osobito je važna činjenica da je najveći relativni odgovor utvrđen upravo u najmlađoj sastojini. To može upućivati na veću sposobnost mlađih stabala da iskoriste promjene u raspoloživom prostoru i konkurenciji, što je važno za primjenu ranog individualiziranog pristupa oblikovanju budućih ciljnih stabala.

Razvoj krošnje pokazao je nešto drukčiji obrazac. Najizraženiji učinak prorede nije utvrđen u najmlađoj sastojini, nego u sastojini trećeg dobnog razreda, gdje je jaka proreda rezultirala srednjim polumjerom krošnje od 5,18 m, u usporedbi s 3,32 m na kontrolnoj podplohi. Istodobno se srednja i slaba proreda nisu međusobno razlikovale, ali su obje rezultirale većim krošnjama od kontrole. Ovakav rezultat pokazuje da odgovor krošnje nije nužno proporcionalan odgovoru opsega stabla te da različita strukturna obilježja stabla mogu različito reagirati na isti uzgojni zahvat. U najstarijoj sastojini, unatoč pozitivnom smjeru promjene srednjeg polumjera krošnje, nije utvrđen statistički značajan učinak tretmana.

Izražen odgovor krošnje u sastojini trećeg dobnog razreda može se povezati s činjenicom da su stabla u toj razvojnoj fazi još sposobna učinkovito koristiti novostvoreni prostor za horizontalni razvoj krošnje. Slične spoznaje o važnosti raspoloživog prostora i stupnja oslobođenosti krošnje za razvoj hrastovih stabala navode Spiecker (1991) i Attocchi i Skovsgaard (2015). Međutim, rezultate treba tumačiti oprezno jer se istraživane sastojine razlikuju i po početnoj strukturi, a eksperimentalni dizajn nije uključivao prostornu replikaciju tretmana unutar pojedinih dobnih skupina. Stoga se utvrđene razlike među plohama ne mogu pripisati isključivo dobi sastojine.

Posebno je značajna interakcija između početnog srednjeg polumjera krošnje i intenziteta prorede utvrđena u najmlađoj sastojini. Statistički značajna interakcija pokazuje da učinak prorede nije bio jednak za sva stabla, nego da je ovisio o njihovoj početnoj razvijenosti krošnje. Stabla s većim početnim krošnjama pokazala su izraženiji odgovor na povećanje intenziteta prorede. Taj rezultat važan je u kontekstu primijenjenog koncepta ciljnih stabala jer pokazuje da intenzitet zahvata može biti učinkovitije usmjeren ako se pri njegovu određivanju uzimaju u obzir početna obilježja pojedinačnih stabala, a ne samo prosječna svojstva sastojine.

Takav individualizirani pristup razlikuje se od tradicionalnog određivanja intenziteta prorede na razini cijele sastojine. U ovom istraživanju intenzitet zahvata nije određen samo prema udjelu uklonjenih stabala ili temeljnice, nego prema prostornom odnosu ciljnih stabala i njihovih konkurenata te procijenjenom prostoru potrebnom za razvoj krošnje. Rezultati razvoja opsega i krošnje pokazuju da je takvim pristupom moguće različitim intenzitetima usmjeravati razvoj odabranih stabala. Posebno je važno što se učinak zahvata razlikovao među stablima ovisno o njihovim početnim obilježjima, što dodatno podupire opravdanost individualiziranog pristupa u odnosu na jednoliko tretiranje svih stabala u sastojini.

Za razliku od opsega i krošnje, visina stabala nije pokazala pozitivan odgovor na povećanje intenziteta prorede. Na svim istraživanim plohama najveće procijenjene završne visine zabilježene su na kontrolnim podplohama, pri čemu su na plohama 2 i 3 razlike između kontrole i svih tretmana bile statistički značajne. Ovaj rezultat pokazuje da povećanje raspoloživog prostora nakon prorede nije nužno povezano s povećanjem visinskog rasta. Visinski rast stabala u sastojini snažno je povezan s konkurencijom za svjetlo i položajem stabla u sastojinskom sloju, dok smanjenje konkurencije može rezultirati izraženijim promjenama drugih dimenzijskih obilježja, osobito debljinskog rasta i razvoja krošnje (Assmann 1970, Pretzsch 2009, Gomez-Garcia i dr. 2025).

Veće završne visine na kontrolnim podplohama stoga ne treba interpretirati kao dokaz boljeg ukupnog razvoja stabala u uvjetima bez prorede. U kontekstu cilja ovog istraživanja važnije je da su tretirana stabla ostvarila veći opseg i, na pojedinim plohama, znatno razvijenije krošnje. Drugim riječima, odgovor na proredu očitovao se prvenstveno kroz promjene horizontalnih dimenzija stabala, a ne kroz povećanje njihove visine. Takav obrazac dodatno potvrđuje da procjena učinka prorede samo na temelju visinskog rasta ne bi u potpunosti obuhvatila strukturne promjene koje nastaju nakon oslobađanja stabala od konkurencije.

Dobiveni rezultati imaju posebnu važnost u kontekstu oblikovanja budućih sjemenskih sastojina. Razvijenost krošnje i raspoloživi prostor oko reproduktivno sposobnih stabala u literaturi se povezuju s njihovom sposobnošću

proizvodnje sjemena. Martiník i dr. (2014) utvrdili su pozitivnu povezanost veličine krošnje, raspoloživog prostora i proizvodnje žira kod hrasta lužnjaka, dok Dobrovolný i dr. (2017) navode raspoloživi prostor, veličinu i arhitekturu krošnje među važnim čimbenicima povezanima s proizvodnjom i kvalitetom žira. U tom smislu, povećanje prostora oko prethodno odabranih ciljnih stabala i posljedični razvoj njihovih krošanja mogu predstavljati povoljan strukturni preduvjet za buduću reproduktivnu funkciju.

Međutim, u ovom istraživanju cvatnja, urod žira i kvaliteta šumskog reprodukcijskog materijala nisu izravno praćeni. Stoga se utvrđeno povećanje opsega i razvoj krošnje ne može izjednačiti s povećanjem reproduktivnog potencijala ili proizvodnje sjemena. Reproduktivni odgovor hrasta složen je i ovisi o više međusobno povezanih čimbenika, uključujući klimatske uvjete, fiziološko stanje stabla, veličinu i strukturu krošnje te prirodnu međugodišnju varijabilnost uroda. Bogdziewicz i dr. (2017) i Pérez-Ramos i dr. (2014) ističu važnost klimatskih čimbenika u varijabilnosti reprodukcije, dok McClory i dr. (2024a) ukazuju na složenost procesa od cvatnje do konačnog razvoja žira kod hrasta lužnjaka. Dodatno, utjecaj izvora peludi na uspješnost proizvodnje žira (McClory i dr. 2024b) pokazuje da reproduktivni odgovor nije moguće objasniti samo strukturom pojedinačnog stabla.

U tom je kontekstu važno rezultate ovog istraživanja promatrati kao dokaz mogućnosti oblikovanja strukturnih preduvjeta za buduću reproduktivnu funkciju, a ne kao dokaz povećanja rodnosti. Povećanje prostora za razvoj krošnje i veći opseg odabranih stabala predstavljaju poželjne razvojne promjene, ali tek bi izravno praćenje cvatnje, uroda žira i kvalitete proizvedenog reprodukcijskog materijala omogućilo procjenu njihova stvarnog reproduktivnog učinka. Ovakvo razlikovanje strukturnih pokazatelja od reproduktivnog odgovora posebno je važno s obzirom na dugoročnu primjenu predloženog uzgojnog pristupa.

Širi značaj istraživanja proizlazi upravo iz ranog trenutka u kojem se provodi selekcija i usmjeravanje stabala. Tradicionalni pristup sjemenskim sastojinama temelji se prvenstveno na naknadnom prepoznavanju i izdvajanju sastojina koje već posjeduju poželjna fenotipska i druga obilježja. Primijenjeni pristup polazi od drukčije pretpostavke: fenotipski kvalitetna stabla moguće je identificirati ranije i tijekom njihova razvoja postupno oslobađati od konkurencije. Na taj se način uzgojni zahvati mogu usmjeriti prema ograničenom broju odabranih stabala, pri čemu se raspoloživi prostor ne povećava jednoliko na razini cijele sastojine, nego ciljano prema potrebama pojedinačnih stabala.

Rezultati osmogodišnjeg razdoblja praćenja pružaju empirijsku potporu takvom konceptu u dijelu koji se odnosi na razvoj strukturnih obilježja. Posebno su važni izraženi učinci na opseg u najmlađoj sastojini te na razvoj krošnje u sastojini trećeg dobnog razreda. Istodobno, činjenica da u najstarijoj sastojini proreda nije značajno utjecala na razvoj krošnje pokazuje da mogućnost oblikovanja krošnje ima svoje razvojne granice i da učinkovitost zahvata nije nužno jednaka u svim fazama razvoja sastojine. To dodatno podupire ideju da bi s proaktivnim oblikovanjem budućih ciljnih stabala trebalo započeti dovoljno rano, prije nego što se mogućnost njihove strukturne pregradnje znatnije smanji.

Pri interpretaciji rezultata potrebno je uzeti u obzir nekoliko ograničenja istraživanja. Prvo, reproduktivna svojstva stabala nisu izravno praćena, zbog čega nije moguće procijeniti stvarni učinak proreda na cvatnju, urod žira ili kvalitetu šumskog reprodukcijskog materijala. Drugo, istraživanje je provedeno na tri trajne pokusne plohe, pri čemu različiti tretmani nisu prostorno replicirani unutar pojedinih dobnih skupina. Zbog toga se dobne razlike u odgovoru ne mogu interpretirati kao čisti učinak dobi sastojine, nego kao kombinacija razvojne faze i specifičnih početnih uvjeta istraživanih ploha. Treće, osmogodišnje razdoblje praćenja predstavlja relativno kratko razdoblje u odnosu na životni vijek hrasta lužnjaka i dugoročnu dinamiku razvoja sjemenskih sastojina. Ograničenja ne umanjuju vrijednost utvrđenih strukturnih odgovora, ali zahtijevaju oprez pri donošenju zaključaka o dugoročnim reproduktivnim učincima.

Unatoč navedenim ograničenjima, istraživanje pokazuje da rana fenotipska selekcija u kombinaciji s individualiziranom proredom može biti učinkovit alat za usmjeravanje razvoja odabranih stabala hrasta lužnjaka. Povećanje intenziteta prorede bilo je povezano s većim opsegom, dok je razvoj krošnje izrazito reagirao na srednjoj dobnoj razini sastojine te pokazao ovisnost o početnoj razvijenosti krošnje u najmlađoj sastojini. Istodobno, povećanje intenziteta zahvata nije pokazalo učinak na visinski rast. Dobiveni rezultati stoga podupiru primjenu ranog i proaktivnog pristupa kao mogućeg načina oblikovanja povoljnijih strukturnih uvjeta budućih sjemenskih sastojina, ali se pritom ne može zaključiti da takvi postupci dokazano povećavaju reproduktivnu sposobnost stabala.

Za konačnu procjenu učinkovitosti ovakvog pristupa potrebno je nastaviti dugoročno praćenje istih stabala i sastojina te uz strukturna obilježja uključiti izravna mjerenja cvatnje, uroda žira, njegove klijavosti i drugih pokazatelja kvalitete šumskog reprodukcijskog materijala. Takva bi istraživanja provjerila rezultira li rano ostvarena strukturna prednost ciljnih stabala reproduktivnom funkcijom te može li se proaktivno oblikovanje budućih sjemenskih sastojina primjenjivati kao dugoročna uzgojna strategija u uvjetima promijenjenih klimatskih prilika.

ZAKLJUČCI

CONCLUSIONS

Provedene individualizirane prorede značajno su utjecale na razvoj opsega stabala hrasta lužnjaka na svim istraživanim plohama, pri čemu je najizraženiji odgovor utvrđen u najmlađoj sastojini. U toj je sastojini jaka proreda rezultirala najvećim povećanjem opsega, uz statistički značajne razlike između svih intenziteta prorede. Razvoj srednjeg polumjera krošnje pokazao je nešto drukčiji obrazac, pri čemu je najizraženiji učinak utvrđen u sastojini III. dobnog razreda. U toj je sastojini jaka proreda rezultirala značajno većim srednjim polumjerom krošnje u odnosu na ostale tretmane. U najmlađoj sastojini utvrđena je i značajna interakcija početne razvijenosti krošnje i intenziteta prorede, što potvrđuje da odgovor pojedinačnih stabala na zahvat ovisi i o njihovim početnim strukturnim obilježjima.

Povećanje intenziteta prorede nije rezultiralo povećanjem završne visine stabala. Na svim istraživanim plohama najveće procijenjene završne visine uglavnom su utvrđene na kontrolnim podplohama, što potvrđuje da se odgovor stabala na smanjenje konkurencije u promatranom razdoblju

prvenstveno očitovao kroz povećanje opsega i razvoj krošnje, a ne kroz visinski rast.

Dobiveni rezultati pokazuju da rana fenotipska selekcija i individualizirano usmjeravanje proreda mogu biti učinkoviti u oblikovanju strukturnih obilježja odabranih stabala hrasta lužnjaka. Povećanje prostora za razvoj krošnje može predstavljati izrazito povoljan strukturni preduvjet za buduću reproduktivnu funkciju sjemenskih stabala, s obzirom na spoznaje iz literature o povezanosti razvijenosti krošnje, raspoloživog prostora i plodonošenja hrasta lužnjaka. Međutim, budući da cvatnja, urod žira i kvaliteta šumskog reprodukcijskog materijala nisu bili izravno praćeni, na temelju rezultata ovog istraživanja nije moguće zaključiti da su provedene prorede povećale reproduktivni potencijal ili rodnost stabala.

Istraživanje stoga pruža empirijsku osnovu za primjenu ranog i proaktivnog pristupa oblikovanju budućih sjemenskih sastojina, pri čemu se na razvoj fenotipski odabranih stabala može utjecati prije njihove pune reproduktivne faze. Za procjenu dugoročnog učinka takvog pristupa potrebno je nastaviti praćenje istraživanih stabala i uključiti izravne pokazatelje reproduktivne funkcije, osobito cvatnju, urod žira, njegovu kvalitetu i druge pokazatelje vrijednosti proizvedenog šumskog reprodukcijskog materijala.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGMENTS

Ovaj rad predstavlja dio istraživanja provedenih u okviru projekta „Osnivanje pokusa za provođenje uzgojnih i genetsko-meliorativnih zahvata u mladim sastojinama hrasta lužnjaka kao temelj za gospodarenje budućim sjemenskim sastojinama" provedenog u razdoblju 2016. – 2018. te radnog zadatka „Prilagodba gospodarenja s ciljem povećanja uroda žira i stabilnosti sastojina" u okviru projekta „Očuvanje sastojina hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u Republici Hrvatskoj s naglaskom na biotske štetne čimbenike" provedenog u razdoblju 2021. – 2025.. Istraživanja su financirana sredstvima Ministarstva poljoprivrede iz naknade za korištenje općekorisnih funkcija šuma.

LITERATURA

REFERENCES

- Assmann, E., 1970: The Principles of Forest Yield Study. Oxford: Pergamon Press. ISBN 9780080066585. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-006658-5.50002-9
- Attocchi, G., 2015: Effects of thinning on growth and development of future crop trees in pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands. Master Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp.
- Attocchi, G., J.P. Skovsgaard, 2015: Crown radius of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) depending on stem size, stand density and site productivity. Scandinavian Journal of Forest Research 30 (4): 289–303.
- Bogdziewicz, M., J. Szymkowiak, I. Kasprzyk, Ł. Grewling, Z. Borowski, K. Borycka, W. Kantorowicz, D. Myszkowska, K. Piotrowicz, M. Ziemianin, M.B. Pesendorfer, 2017: Masting in wind-pollinated trees: system-specific roles of weather and pollination dynamics in driving seed production. Ecology 98 (10): 2615–2625. https://doi.org/10.1002/ecy.1951
- Dekanić, S., 2014: Morfološka i dendrokronološka analiza oštećenih stabala hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u starim sastojinama spačvanskog bazena. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb.
- Dobrovolný, L., A. Martiník, D. Drvodelić, M. Oršanić, 2017: Structure, yield and acorn production of oak (*Quercus robur* L.) dominated floodplain forests in the Czech Republic and Croatia. South-east European forestry 8 (2): 127–136.
- Foest, J.J., J. Szymkowiak, M.K. Dyderski, D. Kelly, G. Kunstler, S. Jastrzębowski, M. Bogdziewicz, 2026: Forest tree fecundity declines as climate shifts. Nature Climate Change 16: 719–727. https://doi.org/10.1038/s41558-026-02638-5
- Gavranović Markić, A., S. Bogdan, M. Gradečki Poštenjak, M. Lanšćak, Z. Vujnović, S. Bogunović, M. Ivanković, 2022: Acorn yields and seed viability of pedunculate oak in a 10-year period in forest seed objects across Croatia. South-east European forestry 13 (1): 27–36. https://doi.org/10.15177/seefor.22-01
- Gómez-García, E., M.J. Rozados Lorenzo, F.J. Silva-Pando, 2025: Modelling growth and yield response to thinning in *Quercus robur* L. stands in NW Spain. Forests 16 (12): 1831. https://doi.org/10.3390/f16121831
- Hasenauer, H., 1997: Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. Forest Ecology and Management 96 (3): 197–206. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00057-1
- Martiník, A., L. Dobrovolný, E. Palátová, 2014: Tree growing space and acorn production of *Quercus robur*. Dendrobiology 71: 101–108. https://doi.org/10.12657/denbio.071.010
- McClory, R., R.H. Ellis, M. Lukac, J. Clark, C. Mayoral, K.M. Hart, A.R.G. Plackett, A.R. MacKenzie, 2024a: Carbon dioxide enrichment affected flower numbers transiently and increased successful post-pollination development stably but without altering final acorn production in mature pedunculate oak (*Quercus robur* L.). Journal of Forestry Research 35 (1): 73. https://doi.org/10.1007/s11676-024-01724-8
- McClory, R., R.H. Ellis, M. Lukac, J. Clark, 2024b: Pollen source affects acorn production in pedunculate oak (*Quercus robur* L.). Journal of Forestry Research 35 (1): 124. https://doi.org/10.1007/s11676-024-01777-9
- Niccoli, F., F. Pelleri, M.C. Manetti, D. Sansone, G. Battipaglia, 2020: Effects of thinning intensity on productivity and water use efficiency of *Quercus robur* L. Forest Ecology and Management 473: 118282. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118282
- Pérez-Ramos, I.M., C. Aponte, L.V. García, C.M. Padilla-Díaz, T. Marañón, 2014: Why is seed production so variable among individuals? A ten-year study with oaks reveals the importance of soil environment. PLoS ONE 9 (12): e115371. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115371
- Popović, M., I. Katičić Bogdan, F. Varga, Z. Šatović, S. Bogdan, M. Ivanković, 2023: Genetic diversity in peripheral pedunculate oak (*Quercus robur* L.) provenances—Potential climate change mitigators in the center of distribution despite challenges in natural populations. Forests 14 (12): 2290. https://doi.org/10.3390/f14122290
- Pretzsch, H., 2009: Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. doi, 10, 978-3.
- R Core Team, 2026: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/
- Rumiantsev, M., O. Kobets, N. Vysotska, V. Luk'yanets, I. Obolonyk, O. Tupchii, O. Bondar, V. Nazarenko, 2023: Acorn production of pedunculate oak in northeast of Ukraine. Forestry Studies 78 (1): 14–27. https://doi.org/10.2478/fsmu-2023-0002
- Spiecker, H., 1991: Controlling the Diameter Growth and the Natural Pruning of Sessile and Pedunculate Oaks (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and Quercus *robur* L.). Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Band 72, Stuttgart. 135 p.
- Špiranec, M., 1975a: Drvnogromadne tablice za hrast, bukvu, obični grab i pitomi kesten. Radovi Šumarskog instituta 22: 1–262. Zagreb.
- Špiranec, M., 1975b: Prirasno-prihodne tablice za hrastove, bukvu, grab i pitomi kesten. Radovi Šumarskog instituta 25: 1–103. Zagreb.
- Vogel, P.J., J.M. Lhotka, J.W. Stringer, 2022: Long-term effects of crop tree release on growth and quality in white-oak (*Quercus alba* L.)-dominated stands. Forest Science 68 (3): 343–352. https://doi.org/10.1093/forsci/fxac015
- Ward, J.S., 2013: Precommercial crop tree release increases upper canopy persistence and diameter growth of oak saplings. Northern Journal of Applied Forestry 30: 156–163. https://doi.org/10.5849/njaf.13-017
- Ward J.S., J. Wikle, 2019: Increased individual tree growth maintains stand volume growth after B-level thinning and crop-tree management in mature oak stands. Forest Science 65: 784–795. https://doi.org/10.1093/forsci/fxz042

SUMMARY

The aim of this study was to assess the applicability of an early and proactive approach to the development of future seed stands of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and to determine the effects of different intensities of individualized thinning on the development of selected structural characteristics of target trees. Unlike the traditional approach of designating already established seed stands, the approach used in this study is based on the early phenotypic selection of high-quality target trees and their gradual release from competition, with thinning intensity determined according to the initial crown development and the potential growing space required for further crown development. The study was conducted on three permanent sample plots in young and middle-aged pedunculate oak stands in Bjelovar and Sisak Management Units. Four treatment variants were applied on each plot: control, and low, medium and high thinning intensity. Treatment effects were assessed based on changes in tree circumference, mean crown radius and total tree height over an eight-year period, from 2016 to 2024, using analysis of covariance and comparison of estimated marginal means. Thinning intensity had a statistically significant effect on the development of tree circumference on all study plots. The strongest response was observed in the youngest stand, where the estimated circumference increased from 18.7 cm in the control treatment to 22.1 cm under high-intensity thinning, with statistically significant differences among all treatments. In the stand of the third age class, the estimated circumference was 27.8 cm in the control treatment and 29.7 cm under high-intensity thinning, while in the oldest stand it increased from 36.0 cm in the control treatment to 37.2 cm under high-intensity thinning. Crown development also showed a positive response to thinning, particularly in the stand of the third age class, where the mean crown radius under high-intensity thinning was 5.18 m, compared with 3.32 m in the control treatment. In the youngest stand, a significant interaction between initial crown development and thinning intensity was found, indicating the importance of timely selection of target trees. In contrast, increasing thinning intensity did not result in greater final tree height; the highest estimated tree heights were generally recorded in the control treatments. The results indicate that the early phenotypic selection of target trees and individualized thinning can direct the development of tree circumference and crown dimensions and create more favourable structural conditions for future seed stands of pedunculate oak. However, since flowering, acorn yield and the quality of forest reproductive material were not directly monitored during the study, the results do not allow a direct conclusion to be drawn regarding an increase in reproductive potential. Longer-term monitoring is required to determine whether this proactive approach can also produce a measurable effect on future seed production and the reproductive function of seed stands.

Keywords: phenotypic selection, pedunculate oak (*Quercus robur* L.), individualized thinning, target trees, crown development, stand structure, seed stands