

Zalihe i bilance ugljika regularno gospodarene šume hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u Pokupskom bazenu

Ostrogović, Maša Zorana

Doctoral thesis / Disertacija

2013

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:412535>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET

Maša Zorana Ostrogović

**ZALIHE I BILANCE UGLJIKA
REGULARNO GOSPODARENE ŠUME
HRASTA LUŽNJAKA (*Quercus robur* L.)
U POKUPSKOM BAZENU**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2013.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF FORESTRY

Maša Zorana Ostrogović

**CARBON STOCKS AND
CARBON BALANCE OF AN EVEN-AGED
PEDUNCULATE OAK (*Quercus robur* L.)
FOREST IN KUPA RIVER BASIN**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2013



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET

Maša Zorana Ostrogović

**ZALIHE I BILANCE UGLJIKA
REGULARNO GOSPODARENE ŠUME
HRASTA LUŽNJAKA (*Quercus robur* L.)
U POKUPSKOM BAZENU**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof.dr.sc. Jura Čavlović

Zagreb, 2013.

Predgovor i zahvale

Ovaj doktorski rad izrađen je na Hrvatskom šumarskom institutu, u Zavodu za uređivanje šuma i šumarsku ekonomiku, a rezultat je istraživanja provedenih u sklopu projekta *Rast i razvoj šuma u različitim ekološkim i gospodarskim uvjetima* (024-0242049-2106) kojeg podupire Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa, a čiji je voditelj dr. sc. Miroslav Benko, te projekata *Bilanca i kruženje ugljika u mladim sastojinama hrasta lužnjaka* i *Ovisnost prirasta o mikrostanišnim i meteorološkim prilikama u šumi hrasta lužnjaka* koje podupiru Hrvatske šume d.o.o., a voditelj je dr. sc. Hrvoje Marjanović.

Tema doktorskog rada obuhvaća cjelokupni šumski ekosustav i kao takva zadire u mnogobrojne znanstvene grane iz polja šumarstva: uređivanje šuma, ekologija i pedologija. Iz tog razloga odabir mentora, koji bi u potpunosti odgovarao navedenoj temi, nije bio lagan zadatak. Ovom prilikom se želim zahvaliti svojem mentoru, prof. dr. sc. Juri Čavloviću, sa Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, što je bez oklijevanja i sumnje srdačno prihvatio ovaj izazov i u cijelosti doprinio zaokruženosti ovog rada.

Posebno veliko *Hvala* upućujem svojem šefu, radnom mentoru, suradniku, savjetniku i prijatelju dr. sc. Hrvoju Marjanoviću na svemu. Hrvoje, hvala za nebrojeno mnogo savjeta bez kojih bih puno duže tražila odgovore na, u tom trenutku, „nerješiva“ pitanja. Hvala ti na nebrojeno mnogo mjeseci, dana, sati i minuta nesebične pomoći pri svim aspektima mog rada. Hvala ti na dobronamjernim kritikama i pravovremenim komentarima. Hvala ti na ukazanom povjerenju.

Hvala ravnateljici Hrvatskog šumarskog instituta, dr. sc. Dijani Vuletić, zatim voditelju projekta na koji sam primljena kao znanstveni novak, dr. sc. Miroslavu Benku, i svim članovima Znanstvenog vijeća, što su mi omogućili sudjelovanje na mnogobrojnim radionicama i konferencijama u inozemstvu, gdje sam stekla nova znanja i vještine koji su mi značajno pomogli prilikom provedbe ovog istraživanja.

Posebno se želim zahvaliti znanstveno-istraživačkom timu sa Sveučilišta u Udinama koji su mi velikodušno ustupili instrumente potrebne za izmjeru respiracije tla i time omogućili da ovo istraživanje postane zaokružena cjelina. Prof. Alessandro Peressotti, Dr. Giorgio Alberti, Dr. Gemini Delle Vedove i Mr. Diego Chiabà – *Molte grazie!*

Rezultati ovog rada temelje se na podacima prikupljenim tijekom više od 400 terenskih radniko-dana i preko 2200 uzoraka i laboratorijskih analiza, stoga je za uspješnu izradu ovog rada bio potreban nesebičan angažman velikog broja ljudi. Ovim putem se želim zahvaliti svakome od njih na srdačnosti i kolegijalnosti koju su mi ukazali.

Za iznimno zahtjevne i skoro svakodnevne terenske poslove želim se posebno zahvaliti Nini, Draganu, Tomi, Dudi i Zlatku što su uvijek bili spremni, po kiši, snijegu, uz obade i komarce. Dragi moji, hvala Vam što ste mi omogućili da bezbrižno računam na vas u svakoj prilici.

Za bezbroj raznovrsnih uzoraka koji su se dani obrađivali u Laboratoriju Hrvatskog šumarskog instituta, veliko hvala Moniki, Renati i Nini bez kojih bi sve to bilo nemoguće. Curke moje, hvala na velikom trudu i odgovornosti koje ste uložile.

Hvala svim kolegama iz mog Zavoda koji su sudjelovali u raznoraznim segmentima ovog istraživanja; od izrade dendrometarskih trakica, preko razvrstavanja i pripremanja uzoraka za analizu, do upisa podataka i raspravljanja o rezultatima.

Hvala i svim ostalim djelatnicima Hrvatskog šumarskog instituta koji su u raznoraznim trenucima sudjelovali u pojedinim segmentima izrade ovog rada.

Hvala kolegi dr. sc. Krunoslavu Teslaku, sa Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, na svesrdnoj pomoći prilikom procesiranja jednog dijela podataka.

Hvala svima koji su u bilo kojem trenutku i na bilo koji način doprinijeli izradi ovog rada.

Na kraju...

Mama, hvala ti *bezdokraja* na svemu što jesi i što sam ja zbog tebe. Tvoj trud, odricanja, snaga i bezuvjetna ljubav urodili su plodom. Ovo je Naš zajednički uspjeh.

Hvala cijeloj mojoj obitelji, *velikima* koji su uvijek vjerovali u mene i čija me naklonost i ljubav grijala kad je bilo najteže, i *malima* čija me iskrenost i čistoća inspirirala i poticala da idem dalje. Sve vas volim.

Kruno, hvala ti što si tu, što si takav kakav jesi i što nikad ne odustaješ. Uz tebe je sve bilo lakše.

Prijatelji, hvala vam na svakom razgovoru i toplim savjetima. Sretna sam što vas imam.

Maša Zorana Ostrogović

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

TI (naslov)	Zalihe i bilance ugljika regularno gospodarene šume hrasta lužnjaka (<i>Quercus robur</i> L.) u Pokupskom bazenu
AU (autor)	Maša Zorana Ostrogović
AD (adresa)	10 450 Jastrebarsko, Cvjetno naselje 41
SO (izvor)	Knjižnica Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Svetošimunska 25 Knjižnica Šumarskog instituta, Jastrebarsko, Cvjetno naselje 41
PY (godina objave)	2013
LA (izvorni jezik)	hrvatski
LS (jezik sažetka)	engleski
DE (ključne riječi)	šumski ekosustav, neto primarna produkcija, respiracija tla, dekompozicija mrtvog drva, unutar-sezonska dinamika tokova ugljika, simulacije budućih bilanci ugljika
GE (zemlja objave)	Hrvatska
PT (vrsta objave)	doktorski rad
VO (obujam)	I-XIV + 130 str. + 45 tablica + 59 slika + 136 citirane literature
AB (sažetak)	U radu su procijenjene zalihe, tokovi i bilanca ugljika šumskog ekosustava hrasta lužnjaka (<i>Quercus robur</i> L.) u Pokupskom bazenu. Primjenom metode kronosekvence utvrđena je dinamika razvoja zaliha ugljika tijekom životnog vijeka sastojine hrasta lužnjaka, odnosno od 5. do 168. godine starosti. Također je procijenjena i bilanca ugljika odabranog šumskog ekosustava, kao neto razlika pohranjenog i oslobođenog ugljika te je utvrđena njena unutar-sezonska dinamika te dinamika tijekom razvoja šumske sastojine. Na temelju podataka o uređajnom razredu hrast lužnjak iz sjemena, u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“, utvrđeno je stvarno stanje zaliha i bilance ugljika u razdoblju trajanja važeće Osnove gospodarenja, od 2004. do 2013. godine. Primjenom različitih scenarija obnove provedena je projekcija razvoja pojedinih sastojina odabranog uređajnog razreda za pet 10-godišnjih razdoblja, od 2004. do 2053. godine, te su utvrđene bilance ugljika ostvarene primjenom navedenih scenarija. Na razini sastojine procijenjena je zaliha ugljika u živoj biomasi, mrtvom drvu (sušci, panjevi i drveni otpad) te šumskoj prostirci i organskoj tvari mineralnog dijela tla. Također su na razini sastojine procijenjeni glavni tokovi ugljika: neto primarna produkcija drvene biomase, produkcija lista i plodova, produkcija sitnog korijena, ukupna i heterotrofna respiracija tla te dekompozicija nadzemne biomase mrtvog drva. Uz pretpostavku da je bilanca ugljika na razini sastojine jednaka neto produkciji ekosustava, ista je procijenjena kao razlika ukupne neto primarne produkcije i ukupne heterotrofne respiracije ekosustava. Na razini uređajnog razreda utvrđeni su i gubici ugljika sječom, a bilanca ugljika je procijenjena kao razlika neto produkcije ekosustava i gubitaka ugljika sječom. Raspodjela zaliha ugljika po glavnim sastavnicama šumskog ekosustava hrasta lužnjaka mijenja se tijekom životnog vijeka na način da su u sastojinama I. dobnog razreda najveće zalihe ugljika pohranjene u organskoj tvari tla, a u starijim sastojinama su najveće zalihe ugljika pohranjene u živoj biomasi. Zalihe u organskom horizontu tla povećavaju se sa starosti sastojine, dok su zalihe ugljika u mrtvom drvu najveće u najmlađim i starim sastojinama, a najniže u srednjodobnim i zrelim sastojinama. Za zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla nije utvrđena statistički značajna ovisnost o starosti sastojine čime je potvrđena pretpostavka da u šumskom ekosustavu hrasta lužnjaka dosadašnji način gospodarenja nema značajniji utjecaj na zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla. Sastojina hrasta lužnjaka, kada je uspješno obnovljena, postaje ponor ugljika već u vrlo ranoj dobi, između 5-te i 13-te godine starosti, što je posljedica veće ukupne neto primarne produkcije u odnosu na ukupnu heterotrofnu respiraciju, i sastojina ostaje ponor ugljika i nakon dobi od 160 godina. Kulminacija bilance ugljika, zabilježena kod sastojine u dobi od 53 godine, odgovara kulminaciji produkcije drvene biomase. Na temelju dobivenih rezultata izrađeni su jednostavni modeli ovisnosti pojedinih zaliha i tokova ugljika o lako dostupnim varijablama šumske sastojine (dob sastojine, drvena zaliha) koji su poslužili za procjenu zaliha i bilance ugljika u stvarnoj šumi hrasta lužnjaka. U uređajnom razredu hrast lužnjak iz sjemena u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“, u razdoblju od 2004. do 2013. godine ostvarena je pozitivna bilanca ugljika. U simulacijskom razdoblju od 2004. do 2053. također je ostvarena kumulativna pozitivna bilanca ugljika i izdvojen je scenarij obnove koji najviše odgovara suvremenim zahtjevima potrajnog gospodarenja šumama.

BASIC DOCUMENTATION CARD

TI (Title)	Carbon stocks and carbon balance of an even-aged Pedunculate Oak (<i>Quercus robur</i> L.) forest in Kupa river basin
OT (Original Title)	Zalihe i balance ugljika regularno gospodarene šume hrasta lužnjaka (<i>Quercus robur</i> L.) u Pokupskom bazenu
AU (Author)	Maša Zorana Ostrogović
AD (Address of Author)	10 450 Jastrebarsko, Cvjetno naselje 41
SO (Source)	Forestry Faculty library, University of Zagreb, Svetošimunska 25 Croatian Forest Research Institute library, Jastrebarsko, Cvjetno naselje 41
PY (Publication Year)	2013
LA (Language of text)	Croatian
LS (Language of Summary)	English
DE (Descriptors, key words)	forest ecosystem, net primary productivity, soil respiration, decomposition of dead wood, within-seasonal carbon fluxes dynamic, future carbon balance simulations
GE (Geo Headings)	Republic of Croatia
PT (Publication Type)	Doctoral Thesis
VO (Volume)	I-XIV + 130 pg + 45 tables + 59 figures + 136 references
AB (Abstract)	Within this research carbon stocks, fluxes and carbon balance was estimated in Pedunculate Oak (<i>Quercus robur</i> L.) forest ecosystem in river Kupa basin. Using chronosequence method carbon stocks dynamic during a life-time of Pedunculate oak stand was determined, from the age of 5 to 168 years. Also, carbon balance of selected forest ecosystem was estimated as difference between accumulated and released carbon, and intra-seasonal dynamic as well as dynamic during a development of stand was determined. On the basis of available data on the management class of Pedunculate Oak high stand, current state of carbon stocks and carbon balance was estimated for the period of current management plan, from the year 2004 to 2013. Using different scenarios of defining area for regeneration, development projection of individual stands of selected management class was made for five 10-years periods, from the year 2004 to 2053, and different carbon balance estimates were obtained for each scenario. At the stand level carbon stocks in live biomass, dead wood (snags, stumps and woody debris), forest floor and organic carbon in mineral soil were estimated. Also, at the stand level, main carbon fluxes were estimated: net primary production in woody biomass, leaf and seed production, fine root production, total and heterotrophic soil respiration and decomposition of aboveground dead wood. Net ecosystem production at the stand level was estimated as difference between total net primary production and total heterotrophic respiration, and it is assumed that it is equal to carbon balance. At the management class level carbon losses due to harvest were determined, and carbon balance was estimated as difference between net ecosystem production and carbon losses due to harvest. Carbon stock share in main forest ecosystem pools changes during a stand development in a way that youngest stands store more carbon in soil organic matter than in live biomass, while in older stands more carbon is stored in live biomass than in soil. Carbon stocks in organic layer increase with stand age, while carbon stocks in dead wood are highest in young and older stands, and lowest in middle-aged, mature stands. For carbon stocks in mineral soil layer no statistically significant age-dependent trend was observed. That confirmed the assumption that harvest activities under current management practice in this type of Pedunculate Oak forest ecosystems does not significantly influence carbon stocks in mineral soil layer. Pedunculate Oak stand, when successfully regenerated, becomes carbon sink very early in a development phase, between the age of 5 and 13 years, as a result of higher total net primary production with respect to total heterotrophic respiration, and stands remain carbon sink even after the age of 160 years. Stand reaches greatest carbon sink in the age of 53 years, and it is in accordance with highest woody biomass production. Obtained results were used to develop simple models of carbon stocks and fluxes as a function of easily obtained stand variables (stand age, growing stock) which were then used to estimate carbon stocks and carbon balance in real forest. In Pedunculate Oak high stand management class, in management unit "Jastrebarski lugovi", positive carbon balance was estimated for the period from 2004 to 2013. For the simulation period from 2004 to 2053, also a positive cumulative carbon balance was estimated, and appropriate scenario that meets the needs of modern sustainable forest management was recognized.

SADRŽAJ

Predgovor i zahvale	I
Temeljna dokumentacijska kartica	III
<i>Basic documentation card</i>	IV
Sadržaj	V
Popis slika	VIII
Popis tablica	XI
Popis kratica	XIII
1. UVOD	1
1.1. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	1
1.2. TERMINOLOGIJA I TEORIJSKI OKVIR	5
1.2.1. Raspodjela zaliha ugljika po glavnim šumskim sastavnicama	8
1.2.2. Glavni tokovi ugljika u šumskom ekosustavu	11
1.3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	14
1.4. CILJ ISTRAŽIVANJA	16
2. MATERIJAL I METODE	17
2.1. PLANIRANJE POKUSA	17
2.1.1. Izbor odjela i odsjeka kao reprezentativnih predstavnika pojedinog dobnog razreda	17
2.1.2. Postavljanje pokusnih ploha	19
2.1.3. Meteorološke stanice	21
2.2. IZMJERA I OBRAČUN ZALIHA UGLJIKA	22
2.2.1. Zalihe ugljika u živoj biomasi ($C^{ŽB}$)	22
2.2.2. Zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD})	28
2.2.3. Zalihe ugljika u organskoj tvari tla (C^{OTT})	30
2.2.4. Zalihe ugljika obračunate prema IPCC metodologiji	33
2.3. IZMJERA I OBRAČUN TOKOVA UGLJIKA	34
2.3.1. Neto primarna produkcija (NPP)	34
2.3.2. Disanje (respiracija) tla (R^{ILO})	37
2.3.3. Dekompozicija mrtvog drva (R_h^{MD})	40
2.4. MIKROSTANIŠNI UVJETI	42

2.5. PROCJENA GODIŠNJE BILANCE UGLJIKA U KRONOSEKVENCI HRASTA LUŽNJAKA	42
2.6. OBRAČUN ZALIHA I BILANCE UGLJIKA U GOSPODARSKOJ JEDINICI „JASTREBARSKI LUGOVI“	43
2.6.1. Gubitak ugljika sječom (CW^{SJ}).....	44
2.6.2. Stvarno stanje zaliha i bilance ugljika u razdoblju od 2004. do 2013. godine	44
2.6.3. Modeli za procjenu zaliha i tokova ugljika	45
2.6.4. Projekcije za razdoblje od 2004. do 2053. godine.....	45
2.7. STATISTIČKA OBRADA	46
2.7.1. Analiza mikrostanišnih uvjeta	46
2.7.2. Procjena pogreške	46
2.7.3. Analiza zaliha ugljika.....	47
2.7.4. Analiza tokova ugljika.....	47
3. REZULTATI	48
3.1. STRUKTURA SASTOJINA KRONOSEKVENCE.....	48
3.2. MIKROSTANIŠNI UVJETI.....	51
3.3. ZALIHE UGLJIKA U GLAVNIM SASTAVNICAMA ŠUME HRASTA LUŽNJAKA	55
3.3.1. Zalihe ugljika u živoj biomasi (C^{ZB}).....	55
3.3.2. Zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD})	56
3.3.3. Zalihe ugljika u organskoj tvari tla (C^{OTT}).....	58
3.3.4. Raspodjela zaliha ugljika po glavnim šumskim sastavnicama	62
3.3.5. Raspodjela zaliha ugljika – IPCC obračun.....	64
3.4. TOKOVI I GODIŠNJA BILANCA UGLJIKA ŠUME HRASTA LUŽNJAKA	65
3.4.1. Neto primarna produkcija (NPP)	65
3.4.2. Ukupna respiracija tla (R^{TLO}).....	66
3.4.3. Dekompozicija mrtvog drva (R_h^{MD}).....	75
3.4.4. Godišnja bilanca ugljika ekosustava	76
3.4.5. Unutar-sezonska dinamika tokova i bilance ugljika.....	77
3.5. ZALIHE I BILANCA UGLJIKA U UREĐAJNOM RAZREDU HRAST LUŽNJAK IZ SJEMENA U GOSPODARSKOJ JEDINICI „JASTREBARSKI LUGOVI“	80
3.5.1. Modeli za procjenu zaliha i tokova ugljika	80
3.5.2. Dobna struktura odabranog uređajnog razreda.....	83
3.5.3. Stvarno stanje zaliha i bilance ugljika u razdoblju od 2004. do 2013. godine	84
3.5.4. Projekcije za razdoblje od 2004. do 2053. godine.....	87

4. RASPRAVA	90
4.1. STRUKTURA I MIKROSTANIŠNI UVJETI U SASTOJINAMA KRONOSEKVENCE	90
4.2. ZALIHE, TOKOVI I BILANCA UGLJIKA U KRONOSEKVENCI.....	92
4.2.1. Zalihe ugljika u živoj biomasi	92
4.2.2. Zalihe ugljika u mrtvom drvu.....	93
4.2.3. Zalihe ugljika u organskoj tvari tla.....	93
4.2.4. Neto primarna produkcija sastojina hrasta lužnjaka.....	95
4.2.5. Ukupna respiracija tla i dekompozicija mrtvog drva u sastojinama hrasta lužnjaka.....	98
4.2.6. Bilanca ugljika (<i>NEP</i>) u šumi hrasta lužnjaka.....	100
4.3. ZALIHE, TOKOVI I BILANCE UGLJIKA UREĐAJNOG RAZREDA HRAST LUŽNJAK IZ SJEMENA U GOSPODARSKOJ JEDINICI „JASTREBARSKI LUGOVI“	101
5. ZAKLJUČCI.....	103
6. LITERATURA.....	106
 SAŽETAK.....	 120
SUMMARY	122
PRILOZI	124
ŽIVOTOPIS.....	127
CURRICULUM VITAE	130

POPIS SLIKA

Slika 1.1.	Dinamika zaliha ugljika u glavnim šumskim sastavnicama tijekom životnog vijeka; ŽB – živa biomasa, OTT – organska tvar tla, MD – mrtvo drvo. Prilagođeno prema PREGITZER I EUSKIRCHEN (2004).	6
Slika 1.2.	Dinamika bilance ugljika tijekom životnog vijeka; + označava ponor ugljika, – označava izvor ugljika. Prilagođeno prema CAMPBELL I DR. (2004).	6
Slika 1.4.	Dinamika organske tvari u šumskoj prostirci (u širem smislu) tijekom životnog vijeka. Prilagođeno prema COVINGTON (1981).	10
Slika 1.5.	Dinamika zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla tijekom životnog vijeka. Slova označavaju dobne razrede; A (<10 g.), B (11 – 30 g.), C (31 – 70 g.), D (71 – 120 g.) i E (120 – 200 g.). Prilagođeno prema PREGITZER I EUSKIRCHEN (2004).	10
Slika 1.6.	Klimadijagram meteorološke postaje Jastrebarsko, za razdoblje 1981. – 2009. godine.	15
Slika 1.7.	Lokacija šumskog kompleksa Pokupskog bazena (lijevo) i granice odabrane gospodarske jedinice te lokacije pokusnih ploha (desno).	16
Slika 2.1.	Udio broja odsjeka uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“ s obzirom na pripadnost bonitetu, a razvrstan po grupama dobnih razreda.	18
Slika 2.2.	Tlocrt prostornog rasporeda kružnih podploha postavljenih u odabranim odsjecima, prema protokolu za praćenje ugljika u kopnenim ekosustavima (engl. <i>Terrestrial Carbon Observation – TCO protocol</i>) (GTOS 2008).	20
Slika 2.3.	U potpunosti opremljena intenzivna ploha u III dobnom razredu. A – mini-meteorološka stanica i pripadajući senzori; B – sustav komora za izmjeru respiracije tla; C – dendrometerska traka; D – košara za lišće.	21
Slika 2.4.	Odnos nadzemne biomase i biomase ukupnog volumena za odabrane sastojine.	26
Slika 2.5.	Ležeće mrtvo drvo u različitim stupnjevima raspadanja.	29
Slika 2.6.	Prostorni raspored pozicija na kojima je uzorkovana šumska prostirka i mineralno tlo.	31
Slika 2.7.	Sonda za uzrokovanje tla.	31
Slika 2.8.	Dendrometerska traka montirana na stablo hrasta lužnjaka broj 15.	35
Slika 2.9.	Sustav za izmjeru tok CO ₂ iz tla postavljen u III dobnom razredu.	38
Slika 2.10.	Komora postavljena neposredno uz senzore za vlagu i temperaturu tla mini-meteorološke stanice.	38
Slika 2.11.	Vrećice za procjenu brzine razgradnje mrtvog drva za 4 dimenzije uzoraka.	41
Slika 2.12.	Prostorni raspored vrećica za razgradnju unutar sastojine stare 5 godina.	41
Slika 3.1.	Drvena zaliha ukupnog drva (d>3 cm) na kraju 2011. godine, za odabrane odsjeke u određenom dobnom razredu. Prikazane su srednje vrijednosti drvene zalihe za 4 intenzivne plohe i za 6-11 inventurnih ploha te 1,96 standardne pogreške.	48
Slika 3.2.	Omjer smjese u odabranim sastojinama kronosekvence.	49
Slika 3.3.	Uporedba visine (hg) (A) i promjera (dg) (B) srednjeg plošnog stabla hrasta lužnjaka dobivenih izmjerom i preuzetih iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O 2003) sa podacima iz prirasno-prihodnih tablica (ŠPIRANEC 1975a).	50
Slika 3.4.	Prosječna dnevna temperatura tla na dubini od 5 cm (A) i prosječni dnevni relativni udio vode u tlu (B) u sastojinama različite starosti (prosjeak ± 1,96 standardna pogreška). Različitim slovima označene su statistički značajne razlike između sastojina.	51
Slika 3.5.	Dinamika temperature tla na dubini od 5 cm tijekom 2011. godine (1.1. – 31.12.), za sastojine različite starosti.	53
Slika 3.6.	Dinamika relativnog udjela vode u tlu tijekom 2011. godine (1.1. – 31.12.), za sastojine različite starosti.	54

Slika 3.7.	Odnos promjera na panju (0,3 m) i nadzemne drvene žive biomase.	56
Slika 3.8.	Model ovisnost zaliha ugljika u mrtvom drvu (sušci, panjevi i drvni otpad) o starosti sastojine. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.	57
Slika 3.9.	Model ovisnosti zaliha ugljika u organskom horizontu o starosti sastojine. Prikazane su srednje vrijednosti 4 podplohe po dobnom razredu i njihove standardne pogreške.	58
Slika 3.10.	Model ovisnost gustoće tla (ρ_b) o postotnom udjelu ugljika u masi suhe tvari tla (CF_t).	59
Slika 3.11.	Koeficijent varijacije gustoće tla (ρ_b), udjela ugljika u masi suhe tvari tla (CF_t) i zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla (C^M) za određene dubine. Prikazane su srednje vrijednosti i apsolutni minimum i maksimum za cijelu kronosekvencu (n=8).	59
Slika 3.12.	Karakteristike tla sastojina različite dobi: a) gustoća tla; b) tekstura tla: crna linija – udio gline (<0,002 mm), tamnosiva linija – udio praha (0,002 – 0,05 mm) i svijetlosiva linija – udio pijeska (0,05 – 2 mm); c) udio i zalihe C u tlu.	61
Slika 3.13.	Raspodjela zaliha ugljika po glavnim šumskim sastavnicama u sastojinama različite starosti.	63
Slika 3.14.	Zalihe ugljika u glavnim šumskim sastavnicama tijekom ophodnje. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške. Isprekidana linija označava dob propisane ophodnje.	63
Slika 3.15.	Raspodjela mrtve biomase u sastojinama različite starosti.	64
Slika 3.16.	Dinamika produkcije drvene i lisne biomase, biomase plodova te neto primarne produkcije ekosustava tijekom životnog vijeka.	66
Slika 3.17.	Zastupljenost izmjerenih podataka u rasponu zabilježene temperature tla na dubini od 5 cm (A) i udjela vlage u tlu (B) tijekom 2011. godine. L – lijeva y-os; D – desna y-os.	67
Slika 3.18.	Ovisnost toka CO ₂ iz tla o temperaturi tla na dubini od 5 cm, za sastojine različite starosti (df=2). Svi parametri su statistički značajni pri p<0,0001.	67
Slika 3.19.	Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO ₂ iz tla i procijenjenih modelom 1 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 1 (B).	68
Slika 3.20.	Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO ₂ iz tla i procijenjenih modelom 2 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 2 (B).	69
Slika 3.21.	Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO ₂ iz tla i procijenjenih modelom 3 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 3 (B).	70
Slika 3.22.	Odstupanja toka CO ₂ iz tla procijenjenih modelom 3 u odnosu na izmjerene vrijednosti, za sastojine različite starosti	71
Slika 3.23.	Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO ₂ iz tla i procijenjenih modelom 3 za sklopljene sastojine (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 3 (B).	72
Slika 3.24.	Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO ₂ iz tla i procijenjenih modelom 4 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 4 (B).	73
Slika 3.25.	Ovisnost omjera heterotrofne i ukupne respiracije tla ($R_h^{TLO}:R^{TLO}$) o ukupnoj respiraciji tla (R^{TLO}).	74
Slika 3.26.	Model ovisnosti koeficijenta brzine razgradnje (k) o srednjem promjeru uzorka mrtvog drva. Prikazane su srednje vrijednosti i 1,96 standardne pogreške. Crne oznake – izmjereno u pokusu dekompozicije, sive oznake – preuzeto iz literature (MATTSON I DR. 1987, za vrste roda <i>Quercus</i>)	75
Slika 3.27.	Godišnja dekompozicija mrtvog drva u sastojinama različite dobi. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.	76
Slika 3.28.	Godišnje vrijednosti bilance ugljika (NEP) za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.	77
Slika 3.29.	Dinamika neto primarne produkcije drvene biomase sastojina različite dobi tijekom vegetacijskog razdoblja 2011. godine.	78

Slika 3.30.	Modelirana ukupna i heterotrofna respiracija tla tijekom 2011. godine (1.1. – 31.12.), prosjek za cijelu kronosekvencu.	78
Slika 3.31.	Unutar-sezonska dinamika neto produkcije ekosustava za sastojine različite starosti.	79
Slika 3.32.	Model ovisnosti zaliha ugljika u živoj biomasi o drvnjoj zalihi krupnog drva preuzetoj iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003). Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške	81
Slika 3.33.	Model ovisnosti omjera zaliha ugljika u mrtvom drvu i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške	82
Slika 3.34.	Model ovisnosti neto primarne produkcije o omjeru drvne zalihe krupnog drva i starosti sastojine preuzetih iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003). Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.	83
Slika 3.35.	Dobna struktura za uređajni razred hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“; stanje prema O.G. (početak 2004. godine) (HŠ D.O.O.2003) te procjena za kraj 2011. godine.	84
Slika 3.36.	Zalihe ugljika uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“ razvrstane po glavnim šumskim sastavnicama.	84
Slika 3.37.	Glavni tokovi i bilance ugljika uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“. A) Neto primarna produkcija, heterotrofna respiracija i neto produkcija ekosustava i B) Neto produkcija ekosustava, gubitak ugljika sječom i neto bilanca ugljika ekosustava.	86
Slika 3.38.	Razvoj dobne strukture uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena, od 2004. do 2053. godine, prema 4 scenarija obnove.....	88
Slika 3.39.	Stvarna posječena drvna zaliha prema važećoj Osnovi gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003) te prema 4 različita scenarija obnove, u pet 10-godišnjih razdoblja.	89
Slika 3.40.	Kumulativna bilanca ugljika za protekla razdoblja (stupci) i prosječna 10-godišnja bilanca ugljika u određenom razdoblju (pune crte), za uređajni razred hrast lužnjak iz sjemena s obzirom na 4 različita scenarija obnove (A, B, C i D) i za pet 10-godišnjih razdoblja. Isprekidana crta – stvarna bilanca ugljika obračunata prema podacima iz važeće Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003)	89

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Raspodjela odsjeka po površini s obzirom na namjenu šume i uređajni razred.....	18
Tablica 2.2. Raspodjela površine i broja odsjeka po dobnim razredima s obzirom na pripadnost pojedinoj šumskoj zajednici u uređajnom razredu hrast lužnjak iz sjemena	18
Tablica 2.3. Podaci za odabrane odsjeke preuzeti iz važeće Osnove gospodarenja za gospodarsku jedinicu „Jastrebarski lugovi“ za razdoblje 2004.-2013. godine (HŠ D.O.O. 2003).....	19
Tablica 2.4. Koordinate centara ploha postavljenih u odabranim odsjecima	20
Tablica 2.5. Promjenjivi polumjeri s obzirom na promjer stabala, prema CRONFI metodologiji i TCO protokolu te polumjeri primijenjeni u kronosekvenci.....	20
Tablica 2.6. Jednadžbe biomase	23
Tablica 2.7. Parametri Scumacher-Hall-ove funkcije za hrast lužnjak (<i>Quercus robur</i> L.), za volumen krupnog drva, dobiveni nelinearnom regresijom iz drvnogromadnih tablica za debljinski stupnjeve po 1 cm (ŠPIRANEC 1975b).....	25
Tablica 2.8. Vrijednosti raznih faktora, omjera i parametra korištenih pri izračunu zaliha ugljika u šumskoj biomasi	27
Tablica 2.9. Opisni parametri za pripadajuće stupnjeve razgradnje mrtvog drva.....	28
Tablica 2.10. Gustoće drva za pojedine stupnjeve razgradnje.....	29
Tablica 2.11. Razlike u obračunu između metodologije korištene u ovom radu i IPCC metodologije.....	33
Tablica 2.12. Shematski prikaz obračuna NPP-a tijekom vegetacijskog razdoblja.....	37
Tablica 2.13. Dimenzije uzoraka i broj uzoraka po pojedinoj vrećici za određenu dimenziju.....	41
Tablica 3.1. Struktura sastojina u kronosekvenci. Prikazane su srednje vrijednosti i 1,96 standardne pogreške.....	49
Tablica 3.2. Tekstura tla i vodni kapacitet tla sastojina u kronosekvenci.....	51
Tablica 3.3. Prosječna dnevna temperatura tla na dubini od 5 cm i prosječni dnevni relativni udio vode u tlu u sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.....	52
Tablica 3.4. Nadzemna drvena (W_{nd}) i lisna biomasa (W_l), podzemna biomasa krupnog (W_{kk}) i sitnog korijena (W_{sk}) i biomasa plodova (W_{pl}), ukupna živa biomasa (W^{ZB}) i ukupne zalihe ugljika u živoj biomasi (C^{ZB}) te omjer podzemne i nadzemne žive biomase ($R:S$), za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške. N za W_l i W_{pl} je 4, a za W_{sk} 16.....	55
Tablica 3.5. Broj sušaca (N^S) i panjeva (N^P) po jedinici površine te njihova nadzemna (W_n) i podzemna (W_p) biomasa. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.....	56
Tablica 3.6. Ukupna biomasa sušaca (W^S), panjeva (W^P) i drvnog otpada (W^{DO}) te ukupna biomasa mrtvog drva (W^{MD}), zalihe ugljika u nadzemnoj i podzemnoj biomasi mrtvog drva (C_n^{MD} , C_p^{MD}) te ukupne zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD}). Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.....	57
Tablica 3.7. Parametri modela ovisnosti zaliha ugljika u mrtvom drvu o starosti sastojine.....	57
Tablica 3.8. Raspodjela biomase i zalihe ugljika u organskom horizontu sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.....	58
Tablica 3.9. Parametri modela ovisnosti zaliha ugljika u O horizontu o starosti sastojine.....	59
Tablica 3.10. Parametri modela ovisnosti gustoće tla o postotnom udjelu ugljika u masi suhe tvari tla.....	60
Tablica 3.11. Kumulativne zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla, po dubinama, za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške (n=4). Različitim slovima označene su značajne razlike između sastojina.....	60

Tablica 3.12. Ukupne zalihe ugljika u glavnim šumskim sastavnicama, u sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.	62
Tablica 3.13. Ukupne zalihe ugljika u šumskim sastavnicama, u sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.	64
Tablica 3.14. Produkcija nadzemne drvene biomase (NPP_{nd}), podzemne biomase krupnog (NPP_{kk}) i sitnog korijena (NPP_{sk}), lisne biomase (NPP_l), biomase plodova (NPP_{pl}) te neto primarna produkcija ekosustava (NEP) u sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške. N za NPP_{nd} , NPP_l i NPP_{pl} je 4, a za NPP_{sk} je 16.	65
Tablica 3.15. Parametri modela 1 procjene toka CO_2 iz tla.....	68
Tablica 3.16. Parametri modela 2 procjene toka CO_2 iz tla.....	69
Tablica 3.17. Parametri modela 3 procjene toka CO_2 iz tla.....	70
Tablica 3.18. Parametri modela 3 procjene toka CO_2 iz tla primijenjenog samo na sklopljene sastojine.	72
Tablica 3.19. Usporedba kvalitete modela. U zagradi je naveden parametrizacijski skup podataka.	72
Tablica 3.20. Parametri modela 4 procjene toka CO_2 iz tla.....	73
Tablica 3.21. Ukupna godišnja respiracija tla i raspodjela na autotrofnu i heterotrofnu respiraciju tla.	74
Tablica 3.22. Koeficijenti brzine razgradnje mrtvog drva za različite vrste drveća i dimenzije uzoraka. Prikazane su srednje vrijednosti i 1,96 standardne pogreške. Različitim slovima označene su statistički značajne razlike između uzoraka različitih dimenzija.	75
Tablica 3.23. Parametri modela ovisnosti koeficijenta brzine razgradnje (k) o srednjem promjeru uzorka mrtvog drva.....	76
Tablica 3.24. Zalihe ugljika u nadzemnoj biomasi mrtvog drva te dekompozicija za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.	76
Tablica 3.25. Glavni tokovi i bilanca ugljika u sastojinama različite starosti.....	77
Tablica 3.26. Podaci preuzeti iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003) za odabrane odsjeke koji čine pokus kronosekvence te izvedene varijable potrebne za izradu modela za procjenu zaliha i tokova ugljika odabranog uređajnog razreda ($N=8$).....	81
Tablica 3.27. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti zaliha ugljika u živoj biomasi o drvnoj zalihi krupnog drva preuzetih iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003).....	81
Tablica 3.28. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti omjera zaliha ugljika u mrtvom drvu i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi.	82
Tablica 3.29. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti omjera zaliha ugljika u organskom horizontu i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi.	82
Tablica 3.30. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti omjera zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi.	82
Tablica 3.31. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti neto primarne produkcije o omjeru drvene zalihe krupnog drva i starosti sastojine preuzetih iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003).....	83
Tablica 3.32. Površine predviđene za obnovu i potencijalno posječena drvna zaliha za 4 različita scenarija.....	87

POPIS KRATICA

C	zalihe ugljika
CF	udio ugljika (engl. <i>carbon fraction</i>)
FC	poljski vodni potencijal (engl. <i>field capacity</i>)
GPP	bruto primarna produkcija (engl. <i>gross primary production</i>)
GTOS	engl. <i>Global Terrestrial Observing System</i>
IPCC	engl. <i>International Panel on Climate Change</i>
k	koeficijent brzine razgradnje organske tvari
LAI	indeks lisne površine (engl. <i>leaf area index</i>)
NECB	neto bilanca ugljika ekosustava (engl. <i>net ecosystem carbon balance</i>)
NEP	neto produkcija ekosustava (engl. <i>net ecosystem productivity</i>)
NPP	neto primarna produkcija (engl. <i>net primary productivity</i>)
O.G.	Osnova gospodarenja
OTT	organska tvar tla
R	disanje (respiracija)
R:S	omjer podzemne i nadzemne biomase (engl. <i>root-to-shoot ratio</i>)
RSWC	relativni udio vode u tlu (engl. <i>relative soil water content</i>)
SWC	udio vode u tlu (engl. <i>soil water content</i>)
T ₁₀₅	temperatura tla na dubini od 5 cm
TCO	engl. <i>Terrestrial Carbon Observation Protocol</i>
V	volumen
W	biomasa (engl. <i>weight</i>)
ρ _b	gustoća tla

Gornje oznake:

AGB	nadzemna biomasa (engl. <i>aboveground biomass</i>)
BGB	podzemna biomasa (engl. <i>belowground biomass</i>)
DB	mrtva biomasa (engl. <i>dead biomass</i>)
DO	drvni otpad
DW	mrtvo drvo (engl. <i>dead wood</i>)
hr	hrast
L	šumski otpad (engl. <i>litter</i>)
LB	živa biomasa (engl. <i>live biomass</i>)
M	mineralni dio tla
M5	– na dubini do 5 cm;
M10	– na dubini do 10 cm;
M20	– na dubini do 20 cm;
M40	– na dubini do 40 cm
MD	mrtvo drvo
ORH	organski horizont (šumska prostirka)
OL	– listinac
OFH	– humusni horizont
ost	ostale vrste
P	panj

S	sušac
SOM	organska tvar tla (engl. <i>soil organic matter</i>)
SJ	sječa
TLO	tlo
uk	ukupno
ŽB	živa biomasa

Donje oznake:

a	autotrofno
h	heterotrofno
HŠ	podatak je preuzet iz Osnove gospodarenja izrađene od strane javnog poduzeća “Hrvatske šume” d.o.o.
kk	krupni korijen
l	list
n	nadzemno
nd	nadzemno drvno
p	podzemno
pl	plod
sj	sječa
sk	sitni korijen

1. UVOD

Šumski ekosustavi kroz proces rasta vežu ugljični dioksid iz atmosfere, te su u kontekstu aktualnog problema klimatskih promjena prepoznati kao značajni ponori atmosferskog ugljika (IPCC 1995, IPCC 2000). Gospodarenje šumskim ekosustavima u Republici Hrvatskoj temelji se na načelu potrajnosti prihoda uz osiguravanje stabilnosti i raznolikosti šumskog ekosustava (KLEPAC I FABIJANIĆ 1996) te je propisano da se „šuma tretira kao obnovljiv prirodni resurs s izraženim općim koristima“ (NACIONALNA ŠUMARSKA POLITIKA I STRATEGIJA 2003). U novije vrijeme, pohrana atmosferskog ugljika u šumske ekosustave postaje sve važnija (FAO 2007, FAO 2009), a sukladno tome sve je jači trend proširivanja načela potrajnog gospodarenja na provođenje onih aktivnosti koje će podržavati i potrajno pohranjivanje ugljika (JANDL I DR. 2007).

Pojam *pohrana ugljika* podrazumijeva zalihe ugljika u različitim sastavnicama šumskog ekosustava (šumska biomasa i šumsko tlo) te bilancu ugljika kao neto razliku tokova ugljika koji pohranjuju i oslobađaju ugljik iz šumskog ekosustava.

Šume hrasta lužnjaka predstavljaju gospodarski važan šumski ekosustav Republike Hrvatske i uređuju se prema važećem Pravilniku o uređivanju šuma s propisanom minimalnom ophodnjom od 140 godina. Rezultat su prirodne obnove oplodnom sječom i predstavljaju skup jednodobnih sastojina različite dobi koje se grupiraju u dobne razrede sa širinom od 20 godina. Ovakav oblik gospodarenja, pod uvjetom pravilnog razmjera dobnih razreda, omogućava potrajnost prihoda, tj. kontinuirano ostvarivanje etata. Utvrđivanjem pohrane ugljika kroz čitavo razdoblje ophodnje moguće je istražiti da li je neki šumski ekosustav trajni „spremnik“ ugljika te da li kao takav udovoljava suvremenim normama potrajnog gospodarenja.

1.1. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

U posljednjem desetljeću obavljene su procjene zaliha i tokova ugljika za mnoge vrste šuma diljem Svijeta (LAW I DR. 2001, ACKER I DR. 2002, REY I DR. 2002, HEDDE I DR. 2008, VESTERDAL I DR. 2009, BRUCKMAN I DR. 2011) te su razvijene raznovrsne metode izmjere sa ciljem što vjerodostojnije procjene zaliha i tokova ugljika (BALDOCCHI I DR. 2001, DAVIDSON I DR. 2002, REICHSTEIN I DR. 2003, MUND 2004, HOUGHTON 2005, LUYSSAERT I DR. 2010).

Mnoga istraživanja upućuju na važnost detaljne izmjere kompletnog šumskog ekosustava u svrhu ostvarivanja preciznijih procjena zaliha i tokova ugljika (ASSMAN 1970, MUND I DR. 2002, GOUGH I DR. 2007, FANG I DR. 2007). Tlo predstavlja najveći spremnik organskog ugljika u kopnenim ekosustavima (POST I DR. 1982, SCHLESINGER 1984), a šumsko tlo do dubine od 1 m sadrži čak oko 70% ukupnih globalnih zaliha ugljika u šumskim ekosustavima (IPCC 2000). Oslobođanje ugljika iz tla kroz proces disanja korijenja i rizosferne mikrofaune te kroz dekompoziciju mrtve organske tvari predstavlja bitnu komponentu u izračunu globalne bilance ugljika (VALENTINI I DR. 2000). GOUGH I DR. (2007) ističu važnost stope dekompozicije krupnog drvnog otpada na bilancu ugljika u šumskim ekosustavima umjerenog pojasa. S obzirom na utvrđene vrijednosti neto produkcije ekosustava autori zaključuju da je uočena stopa dekompozicije značajan tok ugljika te da je utvrđivanje zaliha ugljika u ovoj sastavnici iznimno važno pri izračunu bilance ugljika u šumskim ekosustavima. Produkciju lista u nizinskim listopadnim šumama istraživali su MEIER I DR. (2006) i utvrdili da je to vrlo bitna komponenta nadzemne neto primarne produkcije jer, osim što manjim dijelom sudjeluje u ukupnoj nadzemnoj biomasi, sudjeluje u kruženju hraniva te omogućava stabilnost i produktivnost šumskog ekosustava. Sitno korijenje svojom biomasom sudjeluje vrlo malo u ukupnim zalihama ugljika, no procjena je da u ukupnoj godišnjoj primarnoj produkciji sudjeluje s oko 30% (JACKSON I DR. 1997) te je značajno u procesu kruženja hraniva i u procjeni bilance ugljika.

Metode procjene zaliha ugljika razlikuju se ovisno o razini primjene. HOUGHTON (2005) istražuje primjenjivost metoda daljinskih istraživanja (npr. interpretacija satelitskih snimaka) pri utvrđivanju nadzemne šumske biomase na globalnoj razini. Autor zaključuje da je poznavanje prostorne distribucije šumske biomase neophodno pri procjeni globalne bilance ugljika šumskih ekosustava. Prema HOUGHTONU (2005) bilanca ugljika šumskog bioma ovisi o dva glavna čimbenika; o promjeni površine šuma i šumskog područja kao posljedici krčenja šuma i/ili pošumljavanja te o promjeni šumske biomase po jedinici površine kao posljedici prirodnih ili antropogenih poremećaja (požari, vjetroizvale, napadi insekata, gospodarski zahvati). Za utvrđivanje zaliha ugljika šumskog područja na nacionalnoj razini često se koriste podaci nacionalne inventure šuma. GUO I DR. (2009) procjenjuju nacionalne zalihe ugljika, za razdoblje od 1984. do 2003., koristeći inventurne podatke (npr. ukupnu površinu šumskog područja, ukupan volumen, srednju gustoću biomase, vrijednosti faktora ekspanzije biomase s obzirom na starost sastojine i volumen po jedinici površine). S obzirom na to koju vrstu podataka imaju na raspolaganju, autori primjenjuju tri načina izračuna te zaključuju da je najbolji onaj koji uzima u obzir i dobnu strukturu šumskog područja (tzv. *continuous*

biomass expansion factor method – CBM). U slučaju manje iscrpnih podataka primjenjuju se druga dva načina izračuna koji koriste prosječne vrijednosti biomase po jedinici površine, no njihovom primjenom dolazi do podcjenjivanja ili precjenjivanja zaliha kod mladih ili starih sastojina. Zalihe ugljika pojedinih šumskih lokaliteta od posebnog interesa (zaštićena područja, lokaliteti s naglašenim antropogenim utjecajem i sl.) utvrđuju se biometrijskim metodama (FANG I DR. 2007), tj. direktnom terenskom izmjerom glavnih strukturnih parametara sastojine (broj stabala po hektaru, prsni promjer, visina stabla) uz dodatnu izmjeru ostalih parametara šumskog ekosustava (grmlje, prizemno rašće, šumska prostirka, drveni otpad, organska tvar mineralnog dijela tla, lisna površina) (GTOS 2008).

Tokovi ugljika pojedine komponente ekosustava (npr. list, stabljika, biljka, tlo) tradicionalno se mjere metodom komora, dok se na razini čitavog ekosustava tokovi procjenjuju kao razlika između dviju uzastopno provedenih izmjera zaliha ugljika u biomasi i u tlu. U novije vrijeme, za procjenu bilance ugljika nekog ekosustava najčešće se primjenjuje mikrometeorološka metoda vrtložne kovarijance (BALDOCCHI 2003). To je vrlo sofisticirana metoda koja predstavlja direktnu izmjeru tokova ugljičnog dioksida (CO_2) između atmosfere i odabranog ekosustava i njenom primjenom dobivaju se vrlo precizni podaci koji imaju iznimno značajnu ulogu pri validaciji dosadašnjih procjena tokova ugljika primjenom daljinskih istraživanja (BALDOCCHI 2001) kao i pri parametrizaciji raznovrsnih procesnih modela, npr. BIOME-BGC (HLÁSNY I DR. 2011). No, primjena ove metode podrazumijeva i velika financijska ulaganja zbog visokih troškova postavljanja i održavanja same istraživačke stanice (skupi instrumenti – npr. vrlo brzi $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ analizator, 3D anemometar i dataloger, kontinuirano mjerenje i servis). Iz tog razloga, procjena tokova i bilance ugljika kombinacijom tradicionalne indirektna metode biometrijske izmjere te izmjere pojedinih segmenata (npr. disanje tla) sustavom komora, postaje interesantna široj znanstveno-istraživačkoj zajednici. Poznavanjem ukupnog volumnog prirasta sastojine, specifične gustoće drva po vrstama te godišnje produkcije lisne biomase i biomase plodova može se procijeniti ukupna produkcija nadzemne šumske biomase kao jedan od glavnih tokova ugljika, a uz procjenu disanja tla metodom komora moguće je procijeniti i bilancu ugljika promatranog ekosustava (FANG I DR. 2007, MARJANOVIĆ I DR. 2010).

Gospodarenje šumama utječe na dinamiku zaliha i tokova ugljika. PRICE I DR. (1997) istražuju utjecaj gospodarenja na zalihe i tokove ugljika u borealnim šumama. Autori zaključuju da se gospodarenjem uz ophodnju koja omogućava produkciju najveće drvne mase uz potrajnost prihoda (engl. *maximum sustainable yield*) može postići i značajno povećanje zaliha ugljika u šumskom ekosustavu. U protivnom, izostanak gospodarenja u

negospodarskim šumama dovodi do nagomilavanja prezrele drvne mase koja s vremenom gubi vitalnost i odumire te kroz proces razgradnje predstavlja izvor ugljika. SCOTT I DR. (2004) istražuju utjecaj pripremnog sijeka na stopu pohranjivanja ugljika te potvrđuju da je pozitivna bilanca ugljika nakon gospodarskog zahvata posljedica povećane stope rasta preostalih stabala. CAMPBELL I DR. (2004) istražuju utjecaj gospodarskih zahvata na stopu pohrane ugljika u tri edafski i klimatski različita šumska ekosustava u zapadnom Oregonu. Autori uočavaju trend pohrane ugljika s obzirom na dob šumskih sastojina kao posljedicu promjene relativnih odnosa tokova koji oslobađaju i pohranjuju ugljik u šumskom ekosustavu.

U Hrvatskoj su istraživanja vezana za ugljik u šumskim ekosustavima započela prije nekoliko godina, no uglavnom kroz pojedinačne i nepovezane radove. KOS I DR. (2004) istražili su utjecaj šumarske i drvno-industrijske djelatnosti na ponor ugljika u RH iz aspekta utjecaja na okoliš. BENNDORF (2007) koristi podatke o drvnjoj zalihi iz važeće Šumskogospodarske Osnove područja (ŠGOP) te primjenjuje postojeće ekspanzijske i konverzijske faktore prema IPCC (2003) za procjenu ukupne šumske biomase. Autorica utvrđuje neto pohranu ugljika u biomasi šuma Hrvatske za razdoblje 2008-2012. godine, ne uzimajući u obzir tlo. Sistematsko i organizirano istraživanje kruženja ugljika u šumskim ekosustavima u RH započinje u sklopu INTERREG III B CADSES projekta pod nazivom *CARBON balance drafting and new resources management tools according to Kyoto PROtocol - Carbon Pro* (MARJANOVIĆ I DR. 2007). U sklopu projekta, u mladim sastojinama šume hrasta lužnjaka u Pokupskom bazenu, postavljena je istraživačka stanica za izmjeru tokova ugljičnog dioksida između atmosfere i šumske sastojine, koja kontinuirano radi od 2007. godine (MARJANOVIĆ I DR. 2008, MARJANOVIĆ I DR. 2010). U području dohvata istraživačke stanice (engl. *footprint*) autori istražuju pohranu ugljika primjenom mikrometeorološke i biometrijske metode izmjere te zaključuju da postoji mogućnost usporedbe dobivenih podataka. Također su utvrđene razlike u zaliham ugljika u šumskim ekosustavima pod različitim načinom gospodarenja koje prvenstveno proizlaze iz različitih vrijednosti volumnog prirasta te različitih intenziteta sječe (PALADINIĆ 2009). U okviru Prve nacionalne inventure šuma Republike Hrvatske (ČAVLOVIĆ 2010) obavljena je i procjena zaliha ugljika u pet glavnih sastavnica (spremnika) šumskog ekosustava; nadzemna i podzemna biomasa živih stabala, mrtvo drvo, šumska prostirka i šumsko tlo, i to prema vlasništvu šuma i prema glavnim vrstama drveća. Autor procjenjuje da šume u Hrvatskoj u svojim zaliham imaju pohranjeno oko 640 milijuna tona ugljika, od čega šumsko tlo ima najveći kapacitet i sadrži čak 50% ukupnih zaliha ugljika.

1.2. TERMINOLOGIJA I TEORIJSKI OKVIR

Ugljik se u šumskom ekosustavu može istraživati iz dva aspekta; 1) kao zalihe ugljika akumulirane u glavnim sastavnicama te 2) kao tokovi kojima se ugljik pohranjuje i/ili gubi iz navedenih sastavnica (slika 1.3). U šumskom ekosustavu ugljik se akumulira u živoj biomasi, mrtvom drvu i organskoj tvari šumskog tla (PREGITZER I EUSKIRCHEN, 2004). Nadzemnu živu biomasu čine deblo, grane, grančice i lišće drveća i grmlja te biomasa prizemnog rašća, dok se u podzemnu živu biomasu ubraja krupno i sitno korijenje. Mrtvo drvo su sušci, panjevi, krupni i sitni drvni otpad, a organska tvar tla sadržana je u šumskoj prostirci i mineralnom dijelu tla. Sve navedene sastavnice šumskog ekosustava sadrže određeni postotni udio ugljika u masi suhe tvari, te kao takve predstavljaju zalihe ugljika. Nadalje, svaka sastavnica šumskog ekosustava kontinuirano akumulira ugljik te ga istovremeno gubi, a te procese akumulacije/gubitka ugljika nazivamo tokovi. Prema konvenciji, tok ugljika je pozitivan ako dovodi do povećanja količine ugljika u promatranoj sastavnici, odnosno negativan ako dovodi do njenog smanjenja. Ako promatramo neku sastojinu u cjelini na razini jedne godine, proces rasta sastojine, koji se ogleda kroz godišnji volumni prirast i produkciju lista, predstavlja pozitivni tok ugljika, dok procesi disanja i razlaganja mrtve organske tvari na i u tlu te postupci izvlačenja drvne mase i/ili požari predstavljaju negativne tokove. Neto razlika pozitivnih i negativnih tokova ugljika na razini godine predstavlja bilancu ugljika šumskog ekosustava.

Prilikom istraživanja bilance ugljika nekog ekosustava upotrebljavaju se sljedeći pojmovi (slika 1.3):

Bruto primarna produkcija ekosustava (engl. *Gross primary production – GPP*) je glavni pozitivni tok ugljika, odnosno količina fiksiranog (asimiliranog) ugljika procesom fotosinteze.

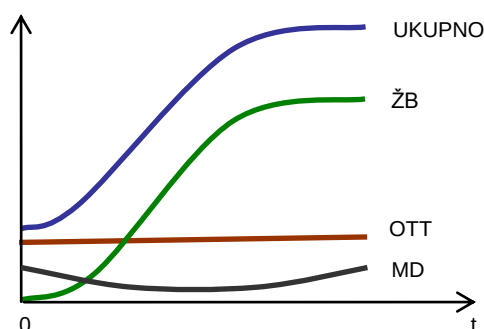
Respiracija ekosustava (engl. *Ecosystem respiration – R_{eco}*) je glavni negativni tok ugljika, odnosno količina oslobođenog ugljika iz ekosustava kroz proces disanja. Dijeli se na autotrofnu respiraciju ili respiraciju biljaka (R_a) te heterotrofnu respiraciju odnosno proces dekompozicije mrtve organske tvari djelovanjem šumske faune i mikroorganizama (R_h). Autotrofna respiracija se dalje dijeli na respiraciju nadzemnog (R_a^N) i podzemnog dijela odnosno korijena (R_a^{TLO}), a heterotrofna na respiraciju mrtvog drva (R_h^{MD}) i organske tvari u tlu (R_h^{TLO}). Respiracija tla (R^{TLO}) prema tome obuhvaća autotrofnu respiraciju podzemnog dijela biljaka (R_a^{TLO}) i heterotrofnu respiraciju tla (R_h^{TLO}). $R_{eco} = R_a + R_h$; $R_a = R_a^N + R_a^{TLO}$; $R_h = R_h^{MD} + R_h^{TLO}$; $R^{TLO} = R_a^{TLO} + R_h^{TLO}$

Neto primarna produkcija (engl. *Net primary production – NPP*) je količina akumuliranog ugljika u živoj biomasi. Obuhvaća produkciju nadzemne i podzemne drvene biomase (NPP_d) i produkciju lisne biomase (NPP_l) i biomase plodova (NPP_{pl}) te predstavlja pozitivan tok ugljika u šumskom ekosustavu. $NPP = GPP - R_a = NPP_d + NPP_l + NPP_{pl}$

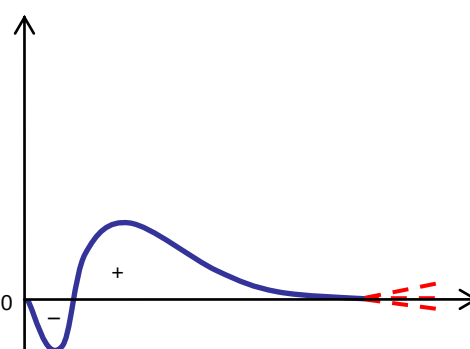
Neto produkcija ekosustava (engl. *Net ecosystem production – NEP*) je količina pohranjenog ugljika u ekosustavu, odnosno razlika GPP -a i R_{eco} , odnosno NPP -a i R_h . U užem smislu ovo je bilanca ugljika nekog ekosustava koja obuhvaća samo respiratorne procese.

Neto bilanca ugljika ekosustava (engl. *Net ecosystem carbon balance – NECB*) je neto razlika svih pozitivnih i negativnih tokova ugljika u nekom ekosustavu. Osim respiratornih tokova ugljika obuhvaća i nerespiratorne procese gubitka ugljika iz ekosustava (npr. sječe, požari, mortalitet) (CHAPIN I DR. 2006, SCHULZE 2006) te predstavlja konačnu bilancu ugljika u gospodarskim šumskim ekosustavima. $NECB = GPP - R_{eco} - H$

Zalihe ugljika u pojedinim sastavnicama se mijenjaju tijekom životnog vijeka šumskog ekosustava kao posljedica akumulacije organske tvari kroz proces rasta žive biomase te razgradnje mrtve organske tvari (slika 1.1).



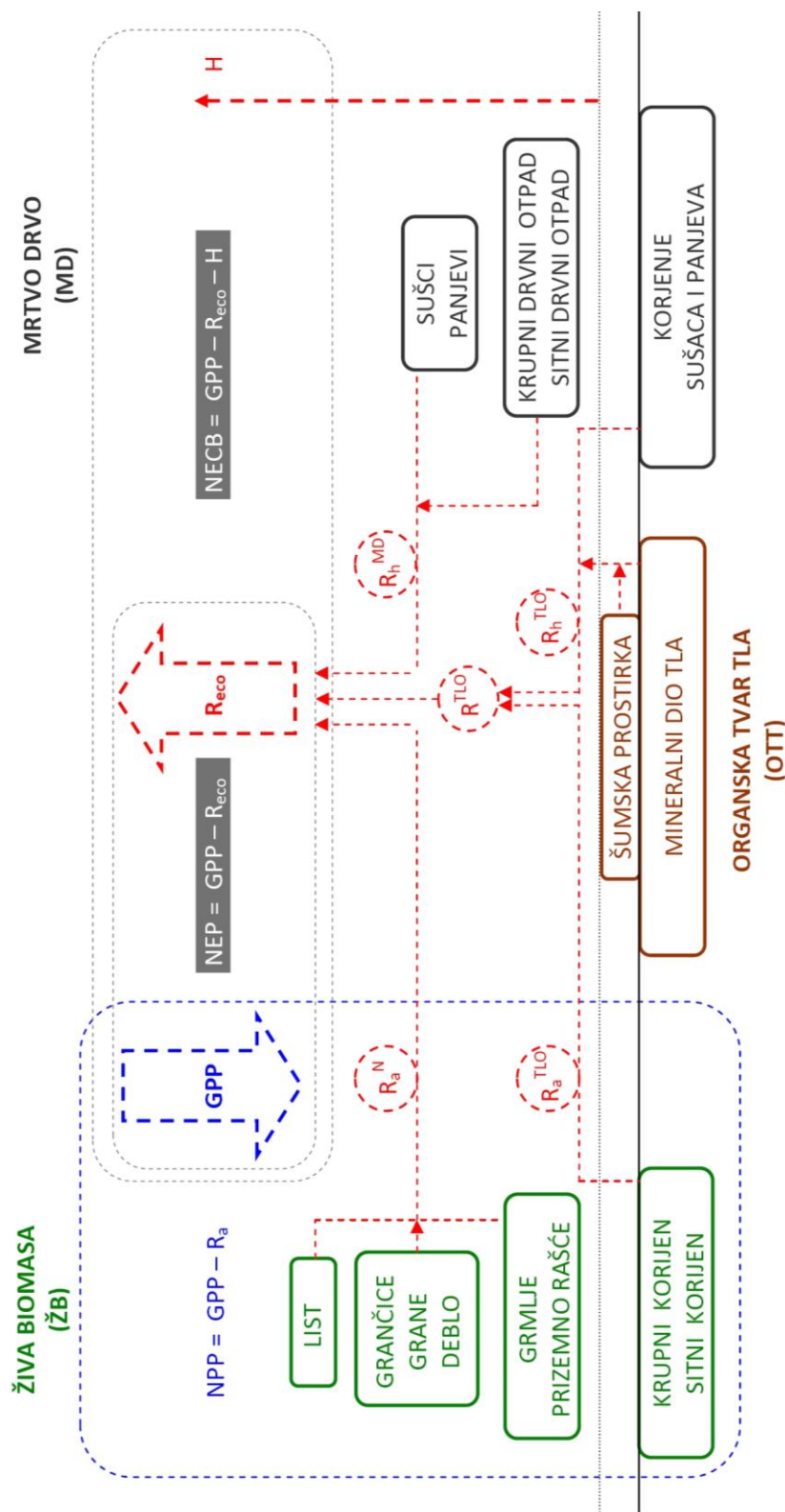
Slika 1.1. Dinamika zaliha ugljika u glavnim šumskim sastavnicama tijekom životnog vijeka; ŽB – živa biomasa, OTT – organska tvar tla, MD – mrtvo drvo. Prilagođeno prema PREGITZER I EUSKIRCHEN (2004).



Slika 1.2. Dinamika bilance ugljika tijekom životnog vijeka; + označava ponor ugljika, – označava izvor ugljika. Prilagođeno prema CAMPBELL I DR. (2004).

Bilanca ugljika (NEP i $NECB$) se također mijenja kroz životnu dob sastojine (slika 1.2). Nakon oplodne sječe, šumski ekosustav postaje neto izvor ugljičnog dioksida. Kako nova, mlada sastojina intenzivno prirašćuje i pohranjuje atmosferski ugljik, krivulja bilance ugljika se polako približava nuli. U trenutku kada produkcija žive biomase nadmaši emisije uslijed procesa dekompozicije, šuma postaje ponor ugljika, a s vremenom se uspostavlja uravnotežen odnos s obzirom na izvore i ponore ugljika (CAMPBELL I DR. 2004). Uočen trend objašnjava se činjenicom da je produkcija ekosustava rezultat fotosinteze, autotrofnog disanja

i dekompozicije (LANDSBERG I GOWER 1997), a ti procesi indirektno ovise o životnoj dobi šumske sastojine (RYAN 1997). Najnovija istraživanja upućuju na zaključak da čak i stare šumske sastojine predstavljaju ponor ugljika (LUYSSAERT I DR. 2008).



Slika 1.3. Shematski prikaz zaliha i tokova ugljika po glavnim sastavnicama šumskog ekosustava: živa biomasa (zeleno), organska tvar tla (smeđe) i mrtvo drvo (tamno sivo). Zalihe su prikazane u pravokutnicima pune linije, pozitivni tokovi ugljika isprekidanom plavom linijom, negativni tokovi isprekidanom crvenom linijom, a izračun produkcije i bilance ugljika u pravokutnicima isprekidane sive linije.

GPP – fotosinteza, odnosno asimilacija ugljika; R_{eco} – respiracija ekosustava; R_a – autotrofna respiracija; R_a^N i R_a^{TLO} – autotrofna respiracija nadzemnog dijela i tla; R_h – heterotrofna respiracija; R_h^{MD} i R_h^{TLO} – heterotrofna respiracija mrtvog drva i tla; R^{TLO} – respiracija tla; H – sječa (engl. harvest); NPP – neto primarna produkcija ekosustava; NEP – neto produkcija ekosustava; $NECB$ – neto bilanca ekosustava.

1.2.1. Raspodjela zaliha ugljika po glavnim šumskim sastavnicama

a. Živa biomasa ($W^{ŽB}$) je najčešće istraživana sastavnica šumskog ekosustava, prvenstveno zbog svoje ekonomske zanimljivosti kroz vrijednost drvnih proizvoda. Obuhvaća živu nadzemnu i podzemnu drvenu te lisnu biomasu i biomasu plodova. Budući da najveći udio u živoj biomasi čini nadzemna drvena masa, kretanje zaliha žive biomase kroz vrijeme odvija se po S-oidnoj krivulji rasta drvene mase (KLEPAC 1965) (slika 1.1). U klasičnim inventurama šuma prati se uglavnom samo nadzemna drvena biomasa, pod nazivom drvena zaliha ($m^3 ha^{-1}$), a uključuje zalihu stabala prsnog promjera iznad određene taksacijske granice (npr. u Hrvatskoj je granica 10 cm) te se izražava kao volumen krupnog ili ukupnog drva (ovisno o tome da li se uzima u obzir biomasa grana u krošnji promjera na tanjem kraju od 7 ili od 3 cm). U novije vrijeme jača interes za ukupnom drvnom zalihom, koja uključuje tanka stabla prsnog promjera ispod zadane taksacijske granice, grane u krošnji promjera manjeg od 7 cm na tanjem kraju, i to prvenstveno zbog sve većeg zanimanja za uključivanje šumske biomase u proces pridobivanja energije (VERKERK I DR. 2011). Podzemna biomasa (tj. krupno korijenje), zajedno s panjevima neposredno oborenih stabala, također je prepoznata kao značajan izvor bioenergije (WALMSLEY I GODBOLD 2010).

b. Mrtvo drvo (W^{MD}) obuhvaća sve sušce, panjeve i drveni otpad (tj. ležeće mrtvo drvo). To je biomasa koja je nastala kao posljedica gospodarskih zahvata sječe ili kao posljedica nepovoljnih biotskih ili abiotskih čimbenika, a nije otpremljena iz šumske sastojine. Mrtvo drvo predstavlja značajne zalihe ugljika koje su u praksi često samo djelomično procijenjene kroz evidenciju sušaca. Uočeno je da kroz životni vijek sastojine mrtva biomasa kulminira u dva navrata i prati tzv. „U“ krivulju (slika 1.1). U mladim sastojinama značajan je udio drvnog otpada i panjeva kao posljedica oplodne sječe prethodne stare sastojine te sušaca kao posljedica faze samo-izlučivanja stabala. U zrelim i starim sastojinama značajan je udio sušaca zbog napada štetnika na stara fiziološki oslabljena stabla te drvnog otpada kao posljedica vjetroizvale i dr. U starijoj dobi također je značajan i udio panjeva od prethodnih proreda i provedenih sijekova oplodne sječe. Mrtvo drvo se razlikuje po gustoći, ovisno u kojem se stupnju raspadanja određeni uzorak nalazi. Primjenom vizualne determinacije fizikalnih karakteristika stupnjeva raspadanja sušaca i ležećeg mrtvog drva (HUNTER 1990), mrtvu drvenu biomasu možemo podijeliti u III do V stupnjeva raspadanja, ovisno o mogućnostima na terenu. Gustoća pojedinog uzorka mrtve drvene biomase može se određivati direktno na terenu primjenom raznovrsnih instrumenata za izmjernu otpornosti drva

na prodiranje, tzv. penetrometri (MÄKIPÄÄ I LINKOSALO 2011) ili u laboratoriju na temelju prikupljenih uzoraka.

Količine biomase mrtvog drva značajno ovise o vrsti ekosustava, načinu gospodarenja i prirodnim poremećajima te o vremenu proteklom od zadnjeg antropogenog ili biotskog/abiotskog utjecaja. Također ovise i o intenzitetu mortaliteta te o stopama dekompozicije mrtve organske tvari.

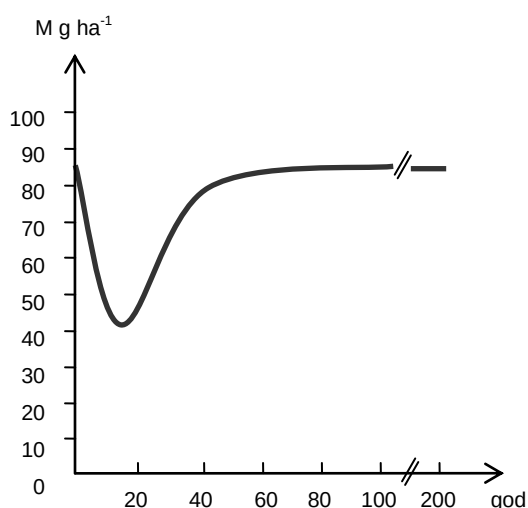
c. Organska tvar tla (OTT) zauzima najveći udio zaliha ugljika u šumskom ekosustavu (IPCC 2000). U širem smislu OTT obuhvaća živu (edafon i korijenje) i neživu organsku tvar koja se dalje dijeli na organske ostatke, humus i inertnu organsku tvar (ugljen, fosili). U užem smislu OTT je neživa organska tvar koju čine nehuminske supstance (organski ostaci biljaka, životinja i mikroorganizama) i specifične humusne tvari (huminske kiseline, fulvokiseline i humin) (ĆIRIĆ 1984). U ovom radu OTT je definirana u užem smislu, odnosno uključujući samo neživu organsku tvar dok je živo korijenje uključeno u živu biomasu.

U OTT-u nehuminske supstance čine oko 20% i predstavljaju lakotopive organske tvari podložne brzom razgradnji (niskomolekularne organske kiseline, jednostavni ugljikohidrati i dr.). Preostalih 80% čine prave humusne tvari relativno velike molekulske mase (makromolekule ili supramolekule), nastale sintetskim reakcijama nehuminskih tvari. Prema tome, OTT se može podijeliti u labilnu i stabilnu frakciju s obzirom na jačinu stabilizacije organske tvari odnosno lakoću i brzinu razgradnje.

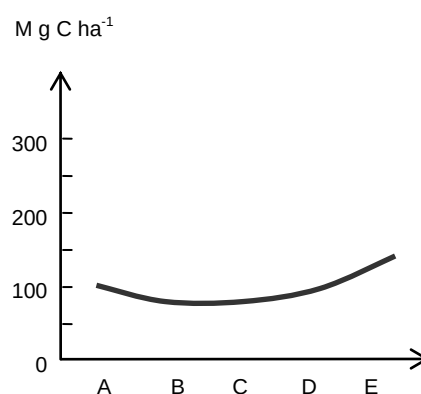
Postoji nekoliko vrsta stabilizacije organske tvari u tlu: fizikalna stabilizacija podrazumijeva formiranje agregata tla koji smanjuju mogućnost kontakata kemijskih supstanci OTT-a s mikroorganizmima, enzimima ili kisikom u tlu; kemijska stabilizacija nastaje udruživanjem organskih tvari s mineralima tla; te biokemijska stabilizacija kao najčvršći oblik vezanja organske tvari u tlu rezultira stvaranjem pravih humusnih tvari, tj. organskih makromolekula (SIX I DR. 2002).

OTT u šumskom ekosustavu sadržana je u šumskoj prostirci i mineralnom dijelu tla. Šumska prostirka u širem smislu obuhvaća organski sloj na površini mineralnog dijela tla (O horizont), akumulativni horizont mineralnog dijela tla (A horizont) sa živim i mrtvim sitnim korijenjem te sitni i krupni drveni otpad na tlu (YANAI I DR. 2003). Zaliha ugljika u tako definiranoj šumskoj prostirci (engl. *forest floor*), u gospodarskim šumskim ekosustavima kreće se prema tzv. Covingtonovoj krivulji (COVINGTON 1981) (slika 1.4). U užem smislu, šumska prostirka obuhvaća samo O horizont, kao što je korišteno i u ovom radu. Organski horizont karakterizira aktivno kruženje ugljika i hraniva te izražena slojevitost s obzirom na

stupanj raspadanja organske tvari, i to u tri podhorizonta – Oi ili OL (engl. **f**ibric, **L**itter) gdje su u većem dijelu prepoznatljivi organski ostaci (tzv. listinac), Oe ili OF (engl. **h**emic, **F**ractioned) s djelomično prepoznatljivim, a djelomično humificiranim organskim ostacima; i Oa ili OH (engl. **s**apric, **H**umified) gdje je u većem dijelu humificirana organska tvar. Zalihe ugljika u šumskoj prostirci kreću se slično Covingtonovoj krivulji, ali s nešto nižim apsolutnim vrijednostima (PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004). Prema istim autorima zalihe organskog ugljika u mineralnom dijelu tla, u šumskim ekosustavima umjerenog pojasa, kreću se prema blago zaobljenoj krivulji s najvećim zalihama ugljika u mladim sastojinama do 30 godina te sastojinama starijim od 120 godina (slika 1.5). U šumskim ekosustavima kojima se gospodari na principu potrajnosti, odnosno gdje su gospodarski zahvati planirani na način da ne narušavaju bitno strukturu i produktivnost žive biomase, pretpostavlja se da su ukupne zalihe ugljika u tlu relativno stabilne (IPCC 2003).



Slika 1.4. Dinamika organske tvari u šumskoj prostirci (u širem smislu) tijekom životnog vijeka. Prilagođeno prema COVINGTON (1981).



Slika 1.5. Dinamika zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla tijekom životnog vijeka. Slova označavaju dobne razrede; A (<10 g.), B (11 – 30 g.), C (31 – 70 g.), D (71 – 120 g.) i E (120 – 200 g.). Prilagođeno prema PREGITZER I EUSKIRCHEN (2004).

1.2.2. Glavni tokovi ugljika u šumskom ekosustavu

U šumskom ekosustavu postoje dva glavna toka ugljika: GPP (bruto primarna produkcija) odnosno proces asimilacije atmosferskog ugljika te R_{eco} (respiracija ekosustava) odnosno proces otpuštanja ugljičnog dioksida u atmosferu, a njihova neto razlika je bilanca ugljika (slika 1.3). Navedene tokove ugljika na razini sastojine nije moguće direktno mjeriti, stoga je za procjenu bilance ugljika provedena razdioba glavnih tokova na sljedeći način:

$$GPP = NPP + R_a \quad (1.1)$$

$$NPP = NPP_d + NPP_l + NPP_{pl} \quad (1.2)$$

$$R_{eco} = R_a + R_h = R^{TLO} + R_h^{MD} \quad (1.3)$$

$$R^{TLO} = R_a^{TLO} + R_h^{TLO} \quad (1.4)$$

Također, u gospodarskim šumama prisutan je i moment sječe kojim se ugljik u biomasi posječenih stabala (CW^{SJ}) gubi iz ekosustava, stoga je i ovaj proces ukratko objašnjen.

a. Produkcija drvene biomase (NPP_d) je najvažniji pozitivni tok ugljika u šumskom ekosustavu. Obuhvaća prirast nadzemne i podzemne drvene biomase te predstavlja najveći dio neto primarne produkcije. Kroz proces fotosinteze biljke asimiliraju ugljični dioksid (CO_2) iz atmosfere i ostvaruju bruto primarnu produkciju (GPP). Intenzitet fotosinteze, a time i GPP ovise o vrsti drveća i genotipu (KOZLOVSKI I PALLARDY 1997). Dio produkata fotosinteze biljke ugrađuju u svoju biomasu (deblo, grane, grančice, korijenje, list i plodovi), a dio troše u procesu autotrofne respiracije (R_a) kojom se oslobađa energija potrebna za održavanje postojećih organa. Raspodjela asimiliranog ugljika na dio koji se troši za bazični metabolizam (R_a) i na dio koji se troši za rast raznovrsnih organa ovisi o specifičnim potrebama pojedine vrste i njezinoj strategiji rasta (KOZLOVSKI I PALLARDY 1997), o starosti stabla/sastojine (LITTON I DR. 2007, DU TOIT 2008) i o trenutnim okolišnim uvjetima (LITTON I DR. 2007).

Produkcija drvene biomase ima izraženu godišnju dinamiku (CAMPBELL I DR. 2004) s najintenzivnijim prirastom u mlađim sastojinama te manjim intenzitetima prirasta u starijim sastojinama. Također, NPP_d ima i jasnu unutar-sezonsku dinamiku koja odgovara lijevo skošenoj unimodalnoj krivulji, s najintenzivnijim prirastom u proljeće, nakon potpunog razvoja lisne površine te u uvjetima porasta prosječne temperature zraka, te s manjim intenzitetima prirasta tijekom kasnog ljeta i jeseni, u ovisnosti o količini dostupne vode u tlu (MARJANOVIĆ 2009, OSTROGOVIĆ I DR. 2009). Procjena ovog toka ugljika može se dobiti na

temelju izmjere prirasta biometrijskom metodom (promjerke, mjerne vrpce, dendrometri) uz primjenu poznatih faktora ekspanzije biomase te omjera podzemne i nadzemne biomase.

b. Produkcija lisne biomase (NPP_l) i biomase plodova (NPP_{pl}) je pozitivan tok ugljika koji se kod nas razmjerno rijetko prati prilikom istraživanja šumskog ekosustava, a također je važan pri procjeni bilance ugljika. Lisna biomasa je bogata hranivima (N, P, K, Ca i Mg) i zbog toga iznimno važna u biološkom kruženju mineralnih elemenata u šumskom ekosustavu kroz godišnju dinamiku produkcije, opadanja i razgradnje lista (ĆIRIĆ 1984, BALBOA-MURIAS I DR. 2006). Razgradnjom lisne biomase u tlo se vraća oko 50-90% od ukupne količine mineralnih tvari koje je biljka kroz godinu akumulirala, ovisno o starosti sastojine (ĆIRIĆ 1984). Produkcija plodova ovisi o dinamici pojave punog uroda koja se odvija u određenim vremenskim intervalima (2-5 godina), ovisno o vrsti drveća (THOMAS I PACHAM 2007). Terenska izmjera obuhvaća prikupljanje otpalog lista i plodova tijekom cijele godine tzv. hvataljkama za lišće (engl. *litter traps*). Procjena godišnje lisne biomase može se dobiti i mjerenjem indeksa lisne površine (u $m^2 m^{-2}$; engl. *leaf area index* – LAI) koji predstavlja omjer površine lista i odgovarajuće površine tla (LAI 2000). Poznavanjem specifične lisne površine (engl. *specific leaf area* – SLA) za pojedine vrste drveća, koji predstavlja omjer površine lista i mase suhe tvari (u $m^2 g^{-1}$), moguće je izračunati lisnu biomasu po površini (m_{stv}) u $g m^{-2}$, prema jednadžbi:

$$m_{stv} = \frac{LAI}{SLA} \quad (1.5)$$

c. Disanje (respiracija) tla (R^{TLO}) često je najznačajnijih negativni tok ugljika u šumskom ekosustavu i kao takvo je neophodno za procjenu bilance ugljika promatranog ekosustava. Produkcija CO_2 u aerobnim uvjetima u tlu posljedica je procesa oksidacija ugljikohidrata, proteina i lignina, a koji se odvijaju djelovanjem metaboličkog procesa korijena biljaka i popratne rizosferne faune (mikorize, paraziti, patogeni) te kao rezultat dekompozicije organske tvari tla. Respiraciju tla dijelimo na autotrofnu (R_a^{TLO}) odnosno disanje korijenja i heterotrofnu (R_h^{TLO}) odnosno dekompoziciju organske tvari tla.

Respiracija korijena ovisi o količini (biomasi) korijenja i brzini metaboličkih procesa koji se odvijaju u korijenu. Metabolizam korijena ovisi o nizu okolišnih faktora kao što su temperatura zraka i tla, vlaga tla (poplave ili vodni stres), sadržaj hraniva u tlu, pH reakcija tla i sl. (LOU I ZHOU 2006). S povećanjem temperature povećava se i respiracija kao posljedica temperaturne osjetljivosti enzima koji sudjeluju u metaboličkim procesima. U nedostatku hraniva rast korijena je stimuliran na štetu nadzemnog dijela (LOU I ZHOU 2006). Vodni stres

ili visoki salinitet također uzrokuju smanjenje respiracije jer je rast korijenja u takvim uvjetima oslabljen.

Respiracija mikroorganizama u zoni korijena (rizosfera) snažno ovisi o količini izlučevina koje korijen proizvede (rizodepozicije). Količina rizodepozicija ovisi o vrsti drveća, a procjenjuje se eksperimentalno u laboratorijskim pokusima. Izlučevine podliježu razgradnji i to uglavnom od strane bakterija prisutnih u zoni korijena. Mikorize (gljive koje žive u simbiozi s korijenjem biljaka) su široko rasprostranjeni mikroorganizmi koji imaju značajnu ulogu u kruženju ugljika i hraniva. Imaju relativno kratak životni vijek i visoku koncentraciju dušika stoga je njihova dekompozicija relativno brza.

Dekompozicija šumske prostirke je proces razgradnje organske tvari tla koji započinje fizikalnom fragmentacijom djelovanjem faune tla (nematode, gujavice, termiti), a završava biokemijskom razgradnjom organskih spojeva djelovanjem mikroorganizama (bakterije, gljive). Dekompozicija šumske prostirke značajno doprinosi ukupnoj respiraciji tla. Šumska prostirka se sastoji od raznovrsnih organskih spojeva, kao što su amino kiseline, organske kiseline, hemiceluloza, celuloza i lignin, a koji imaju različitu brzinu razgradnje. Prilikom utvrđivanju stope dekompozicije šumske prostirke potrebno je prethodno analizirati njezin sastav te utvrditi stopu dekompozicije za pojedine frakcije. Stopa dekompozicije (k) utvrđuje se na temelju podataka o preostaloj masi (X) nakon određenog vremena (t) od mase utvrđene na početku inkubacije (X_0), pokusom na terenu ili u laboratoriju. Dekompoziciju organske tvari najčešće aproksimiramo eksponencijalnim modelom izraženog jednadžbom:

$$X = X_0 e^{-kt} \quad (1.6)$$

Razgradnja organske tvari mineralnog dijela tla obuhvaća fizikalnu fragmentaciju, kemijsku razgradnju te konačno oslobađanje hraniva. Proces ovisi o mnogim faktorima; vlaga, temperatura i tekstura tla, kapacitet izmjene kationa, vodni status, dostupnost kisika i dr. Razgradnju OTT-a, slično kao i kod razgradnje organske tvari u šumskoj prostirci, aproksimiramo eksponencijalnim modelom.

Postoje direktne i indirektne metode izmjere disanja tla. Najčešće direktne metode izmjere su metode komora koje mjere količinu CO_2 koja izađe po jedinici površine tla u određenom vremenu (tzv. tok CO_2 izražen u $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), primjenom različitih metoda (npr. infracrveni plinski analizator - IRGA, natrij i kalcij hidroksid, plinski kromatograf). Za direktnu izmjeru koriste se i tzv. plinske bušotine kod kojih se disanje tla procjenjuje kao razlika u koncentraciji CO_2 duž vertikalnog profila bušotine. Indirektna procjena respiracije tla moguća je iz izmjera neto razmjene ugljika između atmosfere i ekosustava (engl. *Net*

Ecosystem Exchange – NEE) suvremenom mikrometeorološkom metodom vrtložne kovarijance (BALDOCCHI I DR. 1988) uz primjenu modela za razdiobu (particioniranje) tokova (REICHSTEIN I DR. 2005).

Omjer autotrofne i heterotrofne respiracije tla u ukupnoj respiraciji ovisi o mnogim čimbenicima; vrsta vegetacije, vrsta šumske zajednice, dob, način gospodarenja, godišnje doba, mikrostanišni uvjeti itd. (HANSON I DR. 2000).

d. Dekompozicija mrtvog drva (R_h^{MD}) značajan je negativan tok ugljika u šumskom ekosustavu, no vrlo često zanemaren u klasičnim izmjerama. Mrtvo drvo se, kao i šumska prostirka, sastoji od različitih organskih spojeva (lignin, celuloza, hemiceluloza) koji se raspadaju različitom brzinom, stoga ukupna stopa dekompozicije drvnog otpada ovisi o njegovom kemijskom sastavu te stopama dekompozicije određenih kemijskih frakcija. Ovaj tok ugljika moguće je mjeriti direktno, primjenom sustava komora u kontroliranim laboratorijskim uvjetima (DE GROOT I DR. 2000), ili indirektno, primjenom terenskog pokusa dekompozicije (SCHEU I SCHAUERMANN 1994).

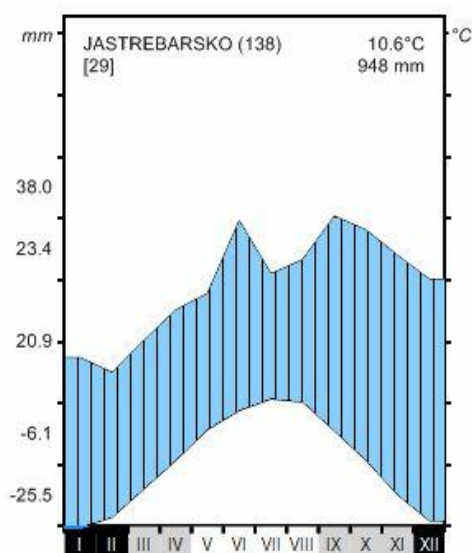
e. Nerespiratorni procesi gubitka ugljika (CW^{SJ}) u gospodarskim šumama uglavnom se odnose na zalihe ugljika u biomasi posječenih stabala koja je otpremljena iz šumske sastojine. U kontekstu procjene bilance ugljika nekog šumskog ekosustava, sva posječena biomasa koja se otpremila iz šume smatra se trenutnim gubitkom ugljika. Takva pretpostavka je primijenjena i u ovom radu. No, ako se promatra u širem smislu, odnosno u kontekstu procjene bilance ugljika u čitavom gospodarsko-industrijskom lancu, količina ugljika koja će predstavljati trenutni gubitak ovisi o strukturi sortimenata. Odnosno, za svaki sortiment se pretpostavlja specifično vrijeme potrebno da se u potpunosti razgradi i oslobodi ugljik iz svoje biomase, stoga konačna bilanca ovisi o udjelu pojedinih sortimenata u ukupnom volumenu posječenih stabala.

1.3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Istraživanje je provedeno u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske, u Pokupskom bazenu, u državnim gospodarskim šumama kojima upravljaju Hrvatske šume d.o.o. Pokupski bazen (porječje rijeke Kupe) je smješten oko 35 km JZ od Zagreba, između $45^{\circ}30'$ i $45^{\circ}42'$ sjeverne zemljopisne širine te $15^{\circ}32'$ i $15^{\circ}50'$ istočne zemljopisne dužine, u tektonskoj zavali Crna Mlaka. Omeđen je Samoborskim gorjem i Vukomeričkim goricama na sjeveru te rijekom Kupom na jugu, a nadmorske visine se kreću od 107 do 130 m. Geološku podlogu centralne nize čine glinovite naslage holocena, glinoviti šljunci i glinoviti pijesci, s prvim

vodonosnim slojem između 6.5 i 9.5 m (BOJANIĆ I IVIČIĆ 1974). Za ovo područje karakterističan je specifični mikroreljef kojeg tvore naizmjenično raspoređene mikrouzvisine – grede i mikroudubine – bare i nize. Cijelo područje je ispresijecano mnogobrojnim vodotocima i kanalima, a prosječni vegetacijski vodostaj kreće se od -60 do -200 cm (MAYER 1996). Glinovita podloga, specifična geomorfologija (makro zavalu) te obilje vode koja pristiže oborinama, bočnim slijevanjem te visoka razina podzemne vode, sve je to pogodovalo razvoju hidromorfni tala, od pseudogleja na zaravni rasprostranjenog na obodnim terasama bazena, preko pseudoglej-glejnih i pseudoglej-semiglejnih tala na prijelaznim položajima između greda i centralne nize, do močvarno glejnih tala u najvećem dijelu centralne nize i hidromelioriranih tala uz duboke kanale i stara korita (MAYER 1996).

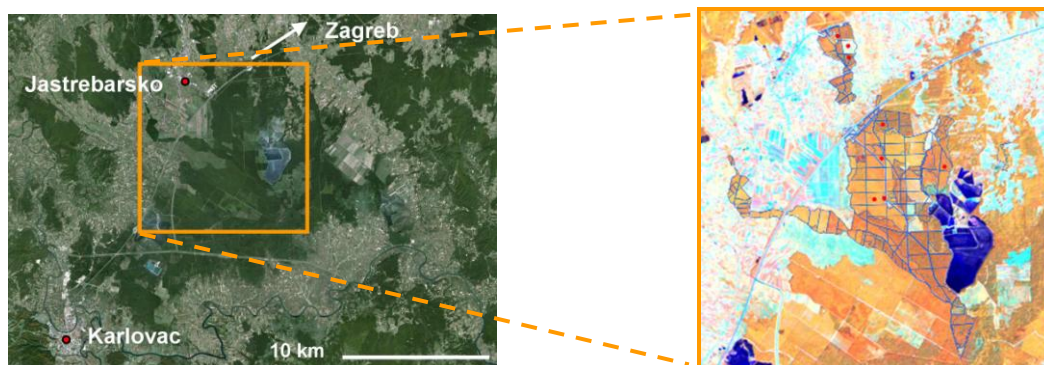
Klima ovog područja je prema Köppenovoj klasifikaciji određena kao umjerena topla kišna klima s oznakom Cfbw[“] (SELETKOVIĆ I KATUŠIN 1992), bez suhog razdoblja, s padalinama jednoliko raspoređenim na cijelu godinu, a najsušim dijelom godine u hladnom godišnjem dobu. Prema podacima s meteorološke postaje Jastrebarsko za razdoblje od 1981. do 2009. godine izrađen je klimadijagram i prikazan na slici 1.7. U promatranom razdoblju zabilježena je prosječna godišnja temperatura zraka od 10,6°C te prosječna temperatura zraka unutar vegetacijskog razdoblja (travanj - rujna) od 17°C. U promatranom razdoblju zabilježena je prosječna godišnja količina oborina od 948 mm, od čega je 500 mm palo unutar vegetacijskog razdoblja (travanj – rujna).



Slika 1.6. Klimadijagram meteorološke postaje Jastrebarsko, za razdoblje 1981. – 2009. godine. Za izradu je korištena besplatna probna verzija softverskog programa KlimaSoft 2.2.3.*

* <http://www.monachus-informatika.hr/klimasoft.aspx>

Pokus je postavljen unutar gospodarske jedinice (g.j.) „Jastrebarski lugovi“ (Šumarija „Jastrebarsko“, Uprava šuma podružnica Karlovac), unutar uređajnog razreda lužnjak iz sjemena. Najzastupljenija šumska zajednica unutar pokusnih ploha je zajednica hrasta lužnjaka i velike žutilovke (*Genisto elatae-Quercetum roboris* Horvat 1938) dok je manjim dijelom prisutna šumska zajednica hrasta lužnjaka i običnoga graba (*Carpino betuli-Quercetum roboris* (Anić 1959) Rauš 1971). Tla su uglavnom pseudoglej i pseudoglej-glejno, a na manjem dijelu pokusa je prisutno i močvarno glejno-amfiglejno tlo.



Slika 1.7. Lokacija šumskog kompleksa Pokupskog bazena (lijevo) i granice odabrane gospodarske jedinice te lokacije pokusnih ploha (desno).

Snimak iz zraka preuzet pomoću *Google Earth TM* Internet servisa, snimljen 2009. godine (lijevo) i CORINE 2000 (desno).

1.4. CILJ ISTRAŽIVANJA

Postavljena je hipoteza da se bilanca ugljika, odnosno neto razlika pohranjene i oslobođene količine ugljika, mijenja kroz životni vijek šumske sastojine kao posljedica promjene u relativnom odnosu produkcije biomase (kao pozitivnog toka) te procesa disanja tla i dekompozicije drvnog otpada (kao negativnih tokova). Cilj ovog rada je istražiti u kojoj dobi odabrana šumska zajednica hrasta lužnjaka postaje spremnik ugljika, zatim koji je maksimalan ponor koji može ostvariti i kada se on postiže te kakva je bilanca ugljika u starim sastojinama. Kvantificiranje zaliha, tokova i bilance ugljika tijekom životnog vijeka promatranog šumskog ekosustava predstavljat će prvi *referentni* podatak te, po mogućnosti, poslužiti u budućim istraživanjima zaliha i tokova ugljika u šumama hrasta lužnjaka.

U kontekstu čitave šume, kao skupa svih jednodobnih sastojina odabrane šumske zajednice hrasta lužnjaka, hipoteza je da dobna struktura utječe na ukupnu bilancu ugljika promatrane šume. Ovim radom želi se procijeniti trenutno stanje zaliha i bilance ugljika u odabranom šumskom ekosustavu hrasta lužnjaka u Pokupskom bazenu te istražiti kako različiti scenariji obnove u projekcijskom razdoblju od 50 godina utječu na dobnu strukturu, a time i na bilancu ugljika promatranog šumskog ekosustava.

2. MATERIJAL I METODE

2.1. PLANIRANJE POKUSA

Za potrebe ostvarenja ciljeva istraživanja odabrana je metoda kronosekvence (lat. *chrono* = vrijeme, *sequence* = slijed) koja podrazumijeva vremenski niz šumskih sastojina koje se međusobno razlikuju po dobi uz nastojanje da ostali okolišni i sastojinski parametri (npr. vrsta šumske zajednice, omjer smjese, tip tla) ostanu u što većoj mjeri nepromijenjeni. Kronosekvencu se temelji na supstituciji vremena prostorom (WALKER I DR. 2010) i glavna pretpostavka u ovoj metodi je da se jedna sastojina razvila iz druge, odnosno da je sastojina koja sada ima 30 godina prije 20 godina bila jednakog strukturnog sastava kao sastojina koja sada ima 10 godina, a da će za 20 godina biti jednaka sastojini koja sada ima 50 godina. Najranija primjena ove metode kod nas bila je u svrhu izrade prirasno-prihodnih tablica (ŠPIRANEC 1975a, BEZAK I DR. 1993), ali se naziv *kronosekvencu* nije još udomaćio. Ova metoda ima široku primjenu u istraživanjima dugogodišnjih razvojnih procesa kod mnogih ekosustava, npr. dinamika rasta i razvoja, dinamika kruženja hraniva (BRUCKMAN I DR. 2011), pohrana ugljika u biomasi i tlu (JANISCH I HARMON 2002, CAMPBELL I DR. 2004, MUND 2004, VESTERDAL I DR. 2009), sukcesija (JOHNSON I MIYANISHI 2008) itd.

Kronosekvencu u ovom istraživanju je sastavljena od niza sastojina koje pokrivaju čitav životni vijek šume hrasta lužnjaka, od 5 do 168 godina.

2.1.1. Izbor odjela i odsjeka kao reprezentativnih predstavnika pojedinog dobnog razreda

Prema podacima iz O-2 obrasca, iz važeće Osnove gospodarenja (O.G.) za gospodarsku jedinicu „Jastrebarski lugovi“ (HŠ D.O.O. 2003), odjeli/odsjeci su razvrstani prema namjeni šume i uređajnom razredu (tablica 2.1). Iz gospodarskih šuma izdvojen je uređajni razred lužnjak iz sjemena te su odsjeci tog uređajnog razreda razvrstani prema šumskim zajednicama i dobnim razredima (tablica 2.2). Za pokus kronosekvence odabrana je šumska zajednica hrasta lužnjaka i velike žutilovke s drhtavim šašem, koja je površinom najzastupljenija u gospodarskoj jedinici, što omogućava dovoljno veliki izbor potencijalnih odsjeka čiji bi niz zadovoljio glavne pretpostavke metode.

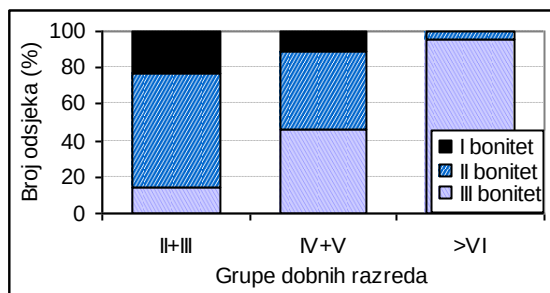
Tablica 2.1. Raspodjela odsjeka po površini s obzirom na namjenu šume i uređajni razred.

Namjena šume	Uređajni razred	Površina (ha)	Broj odsjeka
Gospodarska šuma	Lužnjak iz sjemena	1945,58	154
	Poljski jasen iz sjemena	351,72	27
	Obični grab iz sjemena	112,86	10
	Američki borovac	9,66	1
	Šikara	42,95	10
	Čistina	17,19	5
Ukupno Gospodarska šuma		2479,96	207
Šuma posebne namjene	Lužnjak iz sjemena	47,69	4
	Poljski jasen iz sjemena	66,28	2
	Šikara	13,38	1
	Za posebne potrebe	13,97	4
Ukupno Šuma posebne namjene		139,64	11
UKUPNO		2621,28	218

Tablica 2.2. Raspodjela površine i broja odsjeka po dobnim razredima s obzirom na pripadnost pojedinoj šumskoj zajednici u uređajnom razredu hrast lužnjak iz sjemena

Šumska zajednica		Dobni razredi							UKUPNO
		I	II	III	IV	V	VI	VII i <	
Šuma hrasta lužnjaka i velike žutilovke s drhtavim šašem	P (ha)	178,59	130,69	92,21	62,60	20,62	1,64	150,59	636,94
	N odsjeka	12	7	6	7	3	1	10	46
Šuma hrasta lužnjaka i velike žutilovke s rastavljenim šašem	P (ha)	267,70	74,55	39,19	28,88	-	11,36	191,43	613,11
	N odsjeka	18	4	2	4	-	1	19	48
Šuma poljskog jasena i kasnog drijemovca sa crnom johom	P (ha)	3,82	-	18,26	-	-	25,57	247,04	294,69
	N odsjeka	1	-	2	-	-	3	12	18
Tipična šuma hrasta lužnjaka i običnoga graba	P (ha)	63,93	36,34	130,31	125,27	27,40	-	17,59	400,84
	N odsjeka	6	2	11	15	6	-	2	42
Ukupno P(ha)		514,04	241,58	279,97	216,75	48,02	38,57	606,65	1945,58
Ukupno N odsjeka		37	13	21	26	9	5	43	154

Koristeći GIS programsko okruženje (ArcView 10) i kartografske podloge gospodarske podjele ustupljene od poduzeća Hrvatske šume, odsjeci odabrane šumske zajednice prostorno su izdvojeni i bojom označeni na kartografskoj podlozi. Nadalje, razvrstani su prema starosti u sedam dobnih razreda, s time da je VII dobnom razredu pribrojen i manji broj onih koji su stariji od propisane ophodnje, tj. 140 godina. Prioritet u izboru potencijalnih odsjeka bio je bonitet te starost i struktura sastojina (srednji prsni promjer, srednja sastojinska visina, obrast). Izrazito neravnomjeran raspored dobnih razreda po bonitetima (slika 2.1.), čak unutar čitavog uređajng razreda (4 šumske zajednice), nije omogućio da se bonitet zadovolji kao kriterij pri odabiru sastojina.



Slika 2.1. Udio broja odsjeka uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“ s obzirom na pripadnost bonitetu, a razvrstan po grupama dobnih razreda.

Dodatni kriteriji za odabir bili su tip tla i ukupna površina odsjeka (zbog mogućnosti uklapanja potrebnog broja primjernih površina za izmjeru drvene zalihe, tzv. inventurne plohe). U odabranoj fitocenozi peti dobni razred je bio slabo zastupljen stoga smo bili primorani birati između odsjeka drugih šumskih zajednica. U četvrtom dobnom razredu odsjeci odabrane šumske zajednice se strukturom sastojine nisu uklapali u potencijalni niz zbog čega smo i za ovaj dobni razred bili primorani birati između odsjeka drugih šumskih zajednica. Konačno, u petom dobnom razredu nije odabran niti jedan odsjek, dok je za četvrti dobni razred izabran odsjek koji pripada šumi hrasta lužnjaka i običnoga graba. Odsjek starosti većoj od ophodnje (37B) odabran je unatoč relativno maloj površini (1,68 ha). Zbog svoje starosti ovaj je odsjek jedinstven te je uključen u istraživanje kao svojevrsni indikator u kojem smjeru bi se kretao razvoj sastojine ako se ona ne bi posjekla niti do 160. godine starosti. Na prijedlog Hrvatskog šumarskog instituta Ministarstvo poljoprivrede je donijelo rješenje (UP/I-321-01/11-01/1, 01.02.2012. u Zagrebu) kojim se navedeni odsjek proglašava šumom posebne namjene za znanstvena istraživanja te je izuzet iz redovitog gospodarenja.

Nakon uredskog dijela posla pristupilo se terenskom obilasku selektiranih odsjeka. Konačan izbor odsjeka obavio se na temelju zabilješki s terena o opisu sastojina i staništa. Kronosekvenca se sastoji od 8 odsjeka različite starosti (tablica 2.3).

Tablica 2.3. Podaci za odabrane odsjeke preuzeti iz važeće Osnove gospodarenja za gospodarsku jedinicu „Jastrebarski lugovi“ za razdoblje 2004.-2013. godine (HŠ D.O.O. 2003)

Dobni razred	Dob sastojine*	Šumska zajednica	Bonitet	Vrsta tla	Površina odsjeka	Sklop	Odjel / odsjek
I	150**	Šuma hrasta lužnjaka i velike žutilovke	-	Pseudoglej	10,53	-	2A
I	5		-	Pseudoglej	26,22	-	3B
II	30		II	Močvarno glejno-amfiglej	36,79	nepotpun	37A
III	45		II	Pseudoglej-glej	9,89	potpun	25A
IV	60	Šuma hrasta lužnjaka i ob. graba	I	Pseudoglej-glej	25,6	nepotpun	14A
VI	100	Šuma hrasta lužnjaka i velike žutilovke	III	Pseudoglej	4,69	prekinut	4B
VII	130		III	Pseudoglej-glej	12,41	prekinut	8B
VIII	160		III	Pseudoglej-glej	1,68	progala	37B

* Podatak se odnosi na početak važenja O.G. (1.1.2004. g.).

** Naplodni sijek je proveden 2006. godine, a dovršni sijek 2008. godine tako da je starost ove sastojine za vrijeme izmjere (kraj 2011. godine) bila 3-5 godina. Dalje u radu se za ovu sastojinu koristi starost od 5 godina.

2.1.2. Postavljanje pokusnih ploha

Unutar svakog odabranog odsjeka postavljena je trajna pokusna ploha površine 1 ha, a centar plohe je pozicioniran na način da leži na jednoj od točaka iz sustavne mreže točaka koja se u razdoblju od 2006. do 2008. godine koristila za izmjeru šuma (interna komunikacija

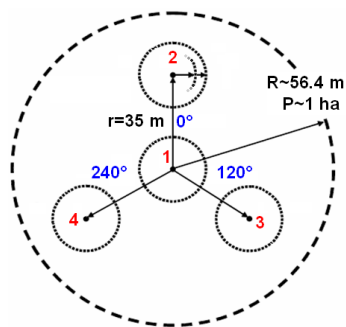
sa HŠ D.O.O.). Svakoj točki je GPS uređajem utvrđena pozicija (x i y koordinate) (tablica 2.4). Nastojalo se da centar ploha bude udaljen od ruba sastojine minimalno 200 m da bi se isključio tzv. rubni efekt.

Unutar svake hektarske plohe postavljene su 4 trajne kružne podplohe (tzv. plohe za intenzivnu izmjeru – intenzivne plohe), prema TCO protokolu (GTOS 2008) (slika 2.1). Međusobna udaljenost podploha je 35 m. Unutar istog dobnog razreda korišteni su polumjeri promjenjive veličine, ovisno o promjeru stabala, a istovremeno i u skladu s metodologijom Hrvatske nacionalne inventure šuma (engl. *Croatian National Forest Inventory – CRONFI*) (ČAVLOVIĆ I BOŽIĆ 2008) i TCO protokola (tablica 2.5).

Tablica 2.4. Koordinate centara ploha postavljenih u odabranim odsjecima

Dobni razred	Starost sastojine na kraju 2011. godine	Odjel / odsjek	Naziv točaka iz mreže točaka	y	x	Naziv plohe	Podplohe s meteorološkom stanicom
I	5	2A	- *			P1a	P1a-1
I	13	3B	831-357	5553092	5059171	P1b	P1b-2
II	38	37A	- *	5554012	5053063	P2	P2-4
III	53	25A	787-370	5554574	5054795	P3	P3-1
IV	68	14A	784-395	5556980	5054542	P4	-
VI	108	4B	826-356	5553001	5058669	P6	P6-2
VII	138	8B	800-371	5554550	5056097	P7	P7-3
preko ophodnje	168	37B	- *	5554585	5053185	P8	P8-2

* Centar plohe ne leži na mreži točaka zbog ograničavajućih okolnosti na terenu.



Slika 2.2. Tlocrt prostornog rasporeda kružnih podploha postavljenih u odabranim odsjecima, prema protokolu za praćenje ugljika u kopnenim ekosustavima (engl. *Terrestrial Carbon Observation – TCO protocol*) (GTOS 2008).

Tablica 2.5. Promjenjivi polumjeri s obzirom na promjer stabala, prema CRONFI metodologiji i TCO protokolu te polumjeri primijenjeni u kronosekvenci.

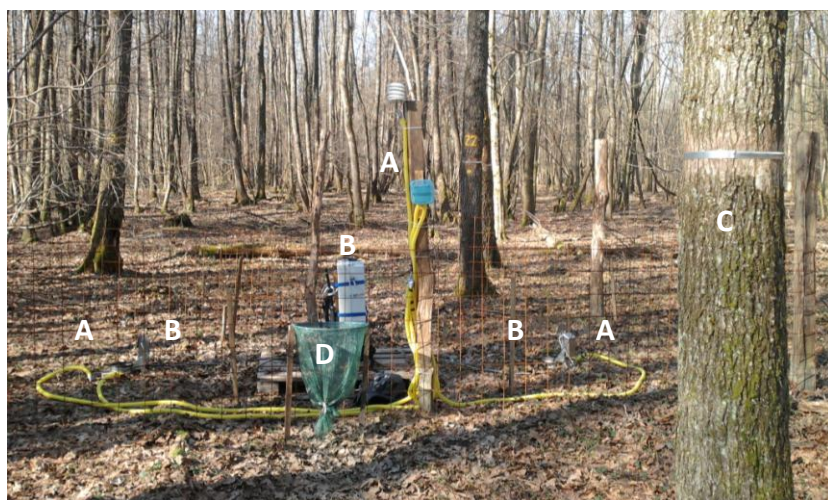
	R (m)								
d (cm)	CRONFI	TCO	I	II	III	IV	VI	VII	VIII
2-5	2	2-5	2						
5-10	3,5		3,5						
11-30	7	5-17 (10)*	7	8	10	12	16	17	17
31-50	13				13	13			
51-80	20								
>80	-	56.4	56.4						

* Standardni polumjer iznosi 10 m, a korigira se s obzirom na gustoću i starost sastojine.

S ciljem ostvarivanja što točnije procjene drvnih zaliha na razini pojedinog odsjeka, u neposrednoj blizini intenzivnih ploha odabrano je 6-11 točaka iz postojeće mreže uređajne inventure šuma. Izuzetak je bila najstarija sastojina površine 1,68 ha gdje je izmjera na intenzivnim ploham predstavljala stanje u cijelom odsjeku. Odabrane točke poslužile su kao centar tzv. inventurnih ploha. Prilikom izmjere korišteni su isti polumjeri kao i kod ploha za intenzivnu izmjeru. Popis inventurnih ploha i njihovih koordinata iskazan je u prilogu 1.

2.1.3. Meteorološke stanice

Na jednoj od 4 intenzivne plohe unutar istog dobnog razreda iskolčena je površina 2 x 3 m i ograđena žičanom ogradom visine 1 m u svrhu zaštite od divljači. U ograđenom prostoru postavljena je mini-meteoroloških stanica s pripadajućim senzorima te obruči komora sustava za izmjeru disanja tla (slika 2.2B). Mini-meteorološke stanice su opremljene sa senzorom za vlagu tla *10HS Soil Moisture* (Decagon, Washington, USA), dva seta senzora za temperaturu tla i jednim senzorom za temperaturu zraka (SFI, Ljubljana). Senzor za vlagu tla ima područje dohvata do 10 cm dubine, odnosno prostor volumena tla od 1 l. Temperatura tla se mjeri termometrima na tri dubine (5, 10 i 15 cm), a temperatura zraka na visini od 2 m iznad tla. Podaci se prikupljaju u polusatnim intervalima. Meteorološka stanica u okviru istraživačke stanice obavlja izmjeru brojnih parametara, a između ostalog i temperature tla termometrima na tri dubine (5, 15 i 25 cm), udio vlage u tlu (0–30 cm) koristeći dva reflektometra (CS616, Campbell Scientific) te temperaturu i vlažnost zraka (HMP45AC, Vaisala). Sve varijable se mjere pri frekvenciji od 0,1 Hz te se pomoću CR1000 datalogera (Campbell Sci. Inc. Lincoln Nebraska, USA) zapisuju kao polusatni prosjeci.



Slika 2.3. U potpunosti opremljena intenzivna ploha u III dobnom razredu. A – mini-meteorološka stanica i pripadajući senzori; B – sustav komora za izmjeru respiracije tla; C – dendrometerska traka; D – košara za lišće.

2.2. IZMJERA I OBRAČUN ZALIHA UGLJIKA

2.2.1. Zalihe ugljika u živoj biomasi (C^{ZB})

Na intenzivnim plohama je u dva navrata (zima 2009./2010. i zima 2010./2011.) obavljena izmjera prsnih promjera svih živih stabala ($d_{1,3} > 2\text{cm}$) s preciznošću od 1 mm i visina svih stabala ($d_{1,3} > 2\text{cm}$) instrumentom Vertex III hypsometer (Haglof Instruments, Švedska). Zabilježena je i pozicija svih živih stabala, odnosno njihova udaljenost od centra plohe i azimut. Iznimka je bila sastojina u dobi od 5 godine gdje je u zimu 2010./2011. godine na 5 ploha površine 3 x 3 m jednokratno obavljeno prebrojavanje svih stabalaca te izmjera promjera na vratu korijena i izmjera visine zadnjeg pršljena grana i ukupne visine na poduzorku (cca. 30 stabalaca po plohi). S ciljem dobivanja procjene drvnih zaliha za pojedini odsjek, u zimu 2011./2012. godine obavljena je jednokratna izmjera prsnih promjera na inventurnim plohama.

Za procjenu zaliha ugljika u živoj biomasi potrebno je poznavati vrijednosti nadzemne i podzemne biomase (W_n^{ZB} i W_p^{ZB}) te udio ugljika u drvu, listu i plodu (engl. *carbon fraction* – *CF*; CF_d , CF_l , CF_{pl}). Nadzemna biomasa može se procijeniti primjenom tzv. faktora ekspanzije biomase (engl. *biomass expansion factor* – *BEF*). Faktori ekspanzije biomase služe za procjenu nadzemne biomase koja uključuje sitne grane i grančice ($d < 7\text{ cm}$ ili $d < 3\text{ cm}$), a primjenjuju se na vrijednosti volumena drvene zalihe krupnog drva ($d > 7\text{ cm}$) ili ukupnog drva ($d > 3\text{ cm}$). Najčešće ne uključuju lisnu biomasu i biomasu plodova, stoga je potrebno obaviti procjenu lisne biomase i biomase plodova na temelju podataka o prikupljenom sitnom šumskom otpadu (vidi poglavlje 2.3.1. b). Za procjenu nadzemne biomase na ovaj način potrebno je poznavati i vrijednosti gustoće drva u apsolutno suhom stanju za pojedine vrste drveća. Podzemna biomasa može se procijeniti koristeći omjere podzemne i nadzemne biomase (engl. *root-to-shoot ratio* – *R:S*) iz literature. Ovisno o porijeklu izvoda *R:S* omjera, mogu se primjenjivati na vrijednosti drvene nadzemne biomase ili ukupne nadzemne biomase (drvena i lisna) (CAIRNS I DR. 1997, GENET I DR. 2009). U omjeru podzemne i nadzemne biomase nije uključena biomasa sitnog korijena, stoga ju je potrebno procijeniti na drugi način, najčešće iz uzoraka tla (poglavlje 2.2.3). Podzemna i nadzemna biomasa mogu se također procijeniti i jednadžbama biomase (engl. *biomass equation* – *BE*). Jednadžbe biomase koriste se za procjenu pojedinih komponenti biomase (ukupna nadzemna biomasa, biomasa debla, biomasa grana, lisna biomasa, biomasa kore, podzemna biomasa) na temelju lako mjerljivih varijabli stabla/sastojine kao što su prsni promjer i visina stabla, odnosno srednji

prsni promjer i srednja sastojinska visina. Najčešće se koriste različiti oblici jednadžbe opće potencije i/ili njihove logaritamske transformacije (tablica 2.6).

Faktori ekspanzije biomase, omjeri podzemne i nadzemne biomase i jednadžbe biomase ovise o mnogobrojnim okolišnim čimbenicima (geografski položaj, nadmorska visina) i parametrima sastojne (vrsta drveća, dob sastojine). Mogu biti generalizirani na pojedine klimatske zone i pripadajuće tipove šuma (CAIRNS I DR. 1997, IPCC 2003, WANG 2006), izrađeni za pojedine rodove ili vrste drveća (LEHTONEN I DR. 2004, WANG 2006, CIENCIALA I DR. 2008) ili se mogu iskazati kao funkcija starosti sastojine (LEHTONEN I DR. 2004, GENET I DR. 2009).

Tablica 2.6. Jednadžbe biomase

Jednadžba biomase		Izvor
$Y = a \times d^b$	$\ln Y = \ln a + b \times \ln d$	Balboa-Murias i dr. 2006, Wang 2006, Cienciala i dr. 2008
$Y = a \times v^b$	$\ln Y = \ln a + b \times \ln v$	Lehtonen i dr. 2004 prema Laasasenaho 1982
$Y = a \times (d^2 \times h)^b$	$\ln Y = \ln a + b \times \ln(d^2 \times h)$	Balboa-Murias i dr. 2006
$Y = a \times (d^2)^b \times (d^2 \times h)^c$	$\ln Y = \ln a + b \times \ln(d^2) + c \times \ln(d^2 \times h)$	Balboa-Murias i dr. 2006
$Y = a \times d^b \times h^c$	$\ln Y = \ln a + b \times \ln d + c \times \ln h$	Cienciala i dr. 2008
$Y = a + b \times e^{\frac{-t}{100}}$		Lehtonen i dr. 2004

gdje je Y – biomasa određene komponente (deblo, grane, list...) (kg); a , b i c – parametri regresije; d – prsni promjer stabla (cm); h – visina stabla (m); v – volumen stabla (m³); $\ln$ – prirodni logaritam.

a. Nadzemna živa biomasa ($W_n^{ŽB}$) je zbroj nadzemne drvene biomase (W_{nd}) te lisne biomase (W_l) i biomase plodova (W_{pl}). Nadzemna drvena biomasa može se izračunati na više načina kombinirajući jednadžbe i faktore raznih autora (tablice 2.6), no tako dobivene vrijednosti značajno se razlikuju. Da bi mogli odabrati najpovoljniji način izračuna s obzirom na lokalne sastojinske uvjete, vrijednosti nadzemne drvene biomase (W_{nd}) dobivene na više načina usporedili smo s biomasom procijenjenom na temelju drvene zalihe ukupnog volumena ($W_{>3}$). Pretpostavili smo da je ukupna drvena zaliha, dobivena primjenom Schumacher-Hall-ove jednadžbe i parametara za pojedine vrste drveća, najbliža stvarnim vrijednostima nadzemne drvene biomase. Za najpovoljniji način izračuna nadzemne drvene biomase izabrali smo onaj koji odgovara logičnom odnosu $W_{nd} > W_{>3}$ te činjenici da je najveći udio biomase tankih grana i grančica u ukupnoj nadzemnoj drvnoj biomasu zastupljen u najranijoj dobi (I dobni razred).

Nadzemna drvena biomasa izračunala se na sljedeće načine:

- 1) Korištenjem volumena krupnog drva i primjenom različitih faktora ekspanzije biomase (*BEF*)

$$W_{nd} - BEF - hrast = V_{d>7} \times \rho \times BEF_{hrast} \quad (2.1)$$

$$W_{nd} - BEF - IPCC = V_{d>7} \times \rho \times BEF_{IPCC} \quad (2.2)$$

- 2) Korištenjem ukupnog volumena i jednadžbi biomase za sitne grane i grančice

$$W_{nd} - (+5\%) = (V_{d>3} + (V_{d>3} / 95 \times 5)) \times \rho \quad (2.3)$$

$$W_{nd} - Balb. = V_{d>3} \times \rho + 1,5 \times \left(\frac{W_{tg} + W_{gr}}{P} \right) \quad (2.4)$$

- 3) Primjenom jednadžbi biomase

$$W_{nd} - Cienc. = \frac{\lambda \times e^{a+b \times \ln d + c \times \ln h}}{P} \quad (2.5)$$

$$W_{nd} - Wang = \frac{10^{a+b \times \log_{10}(d)}}{1000 \times P} \quad (2.6)$$

gdje je W_{nd} – nadzemna drvena biomasa (kg ha^{-1}); $V_{d>7}$ i $V_{d>3}$ – volumen drvene zalihe krupnog i ukupnog drva ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$); ρ – gustoća drva u apsolutno suhom stanju za pojedine vrste drveća (kg m^{-3}); BEF_{hrast} i BEF_{IPCC} – faktori ekspanzije biomase koji ne uključuju lisnu biomasu i biomasu plodova; W_{tg} – biomasa tankih grana $d=0.5-2$ cm (kg); W_{gr} – biomasa grančica $d<0.5$ cm (kg); d – prsni promjer stabla (cm); h – visina stabla (m); P – površina plohe (ha).

U prvom načinu volumen drvene zalihe izračunao se koristeći funkciju Schumacher–Hall – a i parametre za krupno ($d>7$ cm) za četiri glavne vrste drveća; hrast lužnjak, obični grab, crna joha i poljski jasen (suši tip) (ŠPIRANEC 1975b, CESTAR I KOVAČIĆ 1982, CESTAR I KOVAČIĆ 1984). Volumeni ostalih vrsta, koje su se u smjesi pojavile s vrlo malim udjelom korišteni su parametri za obični grab (kao zamjenski parametri za OTB – nizinski brijest, klen, glog i lijeska) te parametri za domaće topole (kao zamjenski parametri za OMB – topola, trušljika i vrba iva). Za volumen krupnog drva za hrast lužnjak korišteni su parametri dobiveni nelinearnom regresijom iz podataka Špirančevih tablica (ŠPIRANEC 1975b) za krupni volumen (tablica 2.7). Lokalne visinske krivulje izrađene su na temelju izmjerenih promjera i visina početkom vegetacije 2009. i 2010. godine za prethodno navedene četiri glavne vrste drveća i 7 dobnih razreda (izuzetak je bila sastojina starosti 5 godina). Korištene su prosječne vrijednosti gustoće drva u apsolutno suhom stanju za četiri glavne vrste drveća,

dok su se za OTB koristile vrijednosti običnog graba, a za OMB vrijednosti crne topole (ŠUMARSKA ENCIKLOPEDIJA 1959). Koristeći dva različita faktora ekspanzije biomase; za hrast (DIETER I ELSASSER 2002) i za listače umjerenog pojasa (IPCC 2003), dobivene su prve dvije vrijednosti nadzemne biomase – $W_{nd_BEF_hrast}$ i $W_{nd_BEF_IPCC}$.

Tablica 2.7. Parametri Scumacher-Hall-ove funkcije za hrast lužnjak (*Quercus robur* L.), za volumen krupnog drva, dobiveni nelinearnom regresijom iz drvnogromadnih tablica za debljinski stupnjeve po 1 cm (ŠPIRANEC 1975b)

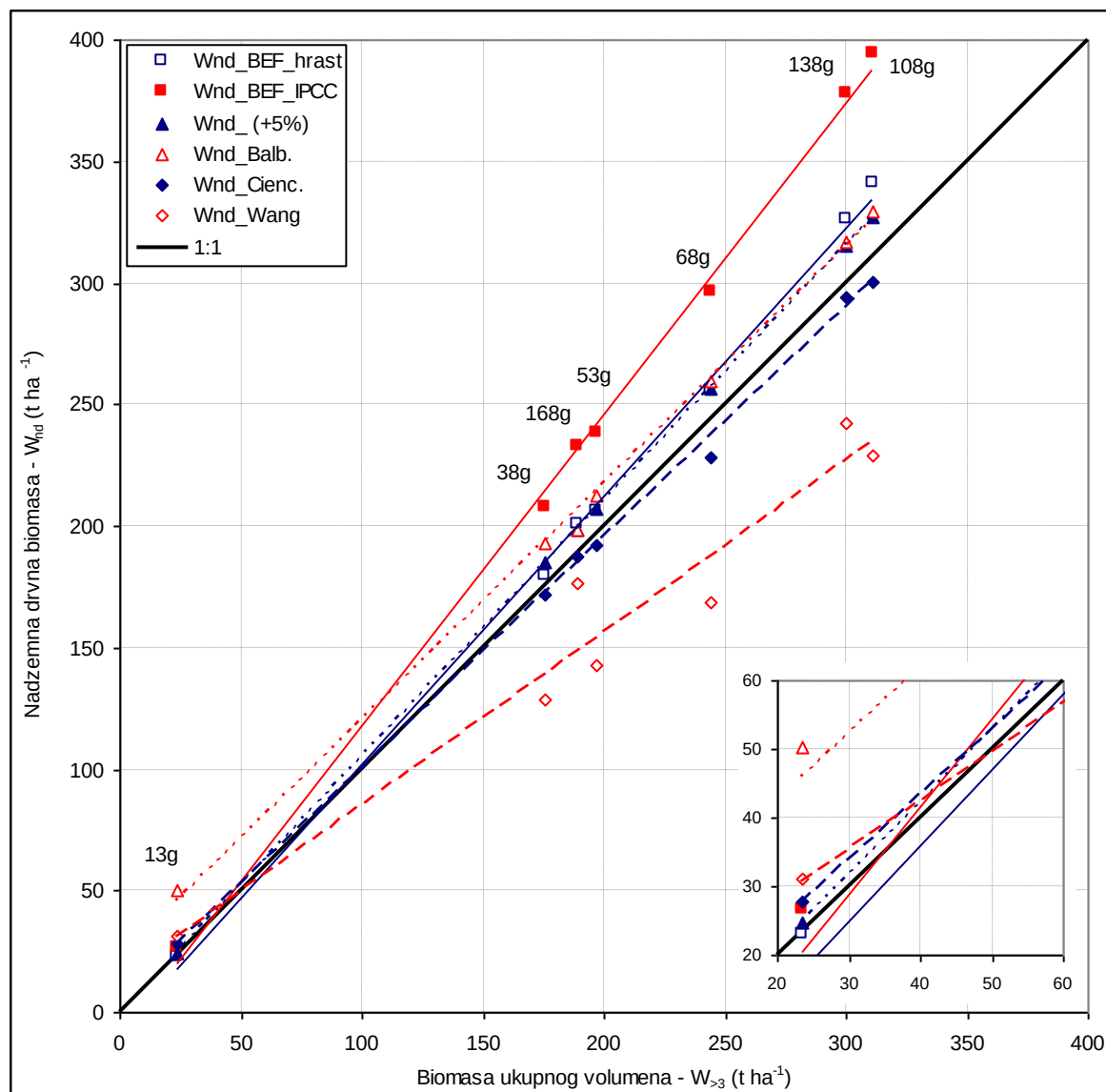
Parametar	Hrast lužnjak	Standardna pogreška
$\ln f-a$	-10,1162	0,0014
b	2,0648	0,0004
c	0,9283	0,0005

U drugom načinu volumen drvene zalihe izračunao se kao i u prethodna dva obračuna prvog načina, osim što su korišteni parametri za ukupno drvo ($d > 3$ cm). Za obični grab korišteni su parametri dobiveni nelinearnom regresijom drvnogromadnih tablica (ŠPIRANEC 1975b) za ukupno drvo (vidi MARJANOVIĆ 2009). Biomasa tankih grana i grančica ($d < 3$ cm) procijenjena je na dva načina; 1) kao fiksni iznos od 5% ukupne nadzemne biomase te 2) koristeći jednadžbu biomase za hrast lužnjak (BALBOA-MURIAS I DR. 2006) pomnoženu sa faktorom 1,5 jer autori daju formulu za biomasu $d < 2$ cm. Vrijednosti nadzemne biomase dobivene ovim obračunima nazvane su $W_{nd_+5\%}$ i W_{nd_Balb} .

U trećem načinu korištene su jednadžbe za nadzemnu biomasu, i to za hrast na temelju prsnog promjera i visine kao nezavisnih varijabli (CIENCIALA I DR. 2008), te općenita jednadžba na temelju samo prsnog promjera (WANG 2006). Vrijednosti nadzemne biomase dobivene ovim obračunima nazvane su W_{nd_Cienc} i W_{nd_Wang} .

Za procjenu nadzemne drvene biomase odabrana je jednadžba 2.4 (W_{nd_Balb}) jer se prilikom usporedbe nadzemne drvene biomase (W_{nd}) s biomasom ukupnog volumena ($W_{>3}$) utvrdilo da W_{nd_Balb} odgovara prethodno postavljenim pretpostavkama, odnosno vrijednosti nadzemne drvene biomase dobivene na ovaj način veće su od biomase ukupnog volumena i udio biomase tankih grana i grančica najveći je u najranijoj dobi (slika 2.3).

Lisna biomasa i biomasa plodova procijenjena je kao ukupna masa suhe tvari prikupljenog lišća i plodova u hvataljkama (vidi poglavlje 2.3.1 b).



Slika 2.4. Odnos nadzemne biomase i biomase ukupnog volumena za odabrane sastojine

b. Podzemna živa biomasa ($W_p^{žB}$) za hrast lužnjak procijenjena je pomoću omjera podzemne i nadzemne biomase u ovisnosti o dobi (GENET I DR. 2009), dok se za ostale vrste koristila prosječna vrijednost omjera podzemne i nadzemne biomase za šume umjerenog pojasa (CAIRNS I DR. 1997) (tablica 2.8). Omjeri su primijenjeni na nadzemnu biomasu (drvnu i lisnu). U podzemnu biomasu pribrojena je i masa sitnog korijena ($d < 2$ mm) procijenjena iz uzoraka tla (poglavlje 2.2.3).

Konačno, ukupna živa biomasa ($W^{žB}$) dobivena je kao zbroj nadzemne drvene (W_{nd}) i lisne (W_l) biomase, biomase plodova (W_{pl}) te podzemne biomase krupnog (W_{kk}) i sitnog korijena (W_{sk}). Zalihe ugljika u živoj biomasu ($C^{žB}$) izračunale su se kao umnožak mase suhe tvari i pripadajućeg udjela ugljika (drvo, list, plod), na način:

$$C^{ZB} = (W_{nd} + W_{kk} + W_{sk}) \times CF_d + W_l \times CF_l + W_{pl} \times CF_{pl} \quad (2.7)$$

Prosječni udio ugljika u masi suhe tvari drva iznosi uglavnom oko 50% (MUND 2004, BRUCKMAN I DR. 2011), dok je udio ugljika u listu određen CNS analizatorom laboratorija za fizikalno-kemijska ispitivanja Hrvatskog šumarskog instituta. Za udio ugljika u plodovima uzet je udio od 50% (GENET I DR. 2009). U tablici 2.8 su prikazane sve vrijednosti korištene pri izračunu zaliha ugljika u živoj biomasi.

Tablica 2.8. Vrijednosti raznih faktora, omjera i parametra korištenih pri izračunu zaliha ugljika u šumskoj biomasi

		Hrast lužnjak	Obični grab	Crna joha	Poljski jasen	Lit. izvor
Gustoća drva, ρ (kg m ⁻³)		620	790	510	650	1
Faktor ekspanzije biomase, BEF	BEF _{hrast}	1,2091				2
	BEF _{IPCC}	1,4				3
Jednadžbe biomase, W (kg)	Parametri jednadžbe					
		a	b	c	λ	
$W_{tg} = a \times d^b$		0,039	1,784			4
$W_{gr} = a + b \times d^2 h$		1,379	0,00024			
$W_{nd} = \lambda \times e^{a+b \times \ln d + c \times \ln h}$		-3,069	2,137	0,661	0,999	5
$W_{nd} = \frac{10^{a+b(\log_{10} d)}}{1000}$		1,991	2,451			6
Jednadžba omjera podzemne i nadzemne biomase, R:S $R : S = a + b \times e^{c \times god}$		0,1893	0,8295	-0,0496		7
Omjer podzemne i nadzemne biomase, R:S		0,26				8
Udio ugljika u drvu, CF _d		0,5				9
Udio ugljika u listu, CF _l		0,51				10
Udio ugljika u plodu, CF _{pl}		0,5				7

a, b, c, λ – parametri jednadžbe; d – prsni promjer (cm); h – ukupna visina (m); ln – prirodni logaritam; e – baza prirodnog logaritma; god – starost stabla/sastojine

Literaturni izvori: 1) Šumarska enciklopedija 1959. – prosječna vrijednost, u apsolutno suhom stanju; 2) Dieter i Elsasser 2002. – meta analiza, prosječna vrijednost za hrast; 3) IPCC 2003. – prosječna vrijednost za listače umjerenog pojasa; 4) Balboa-Murias i dr. 2006. – za hrast; 5) Cienciala i dr. 2008. – za hrast; 6) Wang 2006. – za hrast; 7) Genet i dr. 2009. – meta analiza, za hrast; 8) Cairns i dr. 1997. – prosječna vrijednost za hrastove šume u Europi; 9) Mund 2004. – prosječna vrijednost; 10) laboratorij HŠI-a – prosječna vrijednost.

2.2.2. Zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD})

Izmjera sušaca obavljena je istovremeno i na isti način kao i izmjera živih stabala, na intenzivnim i inventurnim plohama. U jesen/zimu 2011. godine na intenzivnim plohama obavljena je i izmjera panjeva i to njihovog nadzemnog dijela. Panjevima su izmjerena 2-3 promjera s preciznošću od 1 mm te 3-5 visina s građevinskim metrom s preciznošću od 5 mm. S ciljem utvrđivanja odnosa promjera na panju i nadzemne žive biomase na 94 živa i zdrava stabla hrasta lužnjaka, raspoređena po dobnim razredima i debljinskim stupnjevima, obavljena je izmjera promjera debla pri tlu (na 0,3 m). Sušcima i panjevima je određen stupanj raspadanja na temelju nekoliko opisnih/kvalitativnih parametara, kao što je udio kore, prisutnost mahovine, tvrdoća, oblik i boja drva i sl. (tablica 2.9). Razvrstavanje u stupnjeve raspadanja temeljeno je na vizualnoj procjeni koristeći prilagođenu metodologiju po Hunteru (1990). U centru svake inventurne plohe položena su 2 unakrsna transekta (S-J i I-Z) duljine 20 m (ukupno 320 m transekata po sastojini) te je na njima izmjeren drveni otpad (ležeće mrtvo drvo) promjera iznad 1 cm, prema metodi VAN WAGNER (1968). U najstarijoj sastojini, zbog male površine odsjeka, postavljena su 4 transekta duljine 80 m (ukupno 320 m transekata). Svakom komadu mrtvog drva čija je uzdužna os sjekla transekt izmjeren je promjer na sjecištu s transektom i određen mu je stupanj raspadanja vizualnom procjenom u rasponu I-V (tablica 2.9 i slika 2.4). Iznimka je bila najmlađa sastojina u dobi od 5 godina kod koje nije bilo moguće primijeniti metodu transekta zbog toga što je sav drveni otpad, prema pravilu o šumskom redu, posložen u hrpe na panjeve, a glavna pretpostavka metode transekta je nasumičan (prirodan) raspored drvnog otpada po površini. Izmjera drvnog otpada u toj sastojini obavila se utvrđivanjem broja hrpa drvnog otpada na iskolčenoj površini od 0,25 ha (50 x 50 m).

Tablica 2.9. Opisni parametri za pripadajuće stupnjeve razgradnje mrtvog drva

Stupanj raspadanja	Sušac	Panj	Ležeće mrtvo drvo
I	s korom, ukupna visina	svježe posječen, s korom, bez mahovine	svježe, s korom, s postranim granama, pravilnog oblika
II	djelomično otpala kora, bez vrha	s korom, sredina tvrda, djelomično obraslo mahovinom	djelomično otpala kora, tvrdo, pravilnog oblika
III	bez kore, prisutnost štetnika, puklo na pola visine ili niže	bez kore, sredina mekana, obraslo mahovinom, pravilnog oblika	bez kore, mekano, puca pod pritiskom, nepravilnog oblika
IV	/	bez kore, sredina trula, nepravilnog oblika	bez kore, trulo, nepravilnog oblika, djelomično zakopano
V	/	bez kore, raspadnuto, bez oblika	trusi se i raspada, crno, bez oblika, zakopano



Slika 2.5. Ležeće mrtvo drvo u različitim stupnjevima raspadanja.

Nadzemna biomasa sušaca (W_n^S) procijenjena je kao i nadzemna biomasa živih stabala, uz razliku da su vrijednosti gustoće drva za pojedine vrste drveća korištene samo za prvi stupanj raspadanja (dok je bilo moguće sa sigurnošću utvrditi vrstu drveća) dok su za ostale stupnjeve korištene srednje vrijednosti gustoće drva po stupnjevima raspadanja (tablica 2.10) (MUND 2004). Nadzemna biomasa panjeva (W_n^P) procijenjena je na temelju srednjeg izmjerene promjera i srednje izmjerene visine koristeći Huberovu jednadžbu za krnji stožac (jednadžba 2.8) i vrijednosti gustoće drva po stupnjevima raspadanja kao i kod sušaca. Podzemna biomasa panjeva i sušaca (W_p^S i W_p^P) procijenjena je na temelju prosječne vrijednosti omjera podzemne i nadzemne biomase (CAIRNS I DR. 1997) od 0,26. Kod panjeva prethodno je bilo potrebno procijeniti nadzemnu biomasu posječenog stabla, što je provedeno na temelju parova podataka o promjeru pri tlu (na 0,3 m) i nadzemnoj živoj biomasi utvrđenoj za živa stabla, primjenom jednadžbe pravca (jednadžba 2.9) i parabole (jednadžba 2.10). Ukupna biomasa panjeva (W^P), odnosno sušaca (W^S) dobivena je kao zbroj njihove nadzemne i podzemne biomase. Volumen krupnog i sitnog drvnog otpada izračunat je prema jednadžbi za metodu linijskog intersepta (VAN WAGNER 1968) (jednadžba 2.11), a biomasa drvnog otpada (W^{DO}) je dobivena kao umnožak volumena i gustoće drva po stupnjevima raspadanja.

Tablica 2.10. Gustoće drva za pojedine stupnjeve razgradnje.

	Stupnjevi raspadanja				
	I	II	III	IV	V
Vrsta drveća	Gustoća drva (kg m^{-3})				
Hrast lužnjak	620	434	310	186	62
Obični grab	790				
Crna joha	510				
Poljski jasen	650				

Korištene jednadžbe:

$$\text{Huberova jednadžba} \quad V_{panj} = A \times l \text{ (m}^3\text{)} \quad (2.8)$$

$$\text{Linearni model} \quad W_n = a \times d_{0,3} \quad a=0,0102; R^2=0,597 \quad (2.9)$$

$$\text{Parabola} \quad W_n = a \times d_{0,3}^2 - b \times d_{0,3} \quad a=0,0004; b=0,0053; R^2=0,951 \quad (2.10)$$

$$\text{Van Wagnerova jednadžba} \quad V_i = \frac{\Pi^2}{8 \times L} \times \sum_{j=1}^n d_{ij}^2 \quad (2.11)$$

gdje je V_{panj} (m³) – volumen nadzemnog dijela panja; A (m²) – površina poprečnog presjeka u sredini panja, l (m) – visina panja; $d_{0,3}$ – promjer pri tlu, na 0,3 m; a, b – parametri jednadžbe; V_i (m³ m⁻²) – ukupni volumen drvnog otpada na transektu i , L (m) – duljina transektu i , d (m) – promjer komada drvnog otpada na mjestu gdje ga siječe transekt i , n – broj komada drvnog otpada koje siječe transekt i .

Zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD}) dobivene su kao umnožak ukupne biomase panjeva, sušaca i drvnog otpada te udjela ugljika u drvu i izražene su u t C ha⁻¹.

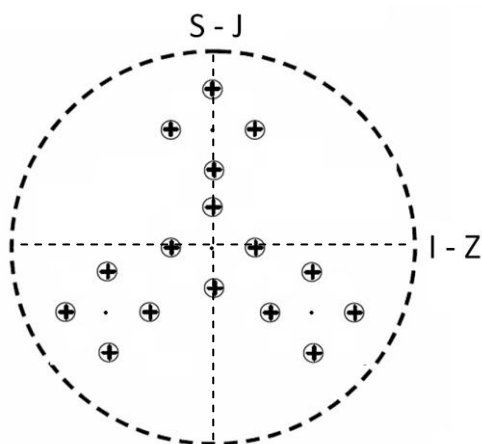
2.2.3. Zalihe ugljika u organskoj tvari tla (C^{OTT})

U rano proljeće 2012. godine, na intenzivnim ploham su određene po 4 pozicije, odnosno orijentacije (S, J, I i Z), na udaljenosti 2-5 m od centra plohe, na kojima je obavljeno prikupljanje uzoraka šumske prostirke i mineralnog dijela tla (slika 2.1 i 2.5).

Šumska prostirka (O horizont) prikupljena je pomoću metalnog obruča unutarnjeg promjera 16 cm. Ukupno je prikupljeno 128 uzoraka (8 sastojina x 4 plohe x 4 pozicije). Uzorci su pohranjeni u plastične vrećice te dopremljeni u laboratorij gdje su razvrstani u dvije frakcije; OL koja je većim dijelom neraspadnuta organska tvar (listinac i grančice promjera manjeg od 1 cm) i OFH gdje je organska tvar u različitim stupnjevima raspadanja. Iz OFH frakcije je izdvojeno korijenje i dalje posebno obrađivano. Frakcijama je utvrđena masa suhe tvari sušenjem na 105°C. Za uzorke OL frakcije pretpostavljeno je da udio ugljika u masi suhe tvari iznosi 50%, dok je za uzorke OFH frakcije provedena laboratorijska analiza. Od ukupno 16 uzoraka OFH-a po dobnom razredu formirana su 4 nova kompozitna uzorka objedinjavanjem 4 originalna uzorka različitih orijentacija (S, J, I i Z) koji su analizirani na postotni udio ugljika u masi suhe tvari CNS analizatorom.

Zalihe ugljika u pojedinoj frakciji O horizonta dobivene su kao umnožak mase suhe tvari i udjela ugljika.

Uzorci **mineralnog dijela tla** prikupljeni su na istim pozicijama kao i uzorci O horizonta. Mineralno tlo je uzorkovano svrdlom *Split tupe sampler* (Eijkelkamp, Giesbeek, Nizozemska) (slika 2.6) unutarnjeg promjera 48 mm i radne dubine do 40 cm. Uzorci su podijeljeni u 4 geometrijska horizonta; 0-5, 5-10, 10-20 i 20-40 cm. Ukupno je prikupljeno 512 uzoraka (8 sastojina x 4 podplohe x 4 pozicije x 4 horizonta). Uzorci su pohranjeni u plastične vrećice i isti dan dopremljeni u laboratorij te pohranjeni na temperaturi od 4°C.



Slika 2.6. Prostorni raspored pozicija na kojima je uzorkovana šumska prostirka i mineralno tlo.



Slika 2.7. Sonda za uzrokovanje tla.

Iz svakog uzorka mineralnog tla izdvojeno je korijenje koje je dalje posebno obrađivano te kamenje. Tlo je sušeno na 70°C do konstantne mase te potom vagano.

Korijenje je razvrstano na sitno, promjera manjeg od 2 mm, i krupno promjera većeg od 2 mm. Sitno korijenje (iz OFH frakcije i mineralnog dijela tla) je sušeno na 105°C i vagano. Biomasa sitnog korijena se pribrojila živoj podzemnoj biomasi te je također poslužila za procjenu godišnje produkcije sitnog korijena (poglavlje 2.3.1 a). Biomasa krupnog korijenja je isključena iz obračuna jer se u živoj biomasi krupni korijen procijenio primjenom omjera nadzemne i podzemne biomase.

S obzirom na udio kamena u uzorku izvršena je korekcija volumena uzorka tla. Volumen svakog uzorka se također korigirao i s obzirom na udio kompresije uzorka prilikom uzorkovanja na terenu. Kompresija uzorka (Δh) izračunala se na sljedeći način:

$$\Delta h = h_{REF} \times \left(\frac{h_{RUPA}}{h_{UZORAK}} - 1 \right); \quad (2.12)$$

gdje je h_{REF} – referentna dubina do koje instrument uzorkuje (40 cm), h_{RUPA} – dubina rupe (cm) izmjerena prilikom uzorkovanja tla, h_{UZORAK} – dužina cijelog uzorka (cm) izmjerena na terenu.

Udio kompresije uzorka pojedinog horizonta u cijelom uzorku ($udio \Delta h_i$) izračunao se na sljedeći način;

$$udio \Delta h_i = \frac{\frac{h_i^2}{m_i}}{\sum_{j=1}^4 \frac{h_j^2}{m_j}} \quad (2.13)$$

gdje je h_i – visina horizonta i (cm), m_i – masa uzorka horizonta i (g), h_j – visina horizonta j (cm), m_j – masa uzorka horizonta j (g).

Volumen tla uzorka pojedinog horizonta izračunao se na sljedeći način:

$$V_i = A \times (h_i + \Delta h \times udio \Delta h_i) \quad (2.14)$$

gdje je A – površina poprečnog presjeka sonde za uzorkovanje tla (cm^2).

Poznavajući volumen tla i masu suhe tvari, za svaki pojedini horizont mineralnog tla izračunala se gustoća tla – ρ_b (g cm^{-3}) kao omjer mase i volumena.

Zaliha ugljika u pojedinom horizontu mineralnog dijela tla izračunala se prema formuli:

$$C^M_i = CF_i \times \rho_{bi} \times h_i \times 100 \quad (2.15)$$

gdje je C^M_i – zaliha ugljika po jedinici površine u uzorku horizonta i mineralnog dijela tla (t C ha^{-1}); CF_i – udio ugljika u masi suhe tvari tla u horizontu i (g g^{-1}); ρ_{bi} – gustoća tla horizonta i (g cm^{-3}); h_i – visina horizonta i , cm.

Od ukupno 64 uzoraka po dobnom razredu formirano je novih 16 kompozitnih uzoraka objedinjavanjem 4 originalna uzorka iz istog horizonta, ali različitih orijentacija (S, J, I i Z). Tako dobiveni uzorci analizirani su s obzirom na postotni udio ugljika u masi suhe tvari. Uzorcima je također i određena tekstura prema ŠKORIĆ (1982).

Za svaku podplohu utvrđena je zaliha ugljika u organskom horizontu (C^{ORH}) i kumulativno po dubinama mineralnog dijela tla; 0 – 5 cm (C^{M5}), 0 – 10 cm (C^{M10}), 0 – 20 cm (C^{M20}) i 0 – 40 cm (C^{M40}). Za svaki dobni razred izražena je srednja vrijednost 4 podplohe.

Zalihe ugljika u organskoj tvari tla (C^{OTT}) dobivene su kao zbroj zaliha ugljika u O horizontu i mineralnom dijelu tla i izražne su u t C ha^{-1} .

2.2.4. Zalihe ugljika obračunate prema IPCC metodologiji

Kao zemlja potpisnica Kyotskog protokola Republika Hrvatska se obvezala na provođenje inventure stakleničkih plinova te izradu godišnjih izvješća, tzv. *National Inventory Report* (NIR). U NIR-u je obračunato oslobađanje, odnosno pohrana ugljika u šumskim ekosustavima u sklopu poglavlja 5 pod nazivom „Korištenje zemljišta, promjena korištenja zemljišta i šumarstvo“ (engl. *Land Use, Land-Use Change and Forestry - LULUCF*). Obračun zaliha i tokova ugljika u šumskim ekosustavima za potrebe NIR-a se u tzv. 1. Kyotskom razdoblju (2008. – 2012. godine) izrađuje prema IPCC metodologiji (*International Panel on Climate Change*) opisanoj u vodiču GPG LULUCF (*Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*) (IPCC 2003). Navedena metodologija se u određenoj mjeri razlikuje od metodologije primijenjene u ovom radu. U svrhu transparentnosti rezultata ovog rada, zalihe ugljika obračunate su i prema IPCC metodologiji. Razlike u obračunima dviju metodologija prikazane su u tablici 2.11.

Tablica 2.11. Razlike u obračunu između metodologije korištene u ovom radu i IPCC metodologije.

GLAVNE SASTAVNICE UGLJIKA KORIŠTENE U OVOM RADU		GLAVNE SASTAVNICE UGLJIKA PREMA IPCC METODOLOGIJI	
1. ŽIVA BIOMASA (ŽB)	nadzemna	1. NADZEMNA BIOMASA (ABOVEGROUND BIOMASS - AGB)	
	podzemna	2. PODZEMNA BIOMASA (BELOWGROUND BIOMASS - BGB)	
	sitno korijenje (d<2 mm)		
2. MRTVO DRVO (MD)	sušci	3. MRTVO DRVO (DEAD WOOD – DW)	sušci
	panjevi		panjevi
	krupni drvni otpad (d≥7 cm)		krupni drvni otpad (d≥7 cm)
	sitni drvni otpad (d=1-7 cm)	4. ŠUMSKI OTPAD (LITTER - L)	drvni otpad (d<7 cm)
3.ORGANSKA TVAR TLA (OTT)	O horizont + grančice (d<1 cm)		O horizont
	mineralni dio tla (do 40 cm)	5. ORGANSKA TVAR TLA (SOIL ORGANIC MATTER - SOM)	mineralni dio tla (do 40 cm)

Sitno korijenje prema IPCC metodologiji može biti sadržano u podzemnoj biomasi, u organskoj tvari tla ili u O horizontu šumskog otpada, ovisno da li je moguće provesti izdvajanje sitnog korijena iz tla ili O horizonta. Budući da je u ovom radu sitno korijenje izdvojeno iz uzoraka tla i O horizonta, u oba obračuna je pribrojeno živoj podzemnoj biomasi.

Donja granica krupnog drvnog otpada prema IPCC metodologiji je proizvoljna za svaku zemlju. U ovom radu je donja granica krupnog drvnog otpada definirana kao i donja granica krupnog volumena, do 7 cm. U oba izračuna korištena je ista granica.

Dubina uzorkovanja tla prema IPCC metodologiji također proizvoljna za svaku zemlju, te je u oba obračuna uzeta ukupna dubina uzorkovanja, do 40 cm.

Glavna razlika između dviju metodologija je u definiranju sastavnica mrtvo drvo, šumski otpad i organska tvar tla. U ovom radu se pod mrtvim drvom podrazumijeva sav mrtvi drveni otpad promjera iznad 1 cm. Prema IPCC-u u mrtvi otpad se ubraja samo mrtvo drvo iznad 7 cm, a sve sitnije od 7 cm, zajedno sa O horizontom tla, čini tzv. šumski otpad (engl. *litter*). Organsku tvar tla u ovom radu čine O horizont i mineralni dio tla, dok prema IPCC-u sastavnicu SOM čini samo mineralni dio tla.

2.3. IZMJERA I OBRAČUN TOKOVA UGLJIKA

Tokovi ugljika mjereni su različitim dinamikama (dnevno, tjedno, godišnje), stoga su svi preračunati na godišnje sumarne vrijednosti izražene u $t\ C\ ha^{-1}\ god^{-1}$. Za neto primarnu produkciju (*NPP*) i heterotrofnu respiraciju tla (R_h^{TLO}) procijenjene su i unutar-sezonske dinamike, i to dvotjednoj razini za *NPP* i dnevnoj razini za R_h^{TLO} .

2.3.1. Neto primarna produkcija (*NPP*)

Pri obračunu ovog toka ugljika objedinjeni su podaci o produkciji drvene biomase te lisne biomase i biomase plodova, no kako su te varijable mjerene na različite načine, opis izmjere biti će prikazan zasebno dok će konačni obračun biti zajednički.

a. Produkcija drvene biomase (*NPP_d*)

Produkcija drvene biomase procijenjena je na temelju periodične izmjere prirasta opsega debla koja je obavljena dendrometarskim trakama (slika 2.7). To su uređaji za izmjeru promjera stabla i pripadaju skupini kontaktnih dendrometara (KEELAND I SHARITZ 1993). Prilikom rangiranja dendrometara prema točnosti, brzini, cijeni, pristupačnosti i ograničenjima primjene, dendrometarske trake su ocjenjene pozitivno s obzirom na sve navedene značajke (CLARK I DR. 2000). Dendrometarskim trakama mjeri se opseg debla, a kako on predstavlja prosjek promjera u svim smjerovima, primjena dendrometarskih traka omogućuje točniju mjeru promjera u odnosu na izmjeru konvencionalnim promjerkama.

Točnost izmjere prirasta dendrometarskim trakama potvrđuje i činjenica da postoji visoki stupanj korelacije između radijalnog prirasta izmjerene dendrometarskim trakama i srednje širine goda očitane s izvrtaka (PALMER I OGDEN 1983). Dendrometarske trake se često koriste pri intenzivnoj izmjeri unutar-sezonske dinamike prirasta, unatoč tendenciji podcjenjivanja rasta (prirasta) opsega u prvoj godini izmjere (KEELAND I SHARITZ 1993).

Metoda izrade, njihovo montiranje te način izmjere prirasta opsega dendrometarskim trakama detaljno su opisani u radu KEELAND I YOUNG (2004). Dendrometarske trake korištene u ovom istraživanju izrađene su od aluminijske trake debljine 0,3 mm i širine 12 mm, a postavljene su na sva stabla prsnog promjera iznad 5 cm, pri čemu je granica definirana tehničkim ograničenjem postavljanja dendrometarskih traka na stabla tanja od 5 cm. Trake su se na deblo učvrstile vlačnim oprugama izrađenim od Inox žice debljine 0,6 mm. S obzirom na prsni promjer stabla korištene su opruge različitih dužina; 50, 55, 70 i 100 mm. Zbog svoje gipkosti, aluminij se vrlo lako montira i brzo formira oko debla, što smanjuje pogrešku mjerenja tijekom prve godine. Trake su postavljene na deblo neposredno iznad oznake za prsni promjer, a u iznimnim slučajevima (grana, zadebljanje, oštećenje i sl.) traka je pomaknuta naviše ili naniže. Prije montiranja se pomoću maklje i/ili ručnog ribeža/brusilice odstranila mrtva kora na dijelu debla gdje se stavljala traka. Prilikom uklanjanja mrtve kore pazilo se da se ne ošteti kambij.

U razdoblju od 8. do 16. travnja 2010. godine, na intenzivnim ploham su na sva stabla ($d_{1,3} > 5$ cm) postavljene dendrometarske trake. Ukupno je postavljeno 644 trake na kojima je tijekom vegetacijskog razdoblja 2010. godine (28. travnja - 10. studenog) i 2011. godine (6. travnja – 29. listopada) obavljena periodična (tjedna do mjesečna) izmjera prirasta opsega. Izuzetak je bila sastojina starosti 5 godina gdje je postavljanje dendrometarskih traka bilo tehnički neizvedivo.



Slika 2.8. Dendrometarska traka montirana na stablo hrasta lužnjaka broj 15.

Produkcija drvene biomase obuhvaća prirast **nadzemne drvene** (NPP_{nd}) i **podzemne biomase** (NPP_p). Godišnja produkcija drvene biomase procijenjena je kao razlika zaliha ugljika u ukupnoj drvnoj biomasi utvrđenoj na početku i na kraju 2011. godine i izražena je posebno za nadzemni i podzemni dio. Kod najmlađe sastojine NPP_{nd} procijenjena je na temelju procijenjenog visinskog prirasta (razlika ukupne visine biljke i visine zadnjeg pršljena grana). Produkciji podzemnog dijela, odnosno krupnog korijena (NPP_{kk}) pribrojena je i produkcija sitnog korijena (NPP_{sk}) koja je procijenjena na 50% ukupne utvrđene biomase sitnog korijena, na temelju pretpostavke da je prosječni životni vijek sitnog korijena 2 godine (GILL I JACKSON 2000, BRUNNER I DR. 2013). Unutar-sezonska dinamika NPP_d procijenila se na temelju dinamike produkcije nadzemne drvene biomase, uz pretpostavku da je dinamika produkcije korijena jednaka dinamici produkcije nadzemnog dijela.

b. Produkcija lisne biomase (NPP_l) i biomase plodova (NPP_{pl})

U centar svake intenzivne plohe postavljene su hvataljke za lišće (slika 2.2D) na visini od cca 1 m i promjera 45 cm, kojima je sakupljan sitni šumski otpad (otpali list, grančice i plodovi) tijekom cijele vegetacije. Pražnjenje hvataljki obavljano je kontinuirano (tjedno do mjesečno) tijekom jesenskih mjeseci 2010. i 2011. godine. Prikupljeni sitni šumski otpad je dopremljen u laboratorij gdje je razvrstan u tri frakcije; list, grančice i plod, te je svakoj frakciji utvrđena masa suhe tvari sušenjem do konstantne mase na 105°C.

Za svaki dobni razred procijenjena je godišnja produkcija lista (NPP_l) i plodova (NPP_{pl}) za 2011. godinu, u $t\ C\ ha^{-1}$. Biomasa grančica obračunala se u okviru produkcije nadzemne drvene biomase (primjenom jednadžbi za biomasu tankih grana i grančica $d < 3\ cm$), stoga se nije uzimala u obračun NPP -a.

c. Obračun neto primarne produkcije (NPP)

Na razini godine, ovaj tok ugljika procijenjen je kao zbroj godišnjih vrijednosti NPP_d , NPP_{pl} i NPP_l . Unutar-sezonska dinamika NPP -a procijenjena je na temelju podataka o unutar-sezonskoj dinamici produkcije nadzemne drvene biomase te podataka o godišnjoj produkciji lisne biomase i biomase plodova. Za najmlađu sastojinu, u dobi od 5 godina, dinamika produkcije nadzemne drvene biomase procijenjena je na temelju prosječne dinamike produkcije nadzemne drvene biomase ostalih sastojina u kronosekvenci. Da bi se unutar-sezonska dinamika NPP -a što točnije procijenila potrebno je poznavati dinamiku spremanja ugljika u šumsku sastojinu tijekom godine. Tijekom vegetacije stablo/sastojina kontinuirano asimilira ugljični dioksid. Dio proizvedenih ugljikohidrata ugrađuje u organizam i plodove

(prirast biomase), dio troši na održavanje metaboličkih procesa (autotrofna respiracija), dok preostale asimilate sprema u obliku rezervnih hraniva (CHAPIN I DR. 1990). Najintenzivniji volumni prirast sastojina ostvaruje tijekom proljeća i ljeta, pohrana ugljika u plodove započinje nakon oplodnje odnosno početkom srpnja (PREWEIN I DR. 2006), dok su pred kraj vegetacijskog razdoblja izraženi procesi spremanja ugljikohidrata u parenhimsko staničje debla, grana, izbojaka i korijenskog sustava. Rezervne tvari biti će iskorištene prilikom produkcije lisne biomase u proljeće naredne godine (CHAPIN I DR. 1990, GENET I DR. 2009) te se njihova pohrana može aproksimirati godišnjom produkcijom lisne biomase. Imajući to na umu, NPP tijekom vegetacije obračunao se kao što je prikazano u tablici 2.12. Za dinamiku NPP_{pl} i NPP_l korišteno je linearno povećanje ukupne biomase tijekom odabranih mjeseci.

Tablica 2.12. Shematski prikaz obračuna NPP -a tijekom vegetacijskog razdoblja

Mjesec	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	NPP_d						
				NPP_{pl}			
					NPP_l		
Obračun NPP -a	NPP_d			$NPP_d + NPP_{pl}$		$NPP_d + NPP_{pl} + NPP_l$	

2.3.2. Disanje (respiracija) tla (R^{TLO})

Izmjera toka CO_2 iz tla obavljana je semi-kontinuirano automatskim sustavom komora (slike 2.8 i 2.9). Sustav za mjerenje respiracije tla izrađen je na Sveučilištu u Udinama, Italija, a spada u tip dinamičkih zatvorenih sustava (LIVINGSTON I HUTCHINSON 1995), izvorno opisan u radu DELLE VEDOVE I DR. (2007). Glavni dio sustava čini vodonepropusno plastično kućište (slika 2.8) unutar kojeg je smješten CO_2 analizator (SBA-4, PP Systems, UK) s ugrađenim senzorima za vlagu zraka, tlak i temperaturu, zračna pumpa (NMP 015B, KNF Neuberger GmbH, Germany) i CR1000 dataloger (Campbell Sci. Inc. Lincoln Nebraska, USA). Na kućište su spojene tri komore kablovima za električnu struju i HD-PVC cijevima za protok zraka, senzor za vlagu tla, dva senzora za temperaturu tla i sustav za napajanje (gel olovna hermetička baterija, 12V). Komore (slika 2.9) se sastoje od čeličnog obruča ($d=16$ cm, $h=8$ cm) i čeličnog poklopca koji se automatski zatvara. Na donjoj strani poklopca nalijepljena je neoprenska spužva koja onemogućuje propuštanje zraka između komore i poklopca. Na terenu su komore postavljene na način da je poklopac okrenut na sjever jer u tom slučaju, kad je podignut, ne zasjenjuje komoru i ne utječe na mikrostanišne uvjete temperature i vlage tla u komori. Mjerenje koncentracije CO_2 započinje kad se poklopac u

potpunosti zatvori. Tijekom mjerenja, zrak cirkulira između komore i CO₂ analizatora, pri konstantnom protoku od 0,5 l min⁻¹. Na temelju brzine porasta koncentracije CO₂ unutar komore računa se tok CO₂ iz tla primjenom sljedeće jednadžbe (DELLE VEDOVE I DR. 2007):

$$F = \frac{c_t - c_0}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{P_0}{R \times (T_0 + 273,15)} \quad (2.16)$$

gdje je F - tok CO₂ iz tla (μmol m⁻² s⁻¹); c_0 i c_t - koncentracije CO₂ na početku i na kraju pojedinačne izmjere (μmol mol⁻¹); V - ukupan volumen cijelog sustava (komore + cijevi) (m³); Δt - vrijeme trajanja pojedinačne izmjere (s); A - površina tla prekrivena komorom (m²); P_0 - tlak zraka u trenutku zatvaranja komore, odnosno na početku izmjere (kPa); T_0 - temperatura zraka u trenutku zatvaranja komore, odnosno na početku izmjere (K); R - univerzalna plinska konstanta (8,31 J mol⁻¹ K⁻¹).



Slika 2.9. Sustav za izmjeru tok CO₂ iz tla postavljen u III dobnom razredu.



Slika 2.10. Komora postavljena neposredno uz senzore za vlagu i temperaturu tla mini-meteorološke stanice.

Podaci dobiveni izmjerom nisu kontinuirani jer se sustav svakih 3-4 dana prenosio s jedne intenzivne plohe na drugu. Posljedica periodične izmjere su praznine u podacima koje je potrebno popuniti da bi se mogla procijeniti ukupna (kumulativna dnevna/godišnja) količina ugljičnog dioksida koji je otpušten iz ekosustava putem respiracije tla. Popunjavanje se u pravilu obavlja primjenom modela ovisnosti toka CO₂ iz tla o nekom okolišnom ili sastojinskom parametru. Na intenzivnim ploham kontinuirano se mjere mikrostanišni uvjeti stoga smo za popunjavanje podataka izabrali model ovisnosti ukupnog toka CO₂ iz tla o temperaturi tla i relativnoj vlažnosti tla (REICHSTEIN I DR. 2003):

$$R^{TLO} = R_{ref} \times e^{(a_{REW} + b_{REW} \times RSWC) \times \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{do5} - T_0} \right)} \times \frac{RSWC}{RSWC_{1/2} + RSWC} \quad (2.17)$$

gdje je R^{TLO} – ukupna respiracija tla izražena kao tok CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); R_{ref} – referentna respiracija tla pri referentnoj temperaturi za istraživano područje; $RSWC$ – relativna vlažnost tla; T_{ref} – referentna temperatura, odnosno prosječna temperatura tla za istraživano područje (11°C); T_0 – donja temperaturna granica koja limitira respiraciju tla (-46°C); T_{tlo5} – temperatura tla na dubini od 5 cm; a_{REW} , b_{REW} i $RSWC_{1/2}$ – parametri modela.

Osim mikrostanišnih varijabli (T_{tlo5} i $RSWC$) prema navedenom modelu tok CO_2 iz tla ovisi i o varijabli R_{ref} koja predstavlja respiraciju tla pri referentnoj temperaturi tla te u uvjetima kada voda u tlu nije limitirajući faktor. Referentna respiracija tla je konstantna na razini sastojine za razdoblje od godine dana. Navedena varijabla je prema Reichstein i dr. (2003) u linearnoj ovisnosti o indeksu lisne površine (engl. *Leaf area index* – *LAI*). Prema JANSSENS I DR. (2001) indeks lisne površine (*LAI*) je u funkciji procjene produkcije sastojine kao glavne determinante respiracije tla. U nedostatku varijable *LAI*, u ovom radu su za procjenu referentne respiracije tla korištene tri nezavisne varijable: neto produkcija lista (NPP_l), ukupna nadzemna neto produkcija (NPP_n) i starost sastojine (*DOB*).

Parametriziranje modela obavilo se koristeći uparene podatke izmjere toka CO_2 i temperature i vlažnosti tla, na razini poludnevni i četvrt-dnevni srednjih vrijednosti. Koristeći kontinuirane vrijednosti temperature i vlažnosti tla procijenili smo kumulativne dnevne vrijednosti produkcije CO_2 iz tla, a njihovim sumiranjem godišnju količinu ugljika otpuštenog iz ekosustava putem procesa disanja tla.

Respiracija tla obuhvaća **autotrofno i heterotrofno disanje**. Za potrebe obračuna neto produkcije ekosustava i neto bilance ekosustava potrebno je poznavati heterotrofnu respiraciju tla. Iz toga razloga provedena je razdioba ukupne respiracije tla na dvije spomenute komponente; autotrofno (R_a^{TLO}) i heterotrofno (R_h^{TLO}) disanje tla. Procjenu heterotrofne respiracije tla moguće je dobiti prilikom izmjere respiracije tla na terenu primjenom metode opkopavanja površine gdje se nalaze komore (engl. *trenching*), čime se presijeca korijenje i prekida dotok ugljikohidrata i hraniva korijenu te respiracija tla obuhvaća samo heterotrofno disanje. Druga metoda je prstenovanje (engl. *girdling*), na način da se ukloni kora i kambij stablu te onemogućiti tok ugljikohidrata korijenju, ali se očuva tok vode i hraniva u krošnju. Procjenu razdiobe ukupne respiracije tla moguće je provesti na temelju objavljenih udjela pojedinih komponenti (LUAN I DR. 2011) ili primjenom modela razdiobe ukupne respiracije. U ovom radu razdioba ukupne respiracije tla na autotrofno i heterotrofno disanje tla provedena je primjenom linearnog modela ovisnosti omjera autotrofne i ukupne respiracije tla o ukupnoj respiraciji tla, izrađenog na temelju objavljenih podataka u globalnoj bazi podataka o respiraciji tla (BOND-LAMBERTY I THOMSON 2012) i meta-analize (SUBKE I DR. 2006).

2.3.3. Dekompozicija mrtvog drva (R_h^{MD})

Pri procjeni dekompozicije mrtvog drva ($d \geq 1$ cm), od ukupnih zaliha ugljika u biomasi mrtvog drva oduzeta je podzemna biomasa panjeva i sušaca jer se njihova dekompozicija obračunala kroz respiraciju tla. Za preostalu biomasu mrtvog drva utvrdio se koeficijent brzine razgradnje (k) s obzirom na dimenzije uzorka.

Za procjenu brzine razgradnje sitnog drvnog otpada postavljen je pokus dekompozicije. Metoda podrazumijeva postavljanje vrećica (engl. *decomposition bags*, *litter bags*) s uzorcima drvnog materijala (grane i grančice), poznate početne mase suhe tvari, na tlo u odabranu šumsku sastojinu. Nakon određenog vremena inkubacije, vrećice se uzimaju iz šume i uzorcima se ponovno utvrđuje masa suhe tvari. Utvrđena razlika u početnoj i završnoj masi uzorka predstavlja količinu organske tvari koja se razgradila, a tijekom kojeg procesa je CO_2 otpušten iz drvnog otpada u atmosferu.

U zimu 2010./2011. godine odabrane su tri sastojine iz pokusa kronosekvence, u dobi od 5, 38 i 108 godina, unutar kojih je postavljen pokus dekompozicije. U svakoj sastojini iskolčena je površina 3 x 3 m unutar koje su postavljene vrećice. Uzorci drvnog materijala prikupili su se iz sastojine u dobi od 38 godina jer je tamo bilo moguće naći lako dostupna stabla manjih dimenzija (srednjeg prsnog promjera 10-15 cm), a da su zdrava i da nisu iz podstojne etaže, i čije su grane po dimenzijama odgovarale potencijalnom sitnom drvnom otpadu ($d=1-7$ cm). U pokus su uključene četiri glavne vrste drveća, tj. hrast lužnjak, poljski jasen, crna joha i obični grab, koje su u odabranim sastojinama zastupljene u većem ili manjem udjelu. Za svaku vrstu određene su 4 kategorije dimenzija uzorka (1, 3, 5 i 7) (vidi tablicu 2.13), određenog promjera i dužine, pri čemu se nastojalo da udio poprečnog presjeka u ukupnoj površini uzorka bude približno konstantan. Oborenim stablima su se ispilile grane u krošnji na 1 m dužine iz kojih su potom izrađeni uzorci. Prilikom izrade nastojala su se izbjeći veća oštećenja i nepravilnosti na grani (zakrivljenost, usukanost, oštećena kora, grbe, kalusi i sl.). Ukupno su izrađena 792 pojedinačna uzorka. Svi uzorci drvnog materijala su obrojčani i svakom je izmjereno 2-6 promjera na sredini uzorka, s elektronskim pomičnim mjerilom s preciznošću od 0,01 mm, te 2 dužine uzorka, s krojačkim metrom s preciznošću od 1 mm. Na temelju izmjerenih dimenzija svakom uzorku je utvrđen početni volumen. Također je svakom uzorku utvrđena i početna masa suhe tvari, sušenjem na 105°C do konstantne mase. Konačno je svakom uzorku utvrđena početna gustoća, kao omjer mase suhe tvari i volumena, i izražena u g cm^{-3} . S obzirom na vidljive nedostatke (npr. oštećena kora, zakrivljenost uzorka) uzorcima je određen i stupanj kvalitete od I do III (I – bez nedostatka, II

- djelomično oštećeno, III – jače oštećeno), a potom su uzorci određenog stupnja kvalitete nasumično razvrstani u vrećice. Vrećice su izrađene od plastične mreže sa širinom okana 2 x 2 mm (tzv. mreža protiv komaraca) i zatvorene metalnim spojnicama. Za svaku vrstu, dimenziju i lokaciju izrađeno je 6 repeticija što omogućava uzorkovanje (uzimanje vrećica iz sastojine) narednih 6 godina, ako se godišnje iz sastojine vadi po jedna repeticija. Ukupno je izrađeno 288 vrećica (3 lokacije x 4 vrste drveća x 4 dimenzije x 6 repeticija), s 2-5 pojedinačnih uzoraka drvnog materijala u svakoj vrećici, ovisno o dimenzijama uzorka (slika 2.10).

Tablica 2.13. Dimenzije uzoraka i broj uzoraka po pojedinoj vrećici za određenu dimenziju.

Kategorija dimenzije	d (cm)	l (cm)	Broj uzoraka po vrećici
1	<1	5	4
3	1-3	10	3
5	3-5	15	2
7	5-7	20	2



Slika 2.11. Vrećice za procjenu brzine razgradnje mrtvog drva za 4 dimenzije uzoraka.

Uz svaku vrećicu se pričvrstila i plastična traka s oznakom vrste drveća, dimenzije i repeticije te brojevima pojedinačnih uzoraka. Vrećice su razvrstane u tri grupe i u svaku sastojinu je postavljeno 96 vrećica (4 vrste x 4 dimenzije x 6 repeticija), u obliku kvadrata bez kutnih uzoraka, i to nasumičnim rasporedom (slika 2.11). Vrećice su postavljene u sastojinu neposredno uz prethodno postavljene mini-meteorološke stanice sa senzorima za temperaturu zraka i temperaturu i vlagu tla.

U zimu 2011./2012. godine iz svake sastojine izvadilo se po 16 vrećica, sveukupno 48 vrećica. Uzorci su se otpremili u laboratorij gdje im se ponovno utvrdila masa suhe tvari sušenjem na 105°C.

	II 7 2	IV 1 3	III 5 4	II 5 4	II 1 5	IV 5 3	III 1 3	II 7 5	
II 3 3	I 3 4	I 5 1	I 1 1	II 1 6	IV 7 1	III 7 4	II 3 1	II 3 4	IV 7 3
IV 5 2	III 3 1	IV 3 4	III 1 2	III 1 4	III 7 2	I 5 6	IV 7 5	III 5 2	I 1 2
IV 3 5	I 5 5	III 7 5	IV 5 1	I 5 4	I 1 3	III 5 5	II 1 3	III 3 2	IV 3 6
I 5 3	II 7 1	I 3 3	IV 7 6	IV 3 3	III 1 1	III 7 3	IV 1 1	I 1 5	IV 5 6
IV 7 4	I 1 6	IV 3 1	III 3 5	II 5 3	IV 7 2	II 7 6	IV 5 4	II 7 3	III 5 3
I 5 2	III 5 6	I 7 3	II 5 5	II 1 1	IV 1 4	II 3 5	III 3 4	IV 1 6	III 1 6
I 3 1	I 7 4	II 1 4	II 3 6	IV 5 5	I 1 4	I 3 6	II 1 2	II 5 1	II 5 6
III 3 3	II 5 2	I 7 5	III 7 1	III 7 6	IV 3 2	I 3 2	I 7 2	I 7 6	II 7 4
	III 3 6	III 1 5	II 3 2	I 3 5	I 7 1	IV 1 5	III 5 1	IV 1 2	

Slika 2.12. Prostorni raspored vrećica za razgradnju unutar sastojine stare 5 godina.

Rimskim brojevima (I-IV) i bojom/šrafurom su označene vrste drveća; prazno (I) – hrast lužnjak, točkasto (II) – obični grab, tamnosivo (III) – crna joha, svijetlosivo (IV) – poljski jasen. Drugi broj obilježava kategoriju dimenzije uzorka (1, 3, 5 i 7), dok treći broj označava broj repeticije, odnosno redoslijed uzimanja vrećice iz sastojine (1-6).

Brzina razgradnje organske tvari najčešće se procjenjuje prema eksponencijalnoj krivulji (OLSEN 1963);

$$Y_t = Y_0 e^{-kt} \quad (2.18)$$

gdje je Y_t – masa suhe tvari uzorka nakon određenog vremena inkubacije t ; Y_0 – masa suhe tvari na početku; k – koeficijent brzine razlaganja; t – vrijeme inkubacije.

Za svaki uzorak utvrđen je koeficijent brzine razlaganja organske tvari (k) na temelju podataka o početnoj i završnoj masi suhe tvari, a za vrijeme inkubacije (t) od jedne godine.

Nadalje, izrađen je model ovisnosti koeficijenta k o promjeru uzorka mrtvog drva, na temelju rezultata pokusa dekompozicije i objavljenih radova.

Procjena količine ugljika koja se otpusti iz ekosustava putem procesa dekompozicije drvnog materijala obavljena je na temelju zalihe ugljika u nadzemnoj biomasi sušaca i panjeva i mrtvom drvnom otpadu te odgovarajućeg koeficijenta brzine razlaganja organske tvari s obzirom na promjer uzorka mrtvog drva. Unutar-sezonska dinamika ovog toka ugljika procijenjena je na temelju utvrđene dinamike respiracije tla.

2.4. MIKROSTANIŠNI UVJETI

Za svaku sastojinu utvrđene su prosječne dnevne vrijednosti temperature tla na dubini od 5 cm (T_{tlo5}) te prosječne dnevne vrijednosti udjela vode u tlu (SWC). Za svaku sastojinu utvrđene su vrijednosti poljskog vodnog kapaciteta tla (FC) na temelju udjela vlage u tlu tri dana nakon maksimalnog zasićenja tla vodom nakon kojeg je uslijedilo ocjeđivanje (REICHSTEIN I DR. 2003). Relativna vlaga tla (RSWC) izračunata je kao omjer vlažnosti tla i vodnog kapaciteta za svaku sastojinu. Također je izrađena i unutar-sezonska dinamika varijabli T_{tlo5} i RSWC za sastojine različite starosti.

2.5. PROCJENA GODIŠNJE BILANCE UGLJIKA U KRONOSEKVENCI HRASTA LUŽNJAKA

Godišnja bilanca ugljika je u slučaju kada nema sječe jednaka neto produkciji ekosustava (NEP). U kronosekvenci NEP je procijenjena je kao razlika godišnje neto primarne produkcije (NPP) te godišnjih sumarnih vrijednosti heterotrofne respiracije tla (R_h^{TLO}) i dekompozicije mrtvog drva (R_h^{MD}). Godišnja NPP je dobivena kao suma produkcije drvene i lisne biomase te biomase plodova. Heterotrofna respiracija tla procijenjena je na

određeni udio od ukupne respiracije tla (R^{TLO}) na temelju analize objavljenih radova. Dekompozicija mrtvog drva dobivena je na temelju podatka o zalihama C u nadzemnoj mrtvoj drvnoj biomasi (C_n^{MD}) te odgovarajućeg koeficijenta brzine razgradnje drvnog otpada (k), s obzirom na dimenzije uzorka mrtvog drva.

Relacije korištene pri procjeni godišnje bilance ugljika su sljedeće:

$$NEP = NPP - R_h^{TLO} - R_h^{MD} \quad (2.19)$$

$$NPP = NPP_d + NPP_l + NPP_{pl} \quad (2.20)$$

$$R_h^{TLO} = a \times R^{TLO} \quad a = \frac{R_h^{TLO}}{R^{TLO}} \quad (2.21)$$

$$R_h^{MD} = C_n^{MD} \times (1 - e^{-kt}) \quad (2.22)$$

Uvrštavanjem jednadžbi 2.20 – 2.22 u 2.19 dobivena je konačna jednadžba za procjenu **godišnje bilance ugljika**:

$$NEP = (NPP_d + NPP_l + NPP_{pl}) - a \times R^{TLO} - C_n^{MD} \times (1 - e^{-kt}) \quad (2.23)$$

Prilikom obračuna unutar-sezonske dinamike NEP -a, vrijednosti glavnih tokova ugljika (neto primarna produkcija, heterotrofna respiracija tla i dekompozicija mrtvog drva) svedene su na jednake razine dinamike, odnosno na dinamiku kojom je mjerena neto primarna produkcija (tjedna do mjesečna izmjera na dendrometarskim trakama). **Unutar-sezonska dinamika** NEP -a za sastojne različite starosti, obračunata je kumulativno na sljedeći način:

$$NEP_i = NPP_i - R_h^{TLO}_i - R_h^{MD}_i \quad (2.24)$$

gdje i označava datum izmjere prirasta opsega na dendrometarskim trakama.

2.6. OBRAČUN ZALIHA I BILANCE UGLJIKA U GOSPODARSKOJ JEDINICI „JASTREBARSKI LUGOVI“

Za obračuna zaliha i bilance ugljika u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“ korišteni su podaci iz važeće Osnove gospodarenja (O.G.) koja se odnosi na razdoblje od 2004. do 2013. godine (HŠ D.O.O. 2003). Obračun je proveden za gospodarske šume uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena.

2.6.1. Gubitak ugljika sječom (CW^{SJ})

Na zahtjev Hrvatskog šumarskog instituta, početkom 2013. godine od Hrvatskih šuma d.o.o. dobiveni su na uvid podaci o ukupnoj užitoj drvnoj zalihi, za vrijeme od početka trajanja važeće O.G. pa do kraja 2012. godine. Otpremljena posječena drvena zaliha procijenjena je kao 90% užite drvne zalihe, uz pretpostavku da 10% užite drvne zalihe čini tzv. otpad (panjevi, rašlje i sl). koji nije otpremljen iz sastojine. Zalihe ugljika u posjećenoj drvnoj zalihi procijenjene su primjenom gustoće drva za pojedine vrste drveća u apsolutno suhom stanju i udjela ugljika u masi suhe tvari drva od 50%. Gubitak ugljika sječom iskazan je za 10-godišnje razdoblje.

2.6.2. Stvarno stanje zaliha i bilance ugljika u razdoblju od 2004. do 2013. godine

U svrhu procjene zaliha i bilance ugljika odabranog uređajnog razreda bilo je potrebno na temelju zaliha i tokova ugljika, procijenjenih u sastojinama kronosekvence, izraditi modele ovisnosti navedenih varijabli o varijablama dostupnim iz O.G. Iz važeće O.G. prikupljeni su podaci o starosti sastojina, drvnoj zalihi i prosječnom godišnjem volumnom prirastu po vrstama drveća te podaci o užitoj drvnoj zalihi u razdoblju od početka trajanja O.G. pa do kraja 2012. godine. Za glavnu nezavisnu varijablu pri izradi modela procjene zaliha ugljika odabrana je drvena zaliha. Budući da se podaci o drvnoj zalihi prikupljeni iz O.G. odnose na stanje na početku 2004. godine, odnosno na kraj 2003. godine, prije izrade modela, drvena zaliha za kraj 2011. godine procijenjena je na sljedeći način:

$$V_{HS} 2011 = V_{HS} O.G. + 8 \times iV_{HS} - V_{SJ} \quad (2.25)$$

Nadalje, pri izradi modela za procjenu neto primarne produkcije (*NPP*) kao nezavisna varijabla koristio se omjer varijabli $V_{HS} 2011$ i *starost 2011* (starost sastojine iz O.G. uvećana za 8 godina).

Na temelju izrađenih modela (sljedeće poglavlje) za svaki odsjek odabranog uređajnog razreda procijenjene su zalihe ugljika za početak 2004. godine i bilanca ugljika za razdoblje od 2004. do 2013. godine. Tako procijenjene zalihe i bilanca ugljika sumirani su po dobnim razredima.

2.6.3. Modeli za procjenu zaliha i tokova ugljika

Za procjenu zaliha i tokova ugljika u uređajnom razredu hrast lužnjak iz sjemena u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“, izrađeni su sljedeći modeli:

$$a) C^{\dot{Z}B} = a \times (V_{HS} 2011) + b; \quad (2.26)$$

linearni model ovisnosti zaliha ugljika u živoj biomasi ($C^{\dot{Z}B}$) o drvnoj zalihi krupnog drva ($V_{HS} 2011$);

$$b) y = a \times (C^{\dot{Z}B})^b; \text{ gdje je } y \text{ omjer } \frac{C^{MD}}{C^{\dot{Z}B}}, \frac{C^{ORH}}{C^{\dot{Z}B}} \text{ i } \frac{C^{M40}}{C^{\dot{Z}B}} \quad (2.27)$$

modeli ovisnosti zaliha ugljika u mrtvom drvu (C^{MD}), organskom horizontu (C^{ORH}) i mineralnom dijelu tla do dubine od 40 cm (C^{M40}), izraženih kao omjera, o zaliham ugljika u živoj biomasi ($C^{\dot{Z}B}$), primjenom jednadžbe opće potencije;

$$c) NPP = a \times (V_{HS} 2011 / starost 2011) + b; \quad (2.28)$$

linearni model ovisnosti neto primarne produkcije (NPP) o omjeru drvne zalihe krupnog drva i starosti sastojine ($V_{HS} 2011 / starost 2011$).

Značajnost modela je testirana analizom varijance te je utvrđena pouzdanost parametara i koeficijenti determinacije.

2.6.4. Projekcije za razdoblje od 2004. do 2053. godine

Na temelju podatka iz važeće O.G. provedene su projekcije razvoja sastojina odabranog uređajnog razreda za narednih pet polurazdoblja (2004. – 2013. g., 2014. – 2023. g., 2024. – 2033. g., 2034. – 2043. g. i 2044. – 2053. g.) primjenom računalnog programa SIMPLAG (TESLAK I DR. 2012). Na taj su način dobivene vrijednosti drvne zalihe ($m^3 ha^{-1}$) i dobi za svaki odsjek tijekom budućih 10-godišnjih razdoblja. Primjenom modela za procjenu neto primarne produkcije (jednadžba 2.28) dobivene su vrijednosti NPP -a za svaki odsjek i svako buduće polurazdoblje. SIMPLAG-om je također provedena projekcija sječivog volumena njege i obnove sastojina (etat međuprihoda i glavnog prihoda) za svaki pojedini odsjek tijekom budućih 10-godišnjih razdoblja. Gubitak ugljika sječom (CW^{SJ}) procijenjen je kako je navedeno u poglavlju 2.6.1.

Projekcija razvoja pojedinih sastojina i cijele šume provedena je na temelju 4 scenarija obnove sastojina u promatranom razdoblju:

A) obnova na čitavoj površini sastojina starijih od 130 godina

B) obnova na 60% normalne površine dobnog razreda

C) obnova na 50% normalne površine dobnog razreda,

odnosno na površini definiranoj na način $\frac{P}{u} \times 10$; gdje je

P – ukupna površina šume

u – propisana ophodnja (za hrast lužnjak iz sjemena 140 godina)

D) obnova na površini definiranoj na način $\frac{P_{>100god}}{40} \times 10$; gdje je

$P_{>100god}$ – površina sastojina starijih od 100 godina.

S obzirom na navedene scenarije, za svako buduće polurazdoblje utvrđena je dobná struktura i posječena drvena zaliha. Također je procijenjena i ukupna bilanca ugljika čitavog uređajnog razreda i izražena je kumulativno za cijelo razdoblje od 2004. – 2053. godine.

2.7. STATISTIČKA OBRADA

Statistička obrada podataka obavljena je u programskom paketu STATISTICA 6,1 (STATSOFT INC. 2004).

2.7.1. Analiza mikrostanišnih uvjeta

Utvrđivanje statistički značajnih razlika u temperaturi tla i relativnoj vlazi tla između sastojina različite starosti provedeno je primjenom analize varijance (ANOVA) te Tukey HSD *post hoc* testa, pri nivou značajnosti od 1%.

2.7.2. Procjena pogreške

Zalihe i tokovi ugljika obračunati su kao funkcije više varijabli stoga je i njihova pogreška izračunata putem zakona gomilanja pogrešaka (PRANJIC 1986), na sljedeći način:

$$s_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X}\right)^2 \times s_X^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial Z}\right)^2 \times s_Z^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial W}\right)^2 \times s_W^2}; \quad (2.29)$$

gdje je Y – željena varijabla kao funkcija poznatih varijabli, $Y = f(X, Z, W)$; X , Z i W – poznate varijable; s_X , s_Z , s_W - standardne pogreške poznatih varijabli; s_Y – standardna pogreška željene varijable.

Parcijalne derivacije funkcija korištenih pri izračunu zaliha i tokova ugljika navedene su u prilogu 2.

2.7.3. Analiza zaliha ugljika

Zalihe ugljika u sastojinama različite starosti (sastojine pokusa kronosekvence) izražene su kao srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške, ukoliko nije drugačije navedeno.

Ovisnost zaliha ugljika u mrtvom drvu i organskom horizontu o starosti sastojina izjednačena je parabolom, odnosno linearnim modelom. Utvrđivanje statistički značajnih razlika u zalihama ugljika u mineralnom dijelu tla između sastojina različite starosti provedeno je primjenom analize varijance (ANOVA) te Tukey HSD *post hoc* testa, pri nivou značajnosti od 1%.

2.7.4. Analiza tokova ugljika

Tokovi ugljika u sastojinama različite starosti izraženi su kao srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške, ukoliko nije drugačije navedeno.

Izrađeni su modeli ovisnosti ukupne respiracije tla o temperaturi tla na dubini od 5 cm, primjenom eksponencijalne jednadžbe, za svaku sastojinu posebno. Dnevne vrijednosti respiracije tla procijenjene su primjenom nelinearnog modela ovisnosti respiracije tla o temperaturi i relativnoj vlažnosti tla te o referentnoj respiraciji tla (REICHSTEIN I DR. 2003). Prilikom modeliranja ukupne respiracije tla, za procjenu referentne respiracije tla korištene su tri prediktorske (nezavisne) varijable: neto produkcija lista (NPP_l), neto produkcija ukupne nadzemne biomase (NPP_n) i starost sastojine (DOB). Odluka o konačnoj nezavisnoj varijabli koja će se koristiti za procjenu dnevne respiracije tla donesena je na temelju koeficijenta determinacije (R^2).

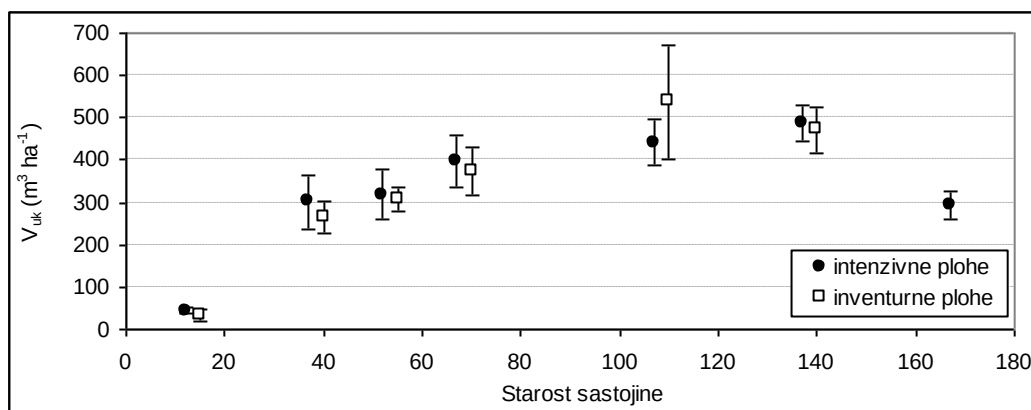
Utvrđivanje statistički značajnih razlika u brzini dekompozicije uzoraka različitih vrsta drveća i različitih dimenzija provedeno je primjenom analize varijance (ANOVA) te Tukey HSD *post hoc* testa, pri nivou značajnosti od 5%. Za procjenu brzine razgradnje mrtve organske tvari na temelju srednjeg promjera uzorka mrtvog drva, izrađen je model ovisnosti koeficijenta brzine razgradnje (k) o srednjem promjeru uzorka mrtvog drva primjenom jednadžbe opće potencije.

3. REZULTATI

Rezultati ovog rada prikazani su u tri osnovne cjeline; 1) struktura i mikrostanišni uvjeti u sastojinama kronosekvence (poglavlja 3.1. i 3.2.), 2) zalihe i bilanca ugljika u pokusu kronosekvence kao modelu šumskog ekosustava hrasta lužnjaka (poglavlja 3.3. i 3.4.) te 3) zalihe i bilanca ugljika u stvarnoj šumi uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“.

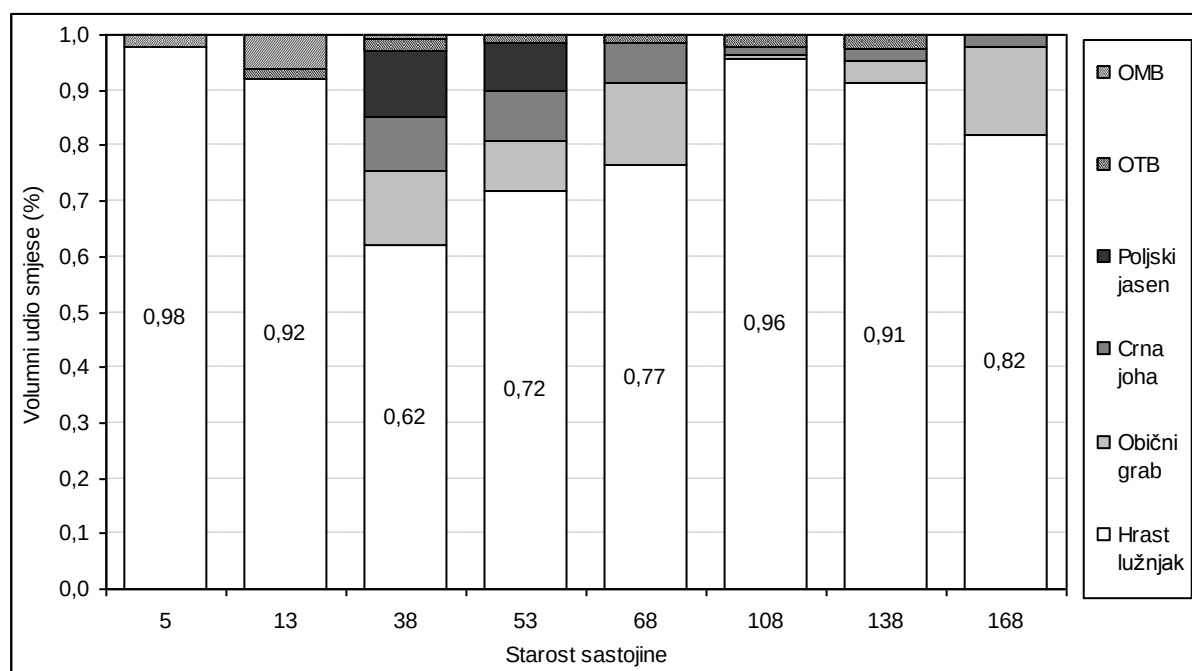
3.1. STRUKTURA SASTOJINA KRONOSEKVENCE

Usporedbom podataka o drvnj zalihi procijenjenoj na temelju izmjere na intenzivnim i inventurnim ploham (slika 3.1) uočava se da nema statistički značajne razlike, iako su srednje vrijednosti drvene zalihe na intenzivnim ploham uglavnom veće. Ako pretpostavimo da je drvena zaliha izmjerena na 6-11 inventurnih ploha reprezentativna za promatrani odsjek može se ustvrditi da plohe odabrane za intenzivno praćenje predstavljaju reprezentativan uzorak čitavog odsjeka. Izražena varijabilnost podataka u odsjeku šestog dobnog razreda (108 godina) vjerojatno je posljedica male površine odsjeka (4,69 ha) i prekinutog sklopa što je za posljedicu imalo da su neke plohe inventurne izmjere bile smještene blizu ruba sastojine (deblji prsni promjeri – veća drvena zaliha), a neke u progali (mali broj stabala – manja drvena zaliha). Najstarija sastojina u dobi od 168 godina je narušene strukture, odnosno mjestimično je jače progaljena zbog čega joj je drvena zaliha niska. Stabla hrasta lužnjaka su izrazito krošnjata što upućuje na mogućnost da je navedena sastojina u mladosti (prije cca. 100 godina) bila gospodarena s ciljem produkcije žira kao hrane za stoku. Također, zbog male površine odsjeka izražen je rubni efekt što dodatno narušava strukturu sastojine.



Slika 3.1. Drvena zaliha ukupnog drva ($d > 3$ cm) na kraju 2011. godine, za odabrane odsjeke u određenom dobnom razredu. Prikazane su srednje vrijednosti drvene zalihe za 4 intenzivne plohe i za 6-11 inventurnih ploha te 1,96 standardne pogreške.

Prema omjeru smjese odabrane sastojine pripadaju čistim i mješovitim sastojinama hrasta lužnjaka (slika 3.2). Najmlađa sastojina je nastala prirodnom obnovom uz dodatno popunjavanje sjetvom žira 2006. godine (600 kom ha^{-1}), dok je obnova sastojine u dobi od 13 godina potpomognuta sadnjom sadnica hrasta lužnjaka ($10000 \text{ kom ha}^{-1}$). Posljedica su skoro čiste sastojine. Mlade i srednjodobne sastojine II., III. i IV. dobnog razreda mješovite su sastojine hrasta lužnjaka sa značajnim udjelom običnoga graba, crne johe, poljskog jasena te ostale tvrde i meke bjelogorice. Sastojine u dobi od 108 i 138 godina čiste su sastojine hrasta lužnjaka što je vjerojatno posljedica proreda koje imaju za cilj pozitivnu selekciju kvalitetnih lužnjakovih stabala. Najstarija sastojina je izuzeta iz regularnog gospodarenja te je po svojoj starosti od 168 godina daleko od propisane ophodnje. Za tu sastojinu bi se moglo reći da po strukturi odgovara srednjodobnoj sastojini običnoga graba s malim brojem prezrelih stabala hrasta lužnjaka stablimičnog rasporeda (tablica 3.1).



Slika 3.2. Omjer smjese u odabranim sastojinama kronosekvence.

Prema podacima iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003) sastojine kronosekvence pripadaju različitim bonitetima, većinom II. i III. bonitetu. No, usporedbom podataka o promjeru i visini srednjeg plošnog stabla (d_g i h_g) preuzetih iz O.G. i dobivenih izmjerom, uočena je značajna razlika (slika 3.3). U svrhu procjene boniteta odabranih sastojina na temelju rezultata ovog istraživanja, provedena je usporedba podataka izmjere sa podacima prirasno-prihodnih tablica za hrast lužnjak (ŠPIRANEC 1975a) (slika 3.3). Prema visini srednjeg plošnog stabla dobivenoj u ovom istraživanju sastojine II., III. i IV. dobnog razreda pripadaju I. bonitetu, sastojina u VI. dobnom razredu je II. bonitet, a sastojina u VII. dobnom

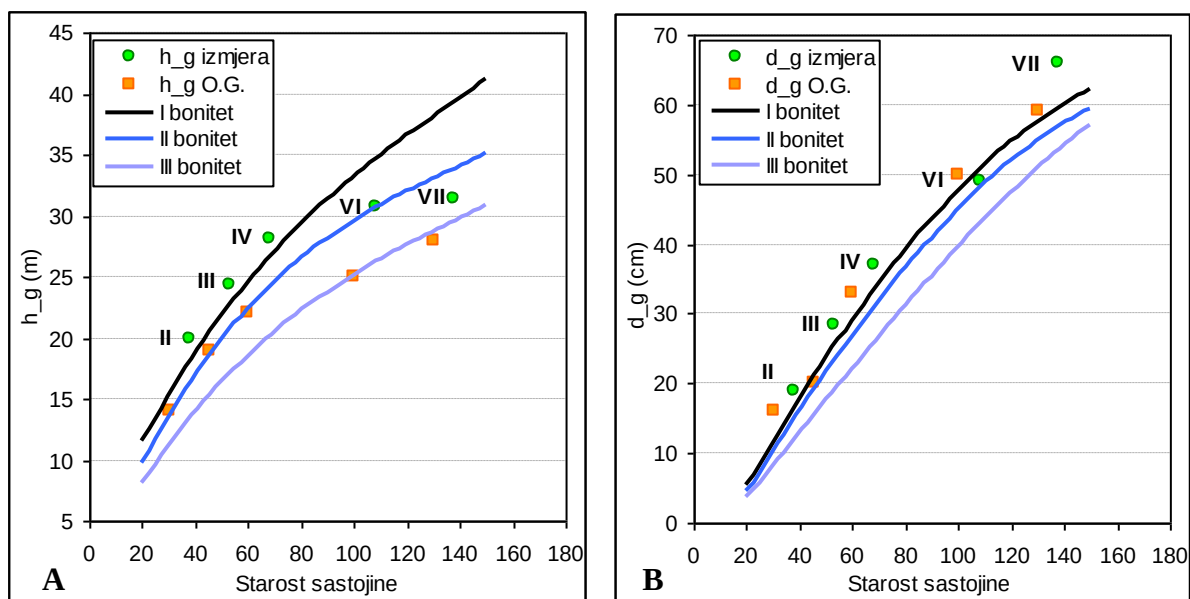
razredu je II./III. bonitet. Najstarija sastojina značajno odstupa od normale i nije prikazana na slici 3.3.

Tablica 3.1. Struktura sastojina u kronosekvenci. Prikazane su srednje vrijednosti i 1,96 standardne pogreške.

Parametar		Taksacijska granica / Vrsta drveća	Dobni razred (starost sastojine) / Broj ploha (intenzivne + inventarne)							
			I (5 g.) *	I (13 g.)	II (38 g.)	III (53 g.)	IV (68 g.)	VI (108 g.)	VII (138 g.)	VIII (168 g.)
			5	12	14	12	12	10	12	4
d _{sr} (cm)	>10 cm	Sve vrste	0,91	11,1	17,1	23,3	27,8	37,2	35,8	45,6
h _{sr} (m)		Sve vrste	0,53	6,9	18,5	21,4	23,3	26,0	21,2	20,6
d _g (cm)		Hr. lužnjak	/	11,2	19,0	28,3	36,9	49,0	65,9	103,7
h _g (m)		Hr. lužnjak	/	7,0	19,9	24,3	28,1	30,8	31,4	21,4
N (kom ha ⁻¹)	>10 cm	Hr. lužnjak	12 ± 1	27 ± 13	547 ± 99	305 ± 41	186 ± 12	153 ± 17	75 ± 5	21 ± 3
		Ost. vrste	<1	0	487 ± 127	292 ± 80	209 ± 25	71 ± 26	117 ± 12	143 ± 10
		Sve vrste		27 ± 13	1035 ± 83	596 ± 57	395 ± 27	224 ± 23	192 ± 12	164 ± 11
		Σ (>2 cm)		9674 ± 1277	644 ± 162	792 ± 437	857 ± 482	1344 ± 526	1020 ± 264	207 ± 124
G (m ² ha ⁻¹)	>10 cm	Hr. lužnjak	7,92 ± 0,85	0,27 ± 0,12	15,5 ± 2,49	17,45 ± 2,01	19,47 ± 1,59	28,88 ± 2,8	25,69 ± 1,11	14,36 ± 1,06
		Ost. vrste	0,10 ± 0,05	0	10,16 ± 2,55	8,07 ± 2,5	7,12 ± 1,27	1,43 ± 0,69	3,21 ± 0,46	5,15 ± 0,76
		Sve vrste		0,27 ± 0,12	25,66 ± 1,54	25,52 ± 1,24	26,59 ± 1,51	30,31 ± 2,52	28,9 ± 1,19	19,5 ± 1,4
		Σ (>2 cm)		12,29 ± 1,57	27,75 ± 1,56	26,88 ± 1,57	28,3 ± 1,55	32,77 ± 2,9	32,42 ± 1,03	20,61 ± 0,88
V _{uk} (m ³ ha ⁻¹)	>10 cm	Hr. lužnjak	1,4 ± 0,15	1,1 ± 0,5	167,6 ± 26,9	223,8 ± 25,3	291,8 ± 25,1	476,5 ± 46	435,3 ± 19,1	240,3 ± 17,3
		Ost. vrste	0,02 ± 0,01	0	96,9 ± 25,4	83,3 ± 25,6	84,7 ± 16,3	14,8 ± 7,8	33,4 ± 6,1	47,2 ± 7,4
		Sve vrste		1,1 ± 0,5	264,5 ± 17,1	307,1 ± 12,3	376,5 ± 22,3	491,4 ± 42,7	468,6 ± 19,7	287,4 ± 19,8
		Σ (>2 cm)		38,1 ± 5	275,7 ± 16,7	312,1 ± 13,1	381,3 ± 21,6	499 ± 43,5	476,6 ± 18,7	292,7 ± 16,5

* Za sastojinu u dobi od 5 godina taksacijska granica je 0, a broj stabala (N) je izražen u kom m⁻².

d_{sr} – srednji prsni promjer; h_{sr} – srednja sastojinska visina; d_g , h_g – promjer i visina srednjeg plošnog stabla; Σ – označava sve vrste.



Slika 3. 3. Uporedba visine (h_g) (A) i promjera (d_g) (B) srednjeg plošnog stabla hrasta lužnjaka dobivenih izmjerom i preuzetih iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O 2003) sa podacima iz prirasno-prihodnih tablica (ŠPIRANEC 1975a).

Starost sastojina u vrijeme izmjere je starost iz O.G. uvećana za 8 godina.

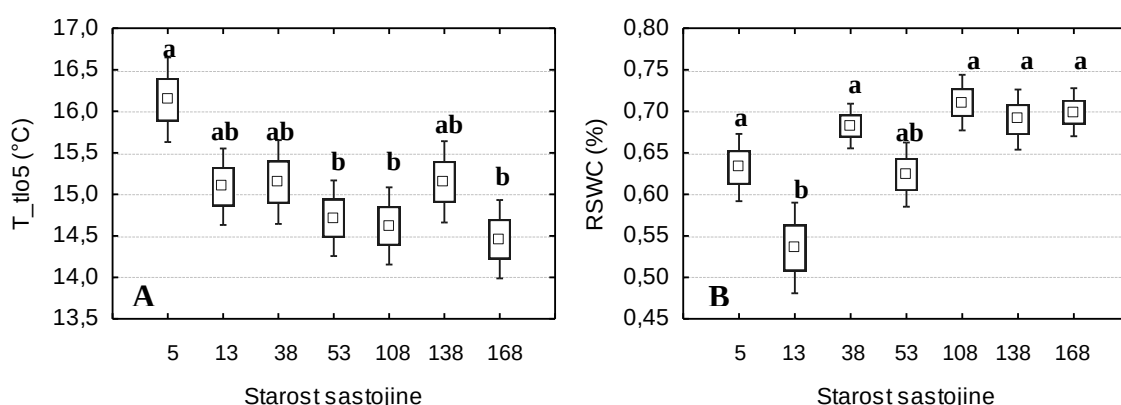
3.2. MIKROSTANIŠNI UVJETI

Tla odabranih sastojina pripadaju skupini hidromorfni tala koje karakterizira povremeno ili trajno prekomjerno vlaženje. S obzirom na teksturu, tla većinom pripadaju ilovastim tlima s podjednakim omjerom pijeska, praha i gline. Izuzetak je sastojina II. dobnog razreda (38 godina) gdje je udio gline preko 50% i tlo je okarakterizirano kao teška glina (tablica 3.2). Vrijednosti poljskog vodnog kapaciteta tla za sastojine različite dobi su u rasponu 0,49 – 0,58.

Tablica 3.2. Tekstura tla i vodni kapacitet tla sastojina u kronosekvenci.

Udio pojedine frakcije	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
Pijesak (0,05 – 2 mm)	0,29	0,24	0,12	0,23	0,26	0,26	0,25	0,26
Prah (0,002 – 0,05 mm)	0,49	0,48	0,37	0,44	0,49	0,49	0,50	0,49
Glina (< 0,002 mm)	0,22	0,28	0,51	0,33	0,25	0,25	0,26	0,25
Teksturna oznaka	ilovača	praškasta glina	teška glina	laka glina	ilovača	ilovača	ilovača	ilovača
Poljski vodni kapacitet tla (v/v)	0,52	0,58	0,53	0,54	/	0,49	0,58	0,54

S obzirom na meteorološke parametre utvrđene su statistički značajne razlike između prosječne dnevne temperature tla na dubini od 5 cm ($F=5,09$; $df=6$; $p<0,0001$) te relativnog udjela vode u tlu ($F=9,98$; $df=6$; $p<0,0001$) za pojedine sastojine unutar vegetacijskog razdoblja (1.4. - 31.10.) (slike 3.4 A i B).



Slika 3.4. Prosječna dnevna temperatura tla na dubini od 5 cm (A) i prosječni dnevni relativni udio vode u tlu (B) u sastojinama različite starosti (prosjek $\pm$ 1,96 standardna pogreška). Različitim slovima označene su statistički značajne razlike između sastojina.

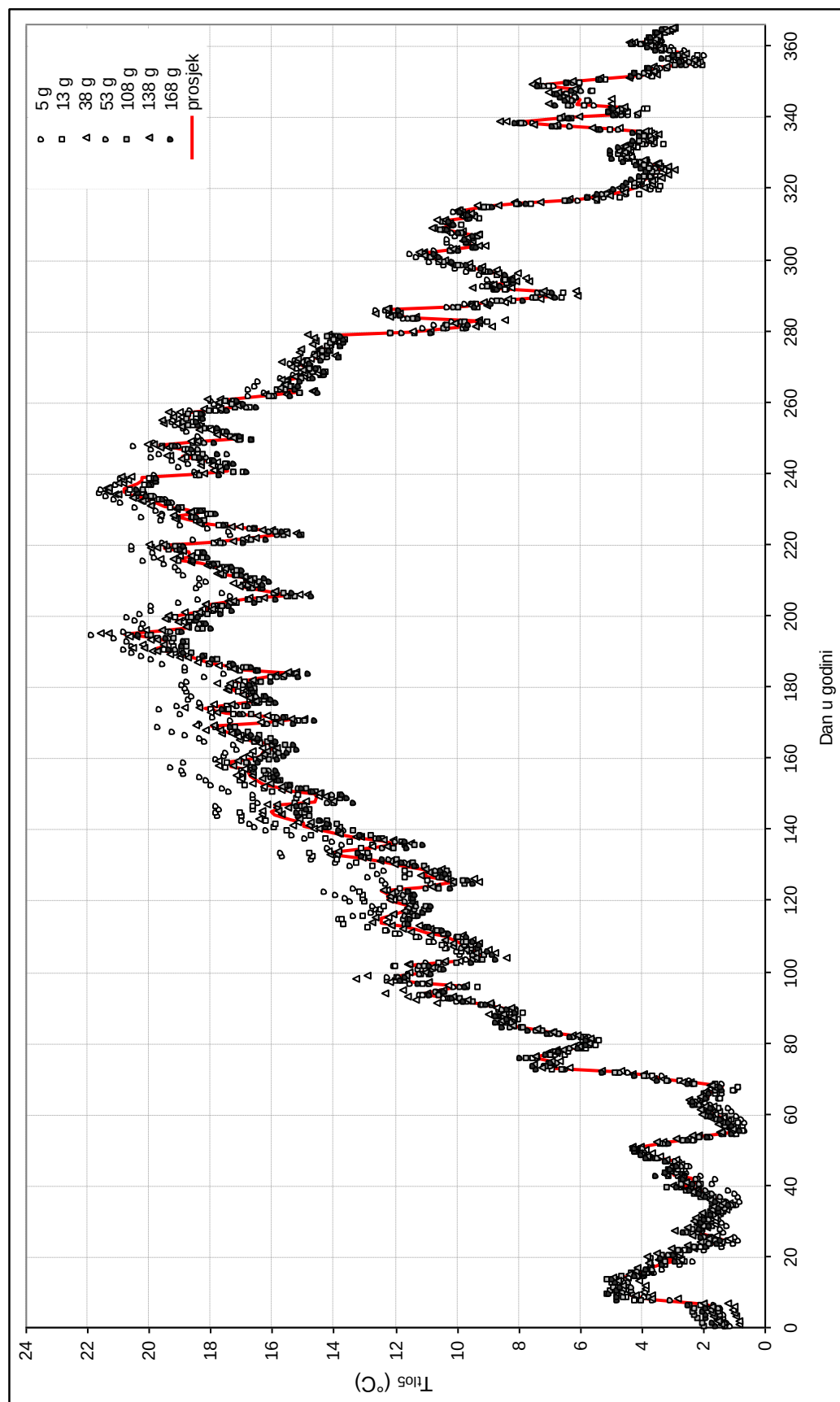
U najmlađoj sastojini utvrđene su statistički značajno više vrijednosti temperature tla u odnosu na starije sastojine u dobi od 53, 108 i 168 godina. Prosječna dnevna temperatura tla

na dubini od 5 cm u vegetacijskom razdoblju 2011. godine u najmlađoj sastojini je iznosila $16,1 \pm 0,3$ °C, dok je u drugima sastojinama bila značajno niža i u rasponu od $14,4 \pm 0,2$ °C do $15,1 \pm 0,3$ °C. Nije utvrđena ovisnosti temperature tla o starosti sastojine. S obzirom na vlagu tla, statistički značajno najniže vrijednosti prosječnog dnevnog relativnog udjela vode u tlu u vegetacijskom razdoblju zabilježene su kod sastojine u dobi od 13 godina. Nije utvrđena ovisnost vlage tla o starosti sastojine.

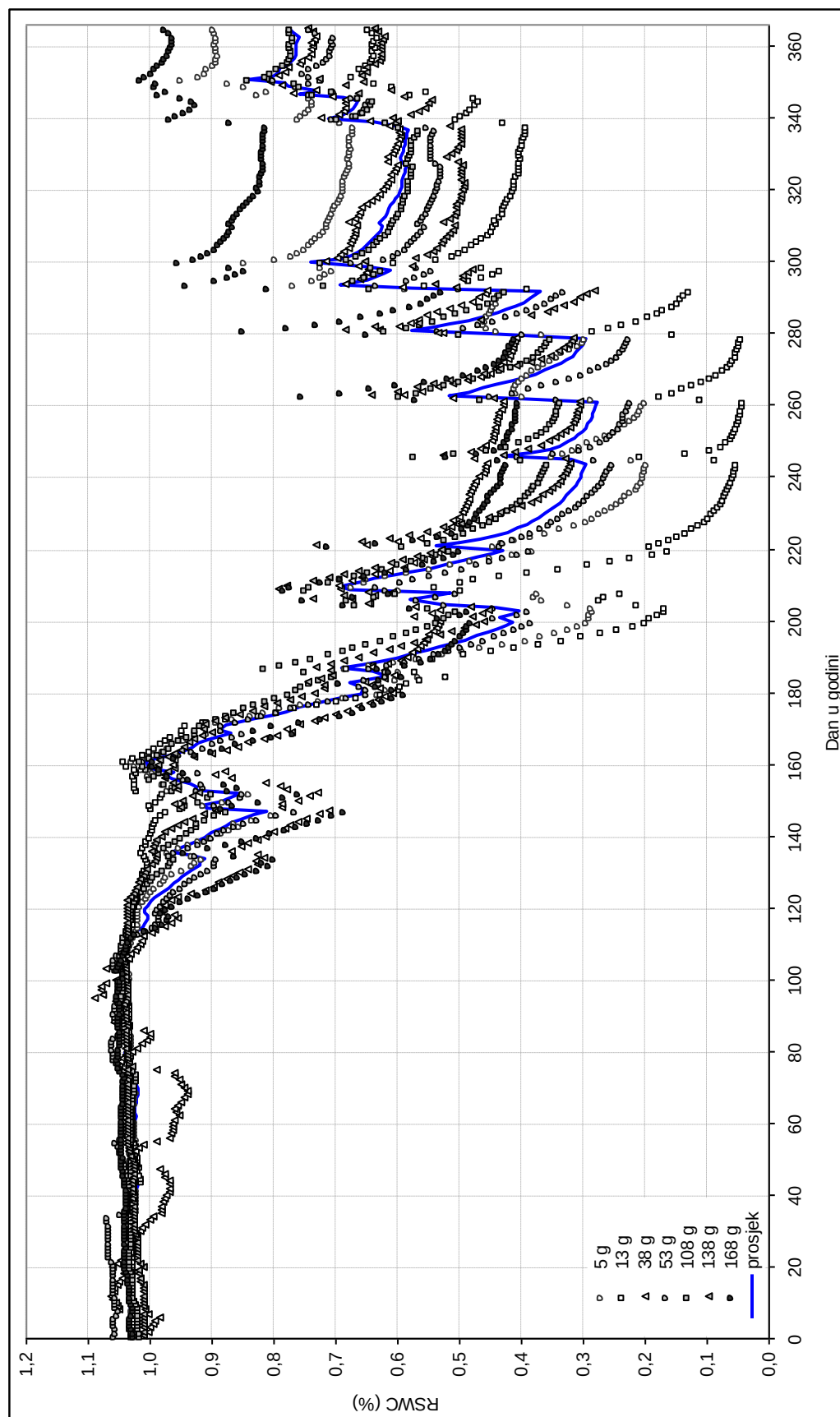
Tablica 3.3. Prosječna dnevna temperatura tla na dubini od 5 cm (T_{tlo5}) i prosječni dnevni relativni udio vode u tlu ($RSWC$) u sastojinama različite starosti. N označava ukupan broj dnevnih srednjih vrijednosti tijekom vegetacijskog razdoblja. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	108	138	168	Prosjek
N	210	209	214	210	210	210	209	1472
T_{tlo5} (°C)	$16,1 \pm 0,3$	$15,1 \pm 0,2$	$15,1 \pm 0,3$	$14,7 \pm 0,2$	$14,6 \pm 0,2$	$15,1 \pm 0,3$	$14,4 \pm 0,2$	$15,0 \pm 0,1$
$RSWC$ (%)	$0,64 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,03$	$0,69 \pm 0,01$	$0,63 \pm 0,02$	$0,71 \pm 0,02$	$0,69 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,01$	$0,66 \pm 0,01$

Dinamika mikrostanišnih meteoroloških parametara tijekom 2011. godine prikazana je na slikama 3.5 i 3.6. Kod najmlađe sastojine (5 godina) u većem dijelu vegetacijskog razdoblja, od 121 do 266 dana u godini (1.5. – 23.9.), zabilježene su veće vrijednosti temperature tla na dubini od 5 cm u odnosu na utvrđen prosjek svih sastojina, dok se kod ostalih sastojina vrijednosti T_{tlo5} uglavnom kreću oko prosjeka. S obzirom na relativni udio vode u tlu, značajan pad vrijednosti $RSWC$ -a utvrđen je za sve sastojine nakon 160 dana u godini (9.6.). U narednih nešto više od mjesec dana (9.6. – 19.7.) prosječni relativni udio vode u tlu (prosjek svih sastojina) je pao sa 100% na svega 41%. Nadalje slijedi razdoblje u kojem se uočavaju najveće razlike u vrijednostima $RSWC$ -a između sastojina. Od 19.7. do 21.10. (200 – 293 dan u godini) kod sastojina u dobi od 5, 13 i 53 godine utvrđene vrijednosti $RSWC$ -a značajno su niže od prosjeka svih sastojina, dok su u istom razdoblju starije sastojine i sastojina od 38 godina bilježile veće vrijednosti relativnog udjela vode u tlu od utvrđenog prosjeka.



Slika 3.5. Dinamika temperature tla na dubini od 5 cm tijekom 2011. godine (1.1. – 31.12.), za sastojine različite starosti.



Slika 3.6. Dinamika relativnog udjela vode u tlu tijekom 2011. godine (1.1. – 31.12.), za sastojine različite starosti.

3.3. ZALIHE UGLJIKA U GLAVNIM SASTAVNICAMA ŠUME HRASTA LUŽNJAKA

3.3.1. Zalihe ugljika u živoj biomasi ($C^{žB}$)

Ukupna zaliha ugljika u živoj biomasi iznosila je od $7,2 \pm 0,6$ do $204,9 \pm 18,1$ t C ha⁻¹, a prosjek za cijelu kronosekvencu iznosio je $127,6 \pm 24,3$ t C ha⁻¹. Najviše vrijednosti zabilježene su u sastojini starosti 108 godina. Razdioba žive biomase po komponentama prikazana je u tablici 3.4.

Tablica 3.4. Nadzemna drvena (W_{nd}) i lisna biomasa (W_l), podzemna biomasa krupnog (W_{kk}) i sitnog korijena (W_{sk}) i biomasa plodova (W_{pl}), ukupna živa biomasa ($W^{žB}$) i ukupne zalihe ugljika u živoj biomasi ($C^{žB}$) te omjer podzemne i nadzemne žive biomase (R:S), za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške. N za W_l i W_{pl} je 4, a za W_{sk} 16 u svakoj sastojini.

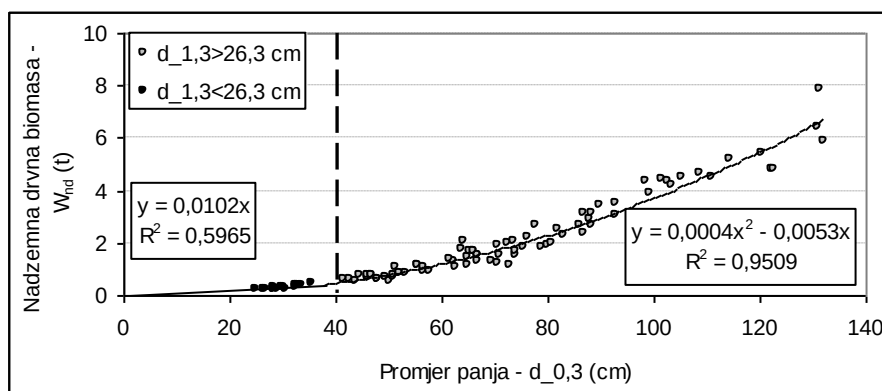
Sastavnica (udio u $W^{žB}$)	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
N (W_{nd})	5	12	14	12	12	10	12	4
W_{nd} (t ha ⁻¹)	$0,9 \pm 0,1$ (6%)	$50,4 \pm 6,4$ (52%)	$193,0 \pm 13,5$ (74%)	$212,5 \pm 10,1$ (75%)	$259,9 \pm 14,7$ (79%)	$329,5 \pm 29,2$ (81%)	$316,9 \pm 11,6$ (81%)	$198,2 \pm 9,9$ (78%)
W_l (t ha ⁻¹)	$0,3 \pm 0,4$ (2%)	$2,9 \pm 0,5$ (3%)	$3,4 \pm 0,4$ (1%)	$3,9 \pm 0,8$ (1%)	$4,2 \pm 0,6$ (1%)	$4,2 \pm 0,4$ (1%)	$3,6 \pm 1,0$ (1%)	$4,6 \pm 0,4$ (2%)
W_{kk} (t ha ⁻¹)	$1,0 \pm 0,3$ (7%)	$32,0 \pm 3,6$ (33%)	$58,5 \pm 7,7$ (23%)	$55,2 \pm 6,3$ (20%)	$60,9 \pm 4,3$ (18%)	$65,9 \pm 5,9$ (16%)	$63,6 \pm 2,6$ (16%)	$41,6 \pm 2,4$ (17%)
W_{pl} (t ha ⁻¹)	0	0	$0,3 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,5$ (1%)	$0,6 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,4$	$3,4 \pm 0,9$ (1%)	$1,1 \pm 0,7$
W_{sk} (t ha ⁻¹)	$12,1 \pm 0,9$ (85%)	$11,9 \pm 0,7$ (12%)	$4,5 \pm 0,5$ (2%)	$7,4 \pm 0,7$ (3%)	$6,5 \pm 0,6$ (2%)	$9,1 \pm 0,5$ (2%)	$5,6 \pm 0,4$ (1%)	$8,3 \pm 0,7$ (3%)
$W^{žB}$ (t ha ⁻¹)	$14,3 \pm 1,2$	$97,2 \pm 9,7$	$259,7 \pm 34,7$	$281,1 \pm 31,6$	$332,1 \pm 23,4$	$409,8 \pm 36,3$	$393,1 \pm 15,6$	$253,8 \pm 14,7$
$C^{žB}$ (t C ha ⁻¹)	$7,2 \pm 0,6$	$48,6 \pm 4,8$	$129,9 \pm 17,3$	$140,6 \pm 15,8$	$166,1 \pm 11,7$	$204,9 \pm 18,1$	$196,6 \pm 7,8$	$126,9 \pm 7,3$
R:S	0,83	0,60	0,30	0,26	0,23	0,20	0,20	0,21
$W_l:W_n$	0,25	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02

R:S predstavlja omjer podzemne biomase krupnog korijena (W_{kk}) i ukupne nadzemne biomase ($W_n = W_{nd} + W_l$).

Postotni udio pojedinih sastavnica u ukupnoj živoj biomasi značajno se razlikuje između sastojina I. dobnog razreda i starijih sastojina, no nakon dobi od 38 godina se stabilizira i zadržava sve do kraja ohpodnje, a i duže. U prosječnoj razdiobi nadzemna drvena biomasa čini oko 76%, biomasa krupnog korijena oko 19%, biomasa sitnog korijena oko 3%, lisna biomasa oko 1%, a biomasa plodova manje od 1 %. Omjer podzemne i nadzemne biomase najveći je u najmlađoj sastojini gdje iznosi 0,83 i sa starosti opada do iznosa od oko 0,2. Postotni udio lisne biomase u ukupnoj nadzemnoj živoj biomasi ($W_l:W_n$) je najveći u najmlađoj sastojini (5 godina) i iznosi oko 25%. Kako sastojina raste, udio lisne biomase se smanjuje i već u II dobnom razredu (sastojina starosti 38 godina) pada na 2% i do kraja ohpodnje se zadržava na vrijednosti od 1-2%.

3.3.2. Zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD})

Da bi se obračunala zaliha ugljika u podzemnom dijelu panjeva prethodno je bilo potrebno utvrditi odnos promjera na panju (pri tlu) i nadzemne drvene žive biomase. Na temelju parova podataka o promjeru pri tlu (na 0,3 m) i nadzemnoj drvenoj živoj biomasi, za 94 zdrava stabla hrasta lužnjaka, ravnomjerno odabrana kroz čitavu kronosekvencu, utvrđena je ovisnost tih dviju varijabli (slika 3.7). Za stabla promjera pri tlu manjeg od 40 cm korišten je linearni model s jednadžbom izjednačenja $W_{nd} = 0,0102 \times d_{0,3}$ ($R^2 = 0,597$), a za stabla promjera pri tlu većeg od 40 cm korišten je polinom drugog stupnja jednadžbe izjednačenja $W_{nd} = 0,0004 \times d_{0,3}^2 + 0,0053 \times d_{0,3}$ ($R^2 = 0,951$). Također je utvrđen i linearan odnos prsnog promjera i promjera pri tlu, s jednadžbom izjednačenja $d_{1,3} = 0,657 \times d_{0,3}$ ($R^2 = 0,964$), prema kojem promjer debla pri tlu od 40 cm odgovara prsnom promjeru od 26,3 cm.



Slika 3.7. Odnos promjera na panju (0,3 m) i nadzemne drvene žive biomase.

Primjenom navedenih jednadžbi izjednačenja procijenjena je potencijalna nadzemna drvena biomasa posječenih stabala, a nadalje primjenom prosječnog omjera podzemne i nadzemne biomase procijenjena je podzemna biomasa panjeva. Raspodjela biomase mrtvog drva prikazana je u tablicama 3.5 i 3.6.

Tablica 3.5. Broj sušaca (N^S) i panjeva (N^P) po jedinici površine te njihova nadzemna (W_n) i podzemna (W_p) biomasa. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

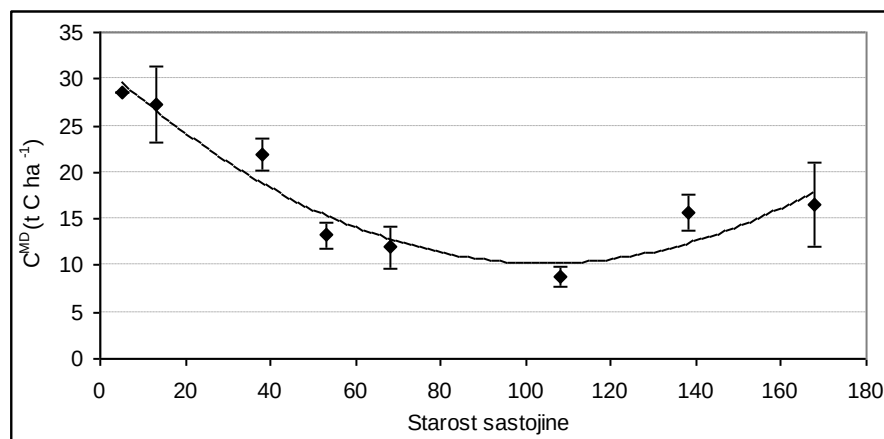
	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
N^S (kom ha ⁻¹)	-	66 ± 66	156 ± 45	64 ± 27	124 ± 68	33 ± 25	48 ± 30	1
W_n^S (t ha ⁻¹)	-	0,21 ± 0,21	7,59 ± 2,07	3,08 ± 1,08	4,18 ± 1,69	0,61 ± 0,29	4,23 ± 2,57	10,44
W_p^S (t ha ⁻¹)	-	0,06 ± 0,06	2,13 ± 0,56	0,81 ± 0,28	1,10 ± 0,44	0,16 ± 0,08	1,11 ± 0,67	2,73
N^P (kom ha ⁻¹)	148	116 ± 20	236 ± 37	184 ± 32	94 ± 19	93 ± 8	105 ± 17	44 ± 19
W_n^P (t ha ⁻¹)	5,72	2,94 ± 0,76	1,55 ± 0,36	1,05 ± 0,24	0,32 ± 0,09	0,61 ± 0,10	1,83 ± 0,25	0,62 ± 0,32
W_p^P (t ha ⁻¹)	49,80	50,29 ± 7,30	24,76 ± 1,90	17,78 ± 2,25	7,15 ± 1,48	11,56 ± 1,17	21,18 ± 1,96	11,58 ± 7,26

Tablica 3.6. Ukupna biomasa sušaca (W^S), panjeva (W^P) i drvnog otpada (W^{DO}) te ukupna biomasa mrtvog drva (W^{MD}), zalihe ugljika u nadzemnoj i podzemnoj biomasi mrtvog drva (C_n^{MD} , C_p^{MD}) te ukupne zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD}). Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

Sastavnica (t ha ⁻¹)	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
W^S	-	0,27 ± 0,27	9,57 ± 2,71	3,89 ± 1,37	5,28 ± 2,13	0,78 ± 0,37	5,34 ± 3,24	13,17
W^P	55,52	53,23 ± 8,02	26,31 ± 1,83	18,84 ± 2,49	7,47 ± 1,56	12,17 ± 1,26	23,02 ± 2,20	12,20 ± 7,57
W^{DO}	1,60	1,11 ± 0,36	7,73 ± 1,20	3,75 ± 0,70	11,10 ± 3,62	4,76 ± 1,67	3,08 ± 0,77	7,58 ± 5,01
W^{MD}	57,12	54,61 ± 8,05	43,61 ± 3,45	26,47 ± 2,96	23,85 ± 3,26	17,71 ± 1,84	31,43 ± 4,02	32,95 ± 7,89
C_n^{MD}	3,66	2,13 ± 0,43	8,43 ± 1,21	3,94 ± 0,66	7,80 ± 2,00	2,99 ± 0,85	4,57 ± 1,35	9,32 ± 2,51
C_p^{MD}	24,90	25,17 ± 3,65	13,45 ± 0,99	9,30 ± 1,14	4,12 ± 0,77	5,86 ± 0,58	11,15 ± 1,03	7,16 ± 3,63
C^{MD} (t C ha ⁻¹)	28,56	27,30 ± 4,02	21,88 ± 1,74	13,24 ± 1,46	11,93 ± 2,24	8,85 ± 1,06	15,72 ± 2,00	16,48 ± 4,54

Broj ploha za sušce je isti kao i za živu biomasu, a za panjeve je 4 u svakoj sastojini (osim za sastojinu u dobi od 5 godina gdje je uzorak 1 ploha površine 0,25 ha).

Zaliha ugljika u mrtvom drvu je u rasponu od $8,85 \pm 1,06$ do $27,30 \pm 4,02$ t C ha⁻¹ (tablica 3.6), a prosjek za cijelu kronosekvencu je $17,99 \pm 2,55$ t C ha⁻¹. Veće zalihe utvrđene su u najmlađim i starim sastojinama, dok su najniže vrijednosti zabilježene u srednjodobnim i zrelim sastojinama što odgovara obliku „U“ krivulje (slika 3.8). Na temelju dobivenih rezultata izrađen je model ovisnosti zaliha ugljika u mrtvom drvu o starosti sastojine ($F=154,26$; $df=3$; $p<0,0001$), a parametri modela prikazani su u tablici 3.7.



Slika 3.8. Model ovisnost zaliha ugljika u mrtvom drvu (sušci, panjevi i drveni otpad) o starosti sastojine. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

Tablica 3.7. Parametri modela ovisnosti zaliha ugljika u mrtvom drvu o starosti sastojine.

$C^{MD} = a \times \text{starost}^2 + b \times \text{starost} + c$ $R = 0,9556$ $R^2 = 0,9132$ $N=8$						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	0,0019	0,0004	5,40	0,0029	0,0010	0,0029
b	-0,4057	0,0628	-6,46	0,0013	-0,5671	-0,2443
c	31,5328	2,0686	15,24	<0,0001	26,2153	36,8502

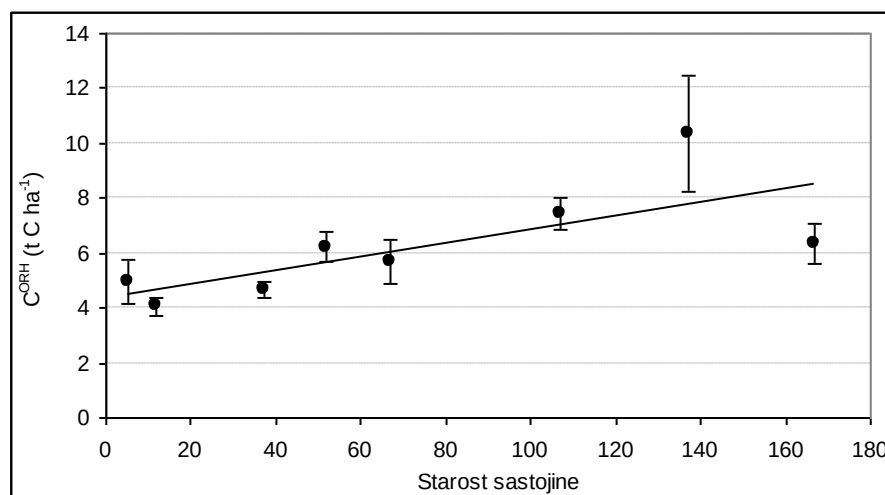
3.3.3. Zalihe ugljika u organskoj tvari tla (C^{OTT})

Zalihe ugljika u OTT su sadržane u šumskoj prostirci (organski horizont) i mineralnom dijelu tla. U biomasi **šumske prostirke** zalihe ugljika su bile u rasponu od 4,05 do 10,43 t C ha⁻¹, sa srednjom vrijednosti za cijelu kronosekvencu od $6,21 \pm 0,70$ t C ha⁻¹. Raspodjela biomase po frakcijama organskog horizonta prikazana u tablici 3.8. Prosječna visina O horizonta u kronosekvenci i njezina standardna devijacija iznosila je $14,7 \pm 7,6$ mm.

Tablica 3.8. Raspodjela biomase i zalihe ugljika u organskom horizontu sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

Sastavnica (t ha ⁻¹)	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
W^{OL}	6,01 ± 0,71	6,27 ± 0,52	5,73 ± 0,47	6,95 ± 0,60	4,48 ± 0,43	9,47 ± 1,04	7,69 ± 0,84	6,71 ± 0,80
W^{OFH}	10,04 ± 2,21	4,40 ± 0,75	11,85 ± 1,71	11,74 ± 1,38	12,27 ± 1,95	8,99 ± 1,11	18,03 ± 3,76	8,66 ± 0,90
W^{ORH}	16,05 ± 2,32	10,67 ± 0,92	17,58 ± 1,77	18,68 ± 1,50	16,75 ± 2,00	18,46 ± 1,52	25,73 ± 3,85	15,38 ± 1,21
C^{ORH} (t C ha⁻¹)	4,94 ± 0,80	4,05 ± 0,31	4,66 ± 0,27	6,23 ± 0,56	5,67 ± 0,79	7,45 ± 0,58	10,34 ± 2,13	6,32 ± 0,72

Neposredno nakon dovršnog sijeka, kod mladih sastojina u dobi do 40 godina, zabilježene su najniže vrijednosti zaliha ugljika u organskom horizontu tla (4 – 5 t C ha⁻¹), dok su najviše vrijednosti zabilježene kod stare sastojine pred kraj ophodnje (cca 10 t C ha⁻¹). U najstarijoj sastojini uočene su značajno niže vrijednosti zaliha ugljika u organskom horizontu tla. Na temelju dobivenih rezultata izrađen je model ovisnosti zaliha ugljika u organskom horizontu o starosti sastojine ($F=11,77$; $df=1$; $p<0,0018$), a parametri modela prikazani su u tablici 3.9.

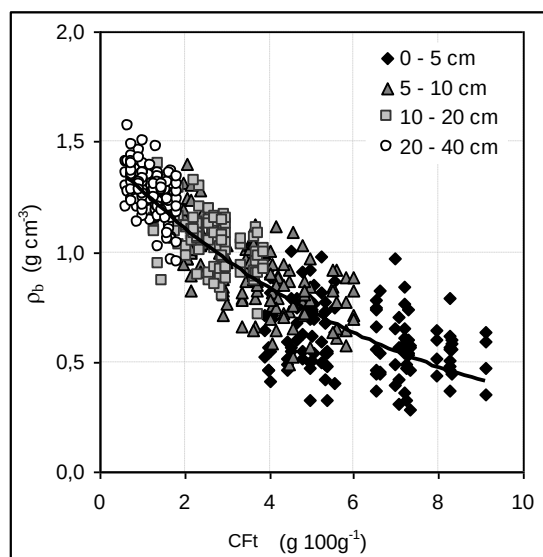
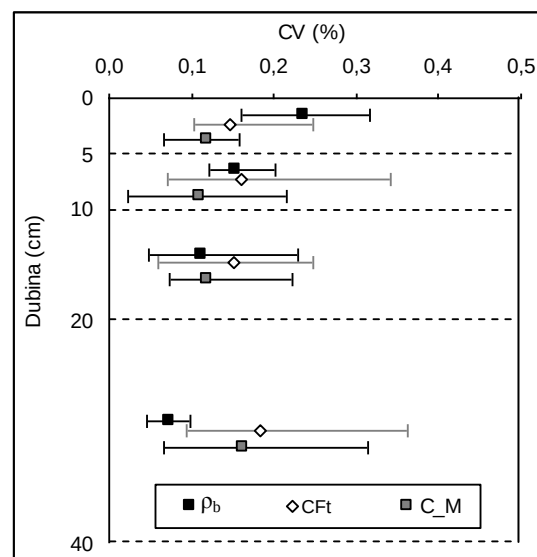


Slika 3.9. Model ovisnosti zaliha ugljika u organskom horizontu o starosti sastojine. Prikazane su srednje vrijednosti 4 podplohe po dobnom razredu i njihove standardne pogreške.

Tablica 3.9. Parametri modela ovisnosti zaliha ugljika u O horizontu o starosti sastojine.

$C_{ORH} = a \times \text{starost} + b$ $R = 0,5309 \quad R^2 = 0,2818 \quad N=32$						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	0,0244	0,0071	3,43	0,0018	0,0099	0,0390
b	4,4037	0,6568	6,70	0,0000	3,0622	5,7451

Zalihe ugljika u **mineralnom dijelu tla** direktno ovise o gustoći tla (ρ_b) te o postotnom udjelu ugljika u masi suhe tvari tla (CF_t). Srednja vrijednost ρ_b u kronosekvenci iznosila je $0,96 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, dok je srednja vrijednost CF_t iznosila $33,59 \pm 0,91 \text{ g kg}^{-1}$. Model ovisnosti gustoće tla o udjelu ugljika u masi suhe tvari tla ($F=14929,71$; $df=2$; $p<0,0001$) prikazan je na slici 3.10. Najveći udio C i najmanja gustoća tla utvrđeni su u površinskom sloju tla (0 – 5 cm) dok su najmanji CF_t i najveća ρ_b utvrđeni u najdubljem mjerenom sloju tla (20 – 40 cm). Za svaku sastojinu kronosekvence utvrđeni su koeficijenti varijacije (CV) udjela ugljika ($n=4$) i gustoće ($n=16$) za svaku dubinu tla. Prosječna unutar-sastojinska varijabilnosti za navedene varijable tla (prosjeak 8 sastojina kronosekvence) prikazana je na slici 3.11.

Slika 3.10. Model ovisnost gustoće tla (ρ_b) o postotnom udjelu ugljika u masi suhe tvari tla (CF_t).Slika 3.11. Koeficijent varijacije gustoće tla (ρ_b), udjela ugljika u masi suhe tvari tla (CF_t) i zaliham ugljika u mineralnom dijelu tla (C^M) za određene dubine. Prikazane su srednje vrijednosti i apsolutni minimum i maksimum za cijelu kronosekvencu ($n=8$).

Tablica 3.10. Parametri modela ovisnosti gustoće tla o postotnom udjelu ugljika u masi suhe tvari tla.

Model $\rho_b = a \times e^{(b \times CFt)}$ R=0,8885 R ² =0,7895 N=511						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	1,4981	0,0160	93,92	<0,0001	1,4668	1,5294
b	-0,1438	0,0037	-38,85	<0,0001	-0,1511	-0,1365

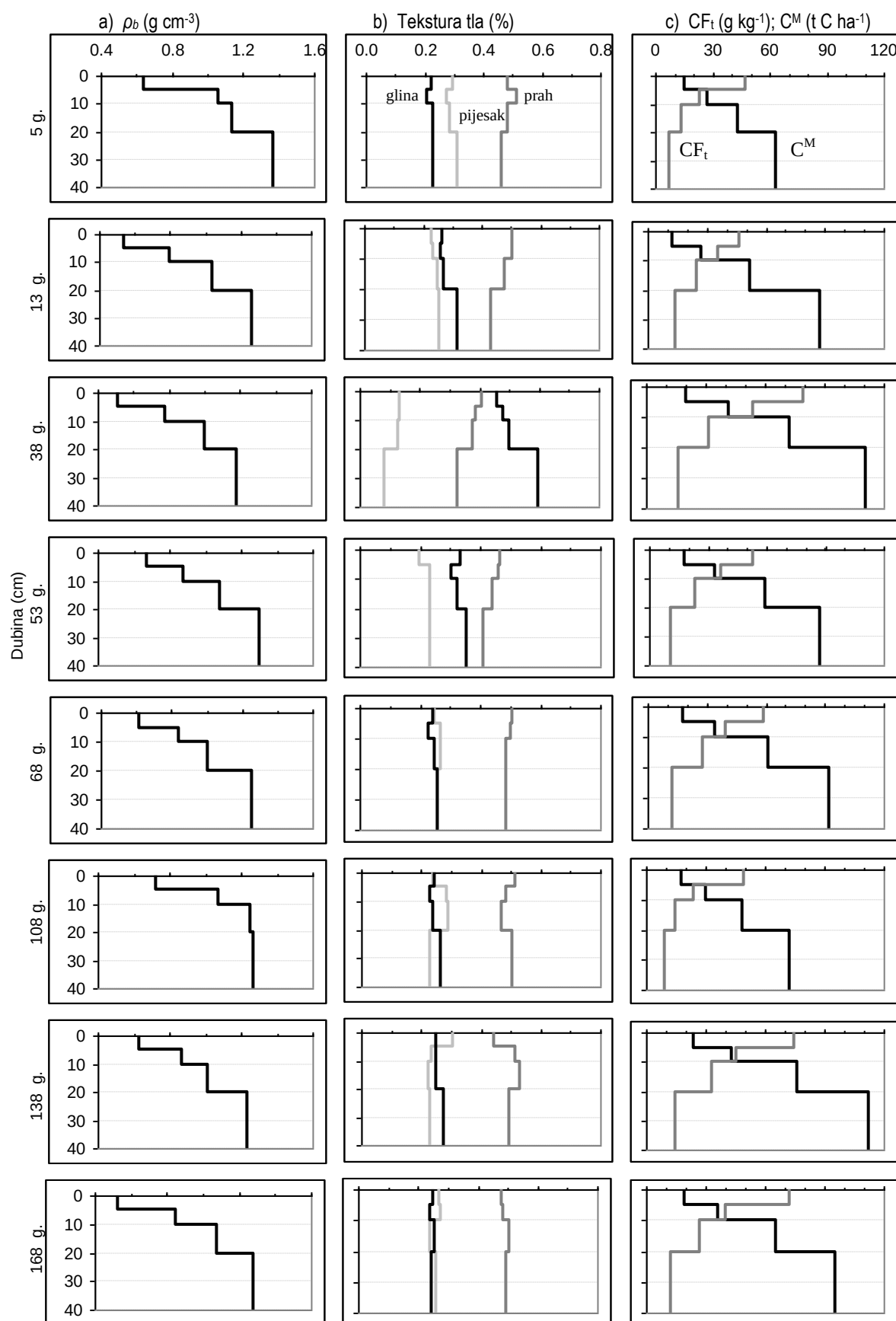
Najveća unutar-sastojinska varijabilnost udjela C u masi suhe tvari tla utvrđena je na dubini 20 – 40 cm i iznosila je 36%, a najveća unutar-sastojinska varijabilnost gustoće tla utvrđena je na dubini 0 – 5 cm i iznosila je 32%, obje utvrđene kod sastojine u dobi od 168 godina. Unutar-sastojinska varijabilnosti zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla kretala se od 2 do 31%, a najveća varijabilnost utvrđena je na dubini 20 – 40 cm, također kod najstarije sastojine. Unutar-sastojinska varijabilnost ukupnih zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla (C^{M40}) iznosila je od 7 do 16%. Varijabilnost udjela C između sastojina kronosekvence kretala se od 22 do 29%, a varijabilnost gustoće tla od 4 do 13 %, ovisno o dubini tla. Varijabilnost C^{M40} između sastojina različite starosti iznosila 19%.

Zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla (C^{M40}) kretale su se od 63,03 do 112,25 t C ha⁻¹ (tablica 3.11), a prosjek za cijelu kronosekvencu iznosio je 90,13 ± 6,04 t C ha⁻¹. Najmanje zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla zabilježene su u najmlađoj sastojini u dobi od 5 godina, dok su najveće vrijednosti zabilježene u starijoj sastojini u dobi od 138 godina. Linearna ovisnost zaliha ugljika o starosti sastojina nije utvrđena (F=3,546; df=1; p<0,0694), ali su utvrđene statistički značajne razlike između sastojina različite dobi (F=12,17; df=7; p<0,0001).

Tablica 3.11. Kumulativne zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla, po dubinama, za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške (n=4). Različitim slovima označene su značajne razlike između sastojina.

C ^{OTT} (t C ha ⁻¹) po dubinama (cm)	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
C ^{M5}	14,89 ± 1,16	12,47 ± 0,41	20,37 ± 1,57	17,67 ± 0,81	17,84 ± 1,41	17,73 ± 1,0,3	23,54 ± 1,18	19,07 ± 1,03
C ^{M10}	27,37 ± 2,11	26,76 ± 1,06	41,22 ± 2,28	33,83 ± 0,77	33,95 ± 3,09	30,30 ± 1,41	42,91 ± 1,80	36,14 ± 0,81
C ^{M20}	43,10 ± 2,61	51,88 ± 1,95	72,64 ± 3,40	59,41 ± 1,96	61,53 ± 6,12	48,57 ± 2,60	75,83 ± 3,37	65,15 ± 0,28
C ^{M40}	63,03 ± 3,80	87,53 ± 5,04	111,11 ± 4,40	87,44 ± 5,24	92,27 ± 7,43	71,98 ± 3,58	112,25 ± 3,74	95,43 ± 4,78
C ^{OTT} (C ^{ORH} + C ^{M40})	67,97 ± 3,88 a	91,59 ± 5,04 ab	115,77 ± 4,41 b	93,67 ± 5,27 ab	97,94 ± 7,47 bc	79,43 ± 3,63 ac	122,59 ± 4,31 b	101,76 ± 4,83 bc

Karakteristike tla za sastojine različite starosti te pripadajuće kumulativne zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla prikazane su na slici 3.12.



Slika 3.12. Karakteristike tla sastojina različite dobi: a) gustoća tla; b) tekstura tla: crna linija – udio gline (<0,002 mm), tamnosiva linija – udio praha (0,002 – 0,05 mm) i svijetlosiva linija – udio pijeska (0,05 – 2 mm); c) udio i zalihe C u tlu.

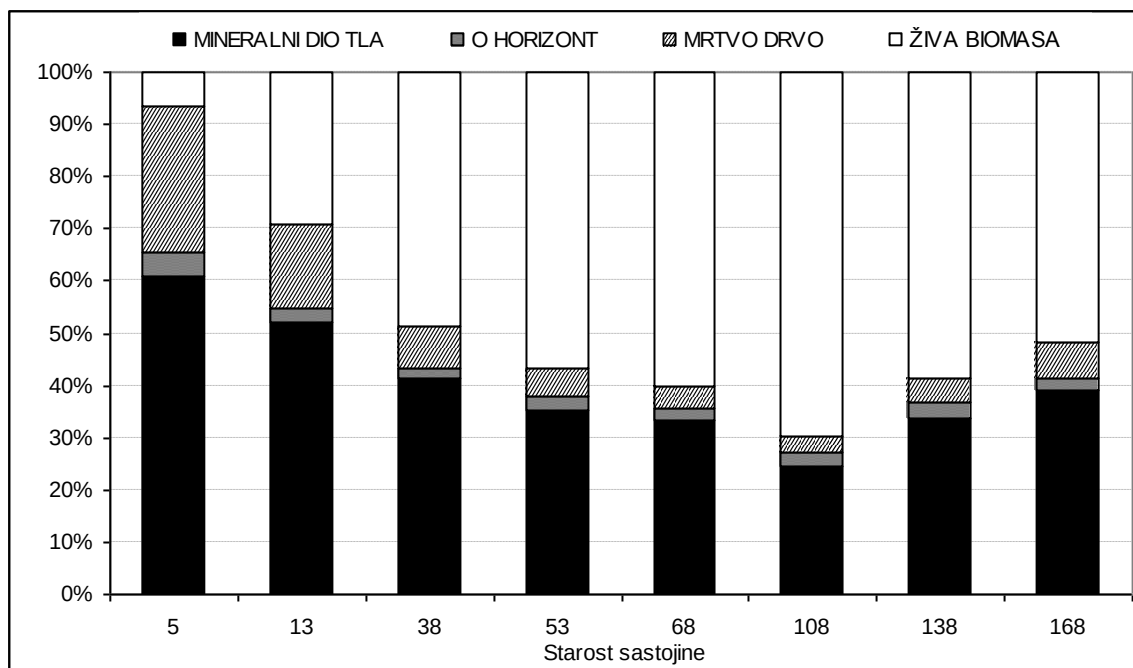
U sastojini u dobi od 38 godina, gdje su utvrđene najveće vrijednosti ukupnih zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla, također je utvrđen i najveći udio gline u tlu koji je u prosjeku (sve mjerene dubine tla) iznosio preko 50%. U najmlađoj sastojini (5 godina), gdje su utvrđene najmanje vrijednosti ukupnih zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla, također je utvrđen i najmanji udio gline u tlu (oko 22%) te nešto niži udio C u masi suhe tvari tla koji je u svim mjerenim dubinama niži od prosjeka svih sastojina. Ukupne zalihe ugljika u OTT u kronosekvenci iznosile su od 67,97 do 122,59 t C ha⁻¹ (tablica 3.10).

3.3.4. Raspodjela zaliha ugljika po glavnim šumskim sastavnicama

Ukupne zalihe ugljika u kronosekvenci šume hrasta lužnjaka su u rasponu od 103,7 do 334,8 t C ha⁻¹ (tablica 3.12). Raspodjela zaliha ugljika po glavnim sastavnicama šumskog ekosustava mijenja se tijekom ophodnje (slika 3.13). U najmlađoj sastojini (5 godina) preko 50% zaliha C sadržano je u tlu dok je skoro sav ostatak zaliha pohranjen u mrtvom drvu. Kako šuma stari omjer se mijenja u korist žive biomase, s time da se zalihe ugljika u tlu uglavnom kreću oko 35-40% (i ne padaju ispod 25%), dok se udio zaliha C u mrtvom drvu smanjuje sa 28% u najmlađoj sastojini na 16% u sastojini staroj 13 godina te na svega 3 – 8% u starijim sastojinama.

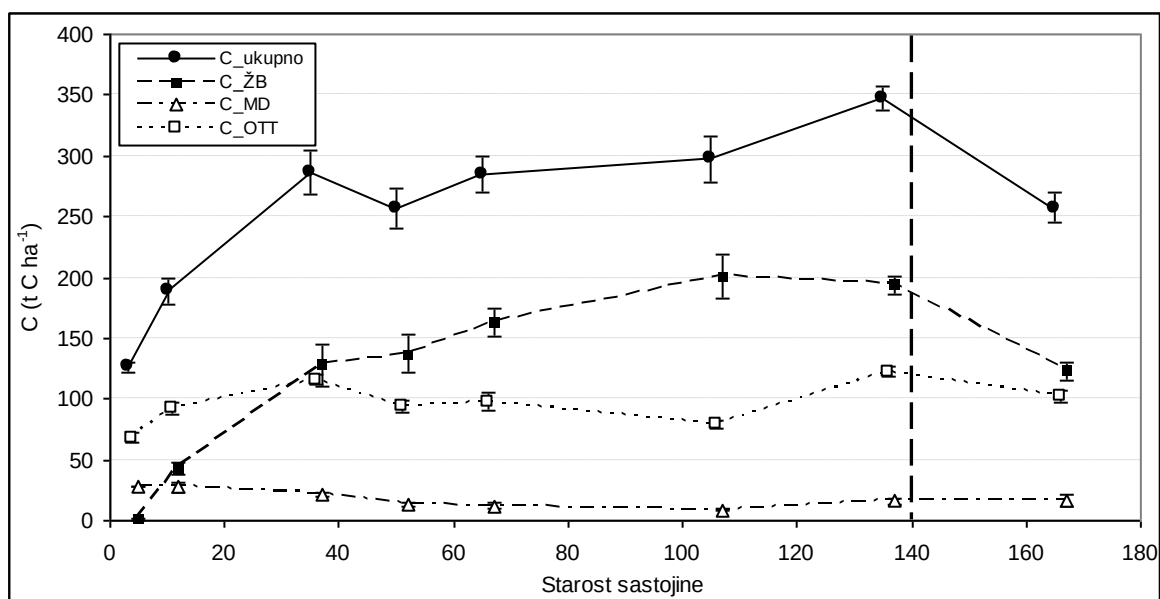
Tablica 3.12. Ukupne zalihe ugljika u glavnim šumskim sastavnicama, u sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

Sastavnica (t C ha ⁻¹)	Starost sastojine (god.)								Prosjek (udio)
	5	13	38	53	68	108	138	168	
C_{ZB}	7,2 ± 0,6	48,6 ± 4,8	129,9 ± 17,3	140,6 ± 15,8	166,1 ± 11,7	204,9 ± 18,1	196,6 ± 7,8	126,9 ± 7,3	127,6 (53%)
C_{MD}	28,6	27,3 ± 4,0	21,8 ± 1,8	13,2 ± 1,4	11,9 ± 2,3	8,9 ± 1,0	15,7 ± 2,0	16,5 ± 4,5	18,0 (7%)
C_{ORH}	4,9 ± 0,8	4,0 ± 0,4	4,7 ± 0,2	6,3 ± 0,6	5,6 ± 0,8	7,4 ± 0,6	10,3 ± 2,1	6,4 ± 0,7	6,2 (3%)
C_{M40}	63,0 ± 3,8	87,5 ± 5,0	111,1 ± 2,8	87,4 ± 5,2	92,3 ± 7,4	72,0 ± 3,6	112,2 ± 3,7	95,4 ± 4,8	90,1 (37%)
ΣC	103,7 ± 3,9	167,4 ± 8,0	267,6 ± 17,9	247,5 ± 16,7	275,9 ± 14,0	293,2 ± 18,5	334,8 ± 9,1	245,2 ± 9,9	241,9 (100%)



Slika 3.13. Raspodjela zaliha ugljika po glavnim šumskim sastavnicama u sastojinama različite starosti.

Dinamika ukupne zalihe ugljika kroz ophodnju prikazana je na slici 3.14. Najniže vrijednosti uočene su kod mladih sastojina, a najviše vrijednosti kod starih sastojina pred kraj ophodnje. Na slici 3.14 prikazana je i sastojina u dobi od 168 godina, izuzeta iz redovitog gospodarenja, kod koje su zabilježene značajno niže vrijednosti ukupnih zaliha ugljika u odnosu na staru sastojinu u dobi od 138 godina.



Slika 3.14. Zalihe ugljika u glavnim šumskim sastavnicama tijekom ophodnje. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške. Isprekidana linija označava dob propisane ophodnje.

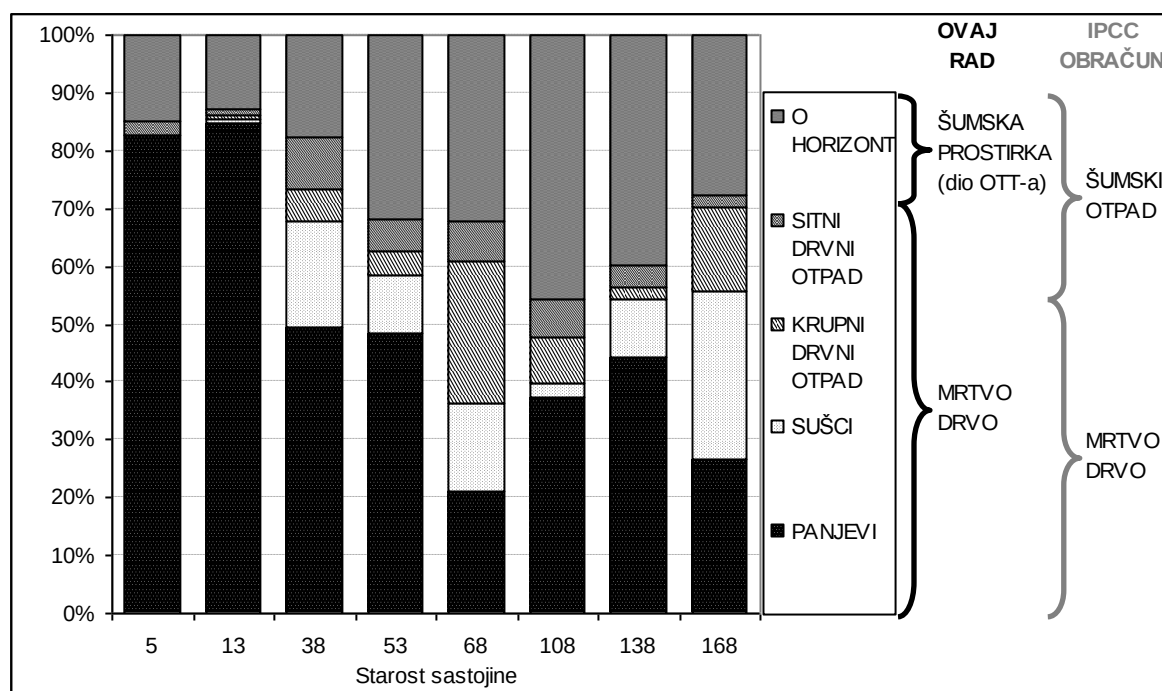
3.3.5. Raspodjela zaliha ugljika – IPCC obračun

Zalihe ugljika prema IPCC metodologiji sadržane su u 5 sastavnica šumskog ekosustava (tablica 2.11), od kojih se nadzemna (C^{AGB}) i podzemna biomasa (C^{BGB}) grupiraju u živu biomasu (C^{LB}), a mrtvo drvo (C^{DW}) i šumski otpad (C^L) u mrtvu biomasu (C^{DB}).

Tablica 3.13. Ukupne zalihe ugljika u šumskim sastavnicama, u sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

Sastavnica (t C ha ⁻¹)	Starost sastojine (god.)								Prosjek (udio)
	5	13	38	53	68	108	138	168	
C^{AGB}	0,6 ± 0,2	26,7 ± 3,2	98,4 ± 6,8	109,3 ± 5,1	132,4 ± 7,3	167,4 ± 14,6	162,0 ± 5,8	102,0 ± 4,9	99,8 (41%)
C^{BGB}	6,6 ± 0,5	21,9 ± 1,8	31,5 ± 3,8	31,3 ± 3,2	33,7 ± 2,2	37,5 ± 3,0	34,6 ± 1,3	24,9 ± 1,2	27,8 (12%)
C^{DW}	27,8	27,0 ± 4,0	19,4 ± 1,7	12,2 ± 1,5	10,7 ± 2,1	7,8 ± 1,0	14,7 ± 2,0	16,0 ± 4,6	16,9 (7%)
C^L	5,7 ± 0,8	4,3 ± 0,4	7,1 ± 0,4	7,3 ± 0,6	6,9 ± 0,8	8,5 ± 0,6	11,3 ± 2,1	6,8 ± 0,7	7,3 (3%)
C^{SOM}	63,0 ± 3,8	87,5 ± 5,0	111,1 ± 2,8	87,4 ± 5,2	92,3 ± 7,4	72,0 ± 3,6	112,2 ± 3,7	95,4 ± 4,8	90,1 (37%)
ΣC	103,7 ± 3,9	167,4 ± 8,0	267,6 ± 17,9	247,5 ± 16,7	275,9 ± 14,0	293,2 ± 18,5	334,8 ± 9,1	245,2 ± 9,9	241,9 (100%)

Budući da je glavna razlika između IPCC metodologije i one korištene u ovom radu u obračunu zaliha ugljika u mrtvom drvu i sitnom šumskom otpadu, raspodjela zaliha ugljika u svim sastavnicama mrtve biomase prikazana je na slici 3.15. Vrijednosti zaliha ugljika u ukupnoj živoj biomasu i mineralnom dijelu tla jednake su u oba obračuna.



Slika 3.15. Raspodjela mrtve biomase u sastojinama različite starosti.

U sastojinama I dobnog razreda preko 85% mrtve biomase čine panjevi, i to najvećim dijelom njihov podzemni dio, dok je najmanji udio panjeva u srednjodobnoj sastojini od 68 godina te u najstarijoj sastojini od 168 godina (20-30%). Udio sušaca u mrtvoj biomasi je oko 10-25% u svim sastojinama osim u I dobnom razredu i u sastojini od 108 godina. Najveći udio drvnog otpada zabilježen je u srednjodobnoj sastojini u dobi od 68 godina (oko 30%), dok je najveći udio organskog horizonta zabilježen u sastojini od 108 godina (oko 45%).

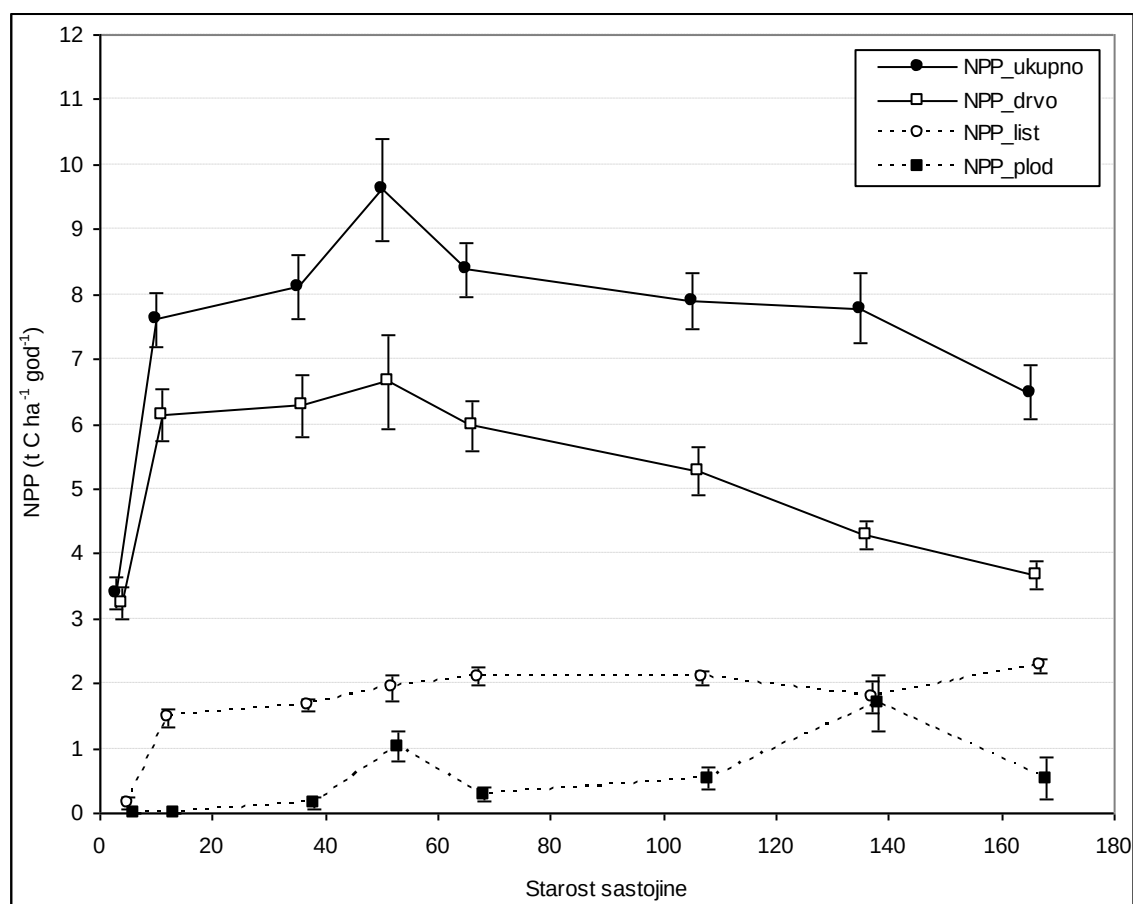
3.4. TOKOVI I GODIŠNJA BILANCA UGLJIKA ŠUME HRASTA LUŽNJAKA

3.4.1. Neto primarna produkcija (NPP)

Ukupna neto primarna produkcija u kronosekvenci kretala se od 3,41 do 9,71 t C ha⁻¹ god⁻¹, s prosjekom od 7,47 ± 0,66, a koeficijent varijabilnosti je iznosio 24,9%. Najveća vrijednost ukupne neto primarne produkcije (NPP) zabilježena je u sastojini starosti 53 godine, što se poklapa sa najvećom vrijednosti produkcije drvene biomase (NPP_d), dok su najviše vrijednosti produkcije lisne biomase zabilježene u najstarijoj sastojini (168 godina). Promatrajući produkciju plodova zabilježene su izrazito niske vrijednosti za sastojine u dobi od 68, 108 i 168 godina (slika 3.16). Najmanji koeficijent varijabilnosti između sastojina različite starosti utvrđen je za produkciju lista (14,6%) ako se ne uzme u obzir najmlađa sastojina sa značajno manjim vrijednostima produkcije lista od ostalih sastojina. Nešto veća varijabilnost utvrđena je za produkciju sitnog korijena (33,7%) i produkciju žive drvenaste biomase (NPP_{nd} + NPP_{kk}) u iznosu od 51,8%. Najveća varijabilnost utvrđena je za produkciju plodova, čak 109,3%.

Tablica 3.14. Produkcija nadzemne drvene biomase (NPP_{nd}), podzemne biomase krupnog (NPP_{kk}) i sitnog korijena (NPP_{sk}), lisne biomase (NPP_l), biomase plodova (NPP_{pl}) te neto primarna produkcija ekosustava (NEP) u sastojinama različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške. N za NPP_{nd}, NPP_l i NPP_{pl} je 4, a za NPP_{sk} je 16.

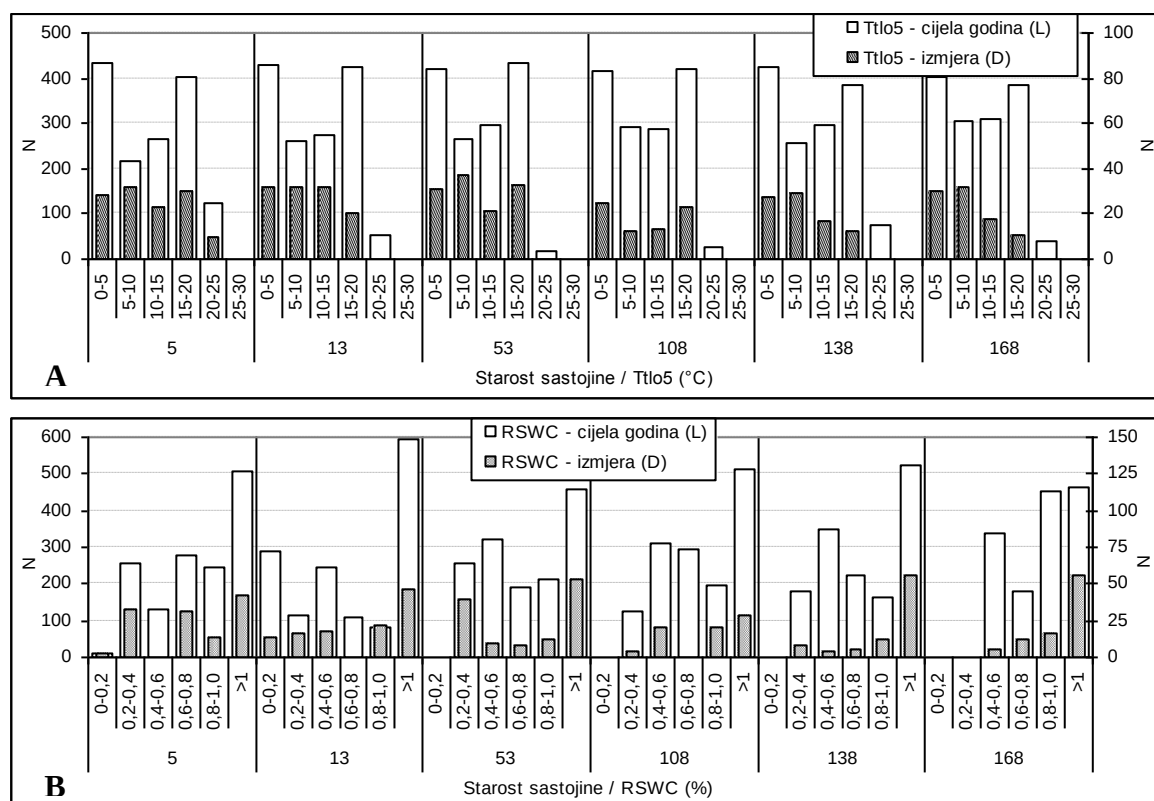
t C ha ⁻¹ god ⁻¹	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
NPP _{nd}	0,12 ± 0,02	1,96 ± 0,25	3,94 ± 0,34	3,90 ± 0,56	3,58 ± 0,29	2,56 ± 0,30	2,55 ± 0,16	1,38 ± 0,13
NPP _{kk}	0,10 ± 0,02	1,21 ± 0,27	1,23 ± 0,30	0,99 ± 0,43	0,82 ± 0,21	0,51 ± 0,20	0,52 ± 0,12	0,31 ± 0,09
NPP _l	0,16 ± 0,10	1,47 ± 0,13	1,68 ± 0,09	1,94 ± 0,20	2,11 ± 0,14	2,08 ± 0,10	1,80 ± 0,25	2,28 ± 0,11
NPP _{pl}	0	0	0,16 ± 0,09	1,03 ± 0,24	0,29 ± 0,11	0,54 ± 0,18	1,70 ± 0,43	0,54 ± 0,33
NPP _{sk}	3,03 ± 0,23	2,95 ± 0,18	1,13 ± 0,13	1,85 ± 0,18	1,63 ± 0,15	2,28 ± 0,13	1,40 ± 0,10	2,05 ± 0,18
NPP	3,41 ± 0,25	7,59 ± 0,43	8,14 ± 0,49	9,71 ± 0,79	8,43 ± 0,43	7,97 ± 0,43	7,97 ± 0,55	6,56 ± 0,42



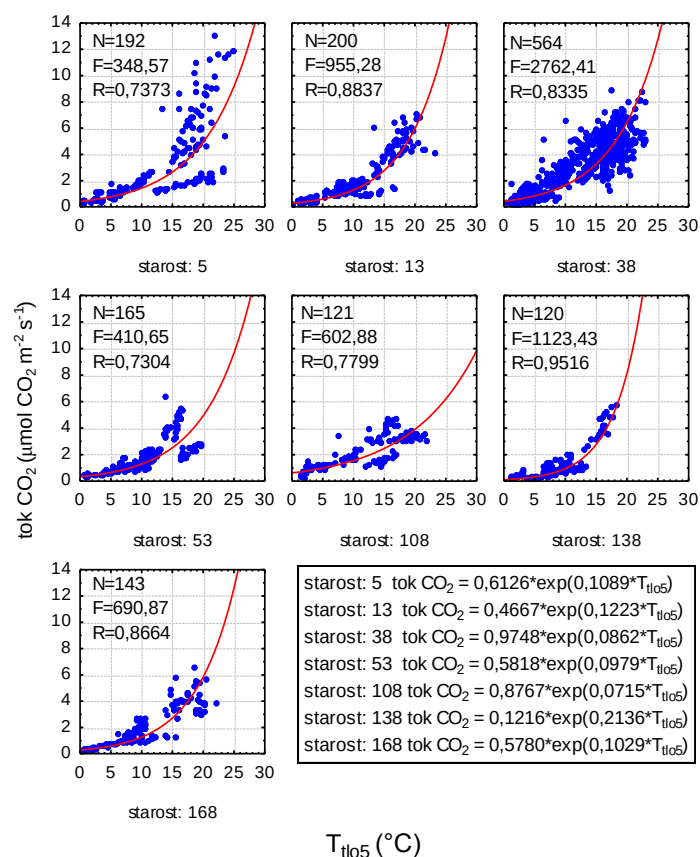
Slika 3.16. Dinamika produkcije drvene i lisne biomase, biomase plodova te neto primarne produkcije ekosustava tijekom životnog vijeka.

3.4.2. Ukupna respiracija tla (R^{tLO})

Izmjera toka CO_2 iz tla bila je periodična te se u pojedinoj sastojini obavljala svaka tri tjedna u trajanju od 3-4 dana, a interval izmjere u pojedinom danu iznosio je jedan sat. Izuzetak je bila sastojina od 38 godina gdje se izmjera obavljala u sklopu istraživačke stanice svaka 4 sata tijekom cijele godine. Da bi se procijenila reprezentativnost izmjere, za svaku sastojinu (osim sastojine uz istraživačku stanicu) utvrđena je zastupljenost izmjerenih podataka u rasponu zabilježenih mikrostanišnih uvjeta tijekom istraživnog razdoblja (slike 3.17 A i B), na razini poludnevni i četvrt-dnevnih srednjih vrijednosti. Može se primijetiti da je izmjera u svakoj sastojini obuhvatila skoro cijeli raspon zabilježenih temperatura tla, stoga je bilo moguće analizirati ovisnost toka CO_2 iz tla o temperaturi tla na dubini od 5 cm, za svaku sastojinu zasebno. Utvrđene su statistički značajne eksponencijalne ovisnosti toka CO_2 iz tla o temperaturi tla na dubini od 5 cm (slika 3.18).



Slika 3.17. Zastupljenost izmjerenih podataka u rasponu zabilježene temperature tla na dubini od 5 cm (A) i udjela vlage u tlu (B) tijekom 2011. godine. L – lijeva y-os; D – desna y-os.



Slika 3.18. Ovisnost toka CO₂ iz tla o temperaturi tla na dubini od 5 cm, za sastojine različite starosti (df=2). Svi parametri su statistički značajni pri $p < 0,0001$.

Nadalje, raspodjela izmjerenih podataka unutar raspona relativne vlažnosti tla je bila neravnomjerna i za pojedine sastojine nije obuhvatila čitav raspon zabilježenih vrijednosti relativne vlažnosti tla, zbog čega nije bilo moguće provesti analizu ovisnosti toka CO₂ iz tla o relativnom udjelu vode u tlu za svaku sastojinu zasebno. Iz tog razloga, odabrani model za popunjavanje praznine u podacima i procjenu dnevne respiracije tla (poglavlje 2.3.2, jednadžba 2.17) primijenio se na čitav skup podataka (sve sastojine).

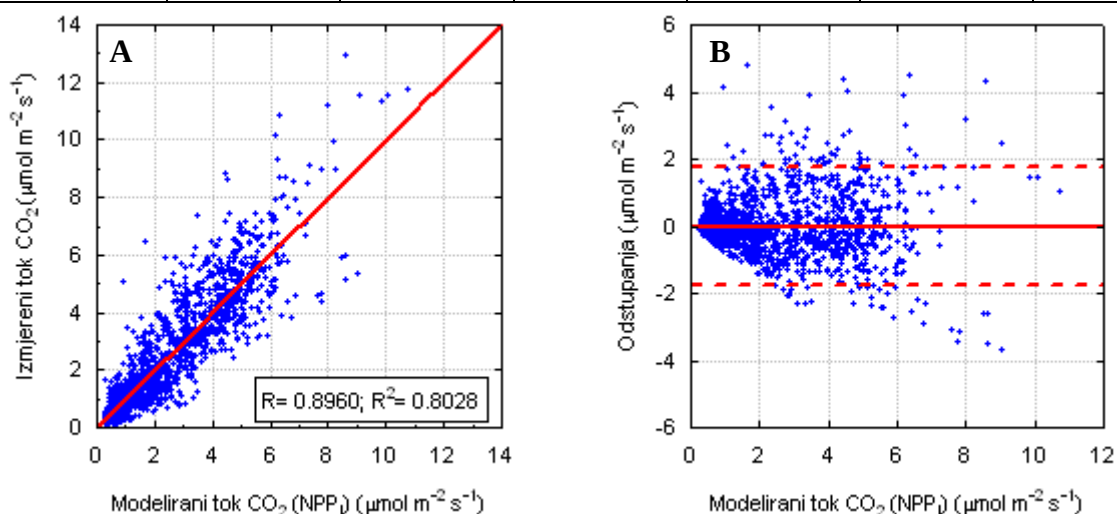
Prema JANSSENS I DR. (2001) indeks lisne površine (*LAI*) u navedenom modelu je u funkciji procjene produkcije sastojine kao glavne determinante respiracije tla. No, u nedostatku varijable *LAI*, opravdano za procjenu referentne respiracije koristiti godišnju produkciju lista (*NPP_l*). Pretpostavljajući linearnu ovisnost *R_{ref}* o *NPP_l* dobiven je **MODEL 1**:

$$R^{TLO} = (a_{NPP_l} + b_{NPP_l} \times NPP_l) \times e^{(a_{REW} + b_{REW} \times RSWC) \times \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{d0.5} - T_0} \right)} \times \frac{RSWC}{RSWC_{1/2} + RSWC} \quad (3.1)$$

koji se primijenio na cijeli set podataka (sve istraživane sastojine).

Tablica 3.15. Parametri modela 1 procjene toka CO₂ iz tla

Model 1 (sve sastojine) R=0,8960 R ² =0,8028 N=1505						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
aNPP _l	2,8999	0,1495	19,40	<0,0001	2,6067	3,1931
bNPP _l	-0,0869	0,0294	-2,96	0,0031	-0,1445	-0,0293
aREW	263,1933	26,4582	9,95	<0,0001	211,2943	315,0923
bREW	259,6002	34,8629	7,45	<0,0001	191,2151	327,9853
RSWC ½	0,2204	0,0428	5,15	<0,0001	0,1364	0,3043



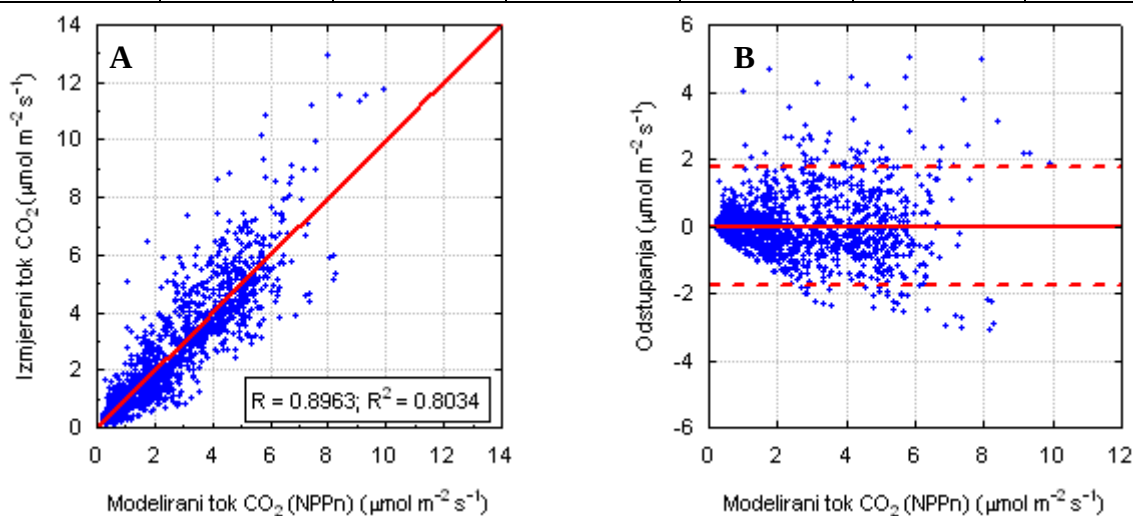
Slika 3.19. Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO₂ iz tla i procijenjenih modelom 1 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 1 (B).

U ovom modelu parametar $bNPP_l$ je negativan što znači da je tok CO_2 iz tla manji što je produkcija listinca veća. Takav odnos dviju navedenih varijabli suprotan je od očekivanog. Prema REICHSTEIN I DR. (2003) ovisnost toka CO_2 iz tla o produkciji lista je pozitivna. Navedena tvrdnja je primjenjiva u slučaju kada se istražuje ovisnost toka CO_2 iz tla o produkciji lista na širem geografskom području, gdje je produkcija lista indikator produktivnosti sastojina. No, NPP_l utvrđena u sastojinama kronosekvence prilično je stabilna kroz čitavo razdoblje (slika 3.16), uz iznimku da su najmanje vrijednosti zabilježene kod najmlađe sastojne. Također, kod najmlađe sastojine su zabilježene i najviše vrijednosti toka CO_2 iz tla, stoga je modelom 1 dobivena negativna vrijednost parametra $bNPP_l$. Nasuprot produkciji lista, ukupan NPP odgovara lijevo skošenoj unimodalnoj krivulji, odnosno kod mladih sastojina ukupna produkcija je najveća, a opada sa starosti. Uz pretpostavku da je NPP_n bolji prediktor R_{ref} dobivamo **MODEL 2**:

$$R^{TLO} = (a_{NPP_n} + b_{NPP_n} \times NPP_n) \times e^{(a_{REW} + b_{REW} \times RSWC) \times \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{do5} - T_0} \right)} \times \frac{RSWC}{RSWC_{1/2} + RSWC} \quad (3.2)$$

Tablica 3.16. Parametri modela 2 procjene toka CO_2 iz tla

Model 2 (sve sastojine) R=0,8963 R ² =0,8033 N=1505						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
aNPP _n	2,4878	0,1241	20,04	<0,0001	2,2443	2,7313
bNPP _n	0,0318	0,0086	3,72	0,0002	0,0151	0,0486
aREW	224,8849	26,2254	8,58	<0,0001	173,4426	276,3273
bREW	325,9595	34,9955	9,31	<0,0001	257,3141	394,6049
RSWC ½	0,1850	0,0385	4,80	<0,0001	0,1094	0,2606

Slika 3.20. Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO_2 iz tla i procijenjenih modelom 2 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 2 (B).

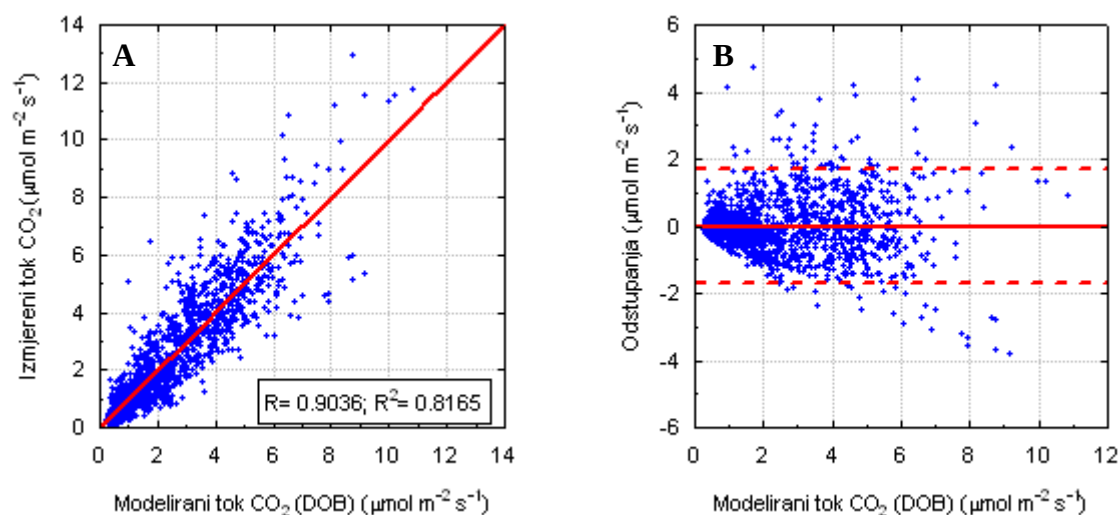
Primjenom modela 2 dobivena je očekivanu pozitivnu ovisnost referentne respiracije tla o neto primarnoj produkciji ukupne nadzemne biomase, odnosno pozitivne vrijednosti parametra $bNPP_n$ (tablica 3.16).

Da bi provjerili da li dob sastojina utječe na tok CO_2 iz tla, u prethodni model je umjesto varijable NPP_n uvrštena varijabla starosti (DOB) i dobiven je **MODEL 3**:

$$R^{TLO} = (a_{DOB} + b_{DOB} \times DOB) \times e^{(a_{REW} + b_{REW} \times RSWC) \times \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{do5} - T_0} \right)} \times \frac{RSWC}{RSWC_{1/2} + RSWC} \quad (3.3)$$

Tablica 3.17. Parametri modela 3 procjene toka CO_2 iz tla

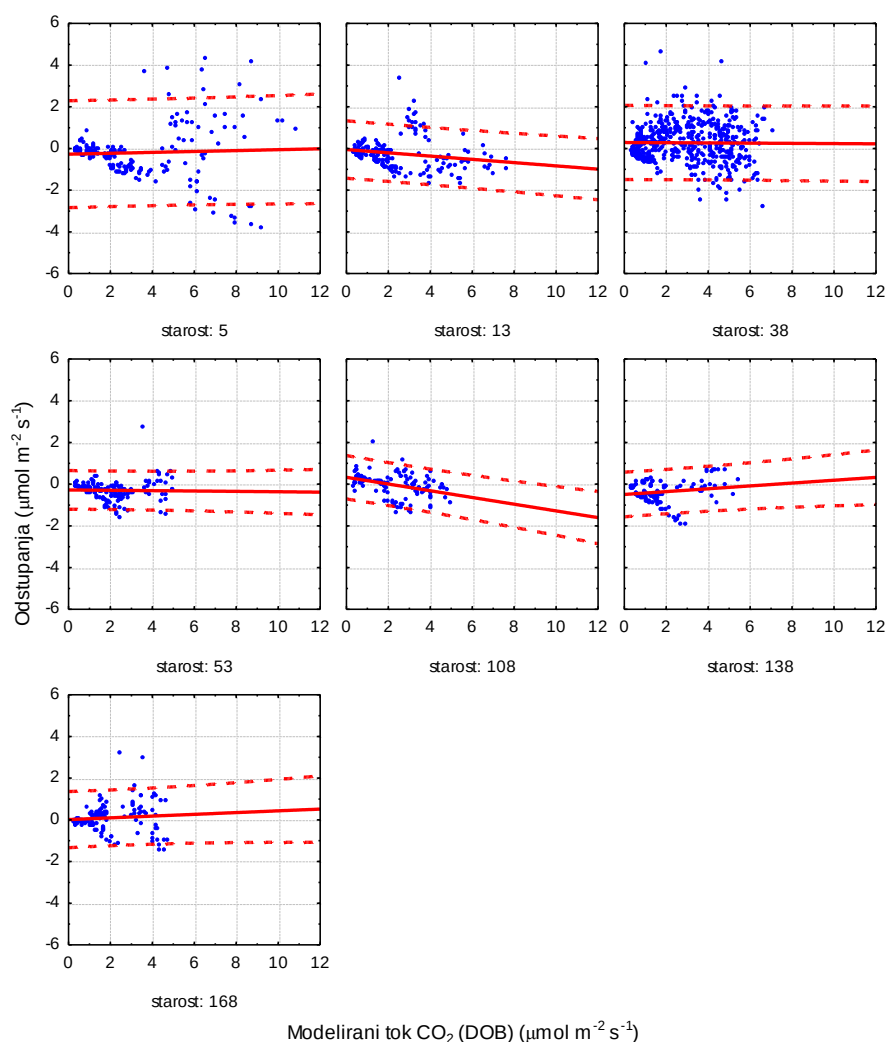
Model 3 (sve sastojine) R=0,9036 R ² =0,8164 N=1505						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
aDOB	3,1436	0,1493	21,06	<0,0001	2,8508	3,4364
bDOB	-0,0049	0,0005	-9,36	<0,0001	-0,0059	-0,0039
aREW	263,6138	24,9656	10,56	<0,0001	214,6426	312,5849
bREW	242,2653	32,2671	7,51	<0,0001	178,9719	305,5588
RSWC ½	0,2430	0,0437	5,56	<0,0001	0,1573	0,3287



Slika 3.21. Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO_2 iz tla i procijenjenih modelom 3 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 3 (B).

Starost kao varijabla dobro opisuje varijabilnost toka CO_2 iz tla. Modelom 3 postignute su veće vrijednosti koeficijenta determinacije u odnosu na prethodna dva modela, a parametar $b\text{DOB}$ je negativan što je i očekivano.

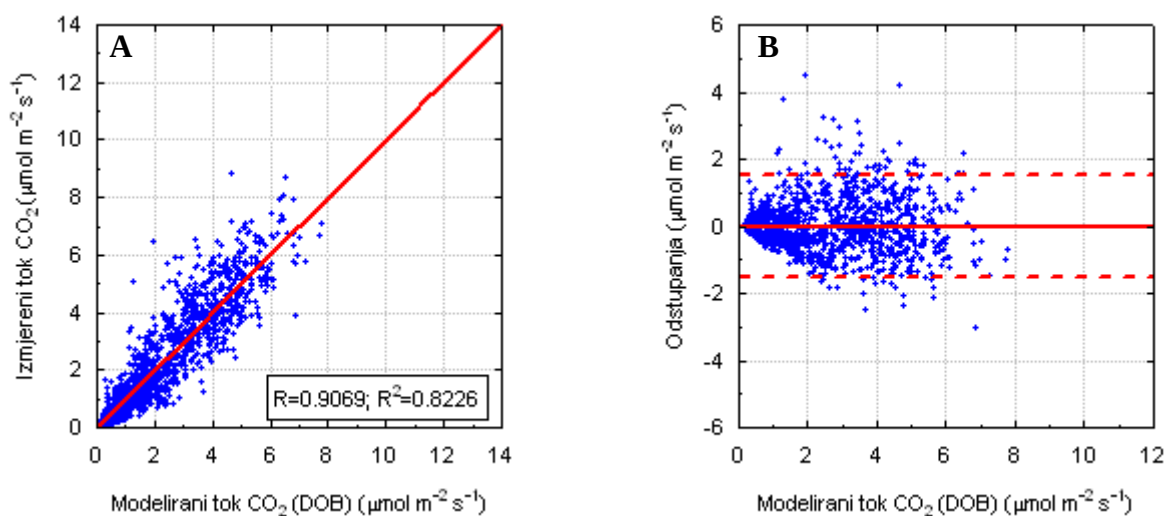
Ako utvrđena odstupanja modelom 3 razvrstamo na svaku sastojinu zasebno (slika 3.22) može se primijetiti da je kod najmlađe sastojine, u dobi od 5 godina, zabilježen najveći raspon odstupanja. Sastojina u dobi od 5 godina je u razvojnem stadiju pomlatka te kod nje još nije došlo do sklapanja krošanja zbog čega se očekuje da je ovisnost toka CO_2 iz tla o mikrostanišnim uvjetima nešto drukčija nego kod ostalih sastojina. Ako iz ukupnog seta podataka isključimo najmlađu sastojinu, koeficijent determinacije se povećava se sa 0,8164 na 0,8225 (tablica 3.19), a ujedno se dobiva i bolja distribucija odstupanja (usporedi slike 3.21 i 3.23).



Slika 3.22. Odstupanja toka CO_2 iz tla procijenjenih modelom 3 u odnosu na izmjerene vrijednosti, za sastojine različite starosti

Tablica 3.18. Parametri modela 3 procjene toka CO₂ iz tla primijenjenog samo na sklopljene sastojine.

Model 3 (sklop) R=0,9069 R ² =0,8225 N=1313						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
aDOB	2,7652	0,0922	29,98	<0,0001	2,5843	2,9461
bDOB	-0,0047	0,0004	-11,16	<0,0001	-0,0055	-0,0039
aE0	157,0005	21,3813	7,34	<0,0001	115,0550	198,9459
bE0	376,0356	30,0037	12,53	<0,0001	317,1749	434,8963
RSWC ½	0,0985	0,0227	4,34	<0,0001	0,0540	0,1430

Slika 3.23. Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO₂ iz tla i procijenjenih modelom 3 za sklopljene sastojine (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 3 (B).

Provedena je usporedba kvalitete modela (tablica 3.19) i za daljnju procjenu respiracije tla kod sklopljenih sastojina izabran je model 3 (sklop), s utvrđenim najvećim koeficijentom determinacije.

Tablica 3.19. Usporedba kvalitete modela. U zagradi je naveden parametrizacijski skup podataka.

	N	Prosjeak	SD	SE	F	df	p	R ²
Izmjereno (sve sastojine)	1505	2,49	2,03	0,05				
Izmjereno (sklop)	1313	2,40	1,85	0,05				
model 1 (sve sastojine)	1505	2,49	1,82	0,05	3501,56	5	<0,0001	0,8046
model 2 (sve sastojine)	1505	2,48	1,83	0,05	3511,63	5	<0,0001	0,8016
model 3 (sve sastojine)	1505	2,49	1,83	0,05	3783,27	5	<0,0001	0,8164
model 3 (sklop)	1313	2,40	1,67	0,05	3688,67	5	<0,0001	0,8225

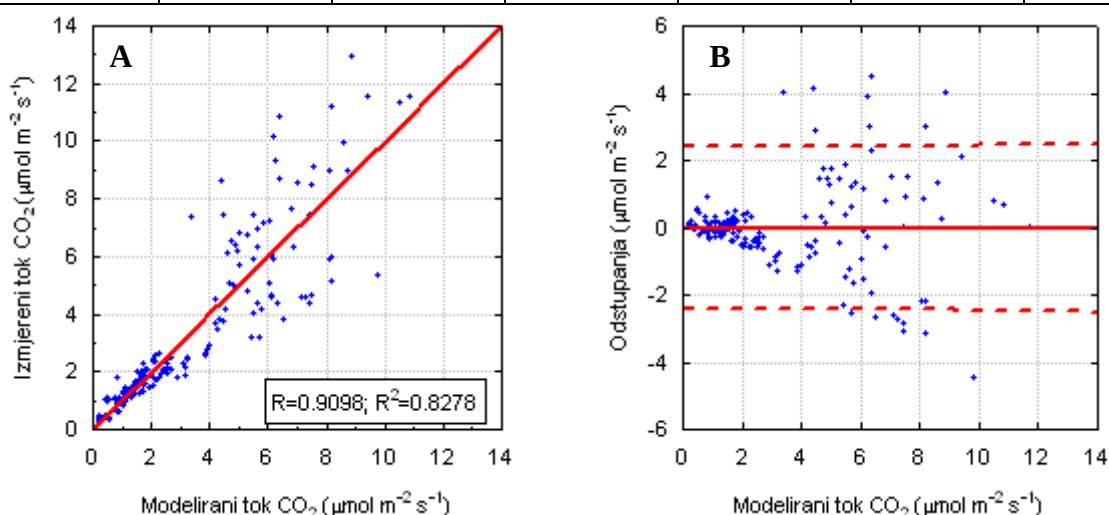
Primjenom osnovnog modela (jednadžba 2.17) samo na skup podataka za sastojinu u dobi od 5 godina nisu dobiveni statistički značajni parametri R_{ref} , b_{REW} i $RSWC_{1/2}$. No, ako se faktor $a_{REW} + b_{REW} \times RSWC$ iz osnovnog modela zamijeni konstantom, parametri postaju

statistički značajni. Navedena konstanta predstavlja aktivacijsku energiju i označava se kao E_0 (LLOYD I TAYLOR 1994). Na taj način je dobiven **MODEL 4**:

$$R^{TLO} = R_{ref} \times e^{E_0 \times \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{do5} - T_0} \right)} \times \frac{RSWC}{RSWC_{1/2} + RSWC} \quad (3.4)$$

Tablica 3.20. Parametri modela 4 procjene toka CO_2 iz tla

Model 4 – 5 godina R=0,9096 R ² =0,8274 N=192						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
R _{ref}	4,8274	0,7813	6,18	<0,0001	3,2863	6,3685
E ₀	507,8437	25,1566	20,19	<0,0001	458,2199	557,4675
RSWC ½	1,0342	0,2886	3,58	0,0004	0,4650	1,6035



Slika 3.24. Odnos izmjerenih vrijednosti toka CO_2 iz tla i procijenjenih modelom 4 (A) i odstupanja s obzirom na vrijednosti dobivene modelom 4 (B).

Za daljnju procjenu respiracije tla kod sastojine stare 5 godina korišten je model 4.

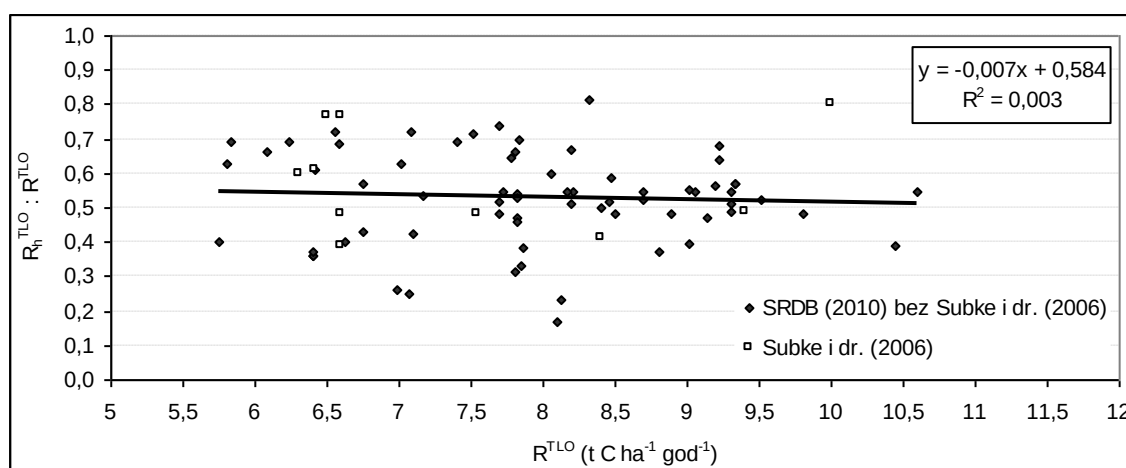
Primjenom navedenih modela i parametara na skup podataka o srednjim četvrt-dnevnim vrijednostima temperature tla na 5 cm (T_{tlo5}) i relativnom udjelu vode u tlu (RSWC), procijenjene su srednje dnevne vrijednosti toka CO_2 iz tla za sastojine različite starosti, izražene u $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Preračunavanje dobivenih vrijednosti u prosječne dnevne vrijednosti respiracije tla, izražene u $\text{g C m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$, obavljeno je na sljedeći način:

$$R^{TLO}_{dan} = R^{TLO}_{mod} \times \frac{s \times m \times h}{1000000} \times 12,0107 \quad (3.5)$$

gdje je R^{TLO}_{dan} – prosječna dnevna respiracija tla, R^{TLO}_{mod} – trenutna respiracija tla dobivena modelom, s – broj sekundi u minuti; m – broj minuta u satu, h – broj sati u danu; 12,0107 – molarna masa ugljika.

Sumiranjem dnevnih vrijednosti dobivene su godišnje vrijednosti ukupne respiracije tla i izražene su u $\text{t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ (tablica 3.21).

Nadalje, provedena je razdioba ukupne respiracije tla na autotrofnu i heterotrofnu komponentu. Iz globalne baze podataka o respiraciji tla (engl. *Global database of soil respiration data*, <http://daac.ornl.gov>) (BOND-LAMBERTY I THOMSON 2012) odabrani su radovi koji se odnose na gospodarene šumske listopadne ekosustave umjerenog pojasa (ključne riječi za odabir radova su bile: *temperate*, *forest*, *managed* i *deciduous*). Također, u analizu podataka uključeni su i radovi iz meta-analize Subke i dr. (2006). Na temelju podataka u rasponu od 5,76 do 10,72 $\text{t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ (prosjeak $R^{TLO} \pm 2,57 \text{ SD}$) izrađen je model ovisnosti omjera heterotrofne i ukupne respiracije tla o ukupnoj respiraciji tla (slika 3.25). Budući da nije utvrđena statistički značajna ovisnost ($F=0,2423$; $df=1$; $p<0,6240$), navedeni model nije se koristio u daljnjoj obradi. Udio heterotrofne respiracije u ukupnoj respiraciji tla određen je kao prosječna vrijednost svih podataka uključenih u analizu i iznosi 0,532.



Slika 3.25. Ovisnost omjera heterotrofne i ukupne respiracije tla ($R_h^{TLO}:R^{TLO}$) o ukupnoj respiraciji tla (R^{TLO}).

Srednja vrijednost ukupne respiracije tla u kronosekvenci iznosila je $8,24 \pm 0,36 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$. Najveće vrijednosti zabilježene su kod sastojine od 38 godina, a najniže kod najstarije sastojine (tablica 3.21).

Tablica 3.21. Ukupna godišnja respiracija tla i raspodjela na autotrofnu i heterotrofnu respiraciju tla.

Sastavnica ($\text{t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$)	Starost sastojine (god.)							Prosjeak $\pm$ stand. pogreška
	5	13	38	53	108	138	168	
R^{TLO}	9,37	8,18	9,50	8,26	7,91	7,77	6,69	$8,24 \pm 0,36$
$R_h^{TLO}:R^{TLO}$	0,532							0,532
R_h^{TLO}	4,98	4,35	5,05	4,39	4,21	4,14	3,56	$4,38 \pm 0,19$
R_a^{TLO}	4,38	3,83	4,45	3,86	3,70	3,64	3,13	$3,86 \pm 0,17$

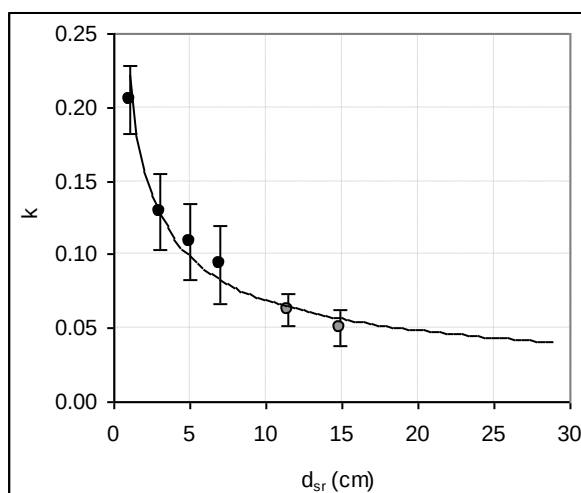
3.4.3. Dekompozicija mrtvog drva (R_h^{MD})

S obzirom na vrstu drveća nije utvrđena statistički značajna razlika u brzini razgradnje sitnog drvnog otpada ($F=2,05$; $df=3$; $p<0,1113$), no s obzirom na dimenzije uzorka izloženog procesu dekompozicije, kao što je i očekivano, najbrža razgradnja utvrđena je kod najsitnijih grančica ($d_{sr}<1$ cm i $l=5$ cm) ($F=18,67$; $df=3$; $p<0,0001$).

Tablica 3.22. Koeficijenti brzine razgradnje mrtvog drva za različite vrste drveća i dimenzije uzoraka. Prikazane su srednje vrijednosti i 1,96 standardne pogreške. Različitim slovima označene su statistički značajne razlike između uzoraka različitih dimenzija.

Vrsta drveća	Koeficijent brzine razlaganja (k)				Srednja vrijednost <i>k</i>
	Dimenzije uzorka, d _{sr} (cm)				
	<1	1-3	3-5	5-7	
N (ukupno za sve vrste)	48	33	24	24	
Hrast lužnjak	0,17 ± 0,03	0,17 ± 0,05	0,13 ± 0,09	0,07 ± 0,06	0,14 ± 0,05
Obični grab	0,20 ± 0,07	0,16 ± 0,05	0,12 ± 0,03	0,14 ± 0,06	0,16 ± 0,03
Crna joha	0,22 ± 0,10	0,07 ± 0,07	0,12 ± 0,07	0,09 ± 0,06	0,12 ± 0,07
Poljski jasen	0,23 ± 0,11	0,10 ± 0,10	0,06 ± 0,05	0,07 ± 0,08	0,12 ± 0,08
Srednja vrijednost <i>k</i>	0,21 ± 0,02 ^a	0,13 ± 0,03 ^b	0,11 ± 0,03 ^b	0,09 ± 0,03 ^b	0,13 ± 0,05

Na temelju podataka o koeficijentu brzine razgradnje sitnog drvnog otpada, utvrđenih pokusom dekompozicije, te podataka o brzini razgradnje krupnog drvnog otpada, preuzetih iz literature (MATSON I DR. 1987), izrađen je model ovisnosti koeficijenta brzine razgradnje o promjeru uzorka mrtvog drva ($F=569,98$; $df=2$; $p<0,0001$) (slika 3.26).



Slika 3.26. Model ovisnosti koeficijenta brzine razgradnje (k) o srednjem promjeru uzorka mrtvog drva. Prikazane su srednje vrijednosti i 1,96 standardne pogreške. Crne oznake – izmjereno u pokusu dekompozicije, sive oznake – preuzeto iz literature (MATTSON I DR. 1987, za vrste roda *Quercus*)

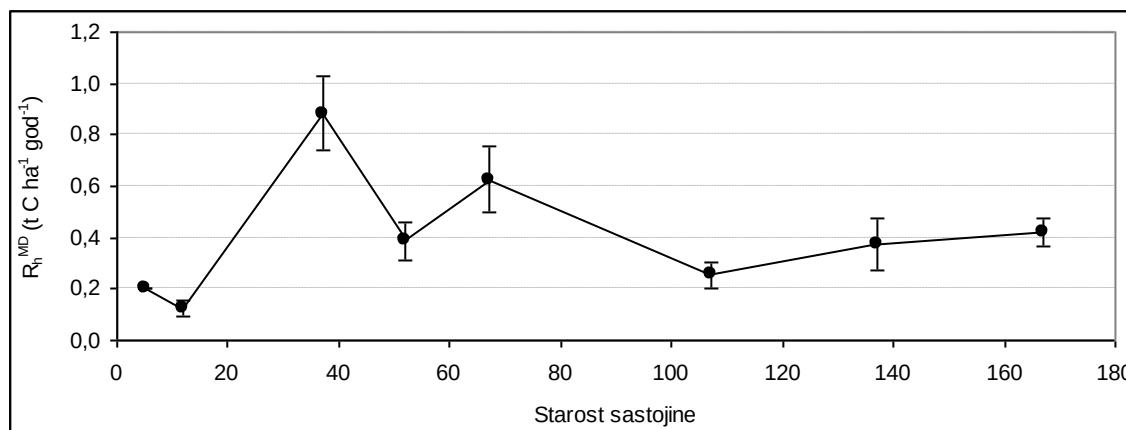
Tablica 3.23. Parametri modela ovisnosti koeficijenta brzine razgradnje (k) o srednjem promjeru uzorka mrtvog drva.

Model $k=a \times d_{sr}^b$ $R=0,9903$ $R^2=0,9807$ $N=6$						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	0,2084	0,0083	25,17	<0,0001	0,1854	0,2314
b	-0,4535	0,0323	-14,04	<0,0001	-0,5432	-0,3638

Za svaku sastojinu utvrđene su zalihe ugljika u nadzemnoj biomasi sušaca i panjeva i mrtvom drvnom otpadu ($d > 1$ cm) te su primjenom odgovarajućeg koeficijenta k , s obzirom na promjer uzorka mrtvog drva, procijenjene vrijednosti dekompozicije mrtvog drva u pojedinoj sastojini (tablica 3.24). Ukupna dekompozicija u pokusu kronosekvence kretala se od 0,12 do 0,88 t C ha⁻¹ god⁻¹. Najveće vrijednosti dekompozicije mrtvog drva utvrđene su u sastojini u dobi od 38 godina, a najmanje u sastojini staroj 13 godina (slika 3.27). Prosjek za cijelu kronosekvencu iznosio je $0,41 \pm 0,09$ t C ha⁻¹ god⁻¹.

Tablica 3.24. Zalihe ugljika u nadzemnoj biomasi mrtvog drva te dekompozicija za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

	Starost sastojine (god.)								
	5	13	38	53	68	108	138	168	Prosjek
C_n^{MD} (t C ha ⁻¹)	3,66	2,13 ± 0,43	8,43 ± 1,21	3,94 ± 0,66	7,80 ± 2,00	2,99 ± 0,85	4,57 ± 1,35	9,32 ± 2,51	5,36 ± 0,97
R_n^{MD} (t C ha ⁻¹ god ⁻¹)	0,21	0,12 ± 0,03	0,88 ± 0,14	0,39 ± 0,07	0,62 ± 0,13	0,25 ± 0,05	0,37 ± 0,10	0,42 ± 0,05	0,41 ± 0,09



Slika 3.27. Godišnja dekompozicija mrtvog drva u sastojinama različite dobi. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

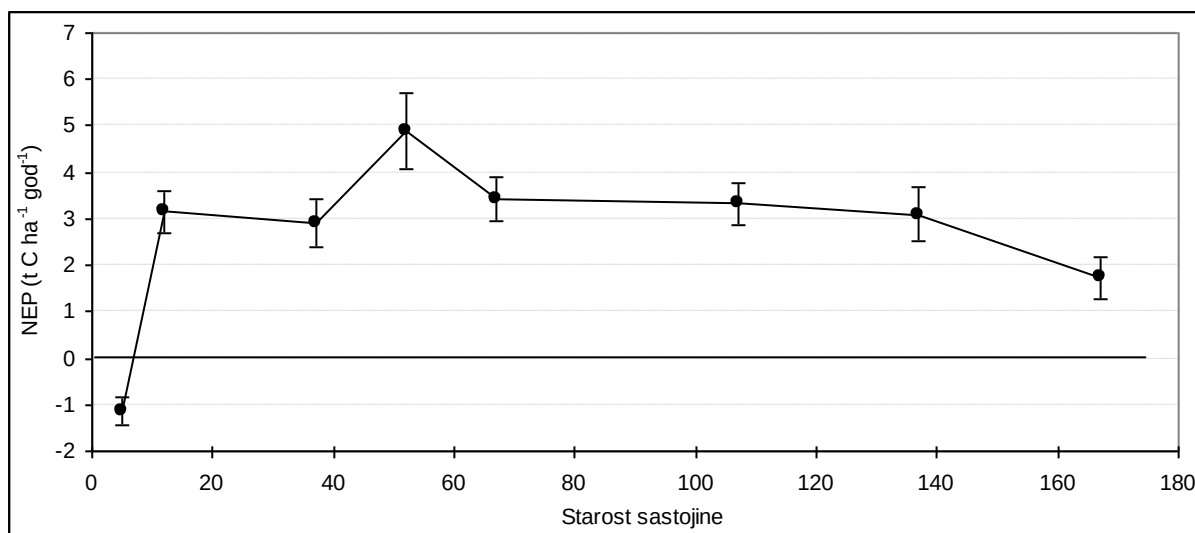
3.4.4. Godišnja bilanca ugljika ekosustava

Godišnja bilanca ugljika, odnosno neto produkcija ekosustava (NEP) hrasta lužnjaka iznosila je od -1,18 do 4,94 t C ha⁻¹ god⁻¹. Kod najmlađe sastojine u dobi od 5 godina

vrijednost *NEP*-a je negativna, dok su kod sastojina u dobi od 13 godini već dobivene pozitivne vrijednosti neto produkcije. Najveće vrijednosti *NEP*-a ostvarila je sastojina u dobi od 53 godine. Kod najstarije sastojine u dobi od 168 godina uočeno je polako smanjivanje *NEP*-a, no produkcija ekosustava je i dalje pozitivna.

Tablica 3.25. Glavni tokovi i bilanca ugljika u sastojinama različite starosti.

t C ha ⁻¹ god ⁻¹	Starost sastojine (god.)							
	5	13	38	53	68	108	138	168
NPP	3,41 ± 0,25	7,59 ± 0,43	8,14 ± 0,49	9,71 ± 0,79	8,43 ± 0,43	7,97 ± 0,43	7,97 ± 0,55	6,56 ± 0,42
R _h ^{TLO}	4,38 ± 0,19							
R _h ^{MD}	0,21	0,12 ± 0,03	0,88 ± 0,14	0,39 ± 0,07	0,62 ± 0,13	0,25 ± 0,05	0,37 ± 0,10	0,42 ± 0,05
NEP	-1,18 ± 0,31	3,09 ± 0,47	2,88 ± 0,54	4,94 ± 0,82	3,43 ± 0,49	3,34 ± 0,48	3,22 ± 0,59	1,76 ± 0,46

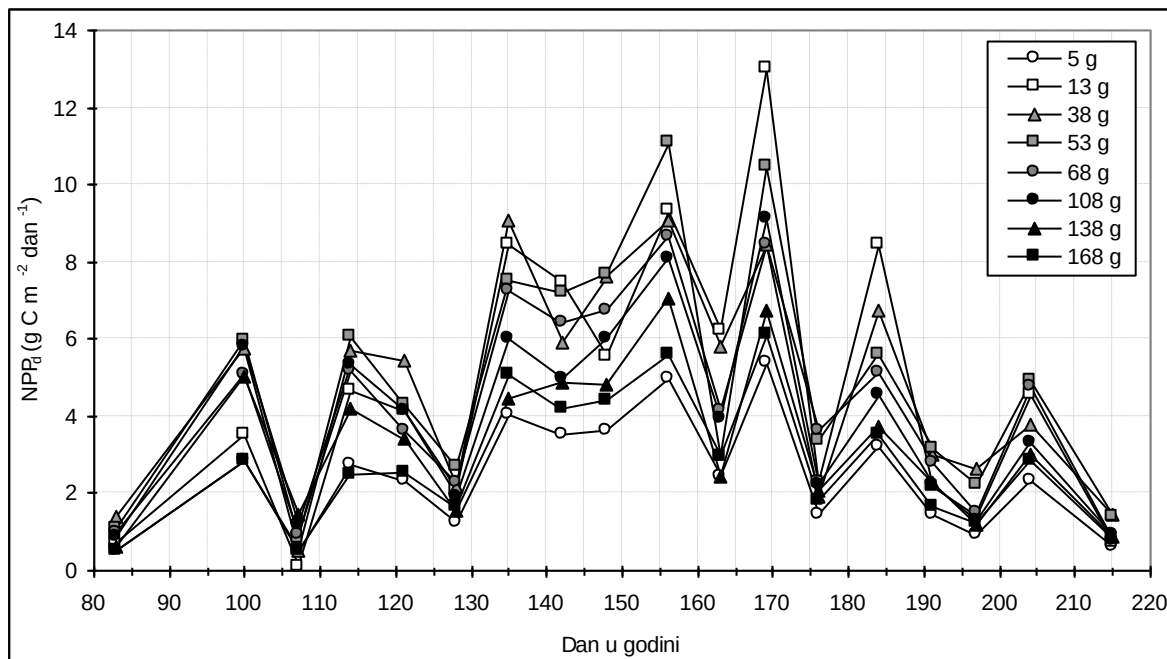


Slika 3.28. Godišnje vrijednosti bilance ugljika (*NEP*) za sastojine različite starosti. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

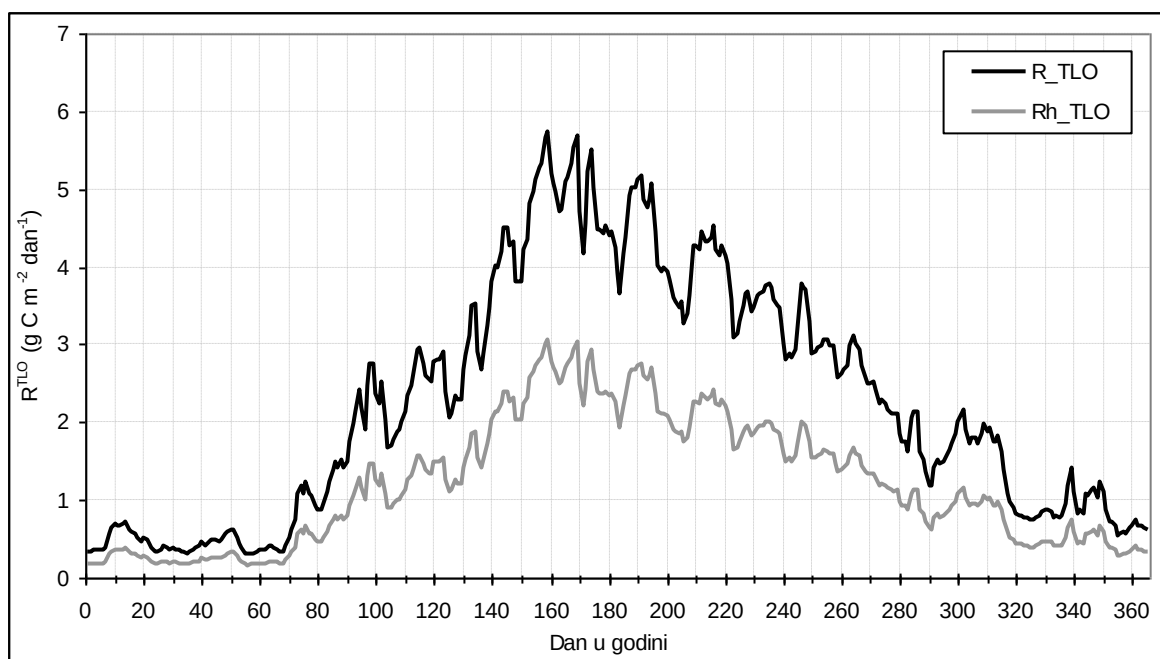
3.4.5. Unutar-sezonska dinamika tokova i bilance ugljika

Prema shematskom prikazu obračuna *NPP*-a tijekom vegetacijskog razdoblja (poglavlje 2.3.1 d, slika 2.12), vidi se da je unutar-sezonska dinamika *NPP*-a do početka 7. mjeseca jednaka produkciji drvene biomase (*NPP_d*). Dinamika *NPP_d* tijekom vegetacijskog razdoblja prikazana je na slici 3.30. Najveće srednje dnevne vrijednosti *NPP_d*-a, oko 8,5 – 13 g C m⁻² dan⁻¹, zabilježene su u razdoblju od 135. do 169. dana u godini (15.5. – 18.6.), a ostvarile su ga sastojine u dobi od 13 do 108 godina. U istom razdoblju najmlađa sastojina (5 godina) i dvije najstarije (138 i 168 godina) ostvarile su srednje dnevne vrijednosti *NPP_d*-a oko 5 – 7 g C m⁻² dan⁻¹. Najniže srednje dnevne vrijednosti *NPP_d*-a, oko 0,1 – 0,9 g C m⁻²

dan^{-1} , kod svih sastojina zabilježene su na početku vegetacijskog razdoblja, oko 83. i 107. dana u godini, te u ljeto (oko 215. dana u godini).



Slika 3.29. Dinamika neto primarne produkcije drvene biomase sastojina različite dobi tijekom vegetacijskog razdoblja 2011. godine.

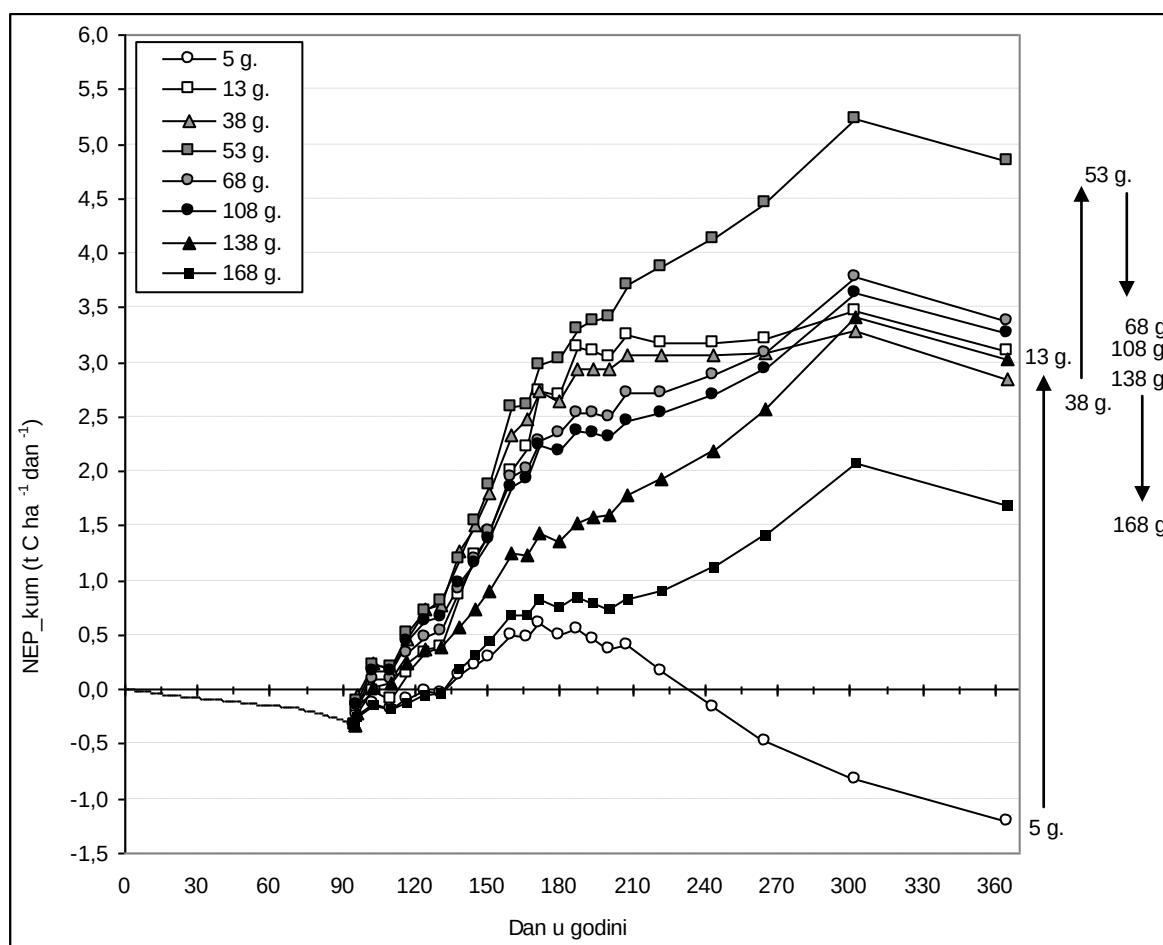


Slika 3.30. Modelirana ukupna i heterotrofna respiracija tla tijekom 2011. godine (1.1. – 31.12.), prosjek za cijelu kronosekvencu.

Dinamika respiracije tla tijekom godine odgovara dinamici temperature tla, sa maksimalnim vrijednostima zabilježenim u ljeto, a najnižim vrijednostima u zimskim mjesecima. Najveće prosječne dnevne vrijednosti ukupne i heterotrofne respiracije tla uočene

su u razdoblju od 159. do 174. dana u godini (8. – 23.6.), a iznosile su iznad 5,5, odnosno 2,8 g C m⁻² dan⁻¹, dok su najniže prosječne dnevne vrijednosti tijekom zime iznosile 0,3 odnosno 0,15 g C m⁻² dan⁻¹.

Promatrajući unutar-sezonsku bilancu ugljika (slika 3.31) mogu se primijetiti određene razlike u dinamici *NEP*-a između sastojina različite starosti. Tijekom mirovanja vegetacije (do cca. 90. dana u godini) *NEP* je negativna kao posljedica respiracije tla. Tijekom vegetacijskog razdoblja većina sastojina (13 – 138 godina) vrlo rano ostvaruje pozitivne vrijednosti *NEP*-a, već nakon 110. dana u godini (20. travnja). Vrijednosti *NEP*-a kod najmlađe i najstarije sastojine (13 i 168 godina) postaju pozitivne nešto kasnije, nakon 117. dana u godini. Za razliku od ostalih sastojina, kod najmlađe sastojine (5 godina) se u jesen (nakon 230. dana u godini) ponovno uočavaju negativne vrijednosti *NEP*-a. Pad vrijednosti *NEP*-a kod svih sastojina na kraju godine posljedica je završetka neto primarne produkcije, dok se proces respiracije tla nastavlja.



Slika 3.31. Unutar-sezonska dinamika neto produkcije ekosustava za sastojine različite starosti.

* * *

Godišnja i unutar-sezonska bilanca ugljika (*NEP*) prikazane u poglavljima 3.4.4. i 3.4.5. u obračunu ne uključuju gubitke ugljika sječom (CW^{SJ}). U pokusu kronosekvence svaka sastojina predstavlja šumu u određenoj dobi, odnosno, kronosekvencu predstavlja model šume kroz čitav njezin životni vijek. U tom kontekstu, najznačajniji gubici ugljika sječom događaju se jednom u životnom vijeku šume, na kraju ophodnje (oplodne sječe). Budući da se pokusom kronosekvence nastojalo dobiti uvid u dinamiku zaliha, tokova i bilance ugljika (u ovom slučaju *NEP*) kroz čitav životni vijek šume hrasta lužnjaka, sve promatrane varijable svedene su na prosječne godišnje vrijednosti, bez uključivanja podataka o sječama, jer na godišnjoj razini to ne bi imalo smisla. Stoga je utjecaj sječe potrebno uključiti u obračun konačne bilance ugljika (*NECB*) na neki drugi način.

Kada se promatra stvarna šuma, koja predstavlja zbroj jednodobnih sastojina istog uređajnog razreda na nekoj površini, sječa se na razini pojedine sastojine obavlja u razdobljima od 10 godina, a na razini čitavog uređajnog razreda svake godine i pritom predstavlja značajan gubitak ugljika. S obzirom na dužinu plansko-gospodarskog polurazdoblja od 10 godina, tijekom kojeg se provede njega svih mladih, srednjodobnih i dozrijevajućih sastojina te obnova svih zrelih sastojina, uzeto je 10-godišnje razdoblje za određivanje glavnih tokova ugljika i izračun bilance ugljika (*NECB*). Takav pristup primijenjen je u sljedećem poglavlju.

3.5. ZALIHE I BILANCA UGLJIKA U UREĐAJNOM RAZREDU HRAST LUŽNJAK IZ SJEMENA U GOSPODARSKOJ JEDINICI „JASTREBARSKI LUGOVI“

3.5.1. Modeli za procjenu zaliha i tokova ugljika

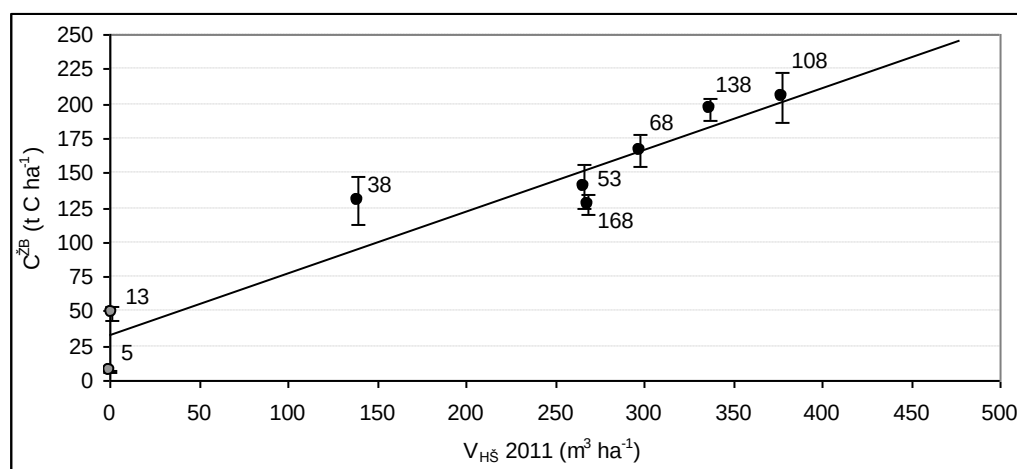
Podaci o starosti sastojina, drvnoj zalihi, prirastu i sječi, preuzeti iz važeće O.G. (HŠ D.O.O. 2003), zajedno s izvedenim varijablama potrebnim za izradu modela, prikazani u tablici 3.26.

Na temelju prikupljenih podataka izrađeni su modeli za procjenu zaliha ugljika u živoj biomasi (tablica 3.27), u mrtvom drvu (tablica 3.28), organskom horizontu (tablica 3.29) i mineralnom dijelu tla (tablica 3.30) te model za procjenu neto primarne produkcije (tablica 3.31).

Tablica 3.26. Podaci preuzeti iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003) za odabrane odsjeke koji čine pokus kronosekvence te izvedene varijable potrebne za izradu modela za procjenu zaliha i tokova ugljika odabranog uređajnog razreda (N=8).

Odjel/odsjek	2A	3B	37A	25A	14A	4B	8B	37B	Prosjeak ± standardna pogreška
Starost sastojine (O.G.)	150	5	30	45	60	100	130	160	
Starost sastojine (2011. g.)	5	13	38	53	68	108	138	168	
V_{HS} O.G. ($m^3 ha^{-1}$)	-	-	103,1	219,6	245,4	348,4	312,3	257,7	
iV_{HS}	-	-	6,0	9,1	7,0	6,0	4,8	3,6	
V_{SJ} ($m^3 ha^{-1}$)	-	-	12,0	26,5	3,5	18,8	13,1	18,5	
V_{HS} 2011 ($m^3 ha^{-1}$)	0	1,1*	139,1	265,9	297,9	377,6	337,6	268,0	210,9 ± 52,0
V_{HS} 2011 / Starost 2011	0	0,1	3,7	5,0	4,4	3,5	2,4	1,6	2,6 ± 0,7
C^{ZB} ($t C ha^{-1}$)	7,2 ± 0,6	48,6 ± 4,8	129,9 ± 17,3	140,6 ± 15,8	166,1 ± 11,7	204,9 ± 18,1	196,6 ± 7,8	126,9 ± 7,3	127,6 ± 24,3
$C^{MD} : C^{ZB}$ (%)	397,22 ± 33,07	56,17 ± 9,96	16,78 ± 2,61	9,39 ± 1,48	7,16 ± 1,44	4,34 ± 0,64	7,99 ± 1,06	13,00 ± 3,65	64,01 ± 47,97
$C^{ORH} : C^{ZB}$ (%)	68,06 ± 15,21	8,44 ± 1,46	3,62 ± 0,63	4,41 ± 0,69	3,43 ± 0,38	3,66 ± 0,65	5,24 ± 0,52	4,96 ± 0,76	12,73 ± 7,92
$C^{M40} : C^{ZB}$ (%)	875,00 ± 90,28	180,04 ± 20,65	85,53 ± 11,92	62,16 ± 7,92	55,57 ± 5,95	35,14 ± 3,57	57,07 ± 2,96	75,18 ± 5,75	178,21 ± 100,75
NPP	-	-	8,14 ± 0,49	9,70 ± 0,79	8,44 ± 0,43	7,97 ± 0,43	7,97 ± 0,55	6,56 ± 0,42	8,13 ± 0,41

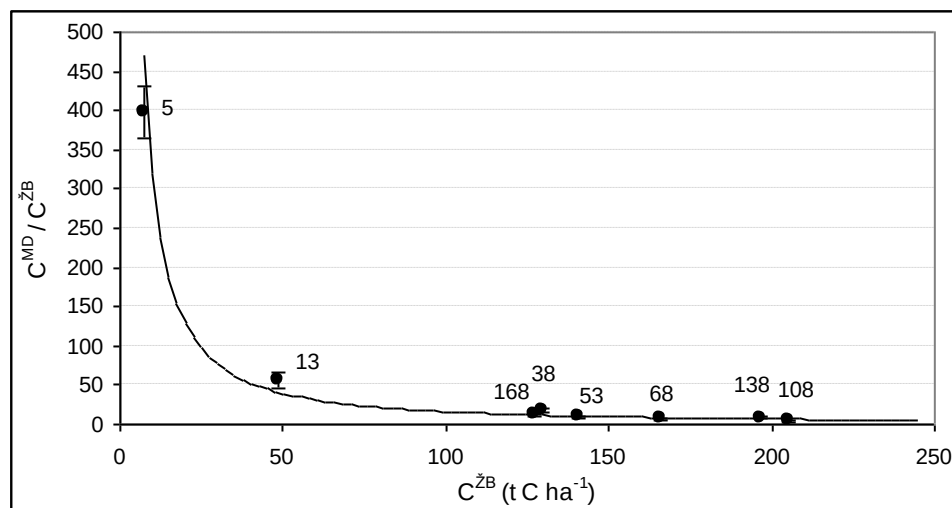
* Procijenjena vrijednost na temelju izmjere na inventurnim ploham, volumen krupnog drva pri taksacijskoj granici 10 cm.



Slika 3.32. Model ovisnosti zaliha ugljika u živoj biomasi o drvnjoj zalihi krupnog drva preuzetaj iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003). Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške

Tablica 3.27. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti zaliha ugljika u živoj biomasi o drvnjoj zalihi krupnog drva preuzetaj iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003).

$C^{ZB} = a \times (V_{HS} 2011) + b$ $R = 0,9526$ $R^2 = 0,9074$ $N=8$ ($F=58,82$; $df=1$; $p<0,0003$)						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	0,4457	0,0581	7,67	0,0003	0,3035	0,5879
b	33,6031	14,6318	2,30	0,0614	-2,1997	69,4059



Slika 3.33. Model ovisnosti omjera zaliha ugljika u mrtvom drvu i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi. Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške

Tablica 3.28. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti omjera zaliha ugljika u mrtvom drvu i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi.

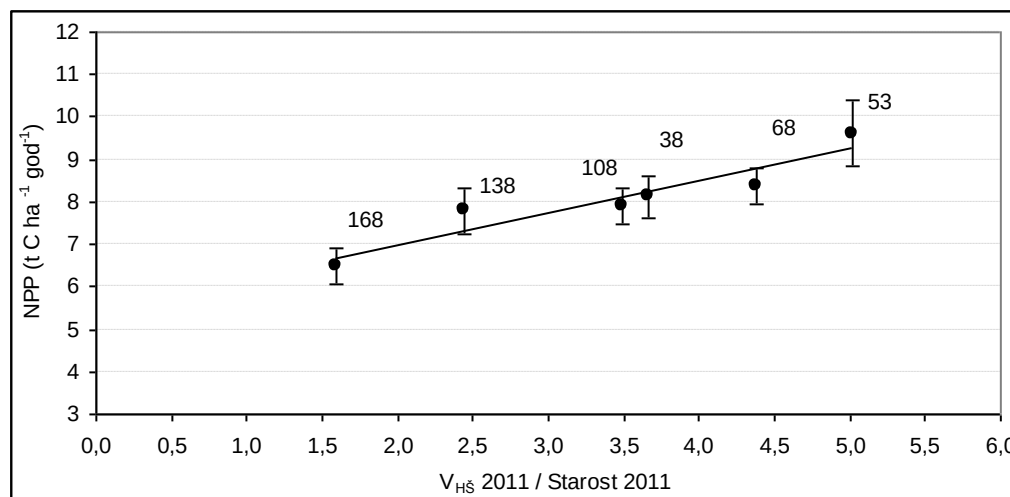
$C^{MD}/C^{ZB} = a \times (C^{ZB})^b$ $R = 0,9993 \ R^2 = 0,9987 \ N=8 \ (F=2850,08; df=2; p<0,0001)$						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	3567,344	291,895	12,22	<0,001	2853,103	4281,586
b	-1,111	0,040	-27,82	<0,001	-1,209	-1,014

Tablica 3.29. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti omjera zaliha ugljika u organskom horizontu i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi.

$C^{ORH}/C^{ZB} = a \times (C^{ZB})^b$ $R = 0,9981 \ R^2 = 0,9962 \ N=8 \ (F=1072,31; df=2; p<0,0001)$						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	461,929	45,257	10,21	<0,001	351,190	572,669
b	-0,971	0,046	-20,99	<0,001	-1,084	-0,858

Tablica 3.30. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti omjera zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla i živoj biomasi o zaliham ugljika u živoj biomasi.

$C^{M40}/C^{ZB} = a \times (C^{ZB})^b$ $R = 0,9995 \ R^2 = 0,9991 \ N=8 \ (F=4714,25; df=2; p<0,0001)$						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	4691,452	172,242	27,24	<0,001	4269,991	5112,912
b	-0,850	0,016	-51,56	<0,001	-0,891	-0,810



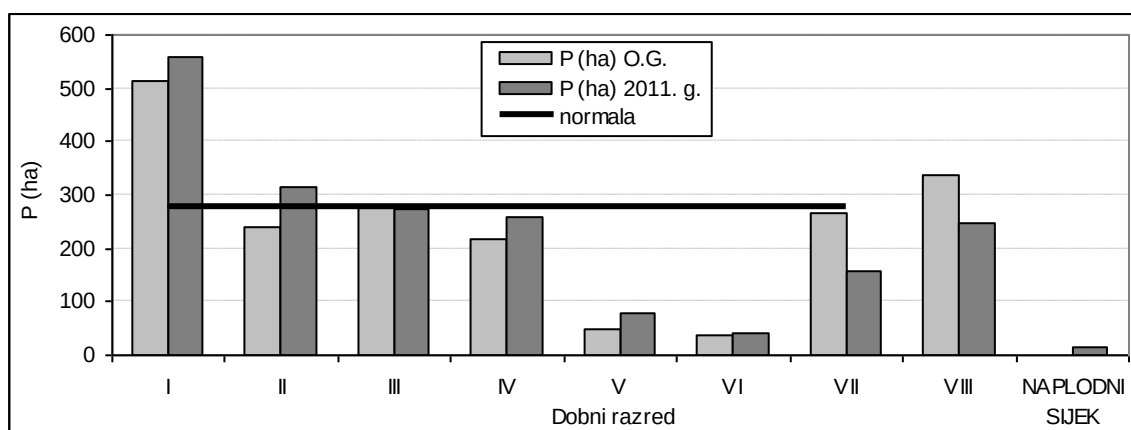
Slika 3.34. Model ovisnosti neto primarne produkcije o omjeru drvene zalihe krupnog drva i starosti sastojine preuzetih iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003). Prikazane su srednje vrijednosti i njihove standardne pogreške.

Tablica 3.31. Rezultati analize varijance i značajnost parametara modela ovisnosti neto primarne produkcije o omjeru drvene zalihe krupnog drva i starosti sastojine preuzetih iz Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003).

$NPP = a \times (V_{H\dot{S}} 2011 / Starost 2011) + b$ $R = 0,9154 \quad R^2 = 0,8380 \quad N=6 \quad (F=20,68; df=1; p<0,0104)$						
Parametar	Vrijednost	Standardna pogreška	t-vrijednost	p-vrijednost	Donja granica pouzdanosti	Gornja granica pouzdanosti
a	0,7342	0,1614	4,55	0,0104	0,2860	1,1823
b	5,6094	0,5843	9,60	0,0007	3,9870	7,2317

3.5.2. Dobna struktura odabranog uređajnog razreda

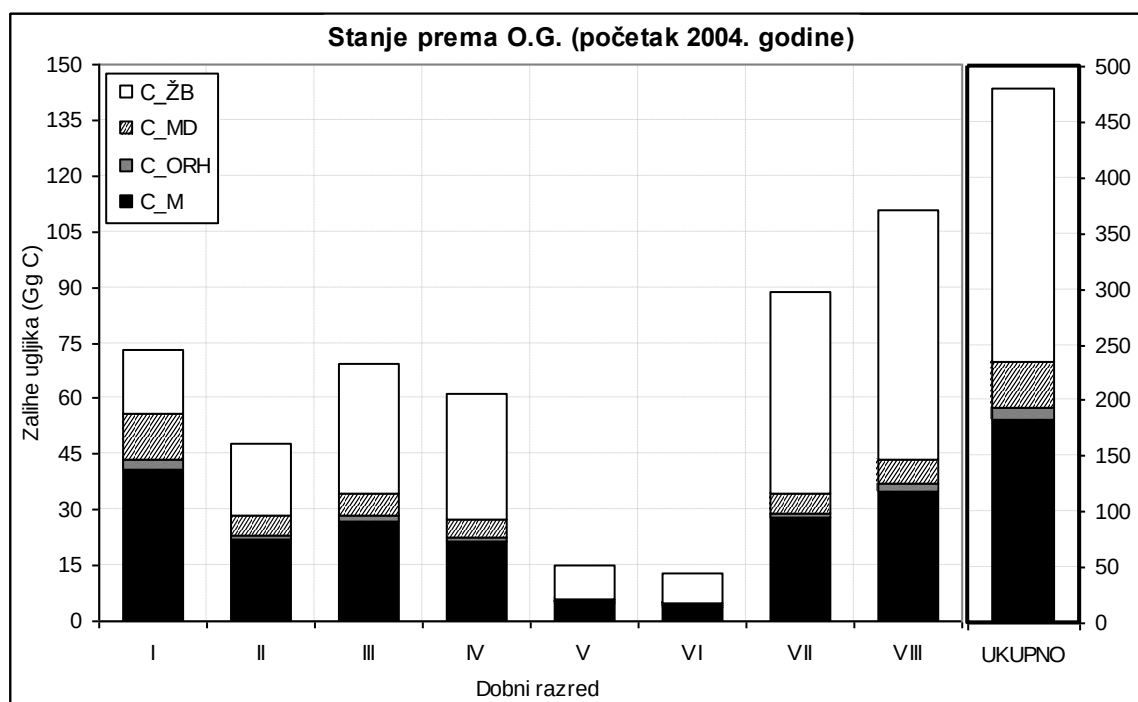
Ukupna površina uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“ iznosi 1945,58 ha. Dobna struktura odabranog uređajnog razreda je narušena, odnosno značajno odstupa od normalne dobne strukture (slika 3.35). Veliki udio u površini čine sastojine I. dobnog razreda te sastojine starije od 120 godina (VII.+VIII. dobnog razred). U odnosu na normalu od 278 ha po dobnom razredu, mlade sastojine imaju čak 2 puta veću površinu. Sastojine II., III. i IV. dobnog razreda približno odgovaraju normalni, dok sastojine V. i VI. dobnog razreda čine tek oko 15 – 30% normalne površine. Udio sastojina starijih od 120 godina iznosi oko 20% ukupne površine.



Slika 3.35. Dobna struktura za uređajni razred hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“; stanje prema O.G. (početak 2004. godine) (HŠ D.O.O.2003) te procjena za kraj 2011. godine.

3.5.3. Stvarno stanje zaliha i bilance ugljika u razdoblju od 2004. do 2013. godine

Na temelju izrađenih modela i njihovih parametara procijenjene su zalihe ugljika u živoj biomasi, mrtvom drvu, organskom horizontu i mineralnom dijelu tla za sve odsjeke odabranog uređajnog razreda te su sumirane po dobnim razredima (slika 3.36). Ukupne zalihe ugljika u uređajnom razredu hrasta lužnjaka iz sjemena na početku 2004. godine iznosile su 479,6 Gg C, od čega je 50,9% bilo pohranjeno u živoj biomasi, 8,7% u mrtvom drvu, 2,1% u organskom horizontu i 38,2% u mineralnom dijelu tla.



Slika 3.36. Zalihe ugljika uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“ razvrstane po glavnim šumskim sastavnicama.

Tokovi ugljika (NPP i CW^{SJ}) obračunati su za svaki odsjek odabranog uređajnog razreda, zatim su sumirani po dobnim razredima od I. do VIII. (za stanje na početku 2004. godine) te je procijenjena bilanca ugljika za cijeli uređajni razred za razdoblje trajanja važeće Osnove gospodarenja (2004. – 2013. godine).

Neto primarna produkcija pojedinog odsjeka, gdje je provedena prorjeda, za 10-godišnje razdoblje ($Gg\ C\ 10god^{-1}$) procijenjena je na sljedeći način:

$$NPP_{10-GOD.} = \left(a \times \frac{V_{O.G.} + 5 \times iV}{Starost_{O.G.} + 5} + b \right) \times P_{ODS} \times 10 / 1000 \quad (3.5)$$

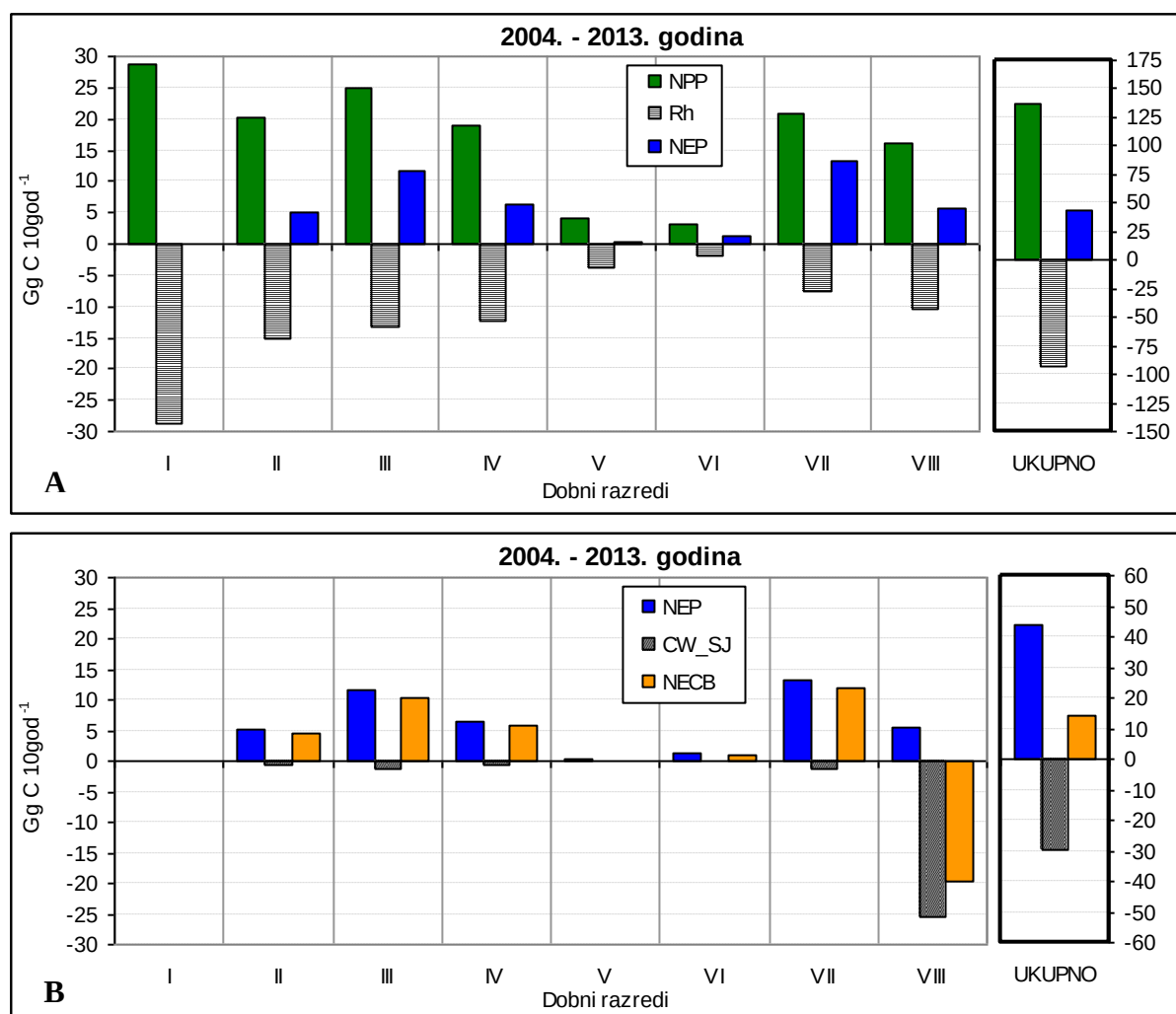
gdje je $V_{O.G.}$ – drvena zaliha pojedinog odsjeka preuzeta iz O.G. (HŠ D.O.O.2003) ($m^3\ ha^{-1}$); iV – ukupni volumni prirast odsjeka ($m^3\ ha^{-1}\ god^{-1}$); P_{ODS} – površina odsjeka (ha); a i b – parametri modela (vidi tablicu 3.31).

Gubitak ugljika sječom za 10-godišnje razdoblje ($Gg\ C\ 10god^{-1}$) procijenjen je na temelju podataka o užitoj drvnoj zalihi, na sljedeći način:

$$CW^{SJ}_{10-GOD.} = \sum (V_{UŽ} \times 0,9 \times \rho \times CF_d) / 1000 \quad (3.6)$$

gdje je $V_{UŽ}$ – užita drvena zaliha za pojedinu vrstu drveća u pojedinom odsjeku, preuzeta iz O.G. (HŠ D.O.O.2003) (m^3); 0,9 – udio otpremljene posječene drvene zalihe u užitoj drvnoj zalihi; ρ – gustoća drva za pojedine vrste drveća ($t\ m^{-3}$) (vidi tablicu 2.8); CF_d – udio ugljika u masi suhe tvari drva (0,5).

Na kraju 2012. godine utvrđeno je da su zahvati prorjede provedeni na oko 98% predviđene površine dok su oplodni sijekovi provedeni u 16 od ukupno 18 sastojina predviđenih za obnovu. Za sastojine u kojima sječa nije provedena, obavljena je njena procjena prema podacima o propisanom etatu u razdoblju I/1. U sastojinama gdje je provedena obnova vrijednosti NPP su obračunate samo za pola 10-godišnjeg razdoblja ($NPP \times 0,5$). Za heterotrofnu respiraciju tla i dekompoziciju mrtvog drva korištene su prosječne vrijednosti utvrđene u pokusu kronosekvence; $R_h^{TLO} = 4,38 \pm 0,19\ t\ C\ ha^{-1}\ god^{-1}$; $R_h^{MD} = 0,41 \pm 0,09\ t\ C\ ha^{-1}\ god^{-1}$. Suma ovih tokova je ukupna heterotrofna respiracija (R_h), koja je također obračunata za 10-godišnje razdoblje i za ukupnu površinu svakog odsjeka odabranog uređajnog razreda, te izražena u $Gg\ C\ 10god^{-1}$. Bilanca ugljika procijenjena je kao razlika neto primarne produkcije te heterotrofne respiracije i gubitaka ugljika sječom.



Slika 3.37. Glavni tokovi i bilance ugljika uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena u g.j. „Jastrebarski lugovi“. A) Neto primarna produkcija, heterotrofna respiracija i neto produkcija ekosustava i B) Neto produkcija ekosustava, gubitak ugljika sječom i neto bilanca ugljika ekosustava.

Neto produkcija ekosustava u razdoblju 2004. – 2013. godine pozitivna je u svim dobnim razredima, a ukupno na razini čitavog uređajnog razreda površine 1945,58 ha iznosi 43,8 Gg C 10god⁻¹ (slika 3.37A). Za isto razdoblje procijenjena je neto primarna produkcija od 137,0 Gg C 10god⁻¹ te heterotrofna respiracija od 93,2 Gg C 10god⁻¹. Na razini čitavog uređajnog razreda gubitak ugljika sječom iznosi 29,6 Gg C 10god⁻¹, a u VIII. dobnom razredu predstavlja značajan negativan tok ugljika od čak 25,4 Gg C 10god⁻¹. U ostalim dobnim razredima vrijednosti ovog toka ugljika su vrlo niske, u prosjeku svega 0,6 Gg C 10god⁻¹. Unatoč značajnom negativnom toku ugljika u VIII. dobnom razredu, ukupna bilanca ugljika uređajnog razreda u promatranom razdoblju je pozitivna i iznosi 14,2 Gg C 10god⁻¹ (slika 3.37B).

3.5.4. Projekcije za razdoblje od 2004. do 2053. godine

Primjenom 4 različita scenarija obnove za pet budućih 10-godišnjih razdoblja utvrđene su razlike u dobivenim dobnim strukturama (slika 3.38), posječenju drvnj zalihi (slika 3.39) i kumulativnim vrijednostima bilanci ugljika (slika 3.40), a sve kao posljedica razlika u propisanim površinama za obnovu (tablica 3.32). U tablici 3.32 iskazane su površine predviđene za obnovu i potencijalno posječena drvena zaliha prema 4 različita scenarija za pojedino 10-godišnje projekcijsko razdoblje.

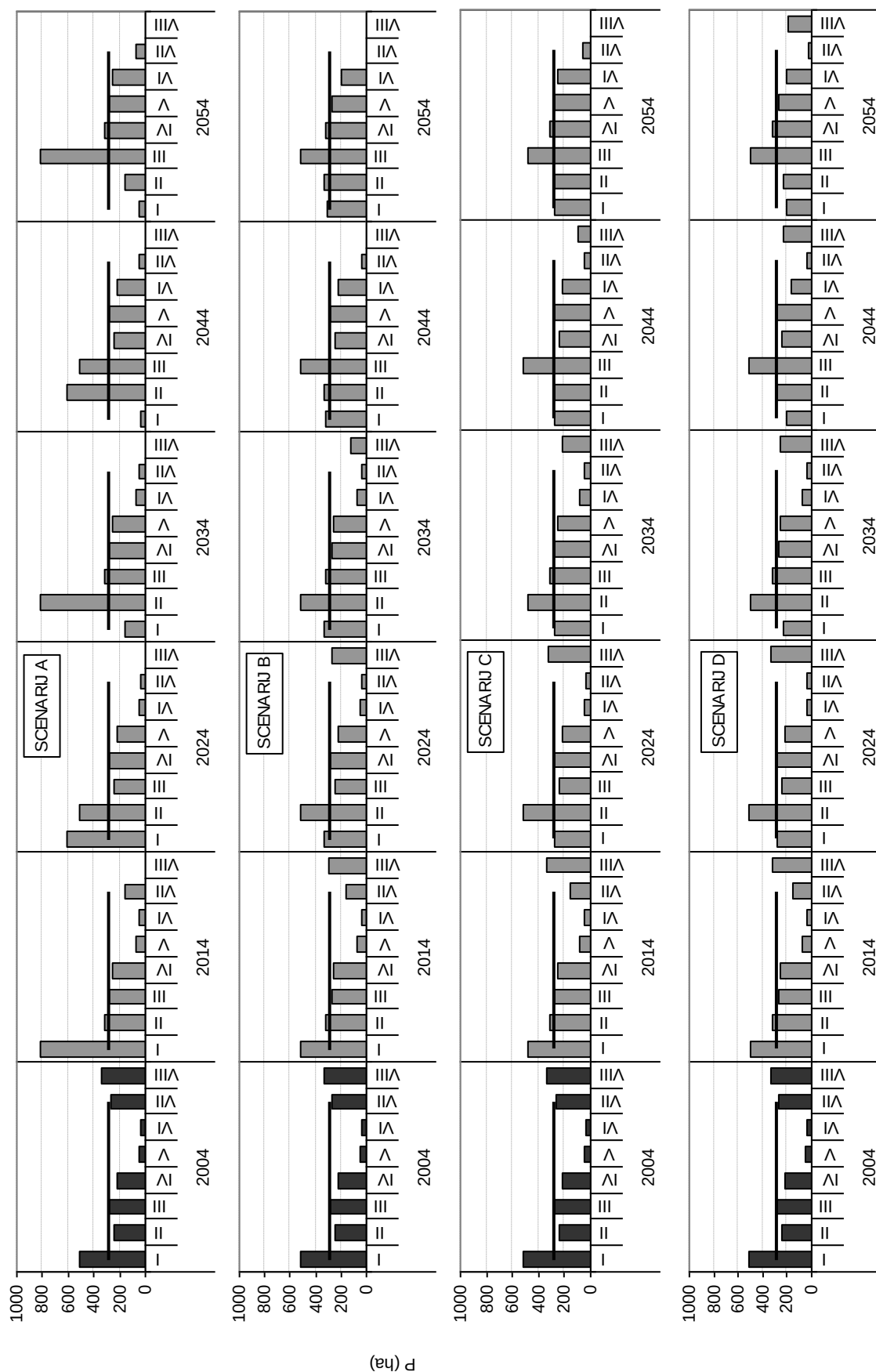
Tablica 3.32. Površine predviđene za obnovu i potencijalno posječena drvena zaliha za 4 različita scenarija.

Buduća razdoblja	SCENARIJ A		SCENARIJ B		SCENARIJ C		SCENARIJ D		CV _{Vsj} (%)
	P (ha)	V ^{SJ} (1000 m ³)	P (ha)	V ^{SJ} (1000 m ³)	P (ha)	V ^{SJ} (1000 m ³)	P (ha)	V ^{SJ} (1000 m ³)	
2004. – 2013.	474,40	201		100		90	161,31	94	44,0
2014. – 2023.	132,25	92	166,76	103	138,97	91	128,80	87	7,3
2024. – 2033.	25,57	84	±	130	±	121	103,80	113	17,8
2034. – 2043.	13,00	73	10%	117	10%	115	91,35	94	20,7
2044. – 2053.	29,74	84		122		123	107,65	110	16,5
UKUPNO	674,96	534	833,80	572	694,85	540	592,91	498	5,7

Prema **scenariju A** dobna struktura ostaje narušena do kraja 50-godišnjeg razdoblja, sa najvećim udjelom III. dobnog razreda i najmanjim udjelom I., II. i VII. dobnog razreda. Posječena drvena zaliha u prvom 10-godišnjem razdoblju značajno je veća od ostalih scenarija, a rezultat je negativna bilanca ugljika. U drugom 10-godišnjem razdoblju V^{SJ} približno je jednaka kao i kod ostalih scenarija, no u naredna tri razdoblja znatno je manja od ostalih. Posljedica tako malih zahvata sječe je visoka vrijednost bilance ugljika koja se ostvaruje do kraja 50-godišnjeg razdoblja.

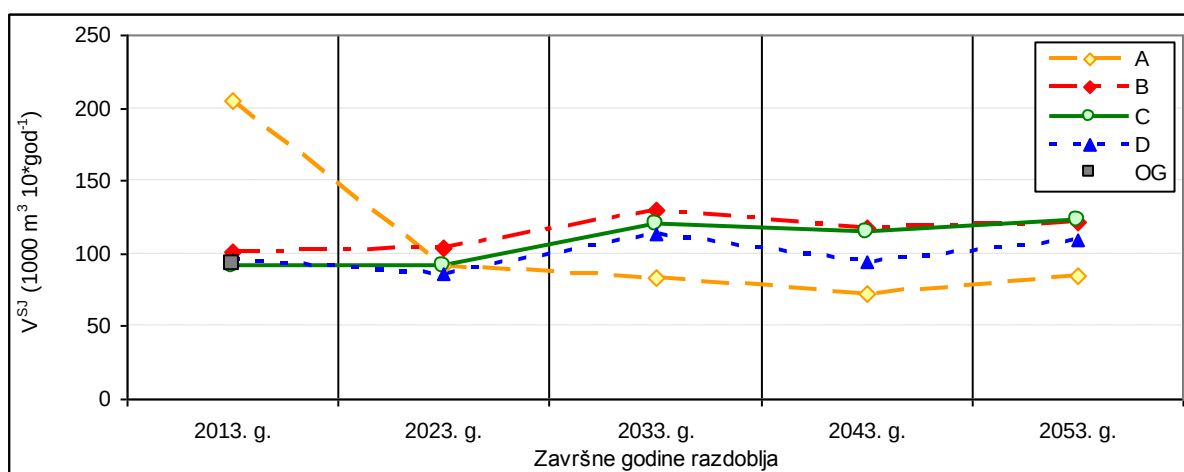
Prema **scenariju B** dobna struktura se do kraja promatranog razdoblja približava normalni, sa nešto većim udjelom III. dobnog razreda, ali bez sastojina starijih od 120 godina. Posječena drvena zaliha je uglavnom veća nego kod ostalih scenarija (osim scenarija A u prvom razdoblju). Bilanca ugljika je pozitivna u cijelom promatranom razdoblju, ali konačna kumulativna vrijednost je najniža u usporedbi sa drugim scenarijima.

Prema **scenariju C** dobna struktura se do kraja promatranog razdoblja približava normalni sa nešto većim udjelom III. dobnog razreda (slično kao i kod scenarija B), ali i sa udjelom, iako malim, sastojina VII. dobnog razreda. Posječena drvena zaliha je vrlo bliska onoj ostvarenoj prema scenariju B, iako u prva tri razdoblja nešto niža. Bilanca ugljika je pozitivna u cijelom promatranom razdoblju i po konačnoj kumulativnoj vrijednosti nalazi se između ostalih scenarija; viša je od scenarija B, a niža od scenarija A i D.

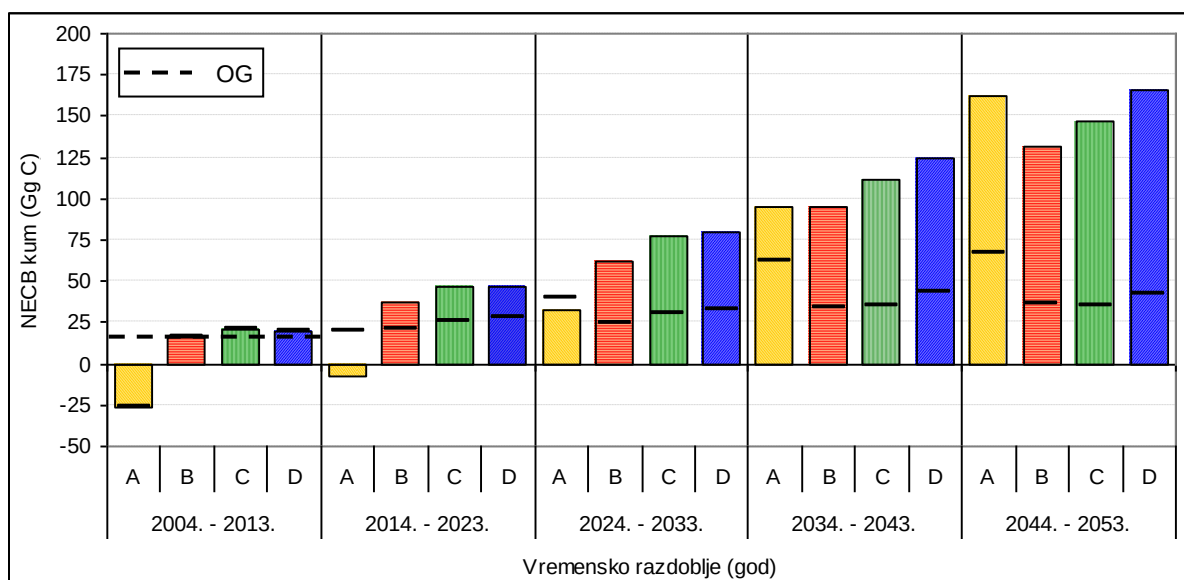


Slika 3.38. Razvoj dobne strukture uređajnog razreda hrast lužnjak iz sjemena, od 2004. do 2053. godine, prema 4 scenarija obnove.

Prema **scenariju D** dobna struktura se do kraja promatranog razdoblja približava normalni, ali sa nešto većim udjelom III. i VIII. dobnog razreda. Posječena drvena zaliha je u prosjeku viša od scenarija A, ali je niža od scenarija B i C. Bilanca ugljika je pozitivna u cijelom promatranom razdoblju i na kraju 50-godišnjeg razdoblja najviša je u odnosu na ostale scenarije.



Slika 3.39. Stvarna posječena drvena zaliha prema važećoj Osnovi gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003) te prema 4 različita scenarija obnove, u pet 10-godišnjih razdoblja.



Slika 3.40. Kumulativna bilanca ugljika za protekla razdoblja (stupci) i prosječna 10-godišnja bilanca ugljika u određenom razdoblju (pune crte), za uređajni razred hrast lužnjak iz sjemena s obzirom na 4 različita scenarija obnove (A, B, C i D) i za pet 10-godišnjih razdoblja. Isprekidana crta – stvarna bilanca ugljika obračunata prema podacima iz važeće Osnove gospodarenja (HŠ D.O.O. 2003)

4. RASPRAVA

4.1. STRUKTURA I MIKROSTANIŠNI UVJETI U SASTOJINAMA KRONOSEKVENCE

Kronosekvenca je poslužila kao model šumskog ekosustava koji je omogućio praćenje dinamike zaliha i tokova ugljika kroz čitav životni vijek šume hrasta lužnjaka. Glavna pretpostavka koju je bilo potrebno zadovoljiti prilikom postavljanja pokusa kronosekvence je ta da se sastojine razlikuju samo po dobi, dok su razlike u ostalim sastojinskim i stanišnim karakteristikama svedene na minimum. U nizinskim šumama Pokupskog bazena, gdje je provedeno ovo istraživanje, hrast lužnjak kao glavna vrsta dolazi u nekoliko šumskih zajednica koje se značajno razlikuju s obzirom na mikroreljefne karakteristike (VUKELIĆ I RAUŠ 1998, VUKELIĆ 2012). Mikrostanišni uvjeti, kao što su vrsta i tekstura tla te temperatura i vlaga tla, imaju velik utjecaj na procese razgradnje mrtve organske tvari na i u tlu (ĆIRIĆ 1984, LANDSBERG I GOWER 1997) i time direktno utječu na zalihe i tokove ugljika u dotičnoj sastojini (LUO I ZHOU 2006). Iz tog razloga, za pokus kronosekvence odabrane su sastojine unutar jedinstvene šumske zajednice - hrast lužnjak s velikom žutilovkom (*Genisto elaeate - Quercetum roboris* Ht. 1938). Izuzetak je sastojina IV dobnog razreda koja pripada zajednici hrasta lužnjaka i običnoga graba (*Carpino betuli - Quercetum roboris*) (tablica 2.3).

Sastojine kronosekvence se razlikuju s obzirom na bonitet što može utjecati na procjenu dinamike razvoja zaliha i tokova ugljika tijekom životnog vijeka šumskog ekosustava (PEICHL I DR. 2010). No, analizom podataka iz O.G. (HŠ D.O.O 2003) utvrđen je izrazito neravnomjeran raspored dobnih razreda po bonitetima (slika 2.1.) što je onemogućilo da se pokus kronosekvence postavi unutar istog boniteta. Jedno od mogućih objašnjenja za uočeno opadanja boniteta sa starosti u odabranom uređajnom razredu može biti provođenje gospodarenja i to na način da su jače prorjede tijekom godina kod starijih sastojina rezultirale manjom gustoćom stabala, većim promjerima i manjim visinama. Također, uočeni bolji boniteti kod mladih sastojina mogu biti posljedica promjenjenih okolišnih uvjeta u posljednjih 60-ak godina (povećanje atmosferskog CO₂, depozicije N) koji su pogodovali rastu mladih sastojina. Prema rezultatima ovog istraživanja većina sastojina kronosekvence pripada I. bonitetu, dok dvije starije sastojine u dobi od 108 i 138 pripadaju II., odnosno II./III. bonitetu (slika 3.3 A). U slučaju različitih boniteta kod sastojina kronosekvence PEICHL I DR. (2010) predlažu provođenje normalizacije sastojina s obzirom na bonitete ukoliko se želi analizirati dinamika bilance ugljika. No, u kontekstu analize svih zaliha i tokova ugljika u šumskom

ekosustavu, nije opravdano da korekcija dobivenih rezultata s obzirom na pripadanost pojedine sastojine određenom bonitetu bude jednosmjerna. Bolji bonitet predstavlja kvalitetnije stanište, a na staništima bogatim hranivima (dušikom) stablo preferira pohranu asimiliranog ugljika u nadzemnu biomasu, dok je kod manje kvalitetnih staništa (tla siromašnija hranivima, odnosno dušikom) povećana alokacija ugljika u podzemnu biomasu u potrazi za hranivima (KING 1993). Uzimajući u obzir sve navedeno vjerujemo da je primjena korekcije zbog razlika u bonitetima u pravilu potrebna, no u našem slučaju nije preporučljiva. Naime, postoji nezanemariv rizik da bi korekcijom, u nedostatku dovoljno podatakak kako ju ispravno napraviti, mogli prouzročiti povećanje pogreške. Iz tog razloga, uz napomenu da nisu rađene korekcije s naslova boniteta, rezultate dobivene ovim istraživanjem smatrat ćemo prosječnim vrijednostima zaliha i tokova ugljika u uređajnom razredu hrasta lužnjaka u g.j. „Jastrebarski lugovi“.

S obzirom na tlo, sastojine kronosekvence rastu na pseudogleju ili pseudoglejno – glejnom tlu s podjednakim omjerom pijeska, praha i gline (tablica 3.2). Izuzetak je sastojina u dobi od 38 godina koja raste na močvarno glejno – amfiglejnom tlu s većim udjelom gline u tlu. No, u navedenoj sastojini je smještena istraživačka stanica za izmjeru tokova ugljičnog dioksida između atmosfere i šumske sastojine (MARJANOVIĆ I DR. 2010), stoga je bez obzira na vrstu i teksturu tla izabrana kao dio kronosekvence hrasta lužnjaka.

S obzirom na prosječne vrijednosti mikrostanišnih meteoroloških parametara tijekom vegetacijskog razdoblja, u najmlađoj sastojini u dobi od 5 godina utvrđene su statistički najviše vrijednosti temperature tla na dubini od 5 cm, dok je relativni udio vlage u tlu u toj sastojini ostao visok (~ 65%) (slike 3.4 A i B). Ovakav rezultat je očekivan s obzirom na to da mlada sastojina u stadiju pomlatka nije u potpunosti sklopljena i tlo je mjestimično izloženo direktnoj insolaciji rezultat čega je značajno veća temperatura tla. Također, kod mlade je sastojine produkcija lista značajno manja nego kod ostalih sastojina (tek $0,16 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ u odnosu na cca $2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ kod ostalih sastojina kronosekvence), te je manja i evapotranspiracija (KOZLOWSKI I PALLARDY 1997) zbog čega nije došlo do isušivanja površinskog dijela tla. Suprotno tome, statistički značajno najniže vrijednosti relativnog udjela vode u tlu uočene su kod sastojine u dobi od 13 godina. U navedenoj sastojini gustoća stabala po površini je izrazito visoka (više od $9500 \text{ biljaka ha}^{-1}$) i produkcija lista je značajno veća od najmlađe sastojine ($1,47 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$) te se može pretpostaviti da u sastojini vladaju kompetitivni uvjeti. Posljedica može biti nizak relativni udio vode u tlu kao što je i utvrđeno u navedenoj sastojini.

Prema gore navedenom, može se pretpostaviti da uočene razlike u meteorološkim parametrima između sastojina proizlaze iz razlika u njihovoj strukturi koja je posljedica starosti sastojine, a ne iz razlika u vrsti i teksturi tla.

4.2. ZALIHE, TOKOVI I BILANCA UGLJIKA U KRONOSEKVENCI

4.2.1. Zalihe ugljika u živoj biomasi

Maksimalne vrijednosti zaliha ugljika u živoj biomasi (C^{ZB}) šume hrasta lužnjaka utvrđene u ovom istraživanju ($204,9 \pm 18,1 \text{ t C ha}^{-1}$) u skladu su sa maksimalnim vrijednostima C^{ZB} jednodobne šume bukve u Njemačkoj od $230,5 - 232,77 \text{ t C ha}^{-1}$ (MUND 2004). Dob u kojoj je utvrđena najveća vrijednosti C^{ZB} u ovom istraživanju je 108 godina što je vrlo blisko dobi od 102, odnosno 111 godina u kojoj su utvrđene maksimalne vrijednosti C^{ZB} kod dviju istraživanih kronosekvenci bukve u Njemačkoj (MUND 2004). U kronosekvenci hrasta kitnjaka u Austriji maksimalna vrijednost C^{ZB} postignuta je u dobi od 74 godine i iznosi svega $102,1 \text{ t C ha}^{-1}$ (BRUCKMAN I DR. 2011). Razlike u zalihama ugljika u živoj biomasi između navedenih kronosekvenci i ovog istraživanja moguće je objasniti razlikama u vrijednosti temeljnice; veće temeljnica – veće vrijednosti C^{ZB} (MUND 2004), manja temeljnica – manje vrijednosti C^{ZB} (BRUCKMAN I DR. 2011). Osim temeljnice, volumen sastojna ili srednja visina također su varijable kojima se mogu objasniti razlike u zalihama ugljika u živoj biomasi. U kronosekvenci bukve u Njemačkoj (MUND 2004), u sastojinama gdje su utvrđene maksimalne zalihe ugljika u živoj biomasi, volumen je preko 20% veći od volumena sastojine s maksimalnim C^{ZB} u ovom istraživanju, dok su sastojine hrasta kitnjaka u Austriji (BRUCKMAN I DR. 2011) u prosjeku 15 – 20% niže od sastojina u ovom istraživanju. U kronosekvenci bukve u Italiji najviše vrijednosti C^{ZB} su niže u odnosu na ovo istraživanje, $172 \pm 11,6 \text{ t C ha}^{-1}$, iako je temeljnica, procijenjena prema objavljenom srednjem promjeru i broju stabala po hektaru, veća i iznosi oko $37 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ (DE SIMON I DR. 2012). Razlog manjim iznosima C^{ZB} može biti posljedica načina obračuna nadzemne biomase primjenom jednadžbi biomase kojima je moguće podcjenjivanje kao što autori i navode. Podcjenjivanje nadzemne biomase primjenom jednadžbi biomasi utvrđeno je i u ovom istraživanju (slika 2.3).

4.2.2. Zalihe ugljika u mrtvom drvu

Zalihe ugljika u mrtvom drvu (C^{MD}) iznimno su varijabilne kad se govori o šumama umjerenog pojasa (PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004). Značajan utjecaj na količinu zaliha ugljika u ovoj sastavnici ima gustoća i kvaliteta sastojine, a u gospodarskim šumama, dodatan faktor koji utječe na vrijednosti zaliha ugljika u mrtvom drvu su zahvati sječe, odnosno njihov intenzitet i dinamika. Prosječni iznos zaliha ugljika u mrtvom drvu C^{MD} utvrđen u ovom istraživanju iznosi $18,0 \pm 2,5 \text{ t C ha}^{-1}$ što je značajno niže od $28,4 \text{ t C ha}^{-1}$ u gospodarskoj šumi bukve u Sloveniji (DEBELJAK 2006). Razlog tomu je značajno veći broj panjeva utvrđenih u bukovoj šumi (oko 217 komada po hektaru) u odnosu na prosječan broj panjeva utvrđen u ovom istraživanju (127 ± 21 komada po hektaru). U gospodarskim šumama bukve u Njemačkoj vrijednosti zaliha ugljika u mrtvom drvu ne prelaze 5 t C ha^{-1} (MUND 2004), ali u navedenom istraživanju u ukupne zalihe ugljika u mrtvom drvu nije uključena podzemna biomasa panjeva i sušaca. Prosječni iznos zaliha ugljika u nadzemnoj biomasi mrtvog drva utvrđen u ovom istraživanju iznosi oko $5,36 \pm 0,97 \text{ t C ha}^{-1}$, što je približno jednako rezultatima do kojih je došla MUND (2004). Također, prema nacionalnoj inventuri šuma u Hrvatskoj, prosječne zalihe ugljika u nadzemnoj biomasi mrtvog drva (sušci i ležeće mrtvo drvo) u državnim šumama iznose oko $4,2 \text{ t C ha}^{-1}$, ako se uzme u obzir površina na kojima je mrtvo drvo zastupljeno (ČAVLOVIĆ 2010), što je u skladu s rezultatima ovog istraživanja.

Dinamika zaliha ugljika u mrtvom drvu (C^{MD}) tijekom životnog vijeka sastojine hrasta lužnjaka (slika 3.8) odgovara „U“ krivulji utvrđenoj u meta-analizi (PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004) za šume umjerenog pojasa, iako apsolutni iznosi C^{MD} utvrđeni u ovom istraživanju čine tek oko 43% od prosječnih zaliha ugljika u mrtvom drvu šuma umjerenog pojasa. No, u gospodarskim šumama (što je slučaj u ovom istraživanju) zalihe ugljika u mrtvom drvu su uglavnom manje nego u negospodarskim šumskim ekosustavima (MUND 2004). Tom činjenicom se mogu objasniti manji iznosi utvrđeni u ovom istraživanju, u odnosu na rezultate meta-analiza (PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004) koja obuhvaća i gospodarske i negospodarske šumske ekosustave.

4.2.3. Zalihe ugljika u organskoj tvari tla

Prema modelu razvoja ekosustava nakon prirodnog ili antropogenog poremećaja (COVINGTON 1981, YANAI I DR. 2003), dinamika zaliha ugljika u šumskoj prostirci obuhvaća 1) razdoblje razgradnje u mladim sastojinama do dobi od 20 godina, 2) razdoblje brze

akumulacije u sastojinama u dobi 20 – 60 godina i 3) razdoblje spore akumulacije u starim sastojinama (slika 1.4). Prema navedenom modelu zalihe ugljika u šumskoj prostirci u starim sastojinama su konstantne. PREGITZER I EUSKIRCHEN (2004) u šumskim ekosustavima umjerenog pojasa također primjećuju niže vrijednosti zaliha ugljika u organskom horizontu kod najmlađih sastojina te sporiju akumulaciju organske tvari kod mladih i srednjodobnih sastojina, ali kod najstarijih sastojina uočavaju niže vrijednosti u odnosu na zrele i stare sastojine. U ovom istraživanju zalihe ugljika u organskom horizontu (C^{ORH}) su u rasponu od 4,05 do 10,43 t C ha⁻¹ i utvrđena je ovisnosti C^{ORH} o starosti sastojine (slika 3.9). Kao i kod PREGITZER I EUSKIRCHEN (2004) najmanje zalihe ugljika u organskom horizontu tla utvrđene su kod najmlađih sastojina, najveće kod zrelih i starih sastojina, dok je kod najstarije sastojine u dobi od 168 godina uočeno opadanje zaliha C u organskom horizontu tla. Najstarija sastojina je narušene strukture sa snažno razvijenom podstojnom etažom običnoga graba, stoga se može pretpostaviti da je udio grabovog lista u šumskoj prostirci veći nego kod sastojine u dobi od 138 godina, u usporedbi s kojom je uočeno opadanje zaliha ugljika u organskom horizontu. Listinac običnoga graba ima značajno uži C:N odnos u usporedbi sa hrastovim listincem (ĆIRIĆ 1984) što može rezultirati bržom razgradnjom šumske prostirke zbog povoljnijih uvjeta za aktivnost mikroorganizama. U usporedbi s pojedinačnim istraživanjima, zalihe ugljika u organskom horizontu u ovom istraživanju značajno su veće od zaliha ugljika u šumskoj prostirci stare sastojine crne johe u Podravini (PERNAR I DR. 2012). Kod crne johe u dobi od 93 do 98 godina u šumskoj prostirci utvrđeno je maksimalno 2,16 t C ha⁻¹, dok u ovom istraživanju C^{ORH} iznosi i do 10,43 t C ha⁻¹. Razlog tomu mogu biti značajno brži procesi razgradnje listinca u sastojinama johe, kao posljedica povoljnijeg C:N odnosa, u usporedbi sa sastojinama hrasta lužnjaka čiji listinac ima širi C:N odnos, posljedica čega je sporija dekompozicija šumske prostirke.

Zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla do dubine od 40 cm (C^{M40}) u kronosekvenci iznosile su od 63,03 do 112,25 t C ha⁻¹, što je vrlo blisko zaliham ugljika u tlu u jednodobnim bukovim šumama u Njemačkoj koje su u rasponu od 69,49 do 109,14 t C ha⁻¹ (MUND 2004) i prosječnim zaliham ugljika u tlu u kronosekvenci bukve u Italiji u iznosu od 105,1 ± 8,3 t C ha⁻¹ (DE SIMON 2012). U kronosekvenci hrasta kitnjaka u Austriji zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla su značajno niže i iznose 53 – 69 t C ha⁻¹ (BRUCKMAN I DR. 2011). Zalihe ugljika u tlu snažno ovise o zaliham u živoj biomasi, jer je podzemna biomasa krupnog i sitnog korijena izvor organskog ugljika koji procesom dekompozicije prelazi u organsku tvar tla. U tom procesu značajnu ulogu ima sitno korijenje (<2 mm) koje zbog svog kratkog životnog vijeka, odnosno intenzivnih procesa produkcije i dekompozicije biomase,

pridonosi akumulaciji organske tvari u mineralnom dijelu tla (BRUNNER I GODBOLD 2010). Značajno manje zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla utvrđene u istraživanju koje su proveli BRUCKMAN I DR. (2011) mogu se, objasniti značajno manjim zaliham ugljika u živoj biomasi u odnosu na $C^{žB}$ u ovom istraživanju. Također, tekstura tla direktno utječe na koncentraciju C u masi suhe tvari tla i to na način da tla grublje strukture (veći udio pijeska, a manji udio praha i gline) imaju manje koncentracije C, a time i manje ukupne zalihe ugljika u tlu (BORCHERS I PERRY 1992). U kronosekvenci kitnjaka u Austriji (BRUCKMAN I DR. 2011) tlo istraživanih sastojina je eutrični kambisol sa podjednakim udjelom pijeska, praha i gline, dok su u ovom istraživanju tla pseudoglej-glejna i močvarno-glejna (tablica 2.3) sa značajnim udjelom praha, a u pojedinim sastojinama i većim udjelom gline u tlu (slika 3.2). Prema tome, značajne razlike u zaliham ugljika u mineralnom dijelu tla između istraživanja koje su proveli BRUCKMAN I DR. (2011) i ovog istraživanja mogu se objasniti i razlikama u vrsti i teksturi tla. U prilog tome ide i činjenica da su najveće koncentracije ugljika u masi suhe tvari tla, a time i najveće zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla, u ovom istraživanju utvrđene u sastojini s najvećim udjelom gline u tlu (>50 %) (slika 3.12).

U kronosekvenci hrasta lužnjaka nije uočena ovisnost zaliha ugljika u mineralnom dijelu tla o dobi sastojina, što je slučaj i u drugim sličnim istraživanjima (MUND 2004, PELTONIEMI I DR. 2004, DE SIMON 2012). U jednodobnim šumskim ekosustavima, u kojima se regeneracija obavlja pod zastorom krošanja starih stabla, pretpostavka je da gospodarski zahvati sječe nemaju značajniji utjecaj na zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla (DE SIMON I DR. 2012) te su one tijekom razvoja šumske sastojine konstantne (BRUCKMAN I DR. 2011). Unatoč tome što nije utvrđena ovisnost C^{M40} o starosti sastojina, utvrđene su statistički značajne razlike između sastojina različite starosti (tablica 3.11) koje se mogu objasniti razlikama u vrsti i teksturi tla.

4.2.4. Neto primarna produkcija sastojina hrasta lužnjaka

Neto primarna produkcija (NPP) je najvažniji tok ugljika u šumskim sastojinama. Uglavnom ovisi o klimatskim uvjetima (PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004, ŽUPEK I DR. 2010), vrsti drveća (YUSTE I DR. 2005b) i dobi sastojine (MUND I DR. 2002, PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004, ŽUPEK I DR. 2010). Vrijednosti NPP-a rastu od borealnih šuma, preko šuma umjerenog pojasa do tropskih šuma. S obzirom na vrste drveća, za različite nadmorske visine utvrđeni su suprotni trendovi. Pri niskim nadmorskim visinama veći iznosi NPP-a utvrđeni su kod listopadnih vrsta (YUSTE I DR. 2005b), dok su pri višim nadmorskim

visinama veće vrijednosti neto primarne produkcije utvrđene kod četinjača (DE SIMON I DR. 2012). Ukupna neto primarna produkcija u kronosekvenci u ovom istraživanju iznosi od 3,41 do 9,70 t C ha⁻¹ god⁻¹, što je blisko rasponu *NPP*-a za šume umjerenog pojasa, 2,5 – 8 t C ha⁻¹ god⁻¹ (PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004) i rasponu *NPP*-a od 5,5 do 9 t C ha⁻¹ god⁻¹ utvrđenog za raznovrsne šumske sastojine kontinentalne Europe (procjena iz FLUXNET mreže, ŽUPEK I DR. 2010). Također, prosječna neto primarna produkcija utvrđena u ovom istraživanju ($7,47 \pm 0,76$) u skladu je s prosječnim iznosom *NPP* za listopadne šume umjerenog pojasa od $7,38 \pm 0,55$ t C ha⁻¹ god⁻¹ (LUYSSAERT I DR. 2007), no veća od prosječnog iznosa *NPP*-a šumskih ekosustava u Europi koji iznosi $5,44 \pm 0,9$ t C ha⁻¹ god⁻¹ (LUYSSAERT I DR. 2010). U odnosu na pojedinačna istraživanja, *NPP* utvrđena u ovom istraživanju nešto je veća od *NPP* utvrđene u listopadnim šumama na višim nadmorskim visinama. U kronosekvenci bukve u Italiji, na nadmorskoj visini od 1200 m, *NPP* iznosi od 2,5 do 4,5 t C ha⁻¹ god⁻¹ (DE SIMON I DR. 2012), dok u šumi hrasta (*Quercus liaotungensis*) i šumi breze (*Betula platyphylla*) u Kini, na nadmorskoj visini 1150 – 1350 m, *NPP* iznosi 3,2 t C ha⁻¹ god⁻¹, odnosno 3,73 t C ha⁻¹ god⁻¹ (FANG I DR. 2007). Nasuprot tome, u sastojinama hrasta lužnjaka u Belgiji, na nižim nadmorskim visinama (16 m.n.v.) i u toplijoj klimi (umjerena oceanska klima) u odnosu na ovo istraživanje (107 – 130 m.n.v.; umjerena topla kišna klima), *NPP* u dobi od 67 godina iznosi čak 17,7 t C ha⁻¹ god⁻¹ (YUSTE I DR. 2005b). To je skoro dvostruko više od najveće vrijednosti *NPP* zabilježene u ovom istraživanju (9,70 t C ha⁻¹ god⁻¹ u sastojini staroj 53 godine), unatoč tome što su obje sastojine na kvalitetnom staništu (sastojine hrasta lužnjaka u Belgiji su na staništu opisanom kao „good site“, a sastojina u dobi od 53 godine u ovom istraživanju pripada I bonitetu).

Dinamika ukupnog *NPP* tijekom životnog vijeka šume hrasta lužnjaka u ovom istraživanju odgovara lijevo skošenoj unimodalnoj krivulji (slika 3.16), s najvećom vrijednosti od $9,70 \pm 0,79$ t C ha⁻¹ god⁻¹, utvrđenom kod sastojine u dobi od 53 godine. Prema ŽUPEK I DR. (2010) u listopadnim šumama Europe najveći iznosi *NPP*-a zabilježeni su u sastojinama u dobi do 50 godina, dok se sa starosti smanjuju. U kronosekvenci smreke u Njemačkoj najveći iznosi *NPP*-a zabilježeni su kod sastojine u dobi od 43 godine (13,37 t C ha⁻¹ god⁻¹) (MUND I DR. 2002), dok je u kronosekvenci bukve u Italiji ukupna neto primarna produkcija najveća u kategoriji *mlade šume* („young forest“), oko 4,5 t C ha⁻¹ god⁻¹ (DE SIMON I DR. 2012).

Produkcija lista (*NPP_l*) u kronosekvenci iznosila je od 0,16 do 2,28 t C ha⁻¹ god⁻¹. Najniža vrijednost *NPP_l* utvrđena je u najmlađoj sastojini dok je u ostalim sastojinama bila približno podjednaka i u prosjeku je iznosila $1,91 \pm 0,11$ t C ha⁻¹ god⁻¹. Dobivene vrijednosti bliske su produkciji lista u sastojini hrasta u Kini u iznosu od 1,87 t C ha⁻¹ god⁻¹ (FANG I DR.

2007). U usporedbi sa kronosekvencama bukve (MUND 2004, DE SIMON I DR. 2012) gdje su prosječni iznosi NPP_l oko $1,5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$, produkcija lista utvrđena u ovom istraživanju je oko 20% veća. To se može objasniti činjenicom da bukove sastojine uglavnom imaju manje izraženu podstojnu etažu (VUKELIĆ I RAUŠ 1998), kako je uočeno i kod MUND (2004), u odnosu na izraženu podstojnu etažu i bogat sloj grmlja u šumskoj zajednici hrasta lužnjaka u kojoj je provedeno ovo istraživanje. Posljedica može biti manja ukupnu produkciju lista po površini u bukovim sastojinama u odnosu na sastojine hrasta lužnjaka.

Što se tiče **produkcije plodova (NPP_{pl})** utvrđena je izrazito velika među-sastojinska varijabilnost, čak 109,3%. Iznos NPP_{pl} u kronosekvenci kretao se od 0,16 do $1,70 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$. Prema definiciji plodonošenje predstavlja ujednačenu produkciju plodova u nepravilnim vremenskim razmacima na širem geografskom području (KELLY I SORK 2002), zbog čega je za očekivati kod reproduktivno zrelih sastojina u kronosekvenci (starije od cca 50 godina) podjednaku produkciju plodova. Uočenu varijabilnost moguće je objasniti činjenicom da reproduktivno zrele sastojine nisu podjednako kvalitetne strukture i podjednagog vitaliteta stabala. Posljedica je da su značajno veći iznosi NPP_{pl} zabilježeni samo kod dvije od ukupno pet reproduktivno zrelih sastojina u kronosekvenci (kod sastojina u dobi od 53 i 138 godina). Kod sastojine u dobi od 68 godina zabilježen je značajan broj sušaca po jedinici površine ($124 \pm 68 \text{ kom ha}^{-1}$) (tablica 3.5) što ukazuje na preveliku gustoću sastojine, zbog čega dolazi do samoizlučivanja, odnosno sušenja stabala. U gustim sastojinama razvoj krošanja pojedinog stabla ograničen je krošnjama susjednih stabala što za posljedicu ima relativno male i nepravilno razvijene krošnje, a posljedica može biti slabiji urod. Kod sastojine starosti 108 godina također je uočena slaba razvijenost krošanja te slaba vitalnost stabala (zapažanje na terenu), dok je najstarija sastojina u dobi od 168 godina narušene strukture, s vrlo malim brojem hrastovih stabala po površini ($21 \pm 3 \text{ kom ha}^{-1}$) (tablica 3.1). Za reprezentativnu procjenu prosječne godišnje produkcije plodova potrebno je imati podatke za niz od minimalno onoliko godina koliko je poznato da iznosi turnus plodonošenja određene vrste drveća. Kod hrasta lužnjaka se puni urod javlja svakih 3 do 5 godina (VIDAKOVIĆ 1983). Podaci o prosječnom punom urodu hrasta lužnjaka vrlo su oskudni, a zbog različitih metodologija prikupljanja podataka ujedno i vrlo varijabilni (MATIĆ 1996), zbog čega ih je bilo teško usporediti sa rezultatima ovog istraživanja. Prema terenskim opažanjima može se pretpostaviti da je 2011. godina, u usporedbi sa 2010. godinom, bila godina boljeg uroda te se može pretpostaviti da je produkcija ploda zabilježena u sastojinama u dobi od 53 i 138 godina prosječna produkcija ploda te godine. Za reprezentativnu procjenu

produkcije ploda na 10-godišnjoj razini potrebni su rezultati dugogodišnjih motrenja dinamike plodonošenja.

4.2.5. Ukupna respiracija tla i dekompozicija mrtvog drva u sastojinama hrasta lužnjaka

Respiracija tla je drugi najvažniji tok ugljika u šumskim sastojinama. To je vrlo složen proces koji obuhvaća disanje korijena i mikroorganizama u rizosferi te razgradnju šumske prostirke i organske tvari u mineralnom dijelu tla, zbog čega ovisi o mnogobrojnim okolišnim i sastojinskim parametrima (LUO I ZHOU 2006). U ovom istraživanju utvrđena je relativno jaka eksponencijalna ovisnost toka CO_2 iz tla o temperaturi tla (slika 3.18). Na temelju parametra b eksponencijalne jednadžbe ($y = a \times e^{bx}$) utvrđena je temperaturna osjetljivost ($Q_{10} = e^{10b}$) u rasponu od 2,04 do 3,40 što je unutar raspona Q_{10} utvrđenog u šumskim ekosustavima Europe i Sjeverne Amerike, 2,0 - 6,3 (DAVIDSON I DR. 1998). Iz analize je isključena sastojina u dobi od 138 godina, kod koje, zbog neravnomjerno raspoređenih izmjerenih podataka toka CO_2 iz tla s obzirom na utvrđene uvjete vlažnosti tla, nije bilo opravdano izračunavati Q_{10} . Za pretpostaviti je da kod navedene sastojine nedostaje izmjera u uvjetima kada je vlaga u tlu bila limitirajući faktor zbog čega je utvrđena iznimno (nerealno) jaka ovisnost toka CO_2 iz tla o temperaturi tla (slika 3.18), odnosno značajno veći Q_{10} u odnosu na ostale sastojine. Unatoč tome, može se pretpostaviti da je „stvarna“ temperaturna ovisnost u ovoj sastojini nešto viša od one utvrđene kod ostalih sastojina, kao posljedica značajno većih vrijednosti biomase organskog horizonta, a prema LISKI I DR. (1999) šumsku prostirku (O horizont) karakterizira veća temperaturna osjetljivost od stabilne organske tvari mineralnog dijela tla.

Respiracija tla ima izraženu vremensku i prostornu varijabilnost (LUO I ZHOU 2006). Dnevna, tjedna, sezonska i među-godišnja varijabilnost snažno su uvjetovane dinamikom meteoroloških parametara (temperatura i vlaga tla) te dinamikom produkcije sastojine. Prostorna varijabilnost respiracije tla ovisi, osim o navedenim varijablama, i o fizikalnim i kemijskim značajkama tla, o udjelu i aktivnosti mikroorganizama i rizosferne faune te o sadržaju sitnog šumskog korijena (CAMPBELL I LAW 2005, LUO I ZHOU 2006). Prostorna varijabilnost respiracije tla u šumskim ekosustavima je u rasponu od 10 do 100% (HANSON I DR. 1993, CAMPBELL I LAW 2005). U ovom istraživanju prostorna varijabilnost ukupne godišnje respiracije tla u čitavoj kronosekvenci hrasta lužnjaka iznosila je 11%.

Ukupna godišnja respiracija tla u kronosekvenci u 2011. godini iznosila je $8,24 \pm 0,36$ t C ha⁻¹ god⁻¹ (tablica 3.21), što je podjednako respiraciji tla u sastojini hrasta lužnjaka u Belgiji u iznosu od $8,8 \pm 0,5$ t C ha⁻¹ god⁻¹ (YUSTE I DR. 2005a) i respiraciji tla u kronosekvenci hrasta u Kini u rasponu od 6,23 do 8,31 t C ha⁻¹ god⁻¹ (LUAN I DR. 2011). Udio heterotrofne respiracije tla u ukupnoj respiraciji tla procijenjena je na temelju analize objavljenih radova i iznosi 0,532. Heterotrofna respiracija tla (R_h^{TLO}) u prosjeku za cijelu kronosekvencu iznosi $4,38 \pm 0,19$ t C ha⁻¹ god⁻¹, što je na donjoj granici heterotrofne respiracije tla u hrastovim sastojinama u Kini u rasponu 4,31 – 6,78 t C ha⁻¹ god⁻¹ (LUAN I DR. 2011), ali je unutar raspona heterotrofne respiracije tla utvrđene za šumske sastojine umjerenog pojasa starije od 10 godina, cca 3 – 5 t C ha⁻¹ god⁻¹ (PREGITZER I EUSKIRCHEN 2004).

Dekompozicija mrtvog drva, kao i respiracija tla, snažno ovisi o temperaturi i vlazi tla, ali i o kvaliteti samog drvnog materijala (tzv. kvaliteta supstrata) koji je izložen procesima razgradnje (ĆIRIĆ 1984, HARMON I DR. 1986, LUO I ZHOU 2006). Kvaliteta drvnog materijala podrazumijeva njegov specifični kemijski sastav (udio šećera, proteina, celuloze, lignina i mineralnih tvari), a on direktno ovisi o vrsti drveća i dimenzijama uzorka. Veći udio lako i brzo razgradivih šećera i proteina znači i bolju kvalitetu supstrata i bržu stopu dekompozicije. U ovom istraživanju nije utvrđena statistički značajna razlika u brzini razgradnje mrtvog drva između različitih vrsta, ali je utvrđena statistički najbrža razgradnja za uzorke najmanjih dimenzija (slika 3.26). Dekompozicija u kronosekvenci u 2011. godini bila je u rasponu 0,12 – 0,88 t C ha⁻¹ god⁻¹, a u prosjeku je iznosila $0,41 \pm 0,09$ t C ha⁻¹ god⁻¹, što je približno 10% od utvrđenog prosječnog iznosa heterotrofne respiracije tla ($4,38 \pm 0,19$ t C ha⁻¹ god⁻¹), odnosno 8% od ukupne heterotrofne respiracije ekosustava ($4,79 \pm 0,21$ t C ha⁻¹ god⁻¹). Najveće vrijednosti utvrđene su u sastojini u dobi od 38 godina iako su najveće zalihe ugljika u nadzemnoj biomasi mrtvog drva uočene kod najstarije sastojine, kod koje je iznos dekompozicije iznosio tek $0,42$ t C ha⁻¹ god⁻¹ (dvostruko manje od dekompozicije u sastojini staroj 38 godina) (tablica 3.24). Moguće objašnjenje je da su uzorci mrtvog drva u sastojini staroj 38 godina sitnijih dimenzija od mrtvog drva u najstarijoj sastojini zbog čega je dekompozicija brža (slika 3.26), a time i ukupna dekompozicija u toj sastojini veća u odnosu na dekompoziciju u najstarijoj sastojini.

4.2.6. Bilanca ugljika (*NEP*) u šumi hrasta lužnjaka

Prvi cilj ovog istraživanja bio je istražiti u kojoj dobi šuma hrasta lužnjaka postaje spremnik ugljika, zatim koji je maksimalan ponor koji može ostvariti i kada se on postiže te kakva je bilanca ugljika u starim sastojinama. Promatrajući šumu hrasta lužnjaka kroz čitav njezin životni vijek (primjenom metode kronosekvence), korištena je pretpostavka da je bilanca ugljika jednaka neto produkciji ekosustava (*NEP*), ne uključujući pritom gubitke ugljika sječom. Tako procijenjena bilanca ugljika se u kronosekvenci hrasta lužnjaka kretala od $-1,18$ do $4,94 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ (tablica 3.25), što je u skladu s iznosima *NEP*-a za šumske ekosustave umjerenog pojasa koje su u rasponu od $-2,5$ do $5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ (CAMPBELL I DR. 2004). Prema dinamici bilance ugljika prikazane na slici 3.28 može se uočiti da šuma hrasta lužnjaka u dobi između 5 i 13 godina postaje ponor ugljika, kao posljedica statistički značajno većih vrijednosti neto primarne produkcije sastojine u odnosu na ukupnu heterotrofnu respiraciju ekosustava ($R_h = R_h^{TLO} + R_h^{MD}$) (tablica 3.25). Maksimalnu pohranu ugljika u iznosu od $4,93 \pm 0,81 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ šuma hrasta lužnjaka je ostvarila u dobi od 53 godine. U toj dobi sastojine i dalje intenzivno prirašćuju u debljinu i visinu, ali istovremeno postaju i reproduktivno zrele i značajan udio u *NPP*-u ima produkcija plodova, oko 10% (tablica 3.14). Nakon toga, bilanca ugljika polako opada sa starosti, ali u dobi od 168 godina i dalje ostaje pozitivna. Sličan trend bilance ugljika uočen i u kronosekvenci bukve u Italiji (DE SIMON I DR. 2012).

Unutar-sezonska dinamika bilance ugljika (slika 3.31) pokazuje razlike između sastojina različite starosti. Većina sastojina postaje ponor ugljika vrlo rano tijekom vegetacijskog razdoblja, već oko 110. dana u godini (20. travnja 2011). Do tog dana kumulativne vrijednosti *NPP*-a postaju veće od kumulativnih vrijednosti heterotrofne respiracije, posljedica čega je pozitivna bilanca ugljika. Izuzetak su najmlađa (5 godina) i najstarija sastojina (168 godina) kod kojih bilanca ugljika postaje pozitivna nešto kasnije, nakon 117. dana u godini, kao posljedica sporije akumulacije *NPP*-a tijekom vegetacijskog razdoblja. Kod sastojine u dobi od 5 godina bilanca ugljika počinje opadati nakon cca. 180. dana u godini (29. lipnja 2011.) te ponovno postaje negativna oko 240. dana u godini (28. kolovoza 2011.) i ostaje negativna do kraja godine. Kod najmlađe sastojine, osim značajno manje produkcije drvene i lisne biomase u odnosu na ostale sastojine, također izostaje i produkcija plodova. Posljedica je da pred kraj vegetacijskog razdoblja kumulativne vrijednosti heterotrofne respiracije postaju veće od iznosa *NPP*-a, a bilanca ugljika postaje negativna.

4.3. ZALIHE, TOKOVI I BILANCE UGLJIKA UREĐAJNOG RAZREDA HRAST LUŽNJAK IZ SJEMENA U GOSPODARSKOJ JEDINICI „JASTREBARSKI LUGOVI“

Drugi cilj ovog istraživanja bio je procijeniti trenutno stanje zaliha i bilance ugljika u odabranom uređajnom razredu u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“ u Pokupskom bazenu. Bilanca ugljika nekog šumskog područja, osim što ovisi o dinamici bilance ugljika s obzirom na dob sastojina, značajno ovisi o dobnoj strukturi promatranog šumskog područja (CAMPBELL I DR. 2004) te razvoju dobne strukture šume tijekom vremena. U gospodarskim šumama, dobna struktura je posljedica provođenja obnove šumskih sastojina, odnosno sječe sastojina starijih od minimalne propisane ophodnje (za hrast lužnjak to je 140 godina). U tom kontekstu, bilanca ugljika uključuje i gubitke ugljika sječom i izražava se kao *NECB*.

Dobna struktura odabranog uređajnog razreda je narušena, sa značajnim udjelom sastojina I. dobnog razreda te iznimno malim udjelom sastojina V. i VI. dobnog razreda (stanje 2004. godine) (slika 3.35). Ostali dobni razredi (II., III., IV., VII. i VIII.) po površini su približno jednaki normalni od 278 ha. Unatoč skoro 2 puta većoj površini sastojina I. dobnog razreda, u odnosu na ostale, ukupne zalihe ugljika u tim sastojinama podjednake su zalihama ugljika u III. i IV. dobnom razredu. To je posljedica manjih iznosa drvne zalihe po jedinici površine u sastojinama I. dobnog razreda u odnosu na starije sastojine III. i IV. dobnog razreda, a drvna zaliha po jedinici površine određena je kao glavna determinanta zaliha ugljika u živoj biomasi (slika 3.32) koja dalje služi u procjeni zaliha u ostalim sastavnicama šumskog ekosustava (slika 3.33). U skladu s nerazmjerno malim površinskim udjelom sastojina V. i VI. dobnog razreda, ukupne zalihe ugljika u tim dobnim razredima čine svega oko 10 do 30% zaliha u ostalim dobnim razredima (slika 3.36). Najveće ukupne zalihe ugljika sadržane su u VII. i VIII. dobnom razredu, što je posljedica velike drvne zalihe u starim sastojinama.

Za razdoblje od 2004. do 2013. godine procijenjena ukupna *NECB* odabranog uređajnog razreda je pozitivna i za ukupnu površinu od 1945,58 ha iznosi $14,2 \text{ Gg C } 10\text{god}^{-1}$ (slika 3.37 B). U promatranom 10-godišnjem razdoblju obnova je obavljena na 255,54 ha i gubitak ugljika sječom je iznosio $29,6 \text{ Gg C } 10\text{god}^{-1}$. Pozitivni iznosi *NECB* uređajnog razreda u promatranom 10-godišnjem razdoblju rezultat su pozitivne bilance utvrđene u svim dobnim razredima osim osmog. U VIII. dobnom razredu negativna *NECB* posljedica je dovršnog sijeka kojim je ostvaren značajan gubitak ugljika.

U kontekstu proučavanja *NECB* nekog gospodarskog šumskog područja, poželjno je ostvariti što veći ponor ugljika (što veći iznos *NECB*), no istovremeno i ostvariti primarni cilj gospodarenja šumama – kontinuirani prihod od posječenog drvne zalihe, te nastojati dobnu strukturu približiti normalni (ukoliko se od nje razlikuje). S obzirom na različite scenarije obnove, primjenjene u ovom istraživanju, utvrđene su razlike u kumulativnim iznosima *NECB* na kraju 50-godišnjeg projekcijskog razdoblja, kao posljedica razlika u posječenju drvnog zalihi. Koeficijent varijabilnosti ukupne posječenog drvne zalihe u 50-godišnjem projekcijskom razdoblju između navedenih scenarija iznosio je 5,7% (tablica 3.32), dok je koeficijent varijabilnosti *NECB* na kraju 50-godišnjeg razdoblja između navedenih scenarija iznosio 10%.

Najveća bilanca ugljika (*NECB*) ostvarena je primjenom scenarija pri kojem je obnova obavljena na čitavoj površini sastojina starijih od 130 godina (scenarij A) i scenarija pri kojem se obnova zasniva na površini sastojina starijih od 100 godina (scenarij D). Najmanja *NECB* dobivena je primjenom scenarija pri kojem se obnova šume obavila na 60% normalne površine dobnog razreda (scenarij B), dok je obnovom šume na 50% normalne površine (scenarij C) ostvarena bilanca ugljika koja se po iznosu nalazi na sredini. S obzirom na ukupnu posječenu drvenu zalihu (V^{SJ}) (tablica 3.31) najveći iznosi V^{SJ} utvrđeni su za scenarij B, najmanji za scenarij D, dok su A i C podjednaki. Osim ukupnog iznosa posječenog drvne zalihe, važno je i nastojati zadržati stabilnost iznosa V^{SJ} tijekom vremena, odnosno osigurati potrajnost prihoda. Relativno stabilan iznos V^{SJ} ostvaren je primjenom scenarija B, C i D, dok je scenarij A apsolutno neprihvatljiv s obzirom na dinamiku sječe tijekom vremena. S obzirom na dobnu strukturu, primjenom scenarija B, C i D na kraju projekcijskog razdoblja ostvaruje se zadovoljavajuća struktura dobnih razreda, dok primjenom scenarija A dobnost struktura i dalje ostaje narušena. Primjenom navedenih scenarija utvrđene su i razlike u ukupno obnovljenoj površini u projekcijskom razdoblju, koje odgovaraju razlikama u ukupno posječenju drvnog zalihi.

Uzimajući sve navedeno u obzir primjenom scenarija obnove šume na 50% normalne površine (scenarij C) i scenarija pri kojem se obnova zasniva na površini sastojina starijih od 100 godina (scenarij D) ostvaruju se zadovoljavajući rezultati. Scenarij C je povoljniji od scenarija D iz aspekta prihoda od posječenog drvne zalihe (tablica 3.31 i slika 3.39), no, promatrajući vrijednosti bilance ugljika na kraju 50-godišnjeg projekcijskog razdoblja (slika 3.40), scenarij D se izdvaja kao najpoželjniji jer osigurava najveću kumulativnu bilancu ugljika.

5. ZAKLJUČCI

Metoda kronosekvence pokazala se kao odgovarajući način istraživanja dinamike pohrane ugljika u jednodobno gospodarenim šumskim ekosustavima hrasta lužnjaka. Unatoč činjenici da odabrane sastojine kronosekvence djelomično pripadaju različitim bonitetima te da, izuzev razlika u dobi, postoje i razlike u sastojinskim i stanišnim parametrima između odabranih sastojina (vrsta šumske zajednice, vrsta i tekstura tla), primjenom metode kronosekvence potvrđene su postavljene hipoteze. Također, primjena ove metode omogućila je izradu jednostavnih modela ovisnosti pojedinih zaliha i tokova ugljika o lako dostupnim varijablama šumske sastojine, kao što su starost sastojine, drvena zaliha krupnog drva i omjer drvne zalihe krupnog drva i starosti sastojine. Nadalje, ovim istraživanjem dobiveni su i statistički značajni parametri za postojeći model ovisnosti respiracije tla o mikrostanišnim meteorološkim parametrima (temperatura i vlaga tla) te povećanje koeficijenta determinacije (sa 0,8046 na 0,8225) uvođenjem nove varijable (dob sastojine). Sve navedeno može poslužiti prilikom budućih istraživanja kruženja ugljika u ovom i sličnim šumskim ekosustavima.

Zalihe ugljika u šumskom ekosustavu hrasta lužnjaka u Pokupskom bazenu usporedive su sa zaliham ugljika u drugim listopadnim šumskim ekosustavima umjerenog pojasa iz literature, uz uvjet da je temeljnica po površini podjednaka i način obračuna sličan. Od ukupnih zaliha ugljika u prosjeku je oko 53% pohranjeno u živoj biomasi, 40% u organskoj tvari tla, a 7% u mrtvom drvu. Raspodjela zaliha ugljika po glavnim sastavnicama šumskog ekosustava hrasta lužnjaka mijenja se tijekom životnog vijeka, na način da su u sastojinama I. dobnog razreda najveće zalihe ugljika pohranjene u organskoj tvari tla, a u starijim sastojinama su najveće zalihe ugljika pohranjene u živoj biomasi. Zalihe ugljika u organskom horizontu tla povećavaju se sa starosti sastojine, dok su zalihe ugljika u mrtvom drvu najviše u najmlađim i starim sastojinama, a najniže u srednjodobnim i zrelim sastojinama. S obzirom na zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla nije utvrđena statistički značajna ovisnost o starosti sastojine što je u skladu s pretpostavkom da u jednodobno gospodarenim šumskim ekosustavima hrasta lužnjaka postojeći način gospodarenja nema značajniji utjecaj na zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla. No, utvrđene su statistički značajne razlike u zaliham ugljika u mineralnom dijelu tla između pojedinih sastojina, koje su posljedica razlika u gustoći tla i postotnom udjelu ugljika u masi suhe tvari tla između sastojina, s naglaskom da je međusastojinska varijabilnost udjela ugljika u masi suhe tvari tla dva puta veća od varijabilnosti gustoće tla.

Prosječna neto primarna produkcija sastojina hrasta lužnjaka u Pokupskom bazenu usporediva je sa prosječnim iznosom produkcije listopadnih šuma umjerenog pojasa, dok je u slučaju usporedbe s pojedinačnim istraživanjima potrebno obratiti pozornost na nadmorsku visinu i klimatske uvjete istraživanih sastojina. Sastojina hrasta lužnjaka postaje ponor ugljika već u vrlo ranoj dobi, između 5 i 13 godina, što je posljedica veće ukupne neto primarne produkcije u odnosu na ukupnu heterotrofnu respiraciju, i sastojina ostaje ponor ugljika i nakon dobi od 160 godina. Kulminacija bilance ugljika, zabilježena kod sastojine u dobi od 53 godine, odgovara kulminaciji produkcije drvne biomase i u skladu je s dobi kulminacije utvrđenoj za listopadne šume Europe. Ponor ugljika, utvrđen kod većine sastojina u našem istraživanju (osim najmlađe sastojine u dobi od 5 godina), posljedica je činjenice da u prosjeku ukupna heterotrofna respiracija čini tek oko 64% neto primarne produkcije, od čega oko 92% čini respiracija tla, a 8% dekompozicija nadzemne biomase mrtvog drva.

Unutar-sezonska dinamika bilance ugljika razlikuje se između sastojina različite starosti. Iako između pojedinih sastojina nije utvrđena razlika u unutar-sezonskoj dinamici neto primarne produkcije drvne biomase, postoje razlike u ukupnim godišnjim vrijednostima primarne produkcije između sastojina. S obzirom na to, razlikuje se i udio heterotrofne respiracije u ukupnoj neto primarnoj produkciji između pojedinih sastojina, a posljedica je razlika u dinamici kumulativnih vrijednosti unutar-sezonske bilance ugljika.

U uređajnom razredu hrasta lužnjaka, u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“ u Pokupskom bazenu, prema podacima iz važeće Osnove gospodarenja za početak 2004. godine utvrđena je narušena dobna struktura sa dvostruko većim udjelom mladih sastojina I. dobnog razreda i značajnim udjelom zrelih sastojina pred obnovu (VII. dobnog razreda i starije). Mlade sastojine u dobi do oko 10 godina predstavljaju izvor ugljika, a sječom starih sastojina također se ostvaruju gubitci ugljika. Unatoč narušenoj dobnoj strukturi uređajnog razreda, u razdoblju od 2004. do 2013. godine ostvarena je pozitivna bilanca ugljika, jer mlade sastojine hrasta lužnjaka vrlo brzo nakon obnove postaju ponor ugljika i ukupne vrijednosti neto produkcije ekosustava postaju veće od utvrđenih ukupnih gubitaka ugljika sječom. U 50-godišnjem projekcijskom razdoblju (2004. – 2053. godine) primjenom različitih scenarija obnove (različite površine propisane za obnovu) ostvaruju se različite bilance ugljika. Stvarna bilanca ugljika utvrđena za razdoblje važenja O.G. (2004. – 2013. godine) odgovara scenariju pri kojem se obnova provodi na 60% normalne površine (scenarij B). Navedeni način propisivanja površine za obnovu primjenjuje se u praksi stoga se može očekivati da će se dosadašnjim načinom gospodarenja u budućem 50-godišnjem razdoblju ostvariti bilanca ugljika utvrđena za scenarij B. Navedeni scenarij je povoljan što se tiče utjecaja na dobnu

strukturu (struktura se na kraju projekcijskog razdoblja približava normalni) i potrajnost prihoda (stabilan iznos posječne drvene zalihe tijekom vremena), no ostvarena bilanca ugljika je najmanja u odnosu na druge scenarije. U kontekstu aktualnog problema klimatskih promjena i uočavanja uloge šumskih ekosustava u pohrani atmosferskog ugljika, a uz održavanje postojećih funkcija šume (potrajnost prihoda), kao povoljni scenariji obnove izdvajaju se scenariji kojima se obnova šume provodi na 50% normalne površine (scenarij C) i pri kojem se obnova zasniva na površini sastojina starijih od 100 godina (scenarij D). Pri tome je scenarij C povoljniji iz aspekta prihoda od posječne drvene zalihe, dok se scenarij D izdvaja kao najpoželjniji jer osigurava najveću pohranu ugljika, a ujedno zadovoljava i ostale kriterije gospodarenja šumama.

Ovim istraživanjem dobiveni su referentni podaci o zalihama, tokovima i bilancama ugljika te njihovoj dinamici tijekom životnog vijeka šumskog ekosustava hrasta lužnjaka u Pokupskom bazenu. Dobiveni rezultati mogu poslužiti kao kvalitetan temelj za buduća istraživanja zaliha i tokova ugljika u šumama hrasta lužnjaka u čitavom njegovom arealu. Također, ovo istraživanje je omogućilo donošenje preporuke za odabir odgovarajućeg načina određivanja površine za obnovu (tzv. scenarija obnove) kojim se osigurava najveća pohrana ugljika čime se udovoljava modernim kriterijima potrajnog gospodarenja šumskim ekosustavima.

6. LITERATURA

- Acker S. A, C. B. Halpern, M. E. Harmon, C.T. Dyrness, 2002: Trends in bole biomass accumulation, net primary production and tree mortality in *Pseudotsuga menziesii* forests of contrasting age. *Tree Physiology* 22(2/3):213-217.
- Assman, E., 1970: The principles of forest yield study. Pergamon press Ltd., Headington Hill Hall, 506 str., Oxford.
- Balboa-Murias, M. A., A. Rojo, J. G. Álvarez, A. Merino, 2006: Carbon and nutrient stocks in mature *Quercus robur* L. stands in NW Spain. *Annals of Forest Science* 63(5):557-565.
- Baldocchi, D. D., B. B. Hincks, T. P. Meyers, 1988: Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micrometeorological method. *Ecology* 69(5):1331-1340.
- Baldocchi, D. D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, C. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Paw, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, S. Wofsy, 2001: FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(11):2415-2434.
- Baldocchi, D. D., 2003: Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9(4):479-492.
- Benndorf, A. M., 2007: Net changes of carbon in the biomass of Croatian Forests from 2008-2012. Magistarski rad, Albert-Ludwig-University, 72 str., Freiburg.
- Bezák, K., V. Krejčí, A. Krznar, 1993: Prirasno-prihodne tablice hrasta lužnjaka u šumama vlažnoga tipa. *Radovi Šumarskog instituta* 28(1-2):55-67.
- Bojanić, L., D. Ivičić, 1974: Opće hidrogeološke karakteristike bazena Crne Mlake. *Geološki vjesnik* 27:267-271, Zagreb.

- Bond-Lamberty, B. P., A. M. Thomson, 2012: A Global Database of Soil Respiration Data, Version 2.0. Baza podataka dostupna on-line (<http://daac.ornl.gov>), Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- Borchers, J.G., D. A. Perry, 1992: The influence of soil texture and aggregation on carbon and nitrogen dynamics in southwest Oregon forests and clear cuts. *Canadian Journal of Forest Research* 22(3):298-305.
- Bruckman, V. J., S. Yan, E. Hochbichler, G. Glatzel, 2011: Carbon pools and temporal dynamics along a rotation period in *Quercus* dominated high forest and coppice with standards stands. *Forest Ecology and Management* 262(9):1853-1862.
- Brunner, I., M. R. Bakker, R. G. Björk, Y. Hirano, M. Lukač, X. Aranda, I. Børja, T. D. Elldhuset, H. S. Helmisaari, C. Jourdan, B. Konôpka, B. C. López, C. Miguel Perez, H. Persson, I. Ostonen, 2013: Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant and Soil* 362(1-2):357-372.
- Brunner, I., D. L. Godbold, 2010: Belowground carbon in forest soils: Turnover as a key process. U: Brunner, I. (ur.) Belowground carbon turnover in European forests - State of the art, COST Action FP0803 Conference, January 26-28, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, 13-16 str.
- Cairns, M. A., S. Brown, E. H. Helmer, G. A. Baumgardner, 1997: Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111(1):1-11.
- Campbell, J. L., B. E. Law, 2005: Forest soil respiration across three climatically distinct chronosequences in Oregon. *Biogeochemistry* 73(1):109-125.
- Campbell, J. L., O. J. Sun, B. E. Law, 2004: Disturbance and net ecosystem production across three climatically distinct forest landscapes. *Global biogeochemical cycle* 18(4):1-11. DOI:10.1029/2004GB002236.
- Cestar, D., Đ. Kovačić, 1982: Drvnogromadne tablice za crnu johu i bagrem. *Radovi Šumarskog instituta Jastrebarsko*, 49:1-149, Zagreb.
- Cestar, D., Đ. Kovačić, 1984: Drvnogromadne tablice za poljski jasen. *Radovi Šumarskog instituta Jastrebarsko*, 60:1-178, Zagreb.

- Chapin III, F. S., G. M. Woodwell, J. T. Randerson, E. B. Rastetter, G. M. Lovett, D. D. Baldocchi, D. A. Clark, M. E. Harmon, D. S. Schimel, R. Valentini, C. Wirth, J. D. Aber, J. J. Cole, M. L. Goulden, J. W. Harden, M. Heimann, R. W. Howarth, P. A. Matson, A. D. McGuire, J. M. Melillo, H. A. Mooney, J. C. Neff, R. A. Houghton, M. L. Pace, M. G. Ryan, S. W. Running, O. E. Sala, W. H. Schlesinger, E.-D. Schulze, 2006: Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems* 9(7):1041–1050.
- Chapin III, F. S., E.-D. Schulze, H. A. Mooney, 1990: The ecology and economics of storage in plants. *Annual review of Ecology and Systematics* 21:423-47.
- Cienciala, E., J. Apltauer, Z. Exnerová, F. Tatarinov, 2008: Biomass functions applicable to oak trees grown in Central-European forestry. *Journal of Forest Science* 54(3):109-120
- Clark, N. A., R. H. Wayne, D. L. Schmoldt, 2000: A review of past research on dendrometers. *Forest Science*, 46(4):570-576.
- Covington, W.W., 1981: Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Ecology* 62(1):41–48.
- Ćirić, M., 1984: *Pedologija* (ur.) D. Ajvazović, Svjetlost, 311 str., Sarajevo.
- Čavlović, J., 2010: *Prva nacionalna inventura šuma Republike Hrvatske*. Ministarstvo regionalnog razvoja, šumarstva i vodnoga gospodarstva, 300 str., Zagreb.
- Čavlović, J., M. Božić, 2008: *Nacionalna inventura šuma u Hrvatskoj, Metode terenskog prikupljanja podataka*. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 146 str., Zagreb.
- Davidson, E. A., E. Belk, R. D. Boone, 1998: Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest, *Global Change Biology* 4(2):217–227.
- du Toit, B., 2008: Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa. *Forest Ecology and Management*, 255(7):2324-2336.
- Davidson, E. A., K. Savage, L. V. Verchot, R. Navarro, 2002: Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 113(1-4):21–37.

- De Groot, R. C., B. Woodward, P. E. Hennon, 2000. Natural decay resistance of heartwood from dead, standing yellow-cedar trees: Laboratory evaluations. *Forest Products Journal* 50:53-59.
- De Simon, G., G. Alberti, G. Delle Vedove, G. Zerbi, A. Peressotti, 2012: Carbon stocks and net ecosystem production changes with time in two Italian forest chronosequences. *European Journal of Forest Research* 131(5):1297-1311.
- Debeljak, M., 2006: Coarse woody debris in virgin and managed forest. *Ecological Indicators* 6(4):733-742.
- Delle Vedove, G., G. Alberti, A. Peressotti, I. Inglema, M. Zuliani, G. Zerbi, 2007: Automated monitoring of soil respiration: an improved automatic chamber system. *Italian Journal of Agronomy* 2(4):377-382.
- Dieter, M., P. Elsasser, 2002: Carbon stocks and carbon stock changes in the tree biomass of Germany's forests. *Forstw Cbl* 121:195-210.
- Fang J., G. Liu, B. Zhu, X. Wang, S. Liu, 2007: Carbon budgets of three temperate forest ecosystems in Dongling Mt., Beijing, China. *Science in China Series D: Earth Science* 50(1):92-101.
- FAO 2007: Food and Agriculture Organization of the United Nations State of the World's Forests, Rim.
- FAO 2009: Food and Agriculture Organization of the United Nations State of the World's Forests, Rim.
- Genet, H., N. Breda, E. Dufrene, 2009: Age-related variation in carbon allocation at tree and stand scales in beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) using a chronosequence approach. *Tree Physiology* 30(2):177-192.
- Gill, R. A., R. B. Jackson, 2000: Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147(1):13-31.
- GTOS (Global Terrestrial Observing System), 2008: TCO Terrestrial Carbon Observations: Protocols for Vegetation Sampling and Data Submission, B. E. Law, T. Arkebauer, J. L. Campbell, J. Chen, O. Sun, M. Schwartz, C. van Ingen, S. Verma (ur.), Rim.

- Gough, C. M., C. S. Vogel, C. Kazanski, L. Nagel, C. E. Flower, P. S. Curtis, 2007: Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest. *Forest Ecology and Management* 244(1-3):60-67.
- Guo, Z., J. Fang, Y. Pan, R. Birdsey, 2009: Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management* 259(7):1225-1231.
- Hanson, P. J., N. T. Edwards, C. T. Garten, J. A. Andrews, 2000: Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48(1):115-146.
- Harmon, M. E., J. F. Franklin, F. J. Swanson, 1986: Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* 15:133–302.
- Hedde, M., M. Aubert, T. Decaëns, F. Bureau, 2008: Dynamics of soil carbon in a beechwood chronosequence forest. *Forest Ecology and Management* 255(1):193–202
- Hlásny, T., Z. Barcza, M. Fabrika, B. Balázs, G. Churkina, J. Pajtík, R. Sedmák, M. Turčáni, 2011: Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research* 47(3):219–236.
- Houghton, R. A., 2005: Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology* 11(6):945-958.
- HŠ d.o.o.(Hrvatske šume d.o.o. Zagreb), 2003: Osnova gospodarenja za g.j. “Jastrebarski lugovi” za razdoblje od 1. 1. 2004. do 31. 12. 2013., Odjel za uređivanje šuma Karlovac, Hrvatske šume d.o.o, Zagreb.
- Hunter, M. L., 1990: Wildlife, forest, and forestry: principles of managing forests for biological diversity. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- IPCC, 1995: Second Assessment: Climate Change 1995. Intergovernmental panel on climate change. <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>
- IPCC, 2000: Special report: Land use, land-use change and forestry, Summary for Policymakers. Intergovernmental panel on climate change.
<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf>

- IPCC, 2003: Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, In: J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (ur.), IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- Jackson, R. B., H. A. Mooney, E.-D. Schulze, 1997: A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 94(14):7362-7366.
- Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D. W. Johnson, K. Minkinen, K. A. Byrne, 2007: How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137(3-4):253-268.
- Janisch, J. E., M. E. Harmon, 2002: Successional changes in live and dead wood carbon stores: implications for net ecosystem productivity. *Tree Physiology* 22(2-3):77-89.
- Janssens, I. A., H. Lankreijer, G. Matteucci, A. S. Kowalski, N. Buchmann, D. Epron, K. Pilegaard, W. Kutsch, B. Longdoz, T. Grünwald, L. Montagnani, S. Dore, C. Rebmann, E. J. Moors, A. Grelle, Ü. Rannik, K. Morgenstern, S. Oltchev, R. Clement, J. Guðmundsson, S. Minerbi, P. Berbigier, A. Ibrom, J. Moncrieff, M. Aubinet, C. Bernhofer, N. O. Jensen, T. Vesala, A. Granier, E.-D. Schulze, A. Lindroth, A. J. Dolman, P. G. Jarvis, R. Ceulemans, R. Valentini, 2001: Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology* 7(3):269-278.
- Johnson, E. A., K. Miyanishi, 2008: Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology letters* 11(5):419-31.
- Kelly, D., V. L. Sork, 2002: Mast seeding in perennial plants: why, how, where? *Annual Rev. Ecol. Syst.*, 33: 427 – 447.
- King, D. A., 1993: A model analysis of the influence of root and foliage allocation on forest production and competition between trees. *Tree Physiology* 12(2):119-135.
- Klepac, D., 1965: Uređivanje šuma. Sveučilište u Zagrebu, Nakladni zavod Znanje, 341 str., Zagreb.
- Klepac D., G. Fabijanić, 1996: Uređivanje šuma hrasta lužnjaka. U: D. Klepac (ur.), *Monografija hrast lužnjak u Hrvatskoj*, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Hrvatske šume d.o.o, 257-272, Vinkovci – Zagreb.

- Kos, A., D. Horvat, J. Čavlović, S. Risović, 2004: Utjecaj šumarske i drvnoindustrijske djelatnosti kao sastavnice procesa kruženja ugljika na promjenu klime. *Drvena industrija* 55(3):129-137.
- Kozlovski, T. T., S. G. Pallardy, 1997: *Physiology of woody plants*, Academic Press, 411 str., San Diego – London.
- Keeland, B. D., R. R. Sharitz, 1993: Accuracy of tree growth measurements using dendrometer bands. *Canadian Journal of Forest Research* 23(11):2454-2457.
- Keeland, B. D., P. J. Young, 2004: Construction and installation of dendrometer bands for periodic tree-growth measurements. National Wetlands Research Centre, Lafayette, LA. <http://www.nwrc.usgs.gov/Dendrometer/>
- Laasasenaho, J., 1982: Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Commun. Inst. For. Fenn.* 108, 1–74.
- Landsberg, J. J., S. T. Gower, 1997: *Applications of physiological ecology to forest management*, Academic Press, 354 str., San Diego.
- Law, B. E., F. M. Kelliher, D. D. Baldocchi, P.M. Anthoni, J. Irvine, D. Moore, S. Van Tuyl, 2001: Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 110(1):27-43.
- Lehtonen, A., R. Mäkipää, J. Heikkinen, R. Sievänen, J. Liski, 2004: Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188(1-3):211–224.
- Liski, J., H. Ilvesniemi, A. Mäkelä, C. J. Westman, 1999: CO₂ emissions from soil in response to climatic warming are overestimated – the decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature. *Ambio* 28:171-174
- Litton, C. M., J. W. Raich, M. Ryan, 2007: Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13(10):2089-2109.
- Livingston, G. P., G. L. Hutchinson, 1995: Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. U: Matson, P. A., R. C. Harriss (ur.), *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. Blackwell Scientific Publications, 14–51, Oxford.

- Lloyd, J., J. A. Taylor, 1994: On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology* 8(3):315-323.
- Luo, Y., X. Zhou, 2006: Soil respiration and the environment. Elsevier, 316 str.
- Luan, J., S. Liu, J. Wang, X. Zhu, Z. Shi, Z., 2011: Rhizospheric and heterotrophic respiration of warm-temperate oak chronosequence in China. *Soil Biology and Biochemistry* 43(3):503-512.
- Luyssaert, S., P. Ciais, S. L. Piao, E.-D. Schulze, M. Jung, S. Zaehle, M. J. Schelhaas, M. Reichstein, G. Churkina, D. Papale, G. Abril, C. Beer, J. Grace, D. Loustau, G. Matteucci, F. Magnani, G. J. Nabuurs, H. Verbeeck, M. Sulkava, G. R. Van der Werf, I. A. Janssens and members of the CARBOEUROPE-IP SYNTHESIS TEAM, 2010: The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology* 16(5):1429-1450.
- Luyssaert, S., E.-D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B. E. Law, P. Ciais, J. Grace, 2008: Old-growth forests as global carbon sink. *Nature* 455(7210):213-215.
- Luyssaert, S., I. Inglima, M. Jung, A. D. Richardson, M. Reichstein, D. Papale, S. L. Piao, E.-D. Schulze, L. Wingate, G. Matteucci, L. Arago, M. Aubinet, C. Beer, C. Bernhofer, K. G. Black, D. Bonal, J.-M. Bonnefond, J. Chambers, P. Ciais, B. Cook, K. J. Davis, A. J. Dolman, B. Gielen, M. Goulden, J. Grace, A. Granier, A. Grelle, T. Griffis, T. Grünwald, G. Guidolotti, P. J. Hanson, R. Harding, D. Y. Hollinger, L. R. Hutya, P. Kolari, B. Kruijt, W. Kutsch, F. Lagergren, T. Laurila, B. E. Law, G. Le Maire, A. Lindroth, D. Loustau, Y. Malhi, J. Mateu, M. Migliavacca, L. Misson, L. Montagnani, J. Moncrieff, E. Moors, J. W. Munger, E. Nikinmaa, S. V. Ollinger, G. Pita, C. Rebmann, O. Roupsard, N. Saigusa, M. J. Sanz, G. Seufert, C. Sierra, M.-L. Smith, J. Tang, R. Valentini, T. Vesala, I. A. Janssens, 2007: CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* 13(12):2509-2537.
- Mäkipää, R., T. Linkosalo, 2011: A non-destructive field method for measuring wood density of decaying logs. *Silva Fennica* 45(5):1135-1142.
- Marjanović, H., 2009: Modeliranje razvoja stabala i elemenata strukture u mladim sastojinama hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), Disertacija, Šumarski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 213 str., Zagreb.

- Marjanović, H., M. Z. Ostrogović, G. Alberti, I. Balenović, E. Paladinić, K. Indir, A. Peressotti, D. Vuletić, 2011: Dinamika ugljika u mlađim sastojinama hrasta lužnjaka tijekom dvije vegetacije. Šumarski list 135(posebni broj):59-73.
- Marjanović, H., G. Alberti, J. Balogh, S. Czóbel, L. Horváth, A. Jagodics, Z. Nagy, M. Z. Ostrogović, A. Peressotti, E. Führer, 2010: Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Forests. U: L. Haszpra (ur.) Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective, 121-156.
- Marjanović, H., G. Alberti, E. Paladinić, K. Indir, G. Delle Vedove, A. Peressotti, D. Vuletić, 2008: One year since the establishment of a research station for intensive monitoring of carbon cycling in a Pedunculate oak stand – What have we learnt?. U: Matić, S., I. Anić (ur.), Zbornik radova sa skupa „Šume hrasta lužnjaka u promijenjenim stanišnim i gospodarskim uvjetima“, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Zagreb.
- Marjanović, H., A. Benndorf, K. Indir, E. Paladinić, A. Peressotti, H. Schweiger, D. Vuletić, 2007: CO₂ and forests in Croatia. U: A. Peressotti (ur.), Local Strategies For Land Use Management According to Kyoto Protocol, Forum Editrice Universitaria Udinese srl., Udine, 121-128.
- Matić, S., 1996: Sjeme hrasta lužnjaka kao temeljni uvjet nastanka i opstanka lužnjakovih šuma. U: D. Klepac (ur.), Monografija hrast lužnjak u Hrvatskoj, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Hrvatske šume d.o.o, 145-157, Vinkovci – Zagreb.
- Mattson, K. G., W. T. Swank, J. B. Waide, 1987: Decomposition of woody debris in a regenerating, clear-cut forest in the Southern Appalachians. Canadian Journal of Forest Research 17:712-721.
- Mayer, B., 1996: Hidropedološki odnosi na području nizinskih šuma Pokupskog bazena. Radovi Šumarskog instituta, Jastrebarsko 31:37–89, Zagreb.
- Meier, C. E., J. A. Stanturf, E. S. Gardiner, 2006: Litterfall in the hardwood forest of a minor alluvial-floodplain. Forest ecology and management 234(1-3):60-77.
- Mund, M, 2004: Carbon pools of European beech forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. Doktorski rad. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe A, Band 189, 256 str.

- Mund M., E. Kummetz, M. Hein, G. A. Bauer, E.-D. Schulze, 2002: Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management* 171(3):275-296.
- Nacionalna šumarska politika i strategija. Narodne novine br.120/2003.
- Olsen, J. S., 1963: Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44(2):322-331, New York.
- Ostrogović, M. Z., H. Marjanović, I. Balenović, E. Paladinić, K. Indir, D. Vuletić, M. Benko, 2009: Unutar-sezonska dinamika debljinskog prirasta pojedinih vrsta drveća unutar odabrane sastojine hrasta lužnjaka. U: Matić, S., I. Anić (ur.), Zbornik radova sa skupa „Šume hrasta lužnjaka u promijenjenim stanišnim i gospodarskim prilikama“, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, 129-141, Zagreb.
- Paladinić, E., 2009: Procjena sposobnosti šumskih sastojina za spremanje ugljika u kontekstu obveza u provedbi Kyoto protokola. Disertacija, Šumarski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 147 str., Zagreb.
- Palmer, J., J. Ogden, 1983: A dendrometer band study of the seasonal pattern of radial increment in kauri (*Agathis australis*). *New Zealand Journal of Botany* 21(1):121-125.
- Peichl, M., M. A. Arain, J. J. Brodeur, 2010: Age effects on carbon fluxes in temperate pine forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(7-8):1090-1101.
- Peltoniemi, M., R. Mäkipää, J. Liski, P. Tamminen, 2004: Changes in soil carbon with stand age – an evaluation of a modelling method with empirical data. *Global Change Biology* 10(12):2078-2091.
- Pernar, N., E. Klimo, D. Bakšić, I. Perković, M. Rybniček, H. Vavrčik, V. H. Gryc, 2012: Akumulacija ugljika i dušika u sastojini crne johe (*Alnus glutinosa* Gaertn.) u Podravini. *Šumarski list* 136(9-10):431-444.
- Post, W. M., W. R. Emanuel, P. J. Zinke, A. G. Stangenberger, 1982: Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298(5870):156-159.
- Pranjić, A., 1986: Šumarska biometrika, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, 204 str.
- Pregitzer, K. S., E. S. Euskirchen, 2004: Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10(1):1-26.

- Prewein, C., M. Endemann, V. Reinöhl, J. Salaj, V. Sunderlikova, E. Wilhelm, 2006: Physiological and morphological characteristics during development of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) zygotic embryos. *Trees-stuct. funct.*, 20:53-60.
- Price, D. T., D. H. Halliwell, M. J. Apps, W. A. Kurz, S. R. Curry, 1997: Comprehensive assessment of carbon stocks and fluxes in a Boreal-Cordilleran forest management unit. *Canadian Journal of Forest Research* 27(12):2005-2016.
- Reichstein, M., A. Rey, A. Freibauer, J. D. Tenhunen, R. Valentini, J. Banza, P. Casals, Y. Cheng, J. M. Grünzweig, J. Irvine, R. Joffre, B. E. Law, D. Loustau, F. Miglietta, W. C. Oechel, J.-M. Ourcival, J. Pereira, A. Peressotti, F. Ponti, Y. Qi, S. Rambal, M. B. Rayment, J. Romanya, F. Rossi, V. Tedeschi, G. Tirone, M. Xu, D. Yakir, 2003: Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4):1104, 15-1 do 15-15.
- Reichstein, M., E. Falge, D. D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grünwald, K. Havránková, H. Ilvesniemi, D. Janous, A. Knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J.-M. Ourcival, J. Pumpanen, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir, R. Valentini, 2005: On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11(9):1424-1439.
- Rey, A., Pegoraro, E., Tedeschi, V., De Parri, I., Jarvis, P. G., Valentini, R., 2002: Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology* 8(9):851-866.
- Ryan, M. G., D. Binkley, J. H. Fownes, 1997: Age-Related Decline in Forest Productivity: Pattern and Process. *Advances in Ecological Research* 27:214-262.
- Scheu, S., J. Schaueremann, 1994: Decomposition of roots and twigs: Effects of wood type (beech and ash), diameter, site of exposure and macro fauna exclusion. *Plant and Soil* 163(1):13-24.
- Schlesinger, W. H., 1984: Soil organic matter: A source of atmospheric CO₂. U: Woodwell, G. M. (ur), *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: Measurement by Remote Sensing*, 111-127, John Wiley, New York.

- Scott N. A., C. A. Rodrigues, H. Hughes, J. T. Lee, E. A. Davidson, D. B. Dail, P. Malerba, 2004: Changes in carbon storage and net carbon exchange one year after an initial shelterwood harvest at Howland Forest. *Environmental Management* 33(1):S9-S22.
- Schulze, E.-D., 2006: Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences* 3(2):147-166.
- Seletković, Z., Z. Katušin, 1992: Klima Hrvatske. U: Rauš, Đ. (ur.), Šume u Hrvatskoj, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i "Hrvatske šume" d.o.o., 13-18, Zagreb.
- Six, J., R. T. Conant, E. A. Paul, K. Paustian, 2002: Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241(2):155-176.
- StatSoft Inc., 2004: STATISTICA (data analysis software system), Version 6. www.statsoft.com
- Subke, J.-A., I. Inglima, M. F. Cotrufo, 2006: Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A metaanalytical review. *Global Change Biology* 12(6):921-943.
- Škorić, 1982: Priručnik za pedološka istraživanja. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet poljoprivrednih znanosti, 57 str., Zagreb.
- Špiranec, M., 1975a: Prirasno-prihodne tablice. Radovi Šumarskog instituta, Jastrebarsko, 25:1-103, Zagreb
- Špiranec, M., 1975b: Drvnogromadne tablice. Radovi Šumarskog instituta, Jastrebarsko, 22:1-262, Zagreb
- Šumarska enciklopedija, 1959., I. izdanje, Leksikografski zavod FNRJ.
- Teslak, K., J. Čavlović, M. Božić, 2012: Simplag, računalni program za prokeciju razvoja regularne šume: konstrukcija, struktura i primjena. *Šumarski list* 136(7-8):331-342, Zagreb.
- Thomas, P. A., J. R. Pacham, 2007: Reproductive strategies of forest plants. *Ecology of woodlands and forests: Description, dynamics, and diversity*. United Kingdom University Press, Cambridge, 144-186.
- Župek, B., G. Zanchi, P. J. Verkerk, G. Churkina, N. Viovy, J. K. Hughes, M. Lindner, 2010: A comparison of alternative modelling approaches to evaluate the European forest carbon fluxes. *Forest ecology and management* 260(3):241-251.
- Valentini, R., G. Matteucci, A. J. Dolman, E.-D. Schulze, C. Rebmann, E. J. Moors, A. Granier, P. Gross, N. O. Jensen, K. Pilegaard, A. Lindroth, A. Grelle, C. Bernhofer, T.

- Grünwald, M. Aubinet, R. Ceulemans, A. S. Kowalski, T. Vesala, Ü. Rannik, P. Berbigier, D. Loustau, J. Gudmundsson, H. Thorgeirsson, A. Ibrom, K. Morgenstern, R. Clement, J. Moncrieff, L. Montagnani, S. Minerbi, P. G. Jarvis, 2000: Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404:861–865
- Van Wagner, C. E., 1968: The Line Intersect Method in Forest Fuel Sampling. *Forest Science* 14(1):20-26.
- Verkerk, P. J., P. Anttila, J. Eggers, M. Lindner, A. Asikainen, 2011: The realisable potential supply of woody biomass from forests in the European Union. *Forest ecology and management* 261(11):2007-2015.
- Vesterdal, L., M.-B. Johansson, C. van der Salm, K. Hansen, 2009: Soil carbon sequestration following afforestation in Denmark, Sweden and the Netherlands. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 6. DOI:10.1088/1755-1307/6/8/082018
- Vidaković, M., 1983: Plod. Period stvaranja sjemenki. *Šumarska enciklopedija* 2: 728 – 729.
- Vukelić, J., 2012: Šumska vegetacija Hrvatske. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Državni zavod za zaštitu prirode, 403 str., Zagreb.
- Vukelić, J., Đ. Rauš, 1998: Šumarska fitocenologija i šumske zajednice u Hrvatskoj. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 310 str., Zagreb.
- Walker, L. R., D. A. Wardle, R. D. Bardgett, B. D. Clarkson, 2010: The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development. *Journal of ecology* 98(4):725-736.
- Wang, C., 2006: Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management* 222(1-3):9-16.
- Walmsley, J. D., Godbold, D. L., 2010: Stump Harvesting for Bioenergy - A Review of the Environmental Impacts. *Forestry* 83(1):17-38
- Yanai, R. D., S. W. Currie, C. L. Goodale, 2003: Soil carbon dynamics after forest harvest: An ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems* 6(3):197-212.
- Yuste, J. C., Nagy, M., Janssens, I. A., Carrara, A., Ceulemans, R., 2005a: Soil respiration in a mixed temperate forest and its contribution to total ecosystem respiration. *Tree Physiology* 25(5):609-619.

- Yuste, J. C., Konôpka, B., Janssens, I. A., Coenen, K., Xiao, C. W., Ceulemans, R., 2005b: Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighbouring stands of *Quercus robur* and *Pinus sylvestris*. Tree Physiology 25(6):701-712.

SAŽETAK

U radu su procijenjene zalihe, tokovi i bilanca ugljika šumskog ekosustava hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u Pokupskom bazenu. Primjenom metode kronosekvence utvrđena je dinamika razvoja zaliha ugljika tijekom životnog vijeka sastojine hrasta lužnjaka, odnosno od 5. do 168. godine starosti. Također je procijenjena i bilanca ugljika odabranog šumskog ekosustava, kao neto razlika pohranjenog i oslobođenog ugljika te je utvrđena njena unutar-sezonska dinamika te dinamika tijekom razvoja šumske sastojine. Na temelju podataka o uređajnom razredu hrast lužnjak iz sjemena, u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“, utvrđeno je stvarno stanje zaliha i bilance ugljika u razdoblju trajanja važeće Osnove gospodarenja, od 2004. do 2013. godine. Primjenom različitih scenarija obnove provedena je projekcija razvoja pojedinih sastojina odabranog uređajnog razreda za pet 10-godišnjih razdoblja, od 2004. do 2053. godine, te su utvrđene bilance ugljika ostvarene primjenom navedenih scenarija.

Na razini sastojine procijenjena je zaliha ugljika u živoj biomasi, mrtvom drvu (sušci, panjevi i drvni otpad) te šumskoj prostirci i organskoj tvari mineralnog dijela tla. Također su na razini sastojine procijenjeni glavni tokovi ugljika: neto primarna produkcija drvene biomase, produkcija lista i plodova, produkcija sitnog korijena, ukupna i heterotrofna respiracija tla te dekompozicija nadzemne biomase mrtvog drva. Uz pretpostavku da je bilanca ugljika na razini sastojine jednaka neto produkciji ekosustava, ista je procijenjena kao razlika ukupne neto primarne produkcije i ukupne heterotrofne respiracije ekosustava. Na razini uređajnog razreda utvrđeni su i gubitci ugljika sječom, a bilanca ugljika je procijenjena kao razlika neto produkcije ekosustava i gubitaka ugljika sječom.

Raspodjela zaliha ugljika po glavnim sastavnicama šumskog ekosustava hrasta lužnjaka mijenja se tijekom životnog vijeka na način da su u sastojinama I. dobnog razreda najveće zalihe ugljika pohranjene u organskoj tvari tla, a u starijim sastojinama su najveće zalihe ugljika pohranjene u živoj biomasi. Zalihe u organskom horizontu tla povećavaju se sa starosti sastojine, dok su zalihe ugljika u mrtvom drvu najveće u najmlađim i starim sastojinama, a najniže u srednjodobnim i zrelim sastojinama. Za zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla nije utvrđena statistički značajna ovisnost o starosti sastojine čime je potvrđena pretpostavka da u šumskom ekosustavu hrasta lužnjaka dosadašnji način gospodarenja nema značajniji utjecaj na zalihe ugljika u mineralnom dijelu tla. Sastojina hrasta lužnjaka, kada je uspješno obnovljena, postaje ponor ugljika već u vrlo ranoj dobi, između 5-te i 13-te godine

starosti, što je posljedica veće ukupne neto primarne produkcije u odnosu na ukupnu heterotrofnu respiraciju, i sastojina ostaje ponor ugljika i nakon dobi od 160 godina. Kulminacija bilance ugljika, zabilježena kod sastojine u dobi od 53 godine, odgovara kulminaciji produkcije drvene biomase.

Na temelju dobivenih rezultata izrađeni su jednostavni modeli ovisnosti pojedinih zaliha i tokova ugljika o lako dostupnim varijablama šumske sastojine (dob sastojine, drvena zaliha) koji su poslužili za procjenu zaliha i bilance ugljika u stvarnoj šumi hrasta lužnjaka. U uređajnom razredu hrast lužnjak iz sjemena u gospodarskoj jedinici „Jastrebarski lugovi“, u razdoblju od 2004. do 2013. godine ostvarena je pozitivna bilanca ugljika. U simulacijskom razdoblju od 2004. do 2053. također je ostvarena kumulativna pozitivna bilanca ugljika i izdvojen je scenarij obnove koji najviše odgovara suvremenim zahtjevima potrajnog gospodarenja šumama.

SUMMARY

Within this research carbon stocks, fluxes and carbon balance was estimated in Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) forest ecosystem in river Kupa basin. Using chronosequence method carbon stocks dynamic during a life-time of Pedunculate oak stand was determined, from the age of 5 to 168 years. Also, carbon balance of selected forest ecosystem was estimated as difference between accumulated and released carbon, and intra-seasonal dynamic as well as dynamic during a development of stand was determined. On the basis of available data on the management class of Pedunculate Oak high stand, current state of carbon stocks and carbon balance was estimated for the period of current management plan, from the year 2004 to 2013. Using different scenarios of defining area for regeneration, development projection of individual stands of selected management class was made for five 10-years periods, from the year 2004 to 2053, and different carbon balance estimates were obtained for each scenario.

At the stand level carbon stocks in live biomass, dead wood (snags, stumps and woody debris), forest floor and organic carbon in mineral soil were estimated. Also, at the stand level, main carbon fluxes were estimated: net primary production in woody biomass, leaf and seed production, fine root production, total and heterotrophic soil respiration and decomposition of aboveground dead wood. Net ecosystem production at the stand level was estimated as difference between total net primary production and total heterotrophic respiration, and it is assumed that it is equal to carbon balance. At the management class level carbon losses due to harvest were determined, and carbon balance was estimated as difference between net ecosystem production and carbon losses due to harvest.

Carbon stock share in main forest ecosystem pools changes during a stand development in a way that youngest stands store more carbon in soil organic matter than in live biomass, while in older stands more carbon is stored in live biomass than in soil. Carbon stocks in organic layer increase with stand age, while carbon stocks in dead wood are highest in young and older stands, and lowest in middle-aged, mature stands. For carbon stocks in mineral soil layer no statistically significant age-dependent trend was observed. That confirmed the assumption that harvest activities under current management practice in this type of Pedunculate Oak forest ecosystems does not significantly influence carbon stocks in mineral soil layer. Pedunculate Oak stand, when successfully regenerated, becomes carbon sink very early in a development phase, between the age of 5 and 13 years, as a result of

higher total net primary production with respect to total heterotrophic respiration, and stands remain carbon sink even after the age of 160 years. Stand reaches greatest carbon sink in the age of 53 years, and it is in accordance with highest woody biomass production.

Obtained results were used to develop simple models of carbon stocks and fluxes as a function of easily obtained stand variables (stand age, growing stock) which were then used to estimate carbon stocks and carbon balance in real forest. In Pedunculate Oak high stand management class, in management unit “Jastrebarski lugovi”, positive carbon balance was estimated for the period from 2004 to 2013. For the simulation period from 2004 to 2053, also a positive cumulative carbon balance was estimated, and appropriate scenario that meets the needs of modern sustainable forest management was recognized.

PRILOZI

Prilog 1. Popis inventurnih ploha i njihovih koordinata

	Popis ploha	y	x		Popis ploha	y	x		Popis ploha	y	x
I DOBNI RAZRED	830-356	5552994	5059069	II DOBNI RAZRED	770364	5553906	5053084	III DOBNI RAZRED	785-371	5554578	5054597
	830-357	5553094	5059071		770365	5554006	5053086		786-370	5554476	5054695
	830-358	5553194	5059073		770366	5554106	5053088		786-371	5554576	5054697
	831-356	5552992	5059169		770367	5554206	5053090		787-369	5554374	5054794
	831-357	5553092	5059171		770368	5554306	5053092		787-370	5554474	5054795
	831-358	5553192	5059173		771364	5553904	5053184		787-371	5554574	5054797
	832-356	5552990	5059269		771365	5554004	5053186		788-368	5554272	5054892
	832-357	5553090	5059271		771366	5554104	5053188		788-369	5554372	5054894
	832-358	5553190	5059273		771367	5554204	5053190		788-370	5554472	5054895
IV DOBNI RAZRED				VI DOBNI RAZRED	772364	5553902	5053284	VII DOBNI RAZRED			
					772365	5554002	5053286				
	783-394	5556882	5054440		824-356*	5553055	5058470		799-370	5554452	5055995
	783-395	5556982	5054442		825-356	5553003	5058569		799-371	5554552	5055997
	783-396	5557082	5054444		826-355	5552901	5058667		799-372	5554652	5055999
	784-394	5556880	5054540		826-356	5553001	5058669		800-370	5554450	5056095
	784-395	5556980	5054542		827-354*	5552840	5058765		800-371	5554550	5056097
	784-396	5557080	5054544		827-355	5552899	5058767		800-372	5554650	5056099
	785-394	5556878	5054640		827-356	5552999	5058769		801-370	5554448	5056195
	785-395	5556978	5054642						801-371	5554548	5056197
	785-396	5557078	5054644						801-372	5554648	5056199

Prilog 2. Jednadžbe za izračun zaliha i tokova ugljika i njihove parcijalne derivacije.

Jednadžba za izračun žive biomase (W^{ZB}),

$$W^{ZB} = W_{nd}^{hr} + W_p^{hr} + W_{nd}^{ost} + W_p^{ost} + W_l$$

$$W_p^{hr} = \left(W_{nd}^{hr} + W_l \times \frac{W_{nd}^{hr}}{W_{nd}^{uk}} \right) \times f^{hr}$$

$$W_p^{ost} = \left(W_{nd}^{ost} + W_l \times \frac{W_{nd}^{hr}}{W_{nd}^{uk}} \right) \times f^{ost}$$

$$W^{ZB} = W_{nd}^{hr} \times (1 + f^{hr}) + W_{nd}^{ost} \times (1 + f^{ost}) + W_l + f^{hr} \times (W_{nd}^{uk} - W_{nd}^{ost}) \times \frac{W_l}{W_{nd}^{uk}} + f^{ost} \times W_{nd}^{ost} \times \frac{W_l}{W_{nd}^{uk}}$$

$$W^{ZB} = W_{nd}^{hr} \times (1 + f^{hr}) + W_{nd}^{ost} \times (1 + f^{ost}) + W_l \times (1 + f^{hr}) + \frac{W_{nd}^{ost}}{W_{nd}^{hr} + W_{nd}^{ost}} \times W_l \times (f^{ost} - f^{hr});$$

gdje je f – oznaka za omjer podzemne i nadzemne biomase (R:S).

Parcijalne derivacije jednadžbe žive biomase:

$$\frac{\partial W^{ZB}}{\partial W_{nd}^{hr}} = 1 + f^{hr} - \frac{W_{nd}^{ost}}{(W_{nd}^{hr} + W_{nd}^{ost})^2} \times W_l (f^{ost} - f^{hr})$$

$$\frac{\partial W^{ZB}}{\partial W_{nd}^{ost}} = 1 + f^{ost} + \frac{W_{nd}^{hr}}{(W_{nd}^{hr} + W_{nd}^{ost})^2} \times W_l (f^{ost} - f^{hr})$$

$$\frac{\partial W^{ZB}}{\partial W_l} = 1 + f^{hr} + \frac{W_{nd}^{ost}}{W_{nd}^{hr} + W_{nd}^{ost}} \times (f^{ost} - f^{hr})$$

Jednadžba za izračun dekompozicije nadzemne biomase mrtvog drva (R^{MD}):

$$R^{MD} = C_n^{MD} (1 - e^{-kt})$$

Parcijalne derivacije dekompozicije nadzemne biomase mrtvog drva:

$$\frac{\partial R^{MD}}{\partial C_n^{MD}} = 1 - e^{-kt}$$

$$\frac{\partial R^{MD}}{\partial k} = C_n^{MD} \times (-1) \times (-t) \times e^{-2kt}$$

Omjer zaliha ugljika u mrtvom drvu, organskom horizontu i mineralnom dijelu tla (x) i zaliha ugljika u živoj biomasi (y):

$$A = \frac{x}{y}$$

Parcijalne derivacije omjera dviju varijabli:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{1}{y}$$

$$\frac{\partial A}{\partial y} = -\frac{x}{y^2}$$

ŽIVOTOPIS



Maša Zorana Ostrogović rođena je 24. srpnja 1982. godine u Zagrebu. Osnovnu školu Dr. Ivan Merz završava 1997. godine, a Gornjogradsku gimnaziju 2001. godine te iste godine upisuje Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirala je 14. rujna 2007. godine, na Zavodu za ekologiju i uzgajanje šuma, sa radom pod naslovom „Utjecaj svjetla na prirodno pomlađivanje hrasta lužnjaka na malim površinama“. Iste godine, 1. prosinca, zapošljava se na Hrvatskom šumarskom institutu, na Zavodu za uređivanje šuma i šumarsku ekonomiku, kao znanstveni novak – asistent na projekt Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa pod nazivom „Rast i razvoj šuma u različitim ekološkim i gospodarskim uvjetima“. U akademskoj godini 2008./2009. upisuje poslijediplomski doktorski studij Šumarstvo na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Urbano šumarstvo, zaštita prirode, uređivanje i zaštita šuma.

U svom znanstveno-istraživačkom radu bavi se izmjerom i procjenom zaliha i tokova ugljika u šumskim ekosustavima te praćenjem utjecaja meteoroloških parametara na rast i prirast šumskih sastojina.

Suradnik je na projektu *ICP Forests HR* te na više domaćih znanstveno-istraživačkih projekata koje financiraju Hrvatske šume d.o.o. Od 2009. godine aktivno sudjeluje u COST akciji FP0803 pod nazivom *Belowground carbon turnover in European forests*, a od 2011. godine je suvoditelj projekta za Hrvatske šume d.o.o. pod nazivom *Ovisnost prirasta o mikrostanišnim i meteorološkim prilikama u šumi hrasta lužnjaka* (voditelj dr.sc. Hrvoje Marjanović).

Tijekom poslijediplomskog studija završila je nekoliko međunarodnih radionica i sudjelovala na više domaćih i međunarodnih konferencija. Kao autor i koautor objavila je 8 radova različitih kategorija.

Osim znanstveno-istraživačkog rada, obavljala je i stručne poslove vezane uz izradu Osnova gospodarenja. Aktivno se služi engleskim jezikom.

Član je Hrvatskog šumarskog društva.

U slobodno vrijeme se bavi plesom i planinari.

Radovi u prvoj skupini referentnih časopisa (a1)

1. Vicca, S., A. K. Gilgen, M. Camino Serrano, F. E. Dreesen, J. S. Dukes, M. Estiarte, S. B. Gray, G. Guidolotti, S. S. Hoeppe, A. D. B. Leakey, R. Ogaya, D. R. Ort, **M. Z. Ostrogović**, S. Rambal, J. Sardans, M. Schmitt, M. Siebers, L. van der Linden, O. van Straaten, A. Granier, 2012: *Urgent need for a common metric to make precipitation manipulation experiments comparable*. New phytologist 195(3):518-522 (pismo).
2. Balenović, I., A. Seletković, R. Pernar, **M. Z. Ostrogović**, A. Jazbec, 2012: Regresijski modeli procjene prsnih promjera za potrebe fotogrametrijske izmjere. Šumarski list 136(3-4):129-139 (članak, znanstveni).
3. Marjanović, H., **M. Z. Ostrogović**, G. Alberti, I. Balenović, E. Paladinić, K. Indir, A. Peressotti, D. Vuletić, 2011: Dinamika ugljika u mlađim sastojinama hrasta lužnjaka tijekom dvije vegetacije. Šumarski list 135(posebni broj):59-73 (članak, znanstveni).
4. Paladinić, E., D. Štimac, H. Marjanović, I. Balenović, **M. Z. Ostrogović**, 2011: Sušenje obične jele (*Abies alba* Mill.) s proizvodnog stajališta na primjeru nekolicine bukovo-jelovih sastojina. Šumarski list 135(posebni broj):248-263 (članak, stručni).
5. **Ostrogović, M. Z.**, K. Sever, I. Anić, 2010: Utjecaj svjetla na prirodno pomlađivanje hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u park-šumi Maksimir u Zagrebu. Šumarski list 134:115-123 (članak, znanstveni).

Radovi s domaćih i međunarodnih skupova (a3)

1. **Ostrogović, M. Z.**, H. Marjanović, I. Balenović, E. Paladinić, K. Indir, D. Vuletić, M. Benko, 2009: Unutarsezonska dinamika plošnog prirasta pojedinih vrsta drveća unutar odabrane sastojine hrasta lužnjaka U: Matić, S., I. Anić (ur.), Šume hrasta lužnjaka u promijenjenim stanišnim i gospodarskim uvjetima, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, 129-142 (prethodno priopćenje, domaća recenzija).
2. Balenović, I., H. Marjanović, G. Alberti, **M. Z. Ostrogović**, G. Delle Vedove, A. Peressotti, D. Vuletić, 2009: First results of soil respiration measurements in a Pedunculate Oak stand of the Pokupsko basin. U: Matić, S., I. Anić (ur.), Šume hrasta lužnjaka u promijenjenim stanišnim i gospodarskim uvjetima, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, 209-221 (prethodno priopćenje, domaća recenzija).

Ostali radovi:

1. Marjanović, H., G. Alberti, J. Balogh, S. Czóbel, L. Horváth, A. Jagodics, Z. Nagy, **M. Z. Ostrogović**, A. Peressotti, E. Führer, 2010: *Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Forests*. U: L. Haszpra (ur.) *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective*, 121-156.

Sudjelovanja na domaćim i međunarodnim skupovima s recenzijom uredništva:

1. **Ostrogović, M. Z.**, H. Marjanović, 2012: *Belowground carbon stocks in lowland oak chronosequence in Croatia*. COST FP0803, Antalya, 29. listopada – 1. studenog, (poster).
2. Marjanović, H., **M. Z. Ostrogović**, G. Alberti, G. Delle Vedove, A. Peressotti, 2012: *Soil respiration in lowland forests – problem of water-logging*. CLIMMANI radionica, Dubrovnik, 6. – 8. lipnja, (usmeno izlaganje)
3. **Ostrogović, M. Z.**, H. Marjanović, G. Alberti, I. Balenović, A. Peressotti, 2011: *Using chronosequence method for assessing change in forest growth conditions*. Geophysical Research Abstracts 13, EGU2011-12942, Copernicus Publications (poster, međunarodna recenzija).
4. Marjanović, H., **M. Z. Ostrogović**, G. Alberti, I. Balenović, A. Peressotti, 2011: *Estimates of net ecosystem productivity at Jastrebarsko forest eddy covariance site in comparison with other forest sites in FLUXNET*. Geophysical Research Abstracts 13, EGU2011-12806, Copernicus Publications (poster, međunarodna recenzija).
5. Marjanović, H., **M. Z. Ostrogović**, E. Paladinić, I. Balenović, K. Indir, B. Vrbek, 2010: *First estimates of carbon stocks by pools in a beech-fir forest stand in Croatia*. U: Seletković, Z. (ur.), FAGUS 2010, 27. – 28. listopada, Varaždin, 35-37 (usmeno izlaganje, sažetak).
6. Paladinić, E., H. Marjanović, **M. Z. Ostrogović**, I. Balenović, S. Krajter, D. Vuletić, 2010: *Simulation of carbon sequestration in aboveground biomass of managed and unmanaged mixed stands of European beech*. U: Seletković, Z. (ur.), FAGUS 2010, Varaždin, 27. – 28. listopada, 32-34 (usmeno izlaganje, sažetak).

Diplomski rad

1. **Ostrogović, M. Z.**, 2007: Utjecaj svjetla na prirodno pomlađivanje hrasta lužnjaka na malim površinama. Diplomski rad, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 49 str., Zagreb.

CURRICULUM VITAE

Maša Zorana Ostrogović was born on 24th of July 1982 in Zagreb. She finished grammar school Dr. Ivan Merz in 1997, and high school in 2001. She graduated at Faculty of forestry University of Zagreb, on 14th of September 2007, at the Department of Ecology and Silviculture, with the Master thesis "Influence of light on the gap regeneration of Pedunculate oak". In the same year, 1st of December, she started working at the Croatian forest research institute, at Department for forest management and forestry economics, as science novice – assistant on the project of Ministry of Science, Education and Sports, entitled "Growth and development of forests in different ecological and management conditions". In academic year 2009/2010 she enrolled in postgraduate doctoral program Forestry, at the Faculty of forestry University of Zagreb, direction Urban forestry, nature protection, forest management and forest protection.

As a scientific researcher she is interested in measurement and estimation of carbon stocks and fluxes in forest ecosystems and monitoring the influence of meteorological parameters on growth of forest stands.

She associates in the ICP Forests HR project and several domestic scientific and research projects financed by „Croatian forests Ltd.“. Since 2009 she is actively involved in COST Action FP0803 entitled Belowground carbon turnover in European forests, and from 2011 she is an associate manager on project entitled „Pedunculate oak forest growth in correlation to micro-site and meteorological conditions" (leading project manager Dr. sc. Hrvoje Marjanović).

During postgraduate doctoral study she finished several international workshops and participated in many domestic and international conferences. As author and co-author she published 7 papers in different categories.

Aside her scientific and research work, she performed professional work for the purpose of writing management plans. She is actively using English.

She is a member of Croatian forest society.

In free time she does dancing and hiking.