

## DINAMIKA UGLJIKA U MLAĐIM SASTOJINAMA HRASTA LUŽNJAKA TIJEKOM DVIJE VEGETACIJE

### CARBON DYNAMICS IN YOUNGER STANDS OF PEDUNCULATE OAK DURING TWO VEGETATION PERIODS

Hrvoje MARJANOVIĆ<sup>1\*</sup>, Maša Zorana OSTROGOVIĆ<sup>1</sup>, Giorgio ALBERTI<sup>2</sup>, Ivan BALENOVIĆ<sup>1</sup>,  
Elvis PALADINIĆ<sup>1</sup>, Krunoslav INDIR<sup>1</sup>, Alessandro PERESSOTTI<sup>2</sup>, Dijana VULETIĆ<sup>1</sup>

**SAŽETAK:** U radu je procijenjena neto produktivnost ekosustava (NEP) i neto bilanca ugljika (NECB) u mladoj sastojini hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) pomoću dvije neovisne metode i to: a) mikrometeorološke metode vrtložne kovarijance (EC) te, b) kombinirane metode koja je uključivala biometrijsku izmjeru šumske biomase i periodičko mjerenje respiracije tla (SR). Maksimalni NEP zabilježen vrtložnom kovarijancom iznosio je  $10,7 \text{ gC m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$  u 2008. godine, odnosno  $12,2 \text{ gC m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$  u 2009. godini. Godišnje vrijednosti NEP kretale su se od  $384 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2008. do  $584 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2009. Godini, iz čega je razvidno da su sastojine u dohvat mjerne stanice u obje godine bile neto spremnik ugljika.

Biometrijskom metodom praćenja prirasta i produkcije listinca i sitnog drvnog otpada dobivena je neto primarna produktivnost (NPP) od  $777 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2008. godine, odnosno  $846 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2009. godini. Udio heterotrofne respiracije ( $R_h$ ) procijenjen je na 50 % od izmjerene ukupne SR, pa je  $R_h$  procijenjena na  $438 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2008. godini, odnosno  $441 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2009. godini. Kombiniranim metodom NEP je dobivena kao razlika NPP i  $R_h$ , a iznosila je  $339$  i  $405 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2008. godini, odnosno 2009. godini. Usporedba dvaju metoda procjene NEP-a daje dobro slaganje do srpnja za obje promatrane godine. Do odstupanja dolazi u drugom dijelu ljeta i jeseni kada prestaje debljinski prirast, ali stabla očito i dalje aktivno spremaju ugljik. Kombinirana metoda daje manje vrijednosti NEP-a u odnosu na metodu vrtložne kovarijance, iz više razloga npr.: udio  $R_h$  je manji od 50 %, omjer podzemnog i nadzemnog dijela biomase;  $R:S$  je veći od 0,257, i sl. Potrebna su daljnja istraživanja koja bi empirički odredila udio  $R_h$  u SR, omjer  $R:S$  te istraživanja količine ugljika u sastavnicama tla.

**Ključne riječi:** Metoda vrtložne kovarijance; respiracija tla; tokovi ugljika; pohrana ugljika

#### UVOD – Introduction

Šumski ekosustavi kroz proces rasta vežu atmosferski ugljik te imaju važnu ulogu u procesu kruženja

ugljika. U posljednje vrijeme raste globalna svijest o važnosti točne i detaljne procjene uloge šumskih ekosustava u pohranjivanju atmosferskog ugljika, posebice zbog potencijala kojega šumski ekosustavi imaju za ublažavanje posljedica uzrokovanih antropogenom emisijom stakleničkih plinova, poglavito  $\text{CO}_2$  (Brown 2002). Generalno gledano, šumska sastojina može predstavljati neto izvor ili neto ponor ugljika, ovisno o vrsti šumske vegetacije, razvojnom stadiju (Magnani *et al.*

<sup>1</sup> Dr. sc. Hrvoje Marjanović, Maša Zorana Ostrogović, dipl. ing. šum., Ivan Balenović, dipl. ing. šum., dr. sc. Elvis Paladinić, mr. sc. Krunoslav Indir, dr. sc. Dijana Vuletić, Hrvatski šumarski institut Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska

<sup>2</sup> Dr. sc. Giorgio Alberti, prof. dr. sc. Alessandro Peressotti, Department of Agricultural and Environmental Sciences, University of Udine Via delle Scienze 208, I-33100 Udine, Italy

\* hrvojem@sumins.hr, tel. ++385 (0)1 6311580

2007), vremenu promatranja (Goulden *et al.* 1996), klimatskim prilikama (Valentini 2003) te posrednom i neposrednom antropogenom djelovanju. Ugljik se u šumskom ekosustavu akumulira u živoj nadzemnoj i podzemnoj biomasi, mrtvoj organskoj tvari i organskoj tvari tla (Simončić *et al.* 2007).

Godišnji volumni prirast sastojine i godišnja produkcija lista korespondiraju s tokovima ugljika, koji se konvencijom označuju kao pozitivni jer povećavaju količinu ugljika u ekosustavu. Tokovi ugljika koji su rezultat procesa autotrofnog disanja i dekompozicije organske tvari konvencijom se označuju kao negativni, jer oslobađaju ugljik iz šumskog ekosustava. Suma navedenih (pozitivnih i negativnih) tokova ugljika predstavlja neto produkciju ekosustava – NEP (prema engl. *Net Ecosystem Production*) i to je jedna od temeljnih varijabli koja nam govori da li i kojom brzinom ekosustav sprema ugljik (Schulze *et al.* 2005).

U gospodarskim šumama, uz respiratorne procese kojima se oslobađa ugljik, odvija se i sječa. Zahvati sječe u konačnici također rezultiraju oslobađanjem ugljika, bilo da se on oslobađa sagorijevanjem posječene biomase ili njenim propadanjem nakon kraja trajanja određenog drvnog proizvoda, pa je to potrebno uzeti u obzir kada se promatra cjelokupni ciklus ugljika. U tom kontekstu, upotrebljava se termin neto bilanca ugljika ekosustava – NECB (prema engl. *Net Ecosystem Carbon Balance*) kojim se, osim respiratornih, uzimaju u obzir i odliv ugljika iz ekosustava zbog zahvata sječe (Chapin *et al.* 2006, Schulze 2006). NECB predstavlja neto razliku pohranjene i oslobođene količine ugljika na razini cijelog ekosustava. Precizno utvrđivanje bilance ugljika, odnosno praćenje svih tokova ugljika u šumskom ekosustavu predstavlja veliki izazov za istraživače.

Metoda vrtložne kovarijance (engl. *Eddy covariance*) je mikrometeorološka metoda (Swink 1951) koja se u agronomskoj i šumarskoj znanosti kori-

sti pri kvantifikaciji razmjene CO<sub>2</sub>, vodene pare i topline između atmosfere i ekosustava. To je statistička metoda kojom se analiziraju podaci skalarnih veličina (koncentracije CO<sub>2</sub> i vodene pare, temperature zraka) te smjera i brzine vjetrova (u 3D) koji se prikupljaju visokom učestalošću (10 – 20 puta u sekundi) kako bi se dobili tokovi spomenutih skalarnih veličina (Burba i Anderson 2010).

Na čitavom nizu različitih lokacija u svijetu se metodom vrtložne kovarijance obavljaju izmjere protoka ugljika između ekosustava i atmosfere, te se računa bilanca ugljika kopnenih ekosustava (Baldocchi 2003). Istraživačke postaje na kojima se koristi metoda vrtložne kovarijance povezane se kroz globalnu mrežu FLUXNET, u okviru koje se prikupljaju, obrađuju i dijele podaci od nekoliko regionalnih mreža (Baldocchi *et al.* 2001).

Metoda vrtložne kovarijance je financijski izazovna, jer zahtijeva uporabu skupih instrumenata (vrlo brzi CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O analizator, 3D anemometar, dataloger itd.) koje je potrebno postaviti iznad razine krošanja (najčešće je riječ o nekoj vrsti metalne konstrukcije ili tornja), zbog čega je njena primjena ograničena. Podaci dobiveni s jedne stanice najčešće se odnose na relativno usko područje oko tornja, i to od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara, ovisno o visini tornja. Posljedično, izražena je potreba za metodom utvrđivanja NEP-a na neki drugi način, po mogućnosti jeftiniji i barem približno pouzdan kao metoda vrtložne kovarijance.

Cilj ovoga rada je procijeniti bilancu ugljika u mladoj sastojini hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) (1); i usporediti dvije metode procjene NEP-a: mikrometeorološku metodu vrtložne kovarijance i kombiniranu metodu koja uključuje biometrijsku izmjeru šumske biomase i periodičko mjerenje respiracije tla (2). Dobiveni kvantitativni rezultati bilance ugljika trebali bi omogućiti ocjenu podudarnosti rezultata dobivenih pomoću dvije nezavisne metode.

## DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA I TEORIJSKA POZADINA

### *Previous research and theoretical background*

Kopneni ekosustavi imaju značajnu ulogu u kontekstu globalnog kruženja ugljika (IPCC 2000), stoga je razumna potreba za utvrđivanjem njihove bilance ugljika. Očekivane klimatske promjene koje se ogleđaju kroz promjene u temperaturi i rasporedu padalina (Bates *et al.* 2008), vrlo vjerojatno će imati utjecaj na bilancu ugljika šumskih ekosustava. Kako lužnjakove šume značajno sudjeluju u ukupnoj šumskoj površini Republike Hrvatske (ŠGOP 2006), uspostavljanje kontinuiranog praćenja procesa kruženja ugljika u tim ekosustavima je od iznimnog značenja.

Prema Valentini *et al.* (2000), Schulze *et al.* (2005) i Schulze (2006) osnovni tokovi ugljika u šumskom ekosustavu su asimilacija CO<sub>2</sub> procesom foto-

sinteze, tzv. bruto primarna produkcija – GPP (prema engl. *Gross Primary Production*) i respiracija ekosustava – R<sub>eco</sub>, koja obuhvaća autotrofnu respiraciju – R<sub>a</sub> (respiracija nadzemnog dijela biljke, korijena, mikorize itd.) i heterotrofnu respiraciju – R<sub>h</sub> (respiracija mikroorganizama odgovornih za dekompoziciju organske tvari i ostale faune). Uslijed praktičnih razloga, respiracija ekosustava često se dijeli na nadzemnu respiraciju i respiraciju tla (Luo i Zhou 2006). Nadzemnu respiraciju je praktički nemoguće mjeriti, osim na malim segmentima biljke (npr. dio lista, dio debla i sl.), a izmjerom respiracije tla dobiva se sumarno doprinos autotrofnog i heterotrofnog dijela, što predstavlja izazov prilikom procjene doprinosa pojedinih tokova u ukupnoj bilanci

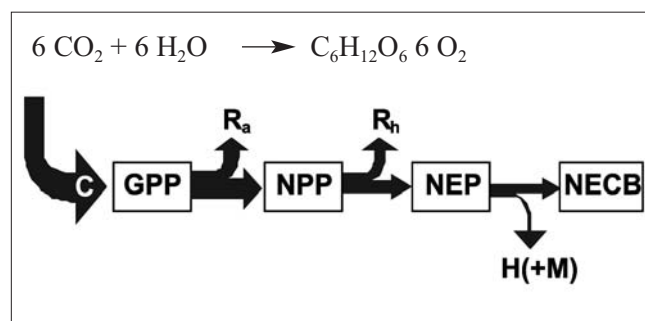
ugljika. Postoji niz metoda (Subke *et al.* 2006) za određivanje udjela  $R_h$  u ukupnoj respiraciji tla, od kojih se u šumskim ekosustavima primjenjuju najčešće metode: i) eliminacija utjecaja korijena (opkopavanja plohe rovom - engl. *trenching*; prstenovanje stabala na plohi - engl. *tree girdling*); ii) indirektna tehnika (regresija  $R_h$  s biomasaom korijena; masena bilanca - kada se pretpostavlja da je unos C u tlo putem listinca i korijena jednak količini C koji se iz tla gubi respiracijom); iii) označavanje izotopima ( $^{13}\text{C}$  u pokusima s umjetno povećanom koncentracijom  $\text{CO}_2$  u zraku; pokusi s uzorcima tla temeljeni na razlici  $\delta^{13}\text{C}$  omjera uzrokovanog različitim metaboličkim procesima C3 i C4 biljaka; analiza  $\delta^{14}\text{C}$  - radioaktivnog izotopa, čija prisutnost je posljedica testiranja nuklearnog oružja tijekom 1950-1960-tih).

Bilancu ugljika ekosustava (NECB) moguće je procijeniti poznajući neto produkciju ekosustava (NEP) i količinu posječenog i izvezenog drva i otpada. NEP je razlika GPP-a i respiracije ekosustava i može se dobiti izravno metodom vrtložne kovarijance.

Ukupna produkcija šumske biomase – NPP (prema engl. *Net Primary Production*) razlika je GPP-a i autotrofne respiracije. NPP predstavlja vrijednost koja se može procijeniti klasičnom šumarskom izmjerom na terenu uz određene pretpostavke (npr. procjenu rasta korijena, sitnih grana i sl.). Poznavanje  $R_h$  omogućuje da se iz vrijednosti NPP-a procijeni NEP. Da bi se izračunao NECB, potrebno je znati koliko je ugljika napustilo ekosustav s drvetom odvezenim iz šume nakon prorede (H). U proredama se u pravilu obaraju i odvoze i suha stabla (barem ona većih dimenzija), a u zrelih sastojinama sječa sušaca provodi se i na godišnjoj razini. Volumen sušaca koji se odveze iz sastojine, u odnosu na volumen sušaca (posječenih ili dubećih) koji ostaje u sastojini, najčešće nije poznat. To je posebno slučaj u mlađim sastojinama, pa je volumen odvezenih sušaca, tj. količinu ugljika u njima radi izračuna NECB-a potrebno procijeniti. Radi konzervativnije procjene NECB-a, može se pretpostaviti da se ugljik u volumenu svih sušaca (M) uklanja iz ekosustava prilikom proreda. Na taj način je u volumenu proreda sadržan i volumen svih stabala koja su se posušila u periodu između proreda (H(+M)). Slika 1 prikazuje glavne tokove ugljika u ekosustavu nakon što je u procesu fotosinteze ugrađen u organsku tvar.

#### PODRUČJE ISTRAŽIVANJA – *Research area*

Istraživanje je provedeno u šumskom kompleksu Pokupskog bazena, u gospodarskoj jedinici “Jastrebarski lugovi” (šumarija “Jastrebarsko“, UŠP Karlovac), u mladim prirodnim sastojinama hrasta lužnjaka. Klima ovoga područja je umjereno topla kišna klima, a obilježava se oznakom Cfbwx” tip prema Köppenovoj klasifikaciji (Seletković i Katušin 1992). Srednja godišnja temperatura, prema meteorološkoj postaji u Jastrebarskom, za razdoblje od 1981. do 2007. godine, je



Slika 1. Glavni tokovi ugljika u šumskom ekosustavu. GPP – ukupna primarna produktivnost, tj. bruto asimilacija ugljika iz  $\text{CO}_2$  u procesu fotosinteze u promatranom razdoblju; NPP – ukupna produkcija šumske biomase, odnosno neto količina ugljika koji je ugrađen u biomasu u promatranom razdoblju; NEP – neto produkcija šumskog ekosustava, odnosno neto količina ugljika koji je vezan u ekosustavu u promatranom razdoblju; NECB – neto (tj. stvarna) bilanca ugljika šumskog ekosustava;  $R_a$  i  $R_h$  – autotrofna i heterotrofna respiracija; H(+M) – ugljik u masi posječenog drva i sušaca.

Figure 1. Main carbon fluxes in forest ecosystem. GPP - Gross Primary Production, i.e. gross assimilation of atmospheric carbon dioxide through the process of photosynthesis during the observed period; NPP - Net Primary Production, i.e. net amount of carbon stored in biomass in the observed period; NEP - Net Ecosystem Production, i.e. net amount of carbon stored in ecosystem during the observed period; NECB - Net Ecosystem Carbon Balance;  $R_a$  and  $R_h$  – autotrophic and heterotrophic respiration; H(+M) – carbon in harvested trees and snags.

Puno je radova koji obrađuju problematiku kruženja ugljika te određivanja zaliha ugljika u različitim sastavnica šumskog ekosustava (Bornkamm i Bennert 1989, Dewar 1991, Ziegler 1991, Dewar i Cannel 1992, Weber i Burschel 1992, Burschel *et al.* 1993, Cannel i Milne 1995, Harrison *et al.* 1995, Böswald 1996, Farkas *et al.* 2011), no na području jugoistočne Europe, u visokoproduktivnim nizinskim šumama hrasta lužnjaka, neposredna izmjera tokova ugljika do sada nije provedena.

Tokovi ugljika značajno ovise o stanišnim i okolišnim uvjetima (Aubinet *et al.* 2000) stoga je detaljan opis šumske vegetacije i klimatskih parametara područja istraživanja neophodan u kontekstu razmatranja rezultata u odnosu na istraživanja provedena u sličnim uvjetima.

10,4 °C, a srednja vegetacijska temperatura (travanj – rujun) 16,9 °C. Srednje mjesečne temperature kreću se od -0,2 °C u siječnju do 20,7 °C u srpnju. Prosječne godišnje padaline su oko 900 mm, od toga u vegetacijskom razdoblju padne oko 500 mm. Teren je nizinski s nadmorskom visinom u rasponu od 107 do 130 m.

Istraživačka stanica za praćenje kruženja ugljika (N 45° 37' 10", E 15° 41' 16") postavljena je u sklopu međunarodnog projekta Carbon-Pro (Marjanović *et al.*



2007). Nalazi se u sastojini hrasta lužnjaka, na rubu odsjeka 37a, u neposrednoj blizini odsjeka 36a, 40a i 41a. Sva četiri odsjeka su međusobno slična po strukturi i starosti. Prema gospodarskoj osnovi, starosti sastojina kreću se od 35 (37a, 40a, 41a) do 40 godina (36a). Uz hrast lužnjak (*Quercus robur* L.) od ostalih vrsta drveća u značajnoj mjeri prisutni su obični grab (*Carpinus betulus* L.), crna joha (*Alnus glutinosa* Gaertn.) i poljski jasen (*Fraxinus angustifolia* L.) dok se vez (*Ulmus laevis* Pall.), divlja kruška (*Pyrus pyraeaster* (L.) Burgsd.), topole (*Populus* sp.) i lijeska (*Corylus avellana* L.) pojavljuju sporadično. U sloju grmlja zastupljeni su glo-

govi (*Crataegus* sp.), svib (*Cornus sanguinea* L.), trušljika (*Rhamnus frangula* L.) i crni trn (*Prunus spinosa* L.). Fitocenološki gledano, riječ je o zajednicama hrasta lužnjaka i velike žutilovke s drhtavim šašem (*Genisto elatae-Quercetum roboris caricetosum brizoides* Horv. 1938) u odsjecima 36a, 37a i 40a te zajednici hrasta lužnjaka i velike žutilovke s rastavljenim šašem (*Genisto elatae-Quercetum roboris caricetosum remotae* Horv. 1939) u odsjeku 41a. Tla se kreću od močvarno glejnog do pseudogleja, naglašene slabe vertikalne propusnosti za vodu (Mayer 1996).

## MATERIJALI I METODE – *Materials and methods*

### Izmjera neto produkcije ekosustava (NEP) mikrometeorološkom metodom vrtložne kovarijance –

#### *Measurements of Net Ecosystem Production (NEP) with micrometeorological method of eddy covariance*

Istraživačka stanica prati razmjenu CO<sub>2</sub> između šumskog ekosustava i atmosfere primjenom metode vrtložne kovarijance. Konačni rezultat mjerenja i obrade podataka je NEE - neto razmjena CO<sub>2</sub> između atmosfere i ekosustava (prema engl. *Net Ecosystem Exchange*), u jedinicama gC m<sup>-2</sup> dan<sup>-1</sup>. Varijabla NEE označava neto količinu CO<sub>2</sub> koji je napustio atmosferu (tj. ugrađen je u biomasu) ili je otpušten nazad u atmosferu. Vrijednosti NEE su negativnog predznaka kada je količina ugljika koji je otišao iz atmosfere i vezao se u biomasu šumskog ekosustava veća od količine ugljika, koji je oslobođen iz ekosustava zbog procesa respiracije. Varijabla NEP odgovara neto količini ugljika koji je vezan u ekosustavu u promatranom razdoblju, i izravno je povezana s NEE. Štoviše, NEP = - NEE.

Istraživačka stanica je detaljno opisana u radovima Marjanović *et al.* (2009) i Marjanović *et al.* (2011). Ukratko, mjerna visina stanice je 23 m, odnosno 3–5 m iznad krošnja stabala. Sustav vrtložne kovarijance čine ultrazvučni anemometar (81000 V, Young, USA) i infracrveni plinski analizator otvorenog tipa (LI-7500, Li-Cor, USA). Podaci se bilježe učestalošću od 20 puta u sekundi (tj. 20 Hz) pomoću malog prijenosnog računala (Mateš *et al.* 2008). Tokovi CO<sub>2</sub> ekosustava, količina gibanja (engl. *momentum*), osjetna (H

i latentna toplina (LE) izražavaju se kao polusatni prosjeci. Primijenjena metodologija temelji se na *EuroFlux* protokolu (Aubinet *et al.* 2000) s dodatnim korekcijama kao što je *Webb Pearman Leuning* (WPL) korekcija (Webb *et al.* 1980). Obrada podataka obavlja se koristeći *EdiRe* računalni program (Sveučilište u Edinburgh-u), a osiguranje kvalitete – QA i kontrola kvalitete – QC obavljaju se prema Foken i Wichura (1996). Koncentracije CO<sub>2</sub> na 6 različitih visina od tla (1, 2, 4, 8, 16 i 23 m) mjere se svakih 6 minuta koristeći infracrveni plinski analizator (IRGA, SBA-4, PP-System). NEE se računa prema Aubinet *et al.* (2000). IRGA daje nedostadne i netočne podatke za trajanja nepovoljnih vremenskih prilika (kiša) ili u slučaju kondenzacije vode na optičkim lećama instrumenata (magla, rosa), posebice u jesen. Posljedica toga je pojava odstupanja (ekstremnih skokova u podacima), zbog čega se primjenjuje algoritam za analizu odstupanja koji prihvaća ili odbacuje podatke prije QA/QC analize. U slučaju kada QA/QC kriterij nije bio zadovoljen ili kada je zamijećen nedostatak dovoljno snažnog vrtložnog prijenosa (turbulentnog transporta) zraka, korištena je procedura nadopunjavanja praznina u podacima (engl. *gap-filling procedure*) prema Reichstein *et al.* (2005).

#### Meteorološka mjerenja – *Meteorological measurements*

U okviru istraživačke stanice postavljena je i meteorološka stanica koja obavlja izmjeru brojnih parametara kao što su: temperatura tla termometrima na tri dubine (5, 15 i 25 cm), udio vlage u tlu (0–30 cm) koristeći dva reflektometra (CS616, Campbell Scientific), dolazno kratkovalno zračenje (CMP3, Kipp i Zonen), gustoća toka dolaznog i reflektiranog fotosintetskog zračenja (PPFD) (LI-190SL quantum sensor, Li-Cor), neto zračenje (NR-LITE, Kipp i Zonen), temperatura i vlaga zraka (HMP45AC, Vaisala), protok topline u tlu

(na 5 i 15 cm) pomoću četiri pločasta senzora za mjerenje protoka topline (HFT3, REBS) i ukupne oborine (52.202 tipping bucket rain gauge, R.M. Young). Korekcija površinskih vrijednosti protoka topline tla obavlja se prema Ochsner *et al.* (2007) i Cava *et al.* (2008). Sve varijable se mjere pri frekvenciji od 0,1 Hz pomoću CR1000 datalogera (Campbell Sci. Inc. Lincoln Nebraska, USA) te se dobivaju polusatni prosjeci.

### Izmjera respiracije tla (SR) automatskim sustavom komora – *Measurements of soil respiration (SR) with automated chamber system*

Respiracija tla (SR) obuhvaća respiraciju korijena živih biljaka, mikorize, mikroorganizama u zoni korijena te respiraciju mikroorganizama i ostale faune u tlu odgovornih za dekompoziciju listinca i organske tvari tla (Luo i Zhou 2006). Dio istraživačke stanice čini i automatski sustav od dvije komore kojim se kontinuirano tijekom cijele godine, svaka 4 sata, obavlja izmjera respiracije tla. Preliminarna analiza prostorne varijabilnosti SR u sastojinama u dohvatnu stanice (Balenović *et al.* 2008) ukazuje da se vrijednosti izmjerene na plohi uz stanicu ne razlikuju statistički značajno od prosjeka SR u šumskom području interesa.

Sustav korišten za mjerenje SR spada u tip dinamičkih zatvorenih sustava (Livingston i Hutchinson 1995), izvorno opisan u radu Delle Vedove *et al.* (2007). Komore se sastoje od čeličnog obruča ( $d = 16$  cm,  $h = 8$  cm) i čeličnog poklopca koji se automatski zatvara. Orijeantirane su na način da je poklopac okrenut na sjever, jer u tom slučaju, kada je dignut, ne zasjenjuje komoru.

Tijekom mjerenja, zrak cirkulira između komore i CO<sub>2</sub> analizatora, pri stalnom protoku od 0,5 l min<sup>-1</sup>. Vлага zraka, tlak i temperatura mjere se dodatnim senzorima. Na temelju brzine porasta koncentracije CO<sub>2</sub> unutar komore računa se tok CO<sub>2</sub> iz tla, u  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Popunjavanje praznina u podacima i razdjeljivanje izmjerenog toka na autotrofni i heterotrofni dio obavljeno je koristeći model Reichstein *et al.* (2003). Prema Tang i Baldocchi (2005) udio respiracije korijena u ukupnoj respiraciji tla u savani hrasta i travnate vegetacije kreće se između 39 % i 41 %, dok se prema Hanson *et al.* (2000) taj udio kreće od 10 % do čak 90 %. Iz rezultata meta-analize koju su proveli Subke *et al.* (2006; tablica 1 i slika 2) proizlazi da je prosječni udio R<sub>h</sub> u ukupnoj SR za šume listača umjerene klime oko 53,6 %, uz standardnu pogrešku od oko 4,0 %. U nedostatku boljih podataka, za potrebe ovoga rada pretpostavili smo da udio R<sub>h</sub> u ukupnoj SR 50 %.

### Izmjera neto primarne produktivnosti (NPP) biometrijskom metodom – *Measurements of Net Primary Productivity (NPP) with biometrical method*

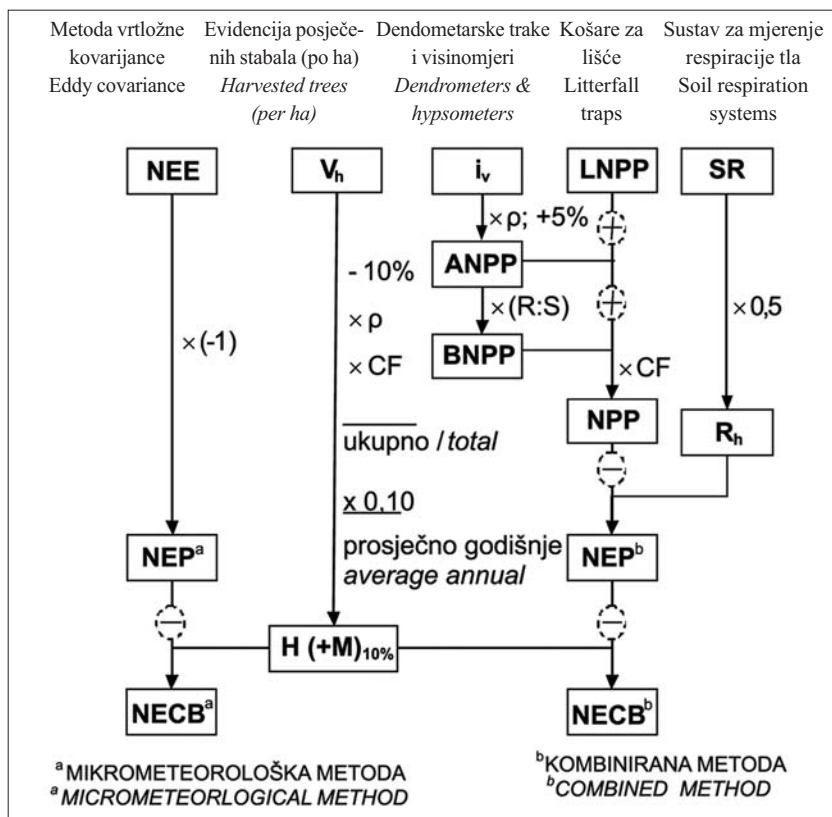
Tijekom 2007. i 2008. godine postavljeno je ukupno 65 trajnih kružnih ploha, radijusa 8-10 m, sa centrom ploha na sjecištima mreže 100x100m. Obavljena je izmjera prsnog promjera svih živih stabala i sušaca ( $d_{1,3} > 2$  cm) s preciznošću od 1 mm i visina svih stabala ( $d_{1,3} > 5$  cm) instrumentom Vertex III hypsometer (Haglof Instruments) te je pritom određena i zabilježena pozicija svih stabala ( $d_{1,3} > 5$  cm). Izmjera visina provedena je početkom i krajem 2008. godine s ciljem utvrđivanja visinskog prirasta. Izračunat je ukupni volumen (do 3 cm) koristeći funkciju Schumacher – Hall-a (1933) s lokalnim parametrima za pojedine vrste (Špiranec 1975, Cestar i Kovačić 1982, Cestar i Kovačić 1984). Na temelju preliminarnе analize područja utjecaja (engl. *footprint*), od ukupnog broja pokusnih ploha odabrane su 24 plohe u užem području dohvata stanice (radijus oko 500 m). Na njima je postavljeno ukupno 643 dendrometarskih traka (Keeland i Young 2006) na sva stabla prsnog promjera iznad 7,5 cm. Tijekom vegetacije 2008. i 2009. godine obavljana je tjedna izmjera kumulativnog prirasta opsega elektronskim pomičnim mjerilom, s preciznošću od 0,01 mm i pogreškom mjerenja procijenjenom na 1 % od vrijednosti odgovarajućeg debljinskog prirasta (Marjanović 2009). Vrijednosti

kumulativnog prirasta opsega korigirane su s obzirom na zakrivljenost debla te pretvorene u debljinski prirast (Marjanović 2009) i konačno u volumni prirast (koristeći parametre za ukupan volumen). Uz pretpostavku da udio tankih grana i grančica ( $d < 3$  cm) čini oko 5 % ukupne nadzemne biomase (Balboa-Murias *et al.* 2006) procijenjena je neto produkcija ukupne nadzemne biomase – ANPP (prema engl. *Aboveground Net Primary Productivity*). Neto produkcija podzemne biomase – BNPP (prema engl. *Belowground Net Primary Productivity*) procijenjena je koristeći omjer podzemne i nadzemne biomase R:S (prema engl. *root to shoot*) od 0,257 (Cairns *et al.* 1997). U svrhu utvrđivanja neto produkcije biomase lišća – LNPP (prema engl. *Leaf Net Primary Productivity*) postavljeno je 12 košara u centar nasumično odabranih ploha s dendrometarskim trakama. Udio ugljika u navedenim sastavnicama dobiven je množenjem biomase suhe tvari s konverzijskim faktorom od 0,5 (IPCC 2003, 2006). Pritom su za dobivanje biomase suhe tvari iz volumena svježeg drveta korištene vrijednosti osnovne gustoće drveta dane u IPCC-ovom priručniku (IPCC 2006, tablica 3A.1.9-1). Konačna vrijednost NPP dobivena je kao zbroj ANPP, BNPP i LNPP.

### Izračun neto bilance ugljika ekosustava (NECB) – *Calculation of Net Ecosystem Carbon Balance (NECB)*

Neto bilanca ugljika mlade sastojine hrasta lužnjaka dobivena je korištenjem dviju metoda: mikrometeorološke metode vrtložne kovarijance, kao standardni način utvrđivanja neto razlike tokova CO<sub>2</sub> između at-

mosfere i ekosustava (a); i kombinacijom biometrijske izmjere šumske biomase i periodičke izmjere disanja tla automatskim sustavom komora (b), koja je radi kratkoće nazvana kombinirana metoda (slika 2).



Slika 2. Shematski prikaz načina izračuna bilance ugljika.  $V_h$  – volumen posječenog drva ( $m^3 ha^{-1}$ );  $H(+M)_{10\%}$  – prosječno godišnje uklanjanje ugljika iz sastojine zahvatima sječe u što se uključuju i suha stabla ( $gC m^{-2} god^{-1}$ );  $i_v$  – volumni prirast ( $m^3 ha^{-1}$ ); ANPP, BNPP, LNPP – produkcija nadzemne drvenaste, podzemne i lisne biomase ( $gC m^{-2} god^{-1}$ ); SR – respiracija tla ( $gC m^{-2} dan^{-1}$ );  $R_h$  – heterotrofna respiracija ( $gC m^{-2} dan^{-1}$ );  $\rho$  – gustoća drva ( $g cm^{-3}$ ); CF – konverzijski faktor, tj. maseni udio ugljika u suhoj tvari drveta; R:S – omjer podzemne i nadzemne drvene biomase.

Figure 2 Scheme of carbon balance calculation procedure.  $V_h$  – volume of harvested wood ( $m^3 ha^{-1}$ );  $H(+M)_{10\%}$  – average yearly amount of carbon exported from forest through thinning including snags ( $gC m^{-2} year^{-1}$ );  $i_v$  – volume increment ( $m^3 ha^{-1}$ ); ANPP, BNPP, LNPP – aboveground woody, belowground and leaves Net Primary Production ( $gC m^{-2} year^{-1}$ ); SR – soil respiration, ( $gC m^{-2} day^{-1}$ );  $R_h$  – heterotrophic respiration ( $gC m^{-2} day^{-1}$ );  $\rho$  – basic wood density ( $g cm^{-3}$ ); CF – Conversion Factor, i.e. carbon content of wood; R:S – root-to-shoot ratio.

Mikrometeorološka metoda daje nam kao rezultat NEE, odnosno NEP ( $NEP^a = -NEE$ ). Kod kombinirane metode, najprije smo izračunali NPP, te smo pomoću procijenjene  $R_h$  dobili NEP kao njihovu razliku ( $NEP^b = NPP - R_h$ ).

Konačna neto bilanca ugljika ekosustava (NECB) dobije se kada se od NEP oduzme ona količina ugljika koja se iz sastojine uklanja sječom (H) jer se ugljik iz uklonjenog drveta prije ili kasnije vraća u atmosferu u obliku  $CO_2$  (spaljivanjem ili dekompozicijom proizvoda od drveta;  $NECB = NEP - H$ ). Zahvati prorede u regularnim sastojinama obavljaju se u pravilu jednom u deset godina. Stoga bi za procjenu prosječne godišnje NECB trebalo promatrati sastojinu najmanje deset godina, ili bi trebalo promatrati niz jednakih sastojina u kojima se svake godine na jednoj obavlja proreda. Na taj način dobila bi se procjena NECB za promatrani tip sastojine za jedno životno razdo-

blja sastojine (u našem slučaju mlađe dobi). U našem slučaju, niti jedna od ove dvije opcije nije bila moguća.

Iznos prosječne godišnje NECB, u desetgodišnjem razdoblje koje obuhvaća jednu proreda, ili je manji od iznosa stvarne godišnje NECB (kada nema prorede), ili je drastično veći (kada se provede proreda). Situacija se dodatno komplicira kada se proreda ne obavlja na cjelokupnom području utjecaja (engl. footprint), jer je teško precizno odrediti koliki doprinos ukupnim tokovima dolazi iz područja gdje je proreda provedena. Kako bi ipak procijenili prosječnu NECB, iskoristili smo činjenicu da je na dijelu područja oko stanice u 2007. godini obavljena proreda kojom je uklonjeno približno 6,2 % biomase u odsjeku 37a, u kojemu je stanica (tablica 1). Kako su plohe u tom dijelu postavljene tijekom 2006. godine, bilo je moguće izračunati, na temelju evidencije o posjećenim stablima, koliki je prosječno uklonjeni volumen po površini. Nadalje, godišnji mortalitet u sastojini je teško procijeniti, a osim toga osušena stabla se prilikom proreda u pravilu sijeku, pa smo za potrebe ovoga rada pretpostavili da je u volumenu proreda sadržan i volumen svih osušenih stabala na plohama na kojima je bila proreda.

Dio posječene nadzemne biomase i cjelokupna podzemna biomasa stabala ostaje nakon sječe u sastojini te se potom razlaže u pravilu nepoznatom brzinom. Dio biomase, koji ostaje u sasto-

jini kao drveni ostatak, procijenjen je na 10 %, pa je dobiveni prosječni volumen trebalo pomnožiti s faktorom 0,9. Tako dobivena vrijednost posječenog i odvezenog drveta pomnožena je s pripadajućim bazičnim gustoćama drveta ( $M_{g\ suhe\ tvari} / m^3\ svježe\ biomase$ ) za pojedinu vrstu (IPCC 2006) i prosječnim udjelom ugljika u suhoj tvari drveta CF (CF=0,5; slika 2). Tako dobivena ukupna količina ugljika koji je uklonjen iz sastojine, odgovara količini koja se uklanja jednom u 10 godina ( $H(+M)$ ).

Kada bi pretpostavili da se proreda, umjesto svakih deset, obavlja svake godine, prosječno bi se sjekla jedna desetina onoga što se posječe uobičajenom proredom. Sukladno tomu, prosječni godišnji utjecaj proreda ( $H(+M)_{10\%}$ ) na NECB, tada bi iznosio približno 10 % od  $H(+M)$ . Za izračun prosječnog godišnjeg NECB kakav bi bio u sastojinama sličnim sastojinama koje su predmet istraživanima koristili smo upravo tu pretpostavku.



## REZULTATI – Results

### Meteorološke prilike u promatranom razdoblju – Meteorological conditions in the observed period

Analizirajući meteorološke podatke može se utvrditi da su se vegetacijske sezone 2008. i 2009. godine razlikovale. Tijekom 2008. godine zabilježeno je 855 mm oborina, dok je 2009. g. bila nešto vlažnija s izmjerenih 939 mm oborina. Pritom je raspored oborina bio povoljniji tijekom 2009. godine, kada je nešto više oborina palo tijekom ljeta i u ranu jesen. Osim toga, početkom lipnja 2008. godine, u doba najintenzivnijeg rasta, nastupilo je kraće kišno razdoblje tijekom kojega je drastično smanjena količina svjetla, što se negativno odrazilo na produkciju sastojina.

U zimskom periodu veći dio površine sastojina oko stanice bio je poplavljen, što je posljedica nizinskog terena i slabe propusnosti tla. Volumni udio vode u tlu (gornjih 30 cm) u slučaju kada je tlo u potpunosti zasićeno vodom iznosio je oko 58 % v/v. S početkom pupanja, a posebice nešto kasnije u vrijeme dovršetka formiranja lista (mjesec svibanj) udio vode u tlu je brzo opadao. Silazni trend udjela vode u tlu u pravilu se nastavljao sve do rujna, uz povremene skokove uslijed kišnih epizoda. Udio vode u tlu u promatranom periodu nije se spuštao ispod 25 % v/v, te se može reći da stabla nisu bila izložena značajnoj suši.

### Struktura sastojine – Stand structure

Struktura sastojine dobivena na temelju izmjera na 24 trajne pokusne plohe uokolo mjerne stanice prikazana je u tablici 1. Vidljivo je da sastojinama dominira hrast lužnjak, i to po svim strukturnim elementima. Kako bi se dobilo na preciznosti, korištena je taksacijska granica od

5 cm te je dan volumen za ukupno drvo (>3 cm na tanjem kraju). U strukturi sastojina značajan je udio drugih vrsta (crne johe, običnog graba i poljskog jasena) što upućuje na zaključak da su uvjeti unutar sastojina vrlo heterogeni te odražava činjenicu da je riječ o mladim sastojinama.

Tablica 1. Struktura mlade sastojine hrasta lužnjaka u području utjecaja na izmjerene tokove CO<sub>2</sub> (taksacijska granica od 5 cm, n=24 plohe, prikazane vrijednosti su prosjeci sa standardnim pogreškama).

Table 1 Structure of young oak stand in the footprint of eddy covariance station (dbh lower limit for measurement was 5 cm, n=24 sampled plots, shown values are means with standard errors).

	2007. g. / 2007			početak 2008.g. / beginning od 2008								
	Proreda u odsjeku 37a (*) / Thining in forest compart. 37a (*)			Odsjek / Forest comp.37a (*)	Prosjeck za sastojine u području utjecaja (**) / Average of stands in the footprint (**)						Sušci / Snags	
Vrsta drveća Tree species	N (n ha <sup>-1</sup> )	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	V <sub>h</sub> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	N (n ha <sup>-1</sup> )	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	d <sub>g</sub> (cm)	h <sub>g</sub> (m)	N (n ha <sup>-1</sup> )	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	V (***) (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
<i>Q. robur</i> L.	23 ± 10	0,4 ± 0,2	4,0 ± 2,9	108,8 ± 21,4	575 ± 63	12,4 ± 1,3	117,1 ± 13,6	16,5	17,7	229 ± 48	1,5 ± 0,3	10,2 ± 2,1
<i>C. betulus</i> L.	72 ± 47	1,0 ± 0,6	8,0 ± 4,5	44,3 ± 31,2	426 ± 122	3,5 ± 1,5	26,8 ± 14,4	10,2	13,9	25 ± 17	0,2 ± 0,2	1,7 ± 1,4
<i>A. glutinosa</i> . Gearnt	5 ± 5	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,1	25,5 ± 12,5	380 ± 93	6,4 ± 1,3	51,6 ± 10,8	14,6	16,9	39 ± 12	0,4 ± 0,2	3,0 ± 1,4
<i>F. angustifolia</i> L.	4 ± 5	0,1 ± 0,1	0,6 ± 0,6	28,7 ± 8,8	159 ± 50	2,7 ± 0,7	19,2 ± 5,0	14,5	16,4	12 ± 5	0,1 ± 0,1	0,6 ± 0,4
Ostale vrste Other tree sp.	5 ± 5	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,2	1,7 ± 1,4	35 ± 17	0,3 ± 0,1	2,6 ± 1,2	11,1	12,1	3 ± 3	0,1 ± 0,1	0,7 ± 0,7
Ukupno Total	108 ± 50	1,5 ± 0,6	12,9 ± 5,4	207,8 ± 17,8	1575 ± 116	25,2 ± 1,0	217,3 ± 10,9	14,2	16,6	308 ± 48	2,3 ± 0,3	16,3 ± 2,2

N – broj stabala, G – temeljnica, V – volumen drvene zalihe (>3 cm), V<sub>h</sub> – posječeni volumen, d<sub>g</sub> – prsni promjer srednjeg stabla, h<sub>g</sub> – visina srednjeg stabla. (\*) Podaci sa ploha iz odsjeka 37a (n=11). (\*\*) Podaci sa ploha u području najvećeg utjecaja na izmjerene tokove (n=24). (\*\*\*) Korištene su visinske krivulje od živih stabla (tj. dane vrijednosti V su gornja granica).

N – number of trees, G – basal area, V – wood volume (>3 cm), V<sub>h</sub> – harvested volume, d<sub>g</sub> – mean basal area diameter at 1,30m, h<sub>g</sub> – height of mean tree. (\*) Data from plots in forest compartment 37a (n=11). (\*\*) Data from plots in the area with high influence on measured fluxes (n=24). (\*\*\*) In volume calculation height curves of living trees were used (i.e. values for V are upper limit).

### Tokovi ugljika – mikrometeorološka mjerenja – Carbon fluxes – micrometeorological measurements

Kako bi procijenili pouzdanost izmjera pomoću vrtložne kovarijance testirano je slaganje tokova energije, tj. energetska bilanca ekosustava. Rezultati za energetsku bilancu dobiveni vrtložnom kovarijancom uspore-

đeni su s rezultatima dobivenim na temelju mjerenja neto sunčevog zračenja i toka topline u tlu. Dobiveno je dobro slaganje (R<sup>2</sup>=0,88, n = 9.340, P < 0,001), pritom je zaokruživanje energetske bilance od 0,64 u grani-

cama područja koja su dali *Twine et al.* (2000) i *Wilson et al.* (2002) na temelju podataka iz FLUXNET mreže sličnih stanica za vrtložnu kovarijancu. Pregled tokova ugljika dan je u tablici 2.

Tablica 2. Tokovi ugljika procijenjeni metodom vrtložne kovarijance; izmjerom respiracije tla i dendrometerskim trakama.  
Table 2. Carbon fluxes estimated using Eddy covariance method; soil respiration measurements and band dendrometers.

Godina Year	GPP	Reco	SR	R <sub>h</sub>	NEP <sup>a</sup>	NEP <sup>b</sup>	H(+M)10%*	NECB <sup>a*</sup>	NECB <sup>b*</sup>
	gC m <sup>-2</sup> god <sup>-1</sup> (gC m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup> )								
2008	1428	1044	876	438	384	339	35*	349	304
2009	1633	1049	882	441	584	405	35*	549	370

Napomena: R<sub>eco</sub> – ukupna respiracija ekosustava. Za pojašnjenje ostalih varijabli vidi sliku 1 i sliku 2. a – dobiveno uz korištenje mikrometeorološke metode; b – dobiveno uz korištenje kombinirane metode; \* Utjecaj prореde (uključujući posječene sušce) je procijenjen radi procjene prosječne godišnje NECB za sastojine poput promatranih. Vrijednosti H(+M)10% navedene u tablici ne odgovaraju stvarnoj sječi te godine (tj. ugljiku uklonjenom u prорedi) već predstavljaju procjenu utjecaja prорede na prosječnu godišnju NECB.

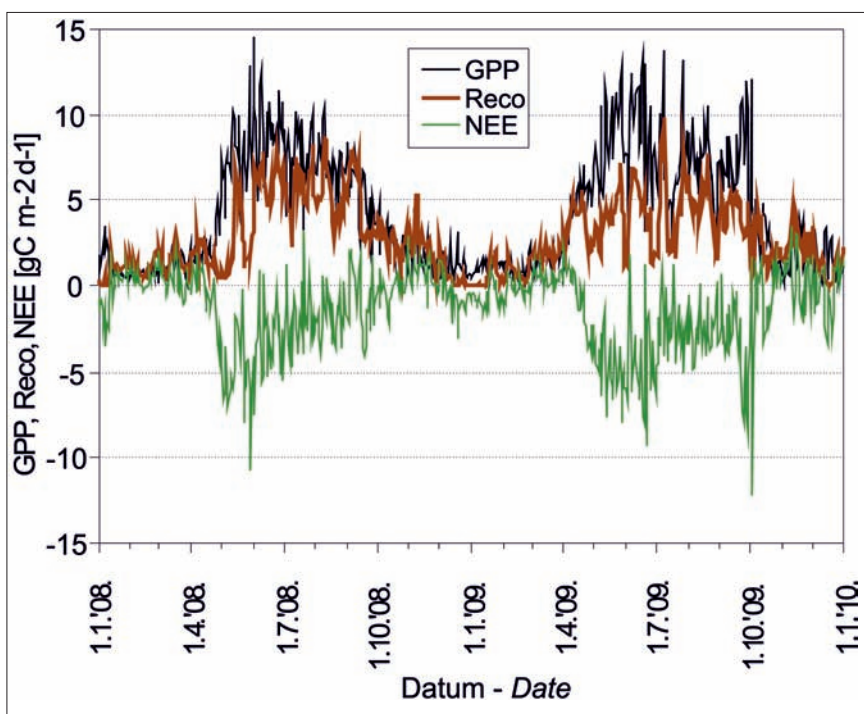
Note: R<sub>eco</sub> – total respiration of the ecosystem. For explanation of other variables refer to figures 1 and 2. a – data obtained using micrometeorological method; b – data obtained using combined method; \* Influence of thinning (including felled snags) was needed for the assessment of the average annual NECB for such stands. Values of H(+M)<sub>10%</sub> reported in table are not actual harvest in that year (i.e. removed carbon amount due to thinning), but are assessment of the influence that thinning have on average annual NECB.

Prikazane vrijednosti za NEE u istraživanom razdoblju dobivene su koristeći oko 58 % izmjerenih podataka vrtložnog toka. Oko 42 % podataka koji su izmjereni trebalo je odbaciti, jer nisu bili zadovoljeni preduvjeti metode vrtložne kovarijance (nedovoljno miješanje zraka, tj. manjak vjetra), odnosno došlo je do kondenzacije na prozoru CO<sub>2</sub> analizatora (rosa ili kiša). Nastale praznine u vremenskim serijama podataka toka nadopunjavane su modelom *Reichsteina et al.* (2005).

Na slici 3 dan je grafikon dnevnih vrijednosti izmjerenog NEE iz kojega se očituje godišnji hod s neto otpuštanjem (emisijom) CO<sub>2</sub> tijekom zime i neto pohranom CO<sub>2</sub> tijekom ljeta. Vrijednosti NEE tijekom zime kretale su se uglavnom oko nule ili nešto iznad nule (emisija CO<sub>2</sub>) jer se vegetacija bila u stanju mirovanja (nema fotosinteze), a visoka zasićenost tla vodom, odnosno djelomična poplavljenost terena i niske temperature reducirali su respiraciju tla.

Sa stajališta šumarstva praktičnije je govoriti o neto produktivnosti ekosustava (NEP = – NEE) pa se u nastavku koristiti ta varijabla. Maksimalna dnevna neto produktivnost iznosila je 10,7 gC m<sup>-2</sup> dan<sup>-1</sup> u 2008. godini, odnosno 12,2 gC m<sup>-2</sup> dan<sup>-1</sup> u 2009. godini. Sumiranjem dnevnih vrijednosti dobivene su godišnje vrijednosti

NEP, i to 384 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> za 2008. godinu, odnosno 584 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> za 2009. godinu, iz kojih je razvidno da su sastojine u dohvatu mjerne stanice u obje godine bile neto spremnik ugljika. Ukupno bruto primarna proizvodnja (GPP) iznosila je 1428 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> u 2008. odnosno 1633 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> u 2009. godini.



Slika 3. Vrijednosti bruto primarne produkcije (GPP), respiracije ekosustava (R<sub>eco</sub>) i neto razmjene (NEE) CO<sub>2</sub> između atmosfere i mlade sastojine hrasta lužnjaka u razdoblju od 1. siječnja 2008. do 31. prosinca 2009. godine.

Figure 3 Values of gross primary production (GPP), ecosystem respiration (R<sub>eco</sub>) and net ecosystem exchange (NEE) between the atmosphere and young pedunculate oak stand, in the period 1 January 2008 - 31 December 2009.

### Respiracija tla – Soil respiration

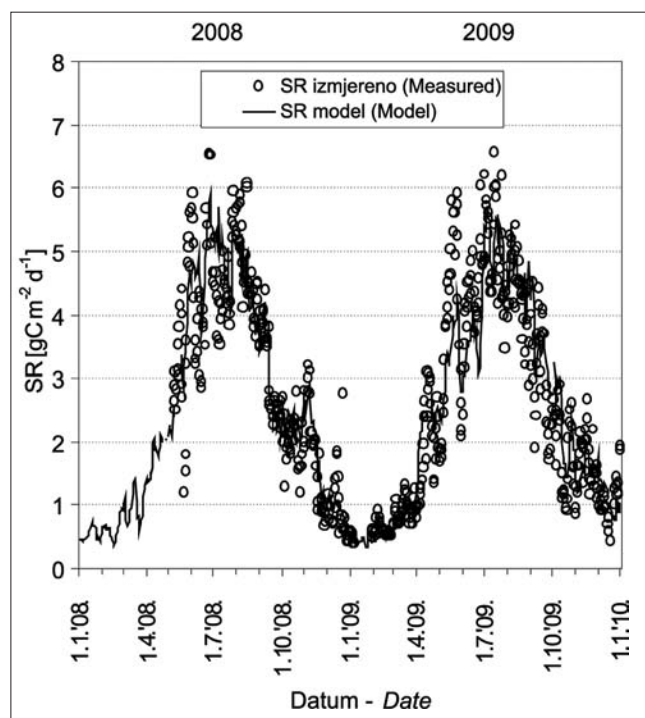
Ukupno respiracija ekosustava procijenjena je na temelju periodičkih izmjera respiracije tla. Dnevni tok CO<sub>2</sub> uslijed respiracije tla korelira s temperaturom tla i iskazuje eksponencijalnu ovisnost (nije prikazano).

Koristeći model dnevne respiracije tla od *Reichsteina et al.* (2003) popunjavane su praznine u podacima za razdoblje prije 8.5.2008. g. kada sustav za respiraciju još nije bio postavljen (što je uzrok za 13,3 %



dnevnih vrijednosti koje nedostaju), odnosno praznine nastale zbog odbacivanja podataka koji nisu prošli kontrolu kvalitete (neobjašnjivi skokovi/padovi koncentracije, snijeg u komori itd.) ili nisu izmjereni (sustav izvan funkcije zbog problema s napajanjem ili vrlo niskom temperaturom). Sveukupno 23,3 % dnevnih vrijednosti procijenjeno je modelom. Sumiranjem svih dnevnih vrijednosti dobivena je ukupna respiracija tla od  $876 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2008. godini, odnosno  $882 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2009. godini. Kao i kod NEE i kod respiracije tla izraženo je sezonsko kretanje s minimumom tijekom zime i maksimumom tijekom ljeta (slike 3 i 4). Minimalna prosječna dnevna respiracija tla iznosila je  $0,35 \text{ gC m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ , dok je maksimalna iznosila  $5,83 \text{ gC m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ .

Pretpostavljeni udio  $R_h$  je 50 % od ukupne SR, pa je prema tome  $R_h$  procijenjena na  $438 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2008. godini, odnosno  $441 \text{ gC m}^{-2} \text{ god}^{-1}$  u 2009. godini.



Slika 4. Respiracija tla mlade sastojine hrasta lužnjaka u razdoblju od 1. siječnja 2008. do 31. prosinca 2009. godine; SR izmjerena – rezultati kontinuiranog mjerenja automatskim sustavom komora; SR model – rezultati modela ovisnosti respiracije tla o temperaturi i vlažnosti tla (Reichstein i dr. 2003).

Figure 4 Soil respiration of young pedunculate oak stand in the period of 1 January 2008 to 31 December 2009; SR measured – results of continuous measurements with automated chamber system; SR modelled – result obtained using daily time step model proposed by Reichstein et al. (2003).

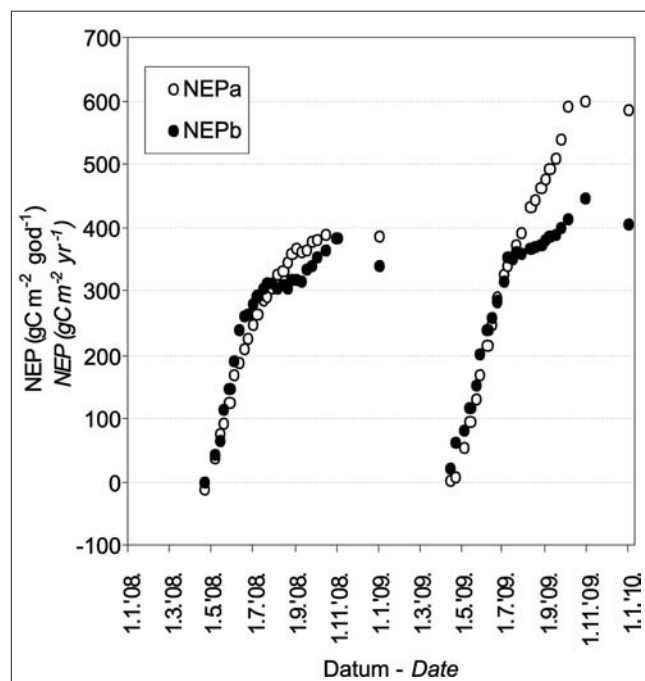
### Neto primarna produktivnost (biometrijska metoda) i neto produkcija ekosustava (kombinirana metoda) –

*Net primary productivity (biometrical method) and net ecosystem productivity (combined method)*

Tjednim izmjerama pomoću dendrometerskih traka željela se ustanoviti unutarsezonska dinamika, a konačne vrijednosti prirasta korištene su za procjenu ukupne neto produktivnosti sastojina u dohvat stаницe. Visinski prirast dobiven je na temelju izmjera visina prije početka i nakon završetka vegetacije za 2008. godinu, a za 2009. godinu procijenjen je na temelju prirasta u 2008.g. (pretpostavljen je jednaki visinski prirast u obje godine). Prirast nadzemnog dijela sastojina (za drvenu masu > 3 cm na tanjem kraju; taksacijska granica 2 cm) iznosio je  $15,64 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  u 2008. godini, odnosno  $17,17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  u 2009. godini.

Slika 5. Neto produkcija (NEP) mlade sastojine hrasta lužnjaka procijenjena koristeći dvije metode izmjere (NEPa – mikrometeorološka metoda; NEPb – kombinirana metoda), za razdoblje od 1. siječnja 2008. do 31. prosinca 2009. godine.

Figure 5 Net ecosystem production of young pedunculate oak stand estimated using two methods (NEPa – micrometeorological method; NEPb – combined method), for period 1 January 2008 – 31 December 2009.



Produktivnost sitne granjevine stabala (<3 cm) procijenjena je na 5 % od produktivnosti nadzemnog dijela debljeg od 3 cm, a produktivnost korijena na 25,7 % od ukupne produktivnosti nadzemnog dijela (uključujući i sitne grane). Na taj način dobivene su vrijednosti za produktivnost granjevine od 0,82 i 0,90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>, odnosno 4,23 i 4,65 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> za produktivnost korijena u 2008., odnosno 2009. godini.

Zbrajanjem svih dijelova dobivena je ukupna produktivnosti drvenaste biomase (bez listinca) u iznosu od 20,69 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> za 2008. godinu, odnosno 22,72 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> za 2009. godinu.

Sve navedene vrijednosti prevedene su u jedinice gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup>.

Produkcija listinca, sjemena i sitnog drvnog otpada (LNPP) unekoliko se razlikovala između dvije sezone te je iznosila 3,98 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> i 4,17 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> suhe tvari, što iznosi 199 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> i 209 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> u 2008. godini, odnosno 2009. godini.

Dobivene su vrijednosti za ANPP od 460 i 507 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> te za BNPP u iznosu od 118 i 130 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> za 2008. godinu, odnosno 2009. godinu. Kada se uzme u obzir i produktivnost lista (LNPP) dobiva se ukupan NPP od 777 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> u 2008. godini, odnosno 846 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> u 2009. godini.

Neto produkcija ekosustava (NEP) dobiva se kao razlika NPP i R<sub>h</sub> te iznosi 339 i 405 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> za 2008. godinu, odnosno 2009. godinu (slika 5).

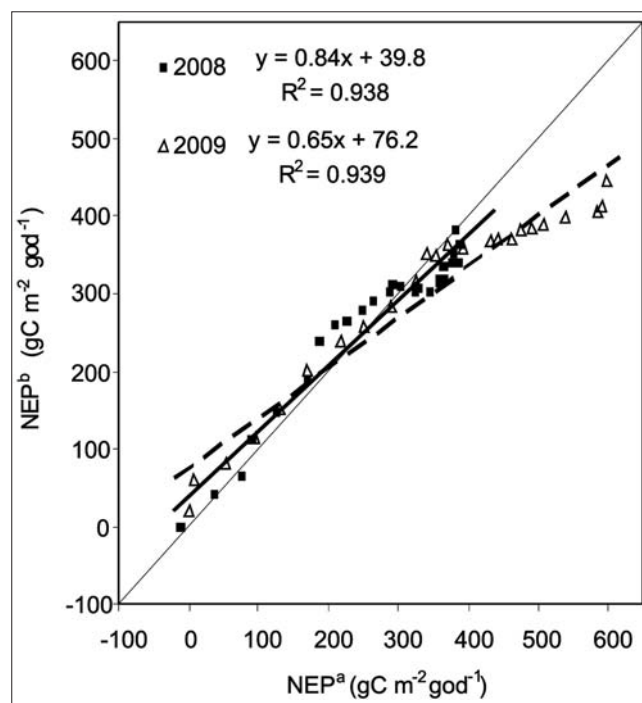
### Usporedba neto produkcije ekosustava dobivenih mikrometeorološkom i kombiniranom metodom – *Comparison of net primary productivity obtained with micrometeorological and combined method*

Vrijednosti NEP dobivene pomoću dvije različite metode (NEP<sup>a</sup> - mikrometeorološka metoda; NEP<sup>b</sup> – kombinirana metoda) tijekom vegetacijskih razdoblja 2008. i 2009. godine prikazana je na slici 5. Kod kombinirane metode korištena je pretpostavka da stablo od početka kolovoza do kraja listopada sprema zalihe u podzemnim dijelovima za sljedeću sezonu listanja. Brzina spremanja ugljika modelirana je jednostavnim linearnim modelom ovisnosti o vremenu, a ukupna količina ugljika spremljenog u rezerve procijenjena je na temelju LNPP.

Na slici 6 prikazana je korelacija vrijednosti NEP dobivenih pomoću dvije neovisne metode. Dobiveno je vrlo dobro slaganje za 2008. godinu, dok je za 2009. godinu slaganje nešto slabije, ali još uvijek izraženo.

Slika 6. Korelacija NEP<sup>a</sup> (mikrometeorološka metoda) i NEP<sup>b</sup> (kombinirana metoda).

Figure 6 Linear correlation between NEP<sup>a</sup> (micrometeorological method) and NEP<sup>b</sup> (combined method).



### Proreda – Thinning

U poglavlju materijali i metode opisano je kako je procijenjen utjecaj prorede. U odsjeku 37a proredom je posječeno približno 208 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> drvene mase u 2007. godini. Uzimajući u obzir vrste i udio drvnog ostatka, proizlazi da je proredom iz sastojine uklonjeno približno

353 gC m<sup>-2</sup>. S obzirom da se prorede obavljaju svakih deset godina, procijenili smo da u našem slučaju utjecaj prorede na prosječnu godišnju NECB iznosi 10 % od ukupne prorede, odnosno približno 35 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup>.

### RASPRAVA – Discussion

Biokemijski ciklusi, poput ciklusa kruženja ugljika, izuzetno su kompleksni jer uključuju veliki broj aktera i njihovih međusobnih odnosa. U ovom istraživanju, po prvi puta u Hrvatskoj, utvrđeni su vrijednost i veličina tokova ugljika između pojedinih sastavnica ekosustava.

Kao što smo i pretpostavljali, mlade sastojine lužnjaka aktivno spremaju ugljik, a vrijednosti NEP od 384 odnosno 584 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> blizu su prosjeka za Europu koji iznosi 311 ± 38 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> za listopadne šume umjerenog pojasa Europe (L u y s s a e r t *et al.* 2007).

Iz slike 5 može se vidjeti da je slaganje između vrijednosti NEP dobivenih različitim metodama vrlo dobro sve do kraja srpnja. Do odstupanja dolazi u drugom dijelu ljeta i jeseni kada prestaje debljinski prirast, ali stabla očito i dalje aktivno spremaju ugljik. Ovo potkrepljuje od raniju poznatu hipotezu da stablo tijekom vegetacijske sezone najprije alokira resurse u rast lista, potom debla, a na kraju sezone na rast korijena.

Navedenu hipotezu pokušali smo iskoristiti na način da modeliramo pohranu ugljika u korijen pomoću linearnog modela temeljenog na poznatoj produkciji listinca. Na taj način uspjeli smo gotovo izjednačiti vrijednosti za NEP za 2008. godinu, dok je za 2009. i dalje prisutna značajna razlika između dvije metode.

Razlog razlike u 2009. godini leži djelomično u činjenici da je za visinski prirast u 2009.g. korištene vrijednosti visinskog prirasta iz 2008.g. Mjerenja visine u proljeće 2010.g. pokazala su da je prosječni visinski prirast u 2009. godini uistinu veći od onog kojega smo pretpostavili, no u vrijeme pisanja ovog rada nije bilo vremena da se ponovo obave svi proračuni.

#### ZAKLJUČCI – *Conclusions*

Istraživane sastojine hrasta lužnjaka značajan su spremnik ugljika koji aktivno pohranjuje ugljik. Vrijednosti NEP-a variraju od vegetacije do vegetacije, a ovisno o metodi iznose 384 i 584 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> (mikrometeorološka metoda), odnosno 339 i 404 gC m<sup>-2</sup> god<sup>-1</sup> (kombinirana metoda) što je u skladu s vrijednostima za Europu (Luyssaert *et al.* 2007). U obje sezone procjena NEP-a kombiniranom metodom daje manje vrijednosti, što se dobiva vrtložnom kovarijancijom, i to: za 11,7 % u 2008., odnosno čak 30,7 % u 2009. godini. Međutim razlika u NEP-u između dvaju metoda na godišnjoj razini manja je što je to razlika NEP-a između dvaju vegetacija (po vrtložnoj kovarijanci) tako da se ne mogu donositi konačni zaključci.

Nastavak praćenja kroz više vegetacijskih sezona omogućit će procjenu varijabilnosti NEP između vegetacija, kao i testiranje razlika u metodama. Potrebno je nastaviti istraživanje respiracije tla te empirijski utvrditi udio R<sub>h</sub> u ukupnoj SR, kako bi se poboljšala pouzdanost

Unutarsezonske razlike u NEP-ovima vjerojatno su posljedica naše pretpostavke o stalnom udjelu od 50 % R<sub>h</sub> u ukupnoj SR. To vjerojatno nije točno, jer je se omjer R<sub>h</sub>:SR mijenja tijekom vegetacije ovisno o dostupnosti vode, svjetla i temperaturnih razmjera. Tijekom ljeta, posebice u vrijeme sušnih razdoblja udio R<sub>h</sub> u ukupnom SR opada zbog limitirajuće vode. Nadalje, poznato je da gustoća drveta varira tijekom vegetacije (rano drvo – kasno drvo), što nije uzeto u obzir.

Iz svega navedenoga, vidljiva je važnost kontinuiranog nastavka postojećih istraživanja, ali i potreba za dodatnim istraživanjima. To se posebice odnosi na istraživanje respiracije tla čija emisija CO<sub>2</sub> predstavlja drugi najveći tok ugljika u kopnenim ekosustavima, od približno 50-75 Pg C god<sup>-1</sup> (Raich i Schlesinger 1992). U sklopu tih istraživanja posebnu težinu trebalo bi dati na razlučivanje porijekla respiracije (autotrofna vs. heterotrofna). Na temelju tih spoznaja moći će se izraditi novi ili bolje parametrizirati postojeći modeli, koji svoju primjenu u praksi već nalaze u razvijenim zemljama prilikom vođenja bilance ugljika za potrebe izvješćivanja po Kyotskom protokolu.

rezultata. Naime, uz nepouzdanost povezanu s omjerom R:S, najveću nepouzdanost u procjenu NEP-a kombiniranom metodom unosi procjena udjela R<sub>h</sub> u ukupnoj respiraciji tla.

Promatramo li utjecaj proreda na bilancu ugljika, na osnovi zabilježenog intenziteta može se zaključiti da proreda, gledano na razini razdoblja od 10 godina, u manjoj mjeri utječe na njegovu ukupnu bilancu. Proreda negativno utječe na bilancu ugljika, naizgled smanjujući brzinu kojom se ugljik akumulira u sastojini za približno 5 do 8 %. Međutim, to “smanjenje” treba uzeti s oprezom, jer bi izostanak proreda sigurno doveo do povećanog mortaliteta, a slijedom toga i do smanjenja NEP-a, odnosno NECB-a. To upućuje na zaključak da prorede ovakvog intenziteta, osim što donose korist zbog vrijednosti užitog drveta te pozitivno utječu na strukturu sastojine, moguće u konačnici nemaju značajniji (negativni) utjecaj na NECB. Ovu hipotezu trebalo bi dalje istražiti i proširiti istraživanja na sastojine kroz cijelu ophodnju.

#### ZAHVALE – *Acknowledgements*

Predstavljeni rad je rezultat istraživanja u sklopu projekta “Bilanca i kruženje ugljika u mladim sastojinama hrasta lužnjaka”, koji je bio nastavak projekta “Načini uključivanja u tržište ugljikom kao dodatni izvor prihoda”, a koje su financirale Hrvatske šume d.o.o. Oprema stanice za praćenje kruženja ugljika nabavljena je 2007. godine u sklopu Interreg IIIB/CARDS projekta Carbon-Pro.

Zahvaljujemo dr. sc. Gemini Delle Vedove, Michel Zulianiju i Diego Ciaba na pomoći pri uspostavi i održavanju stanice.

Zahvaljujemo djelatnicima Hrvatskih šuma d.o.o., upravitelju šumarije Jastrebarsko Milanu Oreškoviću, dipl. inž. šum., Ninoslavu Turčinu, dip. inž. šum., Domagoju Trohi, dipl. inž. šum. te drugima na pomoći pri radu na terenu.

Zahvaljujemo dvojici anonimnih recenzenata na korisnim sugestijama kojima su doprinijeli poboljšanju ovog rada.



LITERATURA – *References*

- Aubinet, M., G. Grelle, A. Ibrom, U. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. S. Kowalski, P. H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grunwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini, T. Vesala, 2000: Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology, *Adv Ecol Res*, 30:113–175.
- 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, *Ann For Sci*, 63:557–565.
- Baldocchi, D. D., 2003: Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future, *Global Change Biol*, 9(4):479–492.
- 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, *B Am Meteorol Soc*, 82(11): 2415–2434.
- Balenović, I., H. Marjanović, G. Alberti, M. Z. Ostrogović, G. Delle Vedove, A. Peressotti, D. Vuletić, 2008: 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, Zagreb.
- Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu, J. P. Palutikof (eds), 2008: Climate change and water, Technical paper VI of the intergovernmental panel on climate change, IPCC Secretariat, p 210, Geneva.
- Bornkamm, R., H. W. Bennert, 1989: Gehalt und Vorrat organischer Inhaltsstoffe in der Baumschicht von Luzulo-Fagetum-Beständen im Solling (BRD), *Flora*, 183:133–148.
- Böswald, K., 1996: Zur Bedeutung des Waldes und der Forstwirtschaft in Kohlenstoffhaushalt, eine Analyse am Beispiel des Bundeslandes Bayern, *Forstliche Forschungsberichte München*, 159, p 147.
- Brown, S., 2002: Measuring carbon in forests: current status and future challenges, *Environ Pollut*, 116:363–372.
- Burba, G. G., D. J. Anderson, 2010: A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA, 211 pp. Dostupno na: [http://www.licor.com/env/applications/eddy\\_covariance/book.jsp](http://www.licor.com/env/applications/eddy_covariance/book.jsp) (21.10.2010.).
- Burschel, P., E. Kürsten, B. C. Larson, 1993: Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt – Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland, *Forstliche Forschungsberichte München*, 126, 135 p.
- Cairns, M. A., S. Brown, E. H. Helmer, G. A. Baumgardner, 1997: Root biomass allocation in the world's upland forests, *Oecologia*, 111:1–11.
- Cannel, M. G. R., R. Milne, 1995: Carbon pools and sequestration in forest ecosystems in Britain, *Forestry*, 68:361–378, Oxford.
- Cava, D., D. Contini, A. Donato, P. Martano, 2008: Analysis of short-term closure of the surface energy balance above short vegetation, *Agric For Meteorol*, 148:82–93.
- Cestar, D., Đ. Kovačić, 1982: Wood volume tables for Black Alder and Black Locust, *Rad Šum inst Jastrebarsko*, 49:1–149, Zagreb.
- Cestar, D., Đ. Kovačić, 1984: Wood volume tables for Narrow-leaved Ash (*Fraxinus parvifolia* Auct.), *Rad Šum inst Jastrebarsko*, 60:1–178, Zagreb.
- Chapin, 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, 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*, 9:1041–1050.
- Delle Vedove, G., G. Alberti, A. Peressotti, I. Inghima, M. Zuliani, G. Zerbi, 2007: Automated monitoring of soil respiration: an improved automatic chamber system, *Ital J Agron* 4:377–382.
- Dewar, R. C., 1991: Analytical model of carbon storage in the trees, soils, and wood products of managed forests, *Tree Physiol* 8:239–258.

- Dewar, R. C., M. G. R. Cannel, 1992: Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples, *Tree Physiol* 11:49–71.
- Farkas, Cs., G. Alberti, J. Balogh, Z. Barcza, M. Birkás, Sz. Czóbel, K. J. Davis, E. Führer, Gy. Gelybó, B. Grosz, N. Kljun, S. Koós, A. Machon, H. Marjanović, Z. Nagy, A. Peressotti, K. Pintér, E. Tóth, L. Horváth, 2011: Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Methodologies. *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective*, (U: L. Haszpra), pp. 65–90.
- Foken, T., B. Wichura, 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agric For Meteorol* 78:83–105.
- Goulden, M. L., J. W. Munger, S.-M. Fan, B. C. Daube, S. C. Wofsy, 1996: Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability, *Science*, 271:1576–1578.
- 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*, 48:115–146.
- Harrison, A. F., P. J. A. Howard, D. M. Howard, D. C. Howard, M. Hornung, 1995: Carbon storage in forest soils, *Forestry*, 68(4):335–348, Oxford.
- IPCC, 2000: Special report on land use, land-use change and forestry, GRID-Arendal [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_sr/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/)
- 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 (eds), IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC, 2006: 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, In: H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (eds), IGES, Japan.
- Keeland, B. D., P. J. Young, 2006: Construction and installation of dendrometer bands for periodic tree-growth measurements, National Wetlands Research Center, Lafayette, LA. <http://www.nwrc.usgs.gov/Dendrometer/>
- Livingston, G. P., G. L. Hutchinson, 1995: Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error, In: P. A. Matson, R. C. Harriss (eds), *Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water*, Blackwell Science, 14–50, Cambridge.
- Luo, Y., X. Zhou, 2006: *Soil respiration and the environment*, Elsevier, p 316, London.
- Luyssaert, S., I. Inglima, M. Jung, A. D. Richardson, M. Reichstein, D. Papale, S. L. Piao, E.-D. Schulze, L. Wingate, G. Mateucci, 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. Huttyra, 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: CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database, *Glob Change Biol*, 13:2509–2537.
- Magnani, F., M. Mencuccini, M. Borghetti, P. Berbigier, F. Berninger, S. Delzon, A. Grelle, P. Hari, P. G. Jarvis, P. Kolari, A. S. Kowalski, H. Lankreijer, B. E. Law, A. Lindroth, D. Loustau, G. Manca, J. B. Moncrieff, M. Rayment, V. Tedeschi, R. Valentini, J. Grace, 2007: The human footprint in the carbon cycle of established temperate and boreal forests, *Nature*, 447:848–850.
- 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., A. Benndorf, K. Indir, E. Paladinić, A. Peressotti, H. Schweiger, D. Vuletić, 2007: CO<sub>2</sub> and forests in Croatia, In: A. Peressotti (ed), *Local strategies for land use management according to Kyoto protocol*, Forum Editrice Universitaria Udinese srl, 121–128, Udine.
- Marjanović, H., G. Alberti, J. Balogh, S. Czóbel, L. Horváth, A. Jagodics, Z. Nagy, M. Z. Ostrogović, A. Peressotti, E. Führer, 2011: Measurements and estimations of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases – Forests, *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective*, (U: L. Haszpra), pp. 121–156.

- Matese, A., G. Alberti, B. Gioli, F. P. Vaccari, P. Toscano, A. Zaldei, 2008: Compact EDDY: a compact, low consumption eddy covariance logging system, *Comput Electron Agric*, 64:343–346.
- Mayer, B., 1996: Hidropedološki odnosi na području nizinskih šuma Pokupskog bazena, *Rad Šum inst Jastrebarsko*, 31:37–89, Zagreb.
- Ochsner, T. E., T. J. Sauer, R. Horton, 2007: Soil heat storage measurements in energy balance studies, *Agron J*, 99:311–319.
- Raich J.W., W.H. Schlesinger, 1992: The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationships to vegetation and climate, *Tellus* 44B: 81–99.
- 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. Tireone, 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 Biogeochem Cyc*, 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, *Glob Change Biol*, 11:1424–1439.
- Schulze, E.-D., 2006: Biological control of the terrestrial carbon sink, *Biogeosciences*, 3:147–166.
- Schulze, E.-D., E. Beck, K. Müller-Hohenstein, 2005: *Plant ecology*, Springer, p 702, Berlin-Heidelberg.
- Schumacher, F. X., F. D. S. Hall, 1933: Logarithmic expression of timber-tree volume, *J Agric Res*, 47:719–734.
- Seletković, Z. Z. Katušin, 1992: *Klima Hrvatske*, U: Šume u Hrvatskoj, 13–18 str., Zagreb.
- Simončič, P., N. Ogrinc, U. Vilhar, T. Grebenc, H. Kraigher, 2007: CO<sub>2</sub> sequestration: State of the art, In: A. Peressotti (eds), *Local strategies for land use management according to Kyoto protocol*, Forum Editrice Universitaria Udinese srl, p 17–23, Udine.
- Subke, J.-A., I. Inglima, M. F. Cotrufo, 2006: Trends and methodological impacts in soil CO<sub>2</sub> efflux partitioning: a metaanalytical review. *Glob Change Biol*, 12:921–943.
- Swinbank, W. C., 1951: The measurement of vertical transfer of heat and water vapour by eddies in the lower atmosphere, *J Meteorol*, 8:135–145.
- ŠGOP, 2006: *Šumskogospodarska osnova područja za razdoblje 2006.–2015.*, Knjiga I, Hrvatske šume d.o.o., 566 str., Zagreb.
- Špiranec, M., 1975: *Drvnogromadne tablice*, Rad Šum inst Jastrebarsko, 22:1–262, Zagreb.
- Tang, J. W., D. D. Baldocchi, 2005: Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components, *Biogeochemistry*, 73:183–207.
- Valentini, R., 2003: Fluxes of carbon, water and energy of European forests, *Ecological Studies* 163, Springer-Verlag, p 270, Berlin, Heidelberg.
- 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.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, R. Leuning, 1980: Corrections of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Q J R Meteorol Soc*, 106:85–100.
- Weber, M., P. Burschel, 1992: *Wald und Holz als Kohlenstoffspeicher*, *Der Wald*, 42:148–151.
- Ziegler, F., 1991. Die Bedeutung des organischen Kohlenstoffes im Unterboden. *Vorratsberechnungen an Waldböden*, *Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie*, 3(5):276–2771.



**SUMMARY:** *Net Ecosystem Productivity (NEP) and Net Ecosystem Carbon Balance (NECB) of young Pedunculate oak (Quercus robur L.) stand were investigated. Two independent methods for assessing NEP were used: a) micrometeorological method of Eddy covariance (EC) and, b) combination of biometric method for assessing Net Primary Productivity (NPP) and periodic soil respiration (SR) measurements (named for reasons of brevity the combined method). NEP from combined method was obtained as a difference of NPP and heterotrophic respiration ( $R_h$ ) which was estimated to have 50 % share in the measured total SR.*

*Maximal measured daily NEP from eddy covariance was  $10,7 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  in 2008., and  $12,2 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  in 2009. The annual NEP ranged from  $384 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in 2008 to  $584 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in 2009 indicating that the stands around the EC tower were actively storing carbon during both years.*

*From biometric measurements of stem increment using dendrometer bands, height increment and litter production we obtained an average NPP of the stands in the footprint of  $777 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in 2008 and  $846 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in 2009. Heterotrophic respiration ( $R_h$ ), estimated from SR measurements was  $438 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in 2008 and  $441 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in 2009. By subtracting  $R_h$  from NPP, we obtained NEP of  $339$  and  $405 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  in 2008 and 2009, respectively.*

*Comparison of results for NEP during vegetation season reveals that agreement between the two methods was very good until July for both years. Later in the summer and autumn, discrepancy occurs when stem growth ceases but trees continue to actively store carbon. This leads to the underestimation of NEP from combined method during that period, leading to the overall lower values of NEP when compared with NEP values from eddy covariance. There could be several reasons for the discrepancies namely, share of  $R_h$  in total SR could be less than 50 %,  $R:S$  could be higher than 0.257, or various combinations of both. Further research is needed that would provide better estimates of share of  $R_h$  in SR,  $R:S$  ratio and soil carbon content.*

*Key words:* Eddy covariance method; soil respiration; carbon fluxes; carbon sequestration