

DINAMIKA OGLJIKA V GOZDNIH EKOSISTEMIH: ŠTUDIJA PRIMERA ZA BUKOV GOZD V JV SLOVENIJI

Carbon dynamics in forest ecosystems: a case study of beech forest in SE Slovenia

Povzetek: Gozdovi imajo pomembno vlogo pri globalnem kroženju ogljika. Globalne podnebne spremembe vplivajo na delovanje in potek procesov v gozdnih ekosistemih, njihovi učinki pa se odražajo tako ekonomsko (proizvodne funkcije gozdov) kot tudi politično (kjotski protokol). Za to so potrebne meritve posameznih komponent tokov ogljika v različnih gozdnih ekosistemih, ki so vezane na letni prirast in razkroj ter dolgotrajno shranjevanje ogljika v lesu, koreninah, ostali rastlinski biomasi in drugih organizmih in organskih snoveh. Hkrati poteka razvoj modelov, ki združujejo znanje o fizičnem in funkcionalnem delovanju gozdnih ekosistemov in omogočajo napovedovanje učinkov globalnih podnebnih sprememb na gozdne ekosisteme. V prispevku so predstavljene dejavnosti Gozdarskega inštituta Slovenije na področju študija in modeliranja dinamike ogljika v gozdnih ekosistemih. V prispevku so predstavljeni rezultati rabe izbranega mehanicističnega determinističnega modela rasti gozda (GOTILWA+), s katerim smo modelirali posamezne komponente ogljika v izbranem sestoju bukve. Ključne besede: celokupna primarna produkcija (GPP), GOTILWA+, modeliranje, nadzemna biomasa, neto izmenjava v ekosistemu (NEE), neto primarna produkcija (NPP), organska snov v tleh (SOM), talna biomasa

Abstract: Forests play an important role in global carbon cycling. As much as the consequences of global climate changes affect the processes in forest ecosystems they are economically (production) and politically (Kyoto protocol) important. Therefore in-situ measurements of different carbon pools and allocation processes are needed in different forest ecosystems, related to annual growth and decomposition, long-term carbon pools in wood, roots, plant biomass and other organic matter. At the same time different models are developed in order to integrate the knowledge about physical and functional processes in forest ecosystems. These models are also used to predict the effects of global climate change on forest ecosystems. In this paper we present the activities at the Slovenian forestry institute, related to carbon dynamics measurements and modelling in forest ecosystems. Original results from a case study in a beech stand are presented, where a mechanistic deterministic model of forest growth GOTILWA+ was applied in order to estimate carbon pools in the selected forest stand. Keywords: Gross primary production (GPP), GOTILWA+, Modelling, Above-ground biomass, Net ecosystem exchange (NEE), Net primary production (NPP), Soil organic matter (SOM), Soil biomass

UVOD

Gozdni ekosistemi imajo pomembno vlogo pri uravnavanju ponorov in kroženja ogljika v kopenskih ekosistemih (D'Arrigo in sod., 1987; Kauppi in sod., 1992; Becker in sod., 1994; Cannell in sod., 1998; Myneni in sod., 2001). Kopenski ekosistemi, predvsem gozdovi, so eden največjih zbiralnikov

in dolgotrajnih hranilnikov ogljika, ki se shranjuje v vegetaciji in gozdnih tleh (Myneni in sod., 1997; Fan in sod., 1998; Houghton in sod., 1998; Houghton in sod., 1999; Barber in sod., 2000; Kutsch in sod., 2005). V luči podnebnih sprememb, z njimi povezanim segrevanjem ozračja ter povišanimi koncentracijami CO₂ pričakujemo povečanje gozdne biomase, opada in kapacitete shranjevanja ogljika izbranega gozda (Nadelhoffer in sod., 1999; Richter in sod., 1999; Giardina in Ryan, 2000; Schlesinger in sod.,

* Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-pošta: ursa.vilhar@gozdis.si

2000), v veliki meri tudi na račun talne biomase (Bowden in sod., 1993). Manj je znanega o možnostih delovanja klimatskih sprememb na aktivacijo stabilnih (anorgansko) vezanih oblik ogljika in s tem možnostjo učinka predvidenih sprememb (Van Veen in sod., 1991) na povečano mikrobiološko aktivnost, krajšo življenjsko dobo korenin in njihovih simbiotov, povečano dihanje tal, hitrost razkroja organske snovi, posledice ekstremnih vremenskih dogodkov in ujm ... ali pa napovedane povečane sečnje v gozdovih (primer Slovenija: ReNGP 2007). Napovedovanje učinkov globalnih podnebnih sprememb na gozdne ekosisteme je bistvenega pomena, saj bodo posledice tako ekonomske (proizvodne funkcije gozdov) kot tudi politične (kjotski protokol). Za to kot prvo potrebne meritve posameznih komponent tokov ogljika v različnih razmerah kot drugo pa razvoj modelov, ki združujejo znanje o delovanju gozdnih ekosistemov (Simončič in sod., 2007).

V Sloveniji potekajo sistematične raziskave predvsem o bukovih gozdovih, saj le-ti obsegajo več kot 87 % vse gozdne površine in predstavljajo 31,7 % lesne zaloge vseh gozdov v Sloveniji. V Sloveniji so na ravni ekosistema in biotske raznovrstnosti posameznih skupin med boljše raziskanimi prav gozdni ekosistemi (Kraigher in sod., 2002; Kutnar in Urbančič, 2006). Na izbranih ploskvah smo tako v zadnjem desetletju podrobneje analizirali pestrosti višjih rastlin (Kutnar in sod., 2002), mahov (Ödör in sod., 2006), gliv (Piltaver in sod., 2002) in bakterij razkrojevalk (Grebenc in sod., 2009a) ter ektomikoriznih gliv na bukvi (Grebenc in sod., 2007). Biotska raznovrstnost sicer ni neposredno vključena v modeliranja dinamike ogljika, predstavlja pa pomembno informacijo o splošnem stanju gozda. S stališča modeliranja so pomembnejši klimatski in hidrološki podatki ter meritve zalog in procesov prehajanja ogljika med posameznimi zbiralniki, ki jih izvajamo neposredno v analiziranem gozdnem ekosistemu (Vilhar 2009, 2010 v tisku) in so neposredno uporabni za modeliranje kot vhodni podatki ali za preverjanje rezultatov modelov.

Številne parametre nadzemne biomase spremljamo s standardiziranimi postopki za pridobivanje podatkov v gozdarstvu (Kušar in sod., 2009, Kovač, 2009) ali usmerjeno (raziskovalno) za spremljanje vplivov okolja ali gospodarjenja na drevesno vrsto z možnostjo nadaljnjih modeliranj (Simončič in sod., 2009). Vzporedno z inventurami nadzemne biomase (ogljik v nadzemni biomasi in mrtvem lesu), potekajo inventure gozdnih tal, s pomočjo katerih pridobivamo podatke za oceno zalog organske snovi oz. ogljika v izbranih sestojih na bukovih rastiščih (Kobal in sod. 2008, Urbančič in sod. 2007, 2009a,b). Podatki inventur in ekspertnih ocen (npr. raba lesa) so osnova izračunom po metodi IPCC (2003) za nacionalna poročila o ponorih in emisijah CO₂ za sektor gozdarstvo (spremembe zalog

ogljika v času za gozd) za poročanje za LULUCF UNFCCC in KP (Mihelič in sod., 2009).

Pomemben podatek o stanju nadzemnih delov drevja je fiziološko stanje, npr. fotosintetska aktivnost glede na razmere v okolju (Čater in Batič, 2006, Čater in sod., 2008, Čater in Simončič, 2008, Potočič in sod., 2009, Čater in Simončič, 2010). Spremljanje rasti drevja in odzivnost drevja na številne okoljske dejavnike (klima, rastišča, gospodarjenje, vremenske razmere, osvetljenost, vodne razmere ...) potekajo tudi s pomočjo uporabe dendrokronoloških, dendrometrijskih in lesno-anatomskih metod v okviru raziskovalnih projektov in monitoringa gozdov (Levanič, 2006, Levanič in Slapnik, 2006, Hafner in Levanič, 2008, Levanič in sod., 2009, Hafner in Levanič, 2009). Na pretok in dinamiko ogljika v rastlini vpliva neto fotosinteza, poraba asimilatov za metabolne procese, npr. reakcijske mehanizme rastline ob stresu, poraba asimilatov za izgradnjo različnih rastlinskih tkiv in organskih sistemov, npr. poraba za rast in razvoj asimilacijskega aparata, cvetov in plodov, stebela, korenin, koreninskih simbiotov in različnih patogenov, ki preusmerjajo asimilate v svojo korist, ter dihanje vseh posameznih komponent v rastlini in sistemu rastlina - tla - rizosfera (Finér in sod., 2007, Matyssek in sod., 2007).

Za razliko od nadzemnih delov in procesov so gozdna tla kompleksnejši sistem, zato mnogi procesi v tleh še niso zadostno raziskani in posledično v modeliranju celotnega gozda bodisi spregledani ali posplošeni. Za uspešno kvantifikacijo dinamike ogljika v gozdnih tleh potrebujemo najmanj osnovne informacije o tipu tal, sestavi in hitrosti razkroja posameznih komponent opada, dinamiki rasti (življenjski dobi) korenin in biotski raznovrstnosti razkrojevalcev in simbiotov. Na Gozdarskem inštitutu Slovenije smo posegli na vsa omenjena področja, začenši s pripravo ocen količine ogljika v mineralnem delu tal ter opadu glede na rastišča in rabo tal (t.i. ocena zalog ogljika; Urbančič in sod., 2005 in 2009a), in situ spremljanja dinamike rasti in odmiranja korenin z minirizotroni in vrstnimi mrežicami (Zeleznik in sod., 2009) ter na osnovi morfoloških in molekularnih znakov identificirali večje število mikoriznih gliv na bukvi (Grebenc in sod., 2009b). Na osnovi številčnosti posameznega tipa ektomikorize v različnih gozdnih ekosistemih smo prvič izračunali prispevek posamezne vrste glive k skladiščenju ogljika v ektomikorizi in v zgornjih plasteh tal (Grebenc in Kraigher, 2009c). Podatki so pripravljene za vključevanje v talne module modelov dinamike ogljika v gozdnih tleh oziroma so bili poskusno že analizirani (Grebenc in sod., 2005), v teku pa so raziskave življenjske dobe in delovanja mikoriznega micelija pod vplivi različnih dejavnikov v okolju.

Del raziskav dinamike ogljika v gozdnih ekosistemih so raziskave stabilnih izotopov ogljika in dušika. Pri spre-

mljanju dinamike ogljika na ravni ekosistemov se stabilne izotope ogljika uporablja za določitev posameznih prispevkov emisij CO₂; npr. preučevanje vpliva karbonatnih ravnotežij in vpliva emisij CO₂ iz podzemnih jam na krasu. Drugi del raziskav vključuje uporabo in meritve izotopske sestave ogljika v drevesnih branikah v povezavi z ugotavljanjem vpliva klime na rast drevja. V tretjem delu raziskav pa raziskujemo vpliv temperature na izotopsko sestavo koreninskega sistema v gozdnih tleh. Poleg eksperimentalnih raziskav potekajo meritve stabilnih izotopov na trajni raziskovalni ploskvi intenzivnega monitoringa gozdov (Forest Focus, FutMon) Brdo pri Kranju. Poleg izotopske sestave ogljika se spremlja izotopska sestava kisika v talni raztopini v povezavi s kroženjem vode v gozdnemu sestoji rdečega bora.

Oceno izmenjave ogljika med zaraščajočimi se terestričnimi ekosistemi in atmosfero lahko ocenimo s pomočjo mikrometeoroloških meritev, npr. z metodo Eddy kovariance. Od poletja 2008 potekajo v okviru raziskav zaraščanja kraških travnišč in sprememb njihove ponorne aktivnosti za ogljik meritve parametrov za oceno neto izmenjave v ekosistemu (NEE) s tehniko Eddy covariance na zaraščajoči površini - opuščnem pašniku na Podgorskem krasu (meritve fotosinteze, vnosa opada, hitrosti dekompozicije, dihanja tal, neto-svetlobnega obsevanja, globalnega obsevanja, meteoroloških parametrov, vlage in temperature tal, toplotnega toka v tleh ...). Vzporedno z meritvami na zaraščajoči se površini potekajo meritve na pašniku, pri delu pa sodelujejo raziskovalci štirih institucij. Poleg ocene NEE se ocenjuje tudi posamezne faze kroženja ogljika, kot so respiracija tal, dinamika vnosa in razkroja opada idr.

MODELIRANJE V GOZDOVIH Z BUKVIJO - PREGLED

Bukovi gozdovi JV Slovenije so že vključeni v velikoprostorski model vplivov predvidenih klimatskih sprememb na pričakovano prostorsko prerezporeditev tipov gozdne vegetacije. Rezultati modelov predvsem po pesimističnih scenarijih za gozdove z bukviijo niso spodbudni (Kutnar in sod., 2009). Modelni pristop smo upoštevali tudi pri pridobivanju ključnih informacij in zbiralnikov ogljika za potrebe gozdarske politike v Sloveniji, pri čemer so ocenjeni zbiralniki (prilagojeno po IPCC 2003) pokazali zanimive rezultate, na primer velik delež odmrle organske biomase v slovenskih gozdnih (Golob, 2007). Isti modeli na ravni države so pokazali tudi relativno majhen delež ogljika iz gozdnih ekosistemov, shranjenega v lesnih proizvodih (2%). Kljub majhnemu deležu predstavljajo lesni proizvodi pomembno neposredno ali posredno zamenjavo za uporabo fosilnih goriv (Golob, 2007). V okviru študije dinamike ogljika v bukovih sestojih so bili testirani nekateri modeli GOTILWA+ (Vilhar in sod., 2008) in CASTANEA

(Davi in sod., 2008) za raziskovalne objekte na Rogu. Objavljeni so bili tudi rezultati modeliranja dinamike ogljika v semenskih sestojih bukve na osnovi kvantitete in kvalitete lesa pri različnih ukrepih nege (Deckmyn in sod., 2009), pri spremljanju odzivov posameznih vrst gliv na spremembe v okolju (Grebenc in sod., 2009b) in v okviru raziskave vpliva vrzeli na kroženje vode v gospodarjenih gozdovih in pragozdnih rezervatih bukve in jelke (Vilhar, 2005, 2006).

V predstavitvi študijskega primera je prikazana metodologija in rezultati številnih prej omenjenih raziskav, ki že potekajo na izbranih raziskovalnih ploskvah in jih je moč uporabiti za natančnejše analize dinamike ogljika v izbranem sestoji bukve z modelom GOTILWA+. GOTILWA+ je mehanicistični deterministični model rasti gozda z možnostmi aplikacije na širokem naboru gozdnih ekosistemov. Model združuje več podmodelov (fotosinteza, alokacija ogljika, rastni modul, dihanje tal in hidrologijo), ki omogočajo simulacijo rasti procesov in vpliv strukture sestoja, tehnike gospodarjenja v sestoji, talnih lastnosti in podnebnih dejavnikov nanje. Model je namenjen aplikaciji v enomernih sestojih, kjer prevladuje le ena drevesna vrsta (Gracia in sod., 2004).

METODE

Za simulacijo z modelom GOTILWA+ smo uporabili podatke, pridobljene na raziskovalnem objektu Snežna jama (Dinaridi, Kočevje). Dnevne meteorološke podatke na ploskvi smo zbrali za obdobje 2004-2006 (Vilhar in sod., 2006), manjkajoče pa privzeli z meteorološke postaje Kočevje in Iskrba (vir: arhivi ARSO). Zaloge ogljika v sestoji smo ocenili na podlagi polne premerbe dreves na raziskovalni ploskvi, lokalnih deblovnic (Kotar, 2003) in količnikov za gostoto lesa (Lipoglavšek, 1980) oziroma za podzemni del sledili vrednostim, ki jih navajata Offenthaler in Hochbichler (2006). Merjene vrednosti fotosintetske aktivnosti smo povzeli po Čater in Simončič (2010), meritve respiracije tal po Čater in Ogrinc (2008), podatke o hitrosti razkroja komponent opada po Grebenc in sod. (2007) in širine branik po Levanič (2007). Kemijske analize in vodno-zračne lastnosti tal smo povzeli po Vilhar (2009). Naštete podatke smo vnesli v podatkovno bazo modela GOTILWA+ in izvedli simulacijo dinamike ogljika za izbrani sestoj v letih 1997-2006. Ujemanje merjenih in simuliranih vrednosti za vsebnost vlage v tleh, temperaturo tal, respiracijo tal in širino branik smo ovrednotili s »Pearsonovim koeficientom korelacije r« in »Indeksom ujemanja D« (Aitken, 1973).

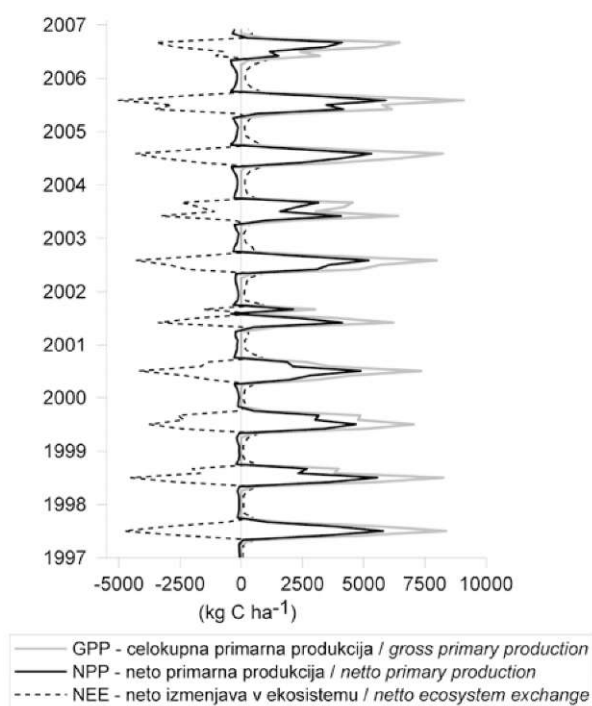
REZULTATI

Vse zbrane in izmerjene podatke za izbrano raziskovalno ploskev smo v podatkovni bazi modela GOTILWA+ razvrstili v 8 sklopov, ki opisujejo ekofiziološke procese v

gozdnem sestoju (fotosinteza, prevodnost listnih rež, lastnosti drevesnih krošenj, lokacija in reliefne značilnosti raziskovalne ploskve, horizontalna in vertikalna zgradba gozda, gostota dreves, ogljik v tleh, vodno-zračne in toplotne lastnosti tal, gospodarjenje z gozdom) in konstante, skupaj 91 parametrov (za podrobnosti glej Vilhar, 2008).

Simulirane vrednosti za vsebnost vlage v tleh so se dobro ujemale z merjenimi, saj je Pearsonov koeficient korelacije r znašal 0,76; indeks ujemanja D pa 0,65. Ujemanje simuliranih in merjenih vrednosti za temperaturo tal je bilo še boljše, saj je bil r 0,93; D pa 0,75. Simulirana respiracija tal se je nekoliko slabše ujemala z merjenimi vrednostmi ($r = 0,37$; $D = 0,50$), prav tako širine branik ($r = 0,14$; $D = 0,44$).

Z modelom smo pridobili simulacije spreminjanja nadzemne biomase, talne biomase, organske snovi v tleh (SOM), celokupne primarne produkcije (GPP), neto primarne produkcije (NPP) in neto izmenjave v ekosistemu (NEE). Za obdobje modeliranja (1997-2006) se je nadzemna biomasa povečala za 68 %, količina SOM je rahlo upadla (4 %), rastlinska biomasa v tleh pa je v vseh letih predstavljala okoli 16 % celokupne nadzemne biomase. Povprečna vrednost za GPP modeliranega sestoja je $21445 \text{ kg C ha}^{-1}$



Slika 1: Celokupna primarna produkcija (GPP), neto primarna produkcija (NPP) in neto izmenjava v ekosistemu (Nee) (kg C ha^{-1}), simulirana z modelom GOTILWA+ v letih 1997-2006 za raziskovalno ploskev Snežna jama

kg C ha^{-1} leto⁻¹, za neto primarno produkcijo pa $11954 \text{ kg C ha}^{-1}$ leto⁻¹. Modelirane vrednosti NEE sledijo letnim gibanjem z negativnimi vrednostmi v vegetacijskem obdobju in pozitivnimi vrednostmi v mesecih mirovanja (zima), v letnem povprečju za modelirana leta $-7896 \text{ kg C ha}^{-1}$ leto⁻¹.

DISKUSIJA

Mehanicistični deterministični model rasti gozda GOTILWA+ se je v gozdnih sestojih, kjer je prevladujoča drevesna vrsta bukev, izkazal s statistično podprtimi rezultati primerjav preverjeno orodje za modeliranje zbiralnikov ogljika in procesov prehajanja ogljika med posameznimi zbiralniki v gozdni vegetaciji in gozdnih tleh. V postopku preverjanja rezultatov modela smo za vse izbrane neodvisne fiziološke meritve v gozdnem sestoju ugotovili zadovoljivo ujemanje modeliranih podatkov in dejanskih meritev s terena. Simulirane zaloge ogljika so v izbranem bukovem sestoju nekoliko večje kot vrednosti, ocenjene za sestoj bukve v Španiji (Merino in sod., 2007) in Nemčiji (Joonsten in sod., 2004). Rezultati odstopajo od poročanih tako za GPP kot za NEE. Modelirane vrednosti za bukov sestoj v Snežni jami so večje tudi glede na podatke za bukove gozdove iz mreže EUROFULX (Granier in sod., 2003). Odstopajoče modelirane vrednosti pa ne izpodbijajo rezultatov in ustreznega delovanja modela GOTILWA+, saj smo za isti sestoj ugotovili večje vrednosti GPP od primerljivih bukovih sestojev tudi z uporabo modela CASTANEA (Davi in sod., 2008). Ta odstopanja lahko razložimo s starostjo gozda in velikim številom debelega drevja, kar značilno poveča obseg zbiralnikov ogljika v travstnih gozdnih ekosistemih (Merino in sod., 2007).

ZAHVALE

Analiza objavljenih rezultatov, modeliranje in priprava prispevka je bila financirana v okviru raziskovalnega programa P4-0107, projektov L1-6706, L4-6232, L4-4450, L4-7163, Z4-7578, J4-1009, J7-7397, CRP V1-0296, CRP V4-0492, Z4-9641-0404-06, V4-0350-06, BI-FR/07-08-INRA-002, V4-0539, L4-9653, L7-2393, L4-2265, programa MR (UV, TG) in mednarodnih projektov NATMAN (5OP EU), CASIROZ (5OP EU) in »CARBON-PRO« (Interreg III B CADSES, EU Neighbourhood programe).

Za tehnično podporo pri delu in pisanju se zahvaljujemo Andreju Verliču.

LITERATURA

1. Aitken P. A. (1973) Assessing systematic errors in rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 20: 121-136
2. Barber V.A., Juday G.P., Finney B.P. (2000) Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 405: 668-673
3. Becker M., Nieminen T.M., Gérémia F. (1994) Short-term variations and long term changes in oak productivity in northeastern Fran-

- ce. The role of climate and atmospheric CO₂. *Annals of Forest Science*, 51: 477-492
4. **Bowden R.D., Nadelhoffer K.J., Boone R.D., Melillo J.M., Garrison J.B. (1993)** Contributions of aboveground litter, below ground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 23: 1402-1407
 5. **Cannell M.G.R., Thornley J.H.M., Mobbs D.C., Friend A.D. (1998)** UK conifer forests may be growing faster in response to increased N deposition, atmospheric CO₂ and temperature. *Forestry*, 71: 277-296
 6. **čater M., Batič F. (2006)** Groundwater and light conditions as factors in the survival of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) seedlings. *European journal of forest research*, 125, 4: 419-426
 7. **čater M., Bobinac M., Levanič T., Simončič P. (2008)** Water status, nutrients and radial increment of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in northern Serbia and comparison with selected sites in Slovenia. Vodne razmere, hranila in debelinski prirastek doba (*Quercus robur* L.) v severni Srbiji ter primerjava z izbranimi rastišči v Sloveniji. *Zb. gozd. lesar.*, 87: 135-144
 8. **čater M., Simončič P. (2009)** Photosynthetic response of young beech (*Fagus sylvatica* L.) on research plots in different light conditions. Fotosintetski odziv mladih stabala bukve (*Fagussylvatica* L.) na odabranim plohama u različitim svetlosnim uvjetima. *Šumar. list*, 83, 11/12: 569-576
 9. **čater M., Simončič P. (2010)** Root distribution of under-planted European beech (*Fagus sylvatica* L.) below the canopy of a mature Norway spruce stand as a function of light. *European journal of forest research: v tisku*. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-009-0352-9> (Published online: 8.1.2010)
 10. **čater M., ogrinc N. (2008)** Soil respiration in natural beech forest (*Fagussylvatica* L.) and different light conditions (canopy vs. gap conditions) / Dihanje tal v naravnem bukovem gozdu (*Fagussylvatica* L.) in različnih svetlobnih razmerah (primerjava zastora in vrzeli). Carbon dynamics in natural beech forest. Simončič P. *Gozdarski inštitut Slovenije*, Ljubljana (v tisku)
 11. **D'Arrigo R.D., Jacoby G.C., Fung I.Y. (1987)** Boreal forests and atmosphere-biosphere exchange of carbon dioxide. *Nature*, 329: 321-323
 12. **Davi H., vilhar U., čater M., Grebenc T., Kraigher H., levanič T., Simončič P. (2008)** Comparison of carbon budget between virgin and managed Slovenian beech stands. Carbon dynamics in natural beech forest. P. Simončič. *Studia forestalia Slovenica*, *Gozdarski inštitut Slovenije*, Ljubljana (v tisku).
 13. **Deckmyn G. i., Mali B., Kraigher H., Torelli N., op ed Beeck M., Ceulemans R.J.M. (2009)** Using the process-based stand model ANAFORE including bayesian optimisation to predict wood quality and quantity and their uncertainty in Slovenian Beech. *Silva Fenn.*, 43, 3: 523-533
 14. **Fan S., Gloor M., Mahlman j., Pacala S., Sarmiento j., Takahashi T., Tans P. (1998)** A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 282: 442-446
 15. **Finér L., Helmisääri H. S., Löhmus K., Majdi H., Brunner I., Bórja I., Eldhuset T., Godbold D., Grebenc T., Konôpka B., Kraigher H., Möttönen M. R., Ohashi M., Oleksyn J., Ostonen I., Uri v., Vanguelova E. (2007)** Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.), and Scots pine (*Pinussylvestris* L.). *Plant Biosystems*, 141, 3: 394 - 405
 16. **Giardina C.P., Ryan M.G. (2000)** Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 404: 858- 861
 17. **Golob S. (2007)** Some scenarios of the impact of forest policy on the carbon cycle on the example of Slovenia. *Gozd. Vest.*, 65, no. 5-6: 254-261
 18. **Gracia C., Sabaté S., Sanchez A. (2004)** GOTILWA+. An integrated model of forest growth. Model documentation and User's guide. <http://www.creaf.uab.es/gotilwa+/download.htm>. s.
 19. **Grainer A., Aubinet M., Epron D., Falge E., Gudmundsson J., Jensen N.O., Koestner B., Matteucci G., Pilegaard K., Schmidt M.G., Tenhunen J. (2003)** Deciduous Forests: Carbon and Water Fluxes, Balances and Ecophysiological Determinants. Fluxes of Carbon, water and Energy of European Forests. R. Valentini, Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, 270
 20. **Grebenc T., Deckmyn G.I., Janssens I., Kraigher H. (2005)** Implementation of mycorrhizae into the existing soil module of Mefyque mechanistic model. V: Rhizosphere management in soils contaminated with organic and inorganic pollutants : COST action 631, Understanding and Modelling Plant-Soil Interactions in the Rhizosphere Environment (UMPIRE) : Kraków-Tomaszowice, Poland, 12-14 May, 2005. [Kraków: European Union, Ministry of Scientific Research and Information Technology: Institute of botany of the Jagiellonian University], s. 31
 21. **Grebenc T., Štupar B., Kraigher H. (2007)** Pomen korenin in mikorize za ponor ogljika. The role of roots and mycorrhizae in carbon sequestration. V: Podnebne spremembe : vpliv na gozd in gozdarstvo: impact on forest and forestry, (*Studia forestalia Slovenica*, 130. Jurc M. (ur.). Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Ljubljana: 399-413
 22. **Grebenc T., Bajc M., Kraigher H. (2009a)** Razkroj lesa in biotska raznovrstnost gliv in bakterij v opadu naravnih sestojev z bukvijo = Wood decomposition and the biodiversity of wood decomposing fungi and bacteria in natural beech stands. V: Trajnostna raba lesa v kontekstu sonaravnega gospodarjenja z gozdovi. (*Studia forestalia Slovenica*, 135). Humar M. (ur.), Kraigher H. (ur.). *Gozdarski inštitut Slovenije*, *Silva Slovenica*, Ljubljana, 47-54
 23. **Grebenc T., Christensen M., Vilhar U., čater M., Martin P.M., Simončič P., Kraigher H. (2009b)** Response of ectomycorrhizal community structure to gap opening in natural and managed temperate beech-dominated forests. *Can.j. for. res.*, 39, no. 7: 1375-1386
 24. **Grebenc T., Kraigher H. (2009c)** Interakcije v mikorizosferi določajo dinamiko ogljika v ekosistemu bukovih gozdov. *Zb. gozd. lesar.*, 88: 11-19
 25. **Hafner P., Levanič T. (2008)** Vpliv klime na maksimalno gostoto krasnega lesa v branikah smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na dveh rastiščih v Sloveniji. The influence of climate on tree-ring maximum latewood density in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) at two sites in Slovenia. *Zb. gozd. lesar.*, 85: 3-10
 26. **Hafner P., Levanič T. (2009)** Stable carbon isotopes in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) tree rings at two sites in Slovenia. Stabilna ogljikova izotopa v branikah smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na dveh rastiščih v Sloveniji. *Zb. gozd. lesar.*, 88: 43-52
 27. **Houghton R.A., Davidson E.A., Woodwell G.M. (1998)** Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochem. Cycles*, 12, 1: 25-34
 28. **Houghton R.A., Hackler J.L., Lawrence K.T. (1999)** The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 285: 574-578
 29. **IPCC (2003)** Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit, IGES, Japan, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.
 30. **Joosten R., Schumacher J., Wirth C., Schulte A. (2004)** Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagussylvatica* L.) in western Germany. *Forest Ecology and Management*, 189, 1: 87-96
 31. **Kauppi P.E., Mileikakainen K., Kuusela K. (1992)** Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 256, 5053: 70-74
 32. **Kobal M., Eeler K., Urbančič M., Zupan M., Mihelič R., Simončič P. (2008)** Organic carbon content of forest and agricultural soils in Slovenia. V: Eurosoil 2008 : University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, Austria, August 2008-08-04 : book of abstracts. Blum, W. E. H. (ur.), Gerzabek, M. H. (ur.), Vodrazka, M. (ur.). University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, 13 s.
 33. **Kotar M. (2003)** *Gozdarski priročnik*. Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 414
 34. **Kovač M. (2009)** Statistična moč kontrolne vzorčne metode - primer monitoringa gozdov in gozdnih ekosistemov. Statistical power of the control sampling method- the case of forest and forest ecosystem condition survey. V: Kontrolna vzorčna metoda v Sloveniji - zgodovina, značilnosti in uporaba. *Studia forestalia Slovenica* (134). Planinšek Š. (ur.), Kovač M. *Gozdarski inštitut Slovenije*, Založba *Silva Slovenica*, Ljubljana, 97-103
 35. **Kraigher H., Jurc D., Kalan P., Kutnar L., Levanič T., Rupel M., Smolej I. (2002)** Beech coarse woody debris characteristics in two virgin forest reserves in Southern Slovenia = Značilnosti odmrlih velikih lesnih ostankov bukve v dveh gozdnih rezervatih v južni Sloveniji. *Zb. gozd. lesar.*, 69: 91-134
 36. **Kušar G., Kovač M., Simončič P. (2009)** Metodološke osnove moni-

- toringa gozdov in gozdnih ekosistemov = Methodological bases of the forest and forest ecological condition survey. V: Kontrolna vzorčna metoda v Sloveniji - zgodovina, značilnosti in uporaba. (Studia forestalia Slovenica, 134). Planinšek Š. (ur.), Kovač M. Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica, Ljubljana, 85-96
37. **Kutnar L., Kobler A., Bergant K. (2009)** Vpliv podnebnih sprememb na pričakovano prostorsko prazazporeditev tipov gozdne vegetacije = The impacts of climate change on the expected spatial redistribution of forest vegetation types. Zb. gozd. lesar., 89: 33-42
 38. **Kutnar L., Odor P., van Dort K. (2002)** Vascular plants on beech dead wood in two Slovenian forest reserves = Vaskularne rastline na odmrlem bukovem drevju v dveh gozdnih rezervatih v Sloveniji. Zb. gozd. lesar., 69: 135-153
 39. **Kutnar L., Urbančič M. (2006)** Vpliv rastiščnih in sestojnih razmer na pestrost tal in vegetacije v izbranih bukovih in jelovo-bukovih gozdovih na Kočevskem = Influence of site and stand conditions on diversity of soil and vegetation in selected beech and fir-beech forests in the Kočevje region. Zb. gozd. lesar., 80: 3-30
 40. **Kutsch W.L., Bahn M., Heinemeyer A. (2005)** Soil Carbon Dynamics. An Integrated Methodology. Cambridge University Press, 286
 41. **Levanič T. (2006)** Vpliv klime na debelinsko rast macesna (*Larix decidua* Mill.) na zgornji gozdni meji v JV Alpah. Effect of climate on growth of european larch (*Larix decidua* Mill.) at the upper treeline in the southeastern Alps. Zb. gozd. lesar., 78: 29-55
 42. **Levanič T., Slapnik A. (2006)** Dendroekološka analiza rasti smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) v okolici dveh termoelektrarn. Dendroecological study of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) growth around two coal-fired power plants. Zb. gozd. lesar., 79: 3-18
 43. **Levanič T. (2007)** ATRICS - a new system for image acquisition in dendrochronology. Tree Ring Research, 63, 2: 117-122
 44. **Levanič T., Gričar J., Gagen M., Jalkanen R., Loadel N.J., Mccarol D., Oven P., Robertson I. (2009)** The climate sensitivity of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in the southeastern European Alps. Trees (Berl. West), 23, 1: 169-180
 45. **Lipoglavšek M. (1980)** Gozdni proizvodi. Učbenik za gozdarstvo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za gozdarstvo, Ljubljana, 211
 46. **Matyssek R., Bahnweg G., Ceulemans R., Fabian W., Grill D., Hanke D.E., Kraigher H., Osswald W., Rennenberg H., Sandermann H., Tausz M., Wieser G. (2007)** Synopsis of the CASIROZ case study: Carbon sink strength of *Fagus sylvatica* L. in a changing environment - experimental risk assessment of mitigation by chronic ozone impact. Plant Biol, 9: 163-180
 47. **Merino A., Real C., Álvarez-Gonzales J.G., Rodríguez-Guitián M.A. (2007)** Forest structure and C stocks in natural *Fagus sylvatica* forest in southern Europe: The effects of past management. Forest Ecology and Management, 250: 206-214
 48. **Mihelič M., Krajnc N., Piškur M., Simončič P., Kušar G., Kobler A. (2009)** Slovenia's national inventory report 2009 for Sector LULUCF. Slovenian Forest Institute, Ljubljana, 46 http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/4771.php.
 49. **Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R. (1997)** Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature, 386: 698-702
 50. **Myneni R.B., Dong J., Tucker C.J., Kaufmann R.K., Kauppi P.E., Liski J., Zhou L., Alexeyev V., Hughes M.K. (2001)** A large carbon sink in the woody biomass of northern forests. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 98, 26: 14784-14789
 51. **Nadelhoffer K.J., Emmett B.A., Gundersen P., Kjonaas O.J., Koopmans C.J., Schleiippi P., Tietema A., Wright R.F. (1999)** Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. Nature, 398: 145-148
 52. **Odor P., Kosec J., Piltaver A., Kraigher H., Grebenc T. (2006)** Diversity of dead wood inhabiting fungi and bryophytes in semi-natural beech forests in Europe. Biol. Conserv., 131, 1: 58-71
 53. **Offenthaler I., Hochbichler E. (2006)** Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. Austrian Journal of Forest Science, Centralblatt für das gesamte Forstwesen, 123, 1/2: 65-86
 54. **Piltaver A., Matočec N., Kosec J., Jurc D. (2002)** Macrofungi on beech dead wood in the Slovenian forest reserves Rajhenavski Rog and Krokari = Glive na odmrlem bukovem lesu v slovenskih gozdnih rezervatih Rajhenavski Rog in Krokari. Zb. gozd. lesar., 69: 171-196
 55. **Potočić N., Seletković I., Čater M., Čosić T., Šango M., Vedriš M. (2009)** Ekofiziološki odziv suncu izloženih sadnica običajne bukve (*Fagus sylvatica* L.) pri različitim razinama gnojidbe. Ecophysiological response of sun-exposed common beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings under different fertilization levels. Šumar. list, 133, 5/6: 289-300
 56. **Read D.J. (1998)** Plants on the web. Nature, 396: 22-23
 57. **ReNGP: Resolucija o nacionalnem gozdnem programu, 2007.** Uradni list RS, št. 111/2007 z dne 5. 12. 2007 : 15252-15323; <http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlurid=20075510>
 58. **Richter D.D., Markewitz D., Trumbore S.E., Wells C.G. (1999)** Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. Nature, 400: 56-58
 59. **Schlesinger W.H., Winkler J.P., Meonigal J.P. (2000)** Soils and the global carbon cycle. V: The Carbon Cycle. Wigley T.M.(ur.), Schimel D.S., (ur.). Cambridge Univ. Press, 93-101
 60. **Simončič P., Kušar G., Kovač M. (2009)** Monitoring gozdov in gozdnih ekosistemov kot merilo okoljskih vplivov = Monitoring of forests and forest ecosystems as a measure for the ecological influences. Gozd. vestn., 67, 7/8: 321-332
 61. **Simončič P., Ogrinc N., Vilhar U., Grebenc T., Kraigher H. (2007)** CO₂ sequestration: state of the art. V: Local strategies for land use management according to Kyoto protocol : exploring new management tools for CO₂ sequestration in agricultural lands and forests. Peresotti, A. (ur.). Forum Editrice Universitaria, Udine, 17-23
 62. **Urbančič M., Simončič P., Kutnar L., Prus T. (2005)** Atlas gozdnih tal Slovenije. Ljubljana: Zveza gozdarskih društev Slovenije: Gozdarski vestnik: Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana, 100
 63. **Urbančič M., Kobal M., Zupan M., Šporar M., Eler K., Simončič P. (2007)** Organska snov v gozdnih tleh. V: Strategija varovanja tal v Sloveniji: zbornik referatov Konference ob svetovnem dnevu tal 5. decembra 2007. Knapič M. (ur.). Pedološko društvo Slovenije, Ljubljana, 217-230
 64. **Urbančič M., Kobal M., Vilhar U., Simončič P. 2009a.** Zaloge organske snovi v izbranih sestojih na bukovih rastiščih = Organic carbon matter pools in selected beech sites. V: Trajnostna raba lesa v kontekstu sonaravnega gospodarjenja z gozdovi. (Studia forestalia Slovenica, 135). Humar M. (ur.), Kraigher H. (ur.). Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana, Silva Slovenica, 19-29
 65. **Urbančič M., Kutnar L., Kralj T., Kobal M., Simončič P. 2009.** Rastiščne značilnosti trajnih ploskev slovenske 16 x 16-kilometrsko mreže. Gozd. vestn., 67, 1: 17-48
 66. **Van Veen J.A., Liljeroth E., Lekkerkerk L.J.A., van de Geijn S.C. (1991)** Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO₂ levels. Ecological Applications, 1, 2: 175-181
 67. **Vilhar U. (2006)** Vodna bilanca dinarskega jelovo-bukovega gozda na Kočevskem rogu. Biotehniška fakulteta, Odd. za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Ljubljana, 246
 68. **Vilhar U., Simončič P., Kajfež-Bogataj L., Katzensteiner K., Diaci J. (2006)** Mikroklimatske razmere v vrzelih in sestojih dinarskega jelovo-bukovega gozda = Microclimate conditions in gaps and mature stands of Dinaric silver fir-beech forests. Zb. gozd. lesar., 81: 21-36
 69. **Vilhar U., Starr M., Urbančič M., Smolej I., Simončič P. (2005)** Gap evapotranspiration and drainage fluxes in a managed and a virgin dinaric silver fir-beech forest in Slovenia : a modelling study. European journal of forest research, 124, 3: 165-175
 70. **Vilhar U., Gracia C., Simončič P. (2008)** C dynamic of a beech stand in SE Slovenia - first results of the GOTILWA+ model. Carbon dynamics in natural beech forests. P. Simončič. Studia Forestalia Slovenica. Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana (v tisku)
 71. **Vilhar U. (2009)** Vpliv gospodarjenja na vodno bilanco jelovo-bukovih gozdov dinarskega krasa = Influence of management on water balance of the silver fir-beech forests in the Dinaric karst, (Studia forestalia Slovenica, 133). Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana, Silva Slovenica, 2009. XVI, 122
 72. **Vilhar U. (2010)** Estimation of carbon stocks in a beech stand in SE Slovenia : a modeling study = Procjena zaliha ugljika u bukovoju šumi u jugoistočnoj Sloveniji : modelska studija. Šumar. list, 2010 (84) [v tisku]
 73. **Železnik P., Božič G., Sinjur I., Kraigher H. (2009)** Dinamika razvoja drobnih korenin treh provenienc navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) v letih 2007 in 2008 = Dynamics of fine root development of three provenances of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in 2007 and 2008. V: Trajnostna raba lesa v kontekstu sonaravnega gospodarjenja z gozdovi. (Studia forestalia Slovenica, 135). Humar M. (ur.), Kraigher H. (ur.), Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana, Silva Slovenica, 31-40