

## Zbornik gozdarstva in lesarstva 71, s. 71 - 89

GDK 813.1

Prispelo / Received: 29.09.2003

Sprejeto / Accepted: 17.11.2003

Pregledni znanstveni članek

Scientific review paper

**LES - SKLADIŠČE OGLJIKA**

Igor LIPUŠČEK\*, Vesna TIŠLER\*

## Izvleček

V prispevku je predstavljeno globalno gibanje ogljikovega dioksida, ki je zaradi velikih količin najpomembnejši toplogredni plin. Preučevali smo ogljikov cikel in možnosti za njegovo podaljšanje, kjer smo analizirali mehanizme, ki ogljikov dioksid odstranjujejo iz ozračja in ga za daljše časovno obdobje vežejo v trdne substance. Osredotočili smo se na ponor ogljikovega dioksida v lesno biomaso in skladiščenje ogljika v lesu. Na osnovi podatkov za delež komponent lesa in s kemijsko analizo komponent smo izračunali delež ogljika v lesu in ekvivalentno količino ogljikovega dioksida, ki je bila v procesu fotosinteze porabljena za nastanek 1 kg lesne materije. Ugotovili smo, da se za nastanek 1,0 kg absolutno suhega lesa v procesu fotosinteze iz atmosfere povprečno porabi 1,8 kg ogljikovega dioksida.

Ključne besede: ogljikov cikel, ogljikov dioksid, ponor ogljika, les

*WOOD – A CARBON DEPOT*

## Abstract

*The article examines the global movement of carbon dioxide, the most important greenhouse gas due to its large quantities. We studied the carbon cycle with possibilities of its extension, and analysed the mechanisms that remove carbon dioxide from the atmosphere and bind it into solid substances for a longer period of time. The focus was on carbon dioxide sink into biomass and carbon deposit in wood. On the basis of wood component data and chemical analysis of the components, we calculated the share of carbon in wood and the equivalent quantity of carbon dioxide used in the process of photosynthesis for formation of 1.0 kg of wood matter. It was established that in the process of photosynthesis, approximately 1.8 kg of carbon dioxide is used on average from the atmosphere to form 1 kg of absolutely dry wood.*

*Key words:* carbon cycle, carbon dioxide, carbon sink, wood

---

\* Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Rožna dolina c. VIII/34, 1000 Ljubljana, SVN

**VSEBINA**  
**CONTENTS**

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	73
	INTRODUCTION	
<b>2</b>	<b>METODA</b> .....	78
	METHOD	
<b>3</b>	<b>IZRAČUNI, REZULTATI IN RAZPRAVA</b> .....	81
	CALCULATIONS, RESULTS AND DISCUSSION	
<b>4</b>	<b>ZAKLJUČKI</b> .....	85
	CONCLUSIONS	
<b>5</b>	<b>SUMMARY</b> .....	86
<b>6</b>	<b>VIRI</b> .....	88
	REFERENCES	

## **1 UVOD**

### **INTRODUCTION**

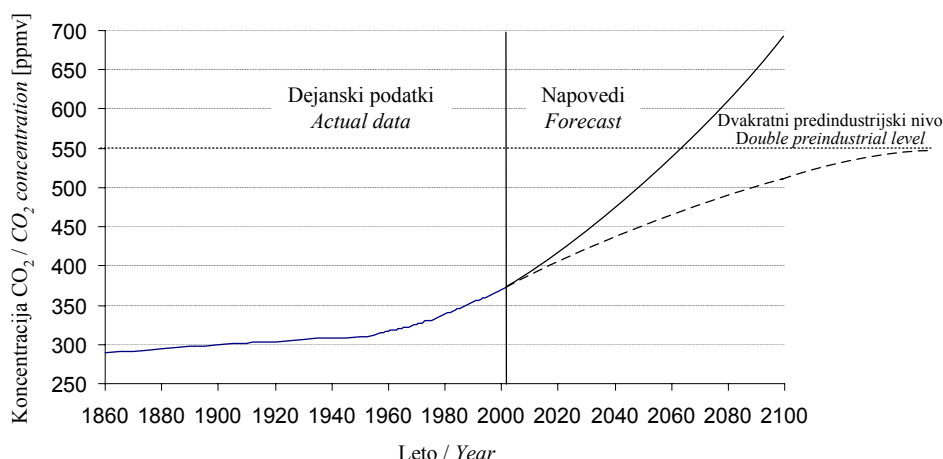
Z naraščanjem posledic globalnega ogrevanja zemlje postaja vpliv gozdov in uporabe lesne surovine na zmanjševanje emisij toplogrednih plinov vse pomembnejši. Gozdovi naj bi rabili kot ponor in skladišče ogljikovega dioksida, s čimer naj bi se znižale koncentracije toplogrednih plinov v atmosferi. Kot navajata PETERSEN/SOLBERG (2002), je bila večina dosedanjih raziskav posvečena ponoru ogljikovega dioksida v gozdovih in uporabi biomase za pridobivanje energije kot nadomestku za fosilna goriva, medtem ko le nekaj raziskav preučuje možnosti uporabe lesnih izdelkov kot nadomestke za energetsko potratnejše izdelke, kot so jeklo, aluminij ali beton. Še manj pa je raziskav, ki les omenjajo kot skladišče ogljika.

Koncentracije toplogrednih plinov v atmosferi so v zadnjem času močno narasle, zato so združeni narodi leta 1997 v Kyotu podpisali okvirno konvencijo o spremembi podnebja, imenovano Kyotski protokol (Slovenija jo je podpisala 21. 10. 1998), po kateri naj bi industrijske države do leta 2010 kolektivno zmanjšale emisije toplogrednih plinov, predvsem ogljikovega dioksida, za 5,2 odstotka glede na leto 1990. Osnovni namen konvencije je stabilizacija koncentracij toplogrednih plinov v ozračju na nivoju, ki bo preprečil naravne antropogene vplive na podnebni sistem. Nekatere države h Kyotskemu sporazumu niso pristopile (Indija, Kitajska). ZDA, Kanada, Japonska in Avstralija trdijo, da brez upoštevanja ponora ogljikovega dioksida v gozdove ne morejo doseči dogovorjenih ciljev. EU meni, da je zanašanje na ponore zloraba protokola, ponori naj bi bili le dobrodošlo dopolnilo k zmanjševanju emisij. Greenpeace kritično ugotavlja, da projekti LUCF (land-use change and forestry) iz Kyotskega protokola sicer omogočajo vezanje ogljika, vendar hkrati dovoljujejo izpuste dodatnih količin ogljikovega dioksida iz fosilnih goriv v atmosfero (TORELLI 2001).

Plini, ki v ozračju preprečujejo, da bi toplotno sevanje s površine zemlje ušlo v vesolje, so ogljikov dioksid, metan, klorofluorogljiki, dušikovi oksidi, ozon in drugi plini, ki se sproščajo zaradi človekovih dejavnosti v industriji, prometu, kmetijstvu itn. Med njimi je najpomembnejši ogljikov dioksid, ki prispeva kar polovico učinka tople grede (KIMMINS 1997).

Koncentracija ogljikovega dioksida se je od druge polovice devetnajstega stoletja pa do danes povišala za približno 30%. Povišanje koncentracije je posledica izkoriščanja

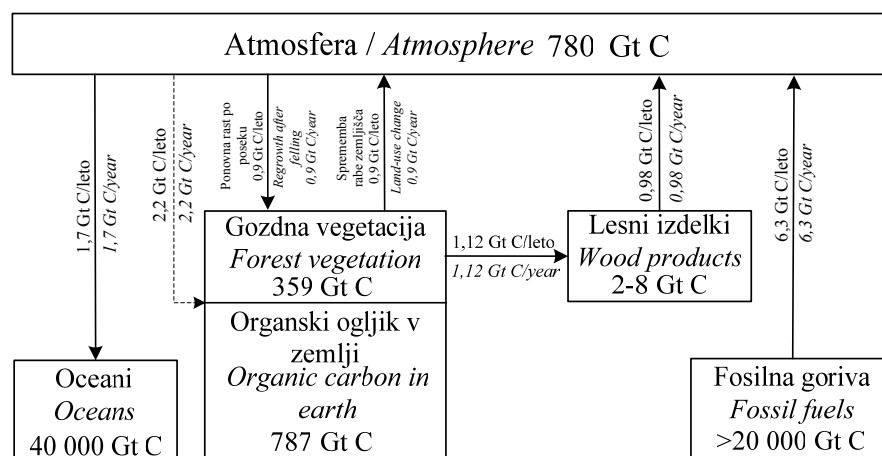
fosilnih goriv (premog, nafta in zemeljski plin) ter uničevanja gozdov z namenom pridobivanja prostora za kmetijske in druge človekove dejavnosti (sprememba rabe zemljišča). Trenutno je koncentracija ogljikovega dioksida v ozračju že za četrtno višja od naravne. Globalne projekcije rasti prebivalstva in predvidevanja o rabi energije nakazujejo, da bo koncentracija ogljikovega dioksida rasla tudi v prihodnje. Znanstvene ocene predvidevajo, da se bo v naslednjih petdesetih letih človekov prispevek ogljikovega dioksida v ozračje podvojil, koncentracija pa bo do leta 2100 dosegla dva- do trikrat višjo koncentracijo, kot je bila konec devetnajstega stoletja. Na sliki 1 je prikazana koncentracija ogljikovega dioksida v ozračju. Do leta 2002 so predstavljeni dejansko izmerjeni podatki, povzeti po KIRSCHBAUM-u (2003) in KEELING/WHORF-u (2003), po letu 2002 pa je predstavljena napoved spreminjanja koncentracije brez ukrepanja (neprekinjena črta) in ob zagotovitvi zahtev Kyotskega sporazuma (črtkana črta) (vir <http://www.climateark.org>). Za ustalitev koncentracij ogljikovega dioksida na dvakratnem predindustrijskem nivoju, kot jih predvideva Kyotski sporazum, bo treba sedanje globalne emisije postopoma več kot prepoloviti.



Slika 1: Spremembe globalnih koncentracij ogljikovega dioksida v ozračju (vir: KIRSCHBAUM 2003, KEELING/WHORF 2003 in <http://www.climateark.org>)

Figure 1: Change in global atmospheric concentration of carbon dioxide (sources: KIRSCHBAUM 2003, KEELING/WHORF 2003 in <http://www.climateark.org>)

Najpomembnejša mehanizma, ki v naravi odstranjujeta ogljikov dioksid iz ozračja, sta fotosinteza in karbonatni cikel. Fotosinteza poteka v rastlinah, ki predelajo ogljikov dioksid v celulozo in druge trdne organske spojine - biomaso. Pri karbonatnem ciklu, ki poteka predvsem v oceanih, pa se ogljikov dioksid kemijsko pretvori v netopne karbonate, ki se usedajo na dno oceana in iz njih nastanejo karbonatne kamnine, npr. apnenec. Oba mehanizma ogljikov dioksid za dalj časa odstranita iz ozračja, saj traja več let, preden biomasa spet razpade, in celo več milijonov let, preden razpadejo apnenčaste kamnine (RAVNIK 1999). Slika 2 ponazarja glavna skladišča ogljika na zemlji in gibanje ogljika v globalnem ogljikovem ciklu. Količina ogljika, ki je uskladiščena v določenem segmentu, je podana v giga tonah ogljika (Gt C), vrednosti so vpisane ob določenem segmentu. Podatki ob puščicah pa ponazarjajo letno gibanje ogljika med določenimi skladišči, in sicer v giga tonah ogljika na leto (Gt C/leto).

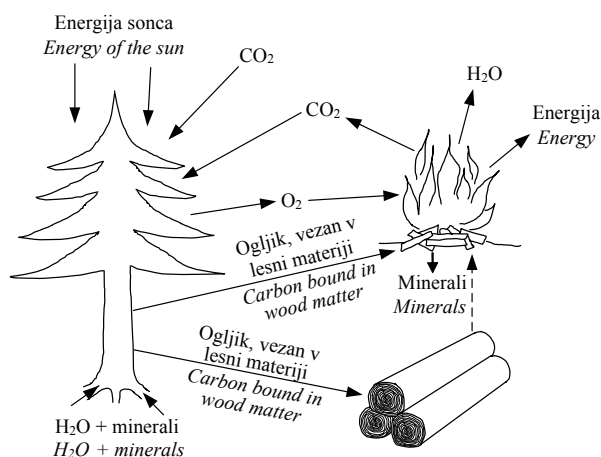


Slika 2: Ocene velikosti skladišč ogljika na zemlji in gibanje ogljika v globalnem ogljikovem ciklu (vir: KIRSCHBAUM 2003)

Figure 2: Estimated sizes of pools and fluxes in the global carbon cycle (source: KIRSCHBAUM 2003)

Kot lahko vidimo iz slike 2, sestavlja ponor ogljika, ki se veže v biomaso, znaten del celotnega ponora ogljika iz atmosfere. Vendar se moramo zavedati, da je vezava ogljika v biomaso možna samo do določene meje, dokler se vezava ne izenači s ponovnim sproščanjem ogljika v atmosfero zaradi biološkega razpada biomase. KIRSCHBAUM (2003) navaja, da se skladičenje ogljika v določenem tipu gozda lahko spreminja le med spodnjo in zgornjo mejo vezave ogljika v biomaso. Ko vezava ogljika v biomaso doseže potencialni maksimum navzema določenega tipa zemlje v določenih klimatskih razmerah, dodatna vezava ogljika ni možna. Ogljik, vezan v biomaso, se lahko celo ponovno sprosti v ozračje, če gozd propade zaradi gozdnega požara ali drugih motenj, kot so golosečnje in neustrezni postopki pridobivanja lesa (TORELLI 2000). V takih primerih se prej opisana korist izniči.

Pri gibanju ogljika v globalnem ogljikovem ciklu na zemlji je treba upoštevati tudi izkoriščanje gozda za lesno surovino, ki je nato uporabljena za pridobivanje energije ali pa za izdelavo lesnih izdelkov. V tem primeru odstranimo ogljik iz gozda in ga "uskладиščimo" v lesnih izdelkih, gozdu pa omogočimo nadaljnjo dodatno vezavo ogljika, saj kot navaja KIRSCHBAUM (2003), z zamenjavo starega in dozorelega gozda, ki vsebuje velike količine ogljika, z mlajšim gozdom, ki vsebuje manj ogljika, omogočimo nadaljnjo vezavo ogljika iz atmosfere. Les, ki je v tem procesu pridobljen, lahko nadalje vrednotimo kot "skladišče" ogljika, saj do emisij ogljikovega dioksida ne pride, dokler les ne razpade. Z lesom, ki ga trajno vgradimo v izdelke, torej tudi trajno "uskладиščimo" ogljik, ki je v tem lesu vezan.



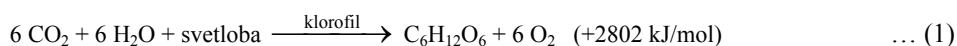
Slika 3: Krožni tokovi ogljika med atmosfero in lesno biomaso

Figure 3: Circular stream of carbon between atmosphere and wood biomass

Na sliki 3 je prikazano gibanje ogljika med atmosfero in lesno biomaso, kjer se v procesu asimilacije s fotosintezo porablja ogljikov dioksid iz atmosfere in tvori materija (biomasa), v kateri sta shranjena energija sonca in ogljik, vezan v različnih spojinah. Biomasa gozdne vegetacije lahko ponovno biološko razpade, ali pa jo uporabimo kot lesno surovino, ki se nadalje uporabi kot surovina za pridobivanje energije, ali pa se uporabi za izdelavo lesnih izdelkov. Če biomasa biološko razpade v 100% aerobnih razmerah, je delež ponovno sproščenega ogljikovega dioksida v atmosfero enak deležu ogljikovega dioksida, ki je bil v procesu fotosinteze vezan v biomaso (BÖRJESSON/GUSTAVSSON 2000). Vendar kot navajata BÖRJESSON/GUSTAVSSON (2000), biomasa v naravi ne razpada v 100% aerobnih razmerah, ampak razpad poteka tudi v anaerobnih razmerah, v katerih se namesto ogljikovega dioksida tvori metan, ki ima z vidika toplogrednih plinov devetkrat višji potencial od ogljikovega dioksida, če ju primerjamo na volumski osnovi, oz. enaindvajsetkrat višji potencial, če ju primerjamo na osnovi mase. Po podatkih švedske agencije za zaščito okolja naj bi se pri biološkem razpadu biomase tvorilo 60% metana in 40% ogljikovega dioksida (BÖRJESSON/GUSTAVSSON 2000). V primeru, da je gozdna biomasa uporabljena kot surovina za pridobivanje energije, se v popolnem procesu izgorevanja tvorijo emisije ogljikovega dioksida, vodne pare ter pepel, v katerem so minerali (NDIEMA s sod. 1998). V realnem procesu gorenja pa se pojavljajo tudi emisije ogljikovega oksida, neizgorelih ogljikovodikov, dušikovi oksidi, dim in saje, katerih delež variira glede na klimatske razmere in konstrukcijske lastnosti peči (NDIEMA s sod. 1998, MALOVRH/PRAZNIK 2000). V primeru, ko lesno biomaso uporabimo kot surovino za izdelavo lesnih izdelkov, do ponovnega sproščanja ogljika v atmosfero ne pride. Ogljik je torej trajno vezan oz. "uskladiščen" v lesu, vse dokler izrabljeni lesni izdelki nisi odvrženi na odpad ali porabljeni za pridobivanje energije. Zaradi vsega naštetega torej les moramo upoštevati in obravnavati kot skladišče ogljika. V nadaljevanju predstavljamo izračun deleža ogljika v lesu in primerjalno količino ogljikovega dioksida, ki je bila v ta namen porabljena iz atmosfere. Namen tega prispevka je zagotoviti podatke o količini ogljikovega dioksida, ki je vezan v lesni materiji, kar bo osnova za izračun emisij toplogrednih plinov, ki se sprostijo v življenjskem ciklusu izdelkov.

## 2 METODA METHOD

Izhajali smo iz formule fotosinteze, ki je predstavljena z enačbo 1 in ponazarja zaporedje več zapletenih reakcij, pri katerih se ogljikov dioksid pretvori v glukozo. Iz glukoze se nato prek zapletenih reakcij tvorijo osnovni gradniki oz. komponente lesa, kot so celuloza, polioze, lignin in ekstraktivne snovi.



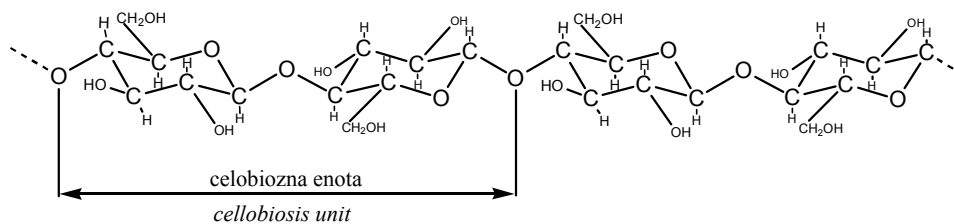
Iz literature (DINWOODIE 2000) smo povzeli povprečen masni delež komponent lesa, ki je predstavljen v preglednici 1.

Preglednica 1: Masni deleži komponent lesa (vir: DINWOODIE 2000)

Table 1: Mass share of wood components (source: DINWOODIE 2000)

Komponenta <i>Component</i>	Povprečen masni delež (%) <i>Average mass share (%)</i>	
	Smreka / <i>Spruce</i>	Bukev / <i>Beech</i>
Celuloza / <i>Cellulose</i>	42 ± 2	45 ± 2
Hemiceluloze / <i>Hemicelluloses</i>	27 ± 2	30 ± 5
Lignin / <i>Lignin</i>	28 ± 3	20 ± 4
Ekstraktivi / <i>Extractives</i>	3 ± 2	5 ± 4

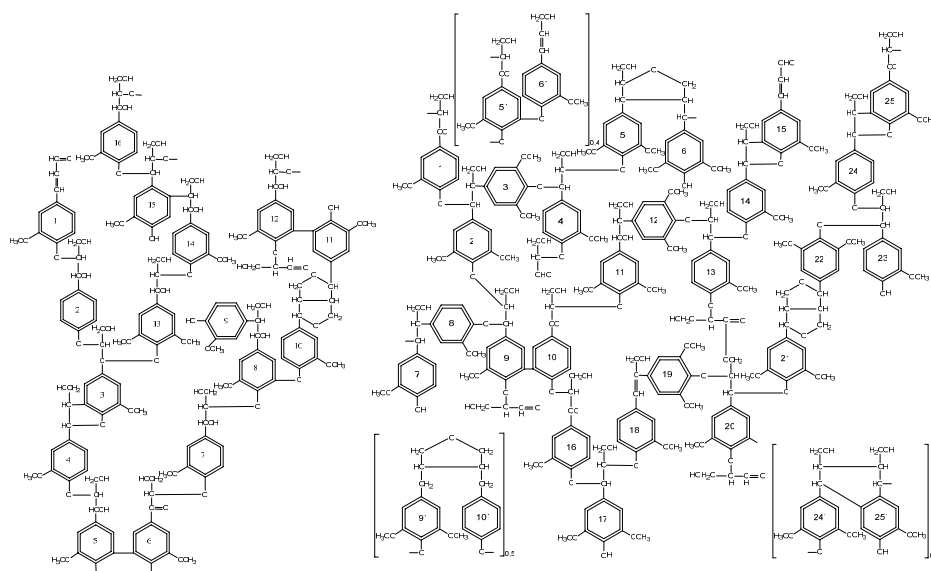
Nato smo na osnovi kemijskih formul posameznih komponent lesa izračunali masne deleže elementov, ki te spojine tvorijo. Kemijska formula celuloze je predstavljena na sliki 4, kemijski formuli smrekovega in bukovega lignina pa na sliki 5.



Slika 4: Strukturna formula celuloze (vir: DINWOODIE 2000)

Figure 4: Structural formula for the cellulose molecule (source: DINWOODIE 2000)





Slika 5: Model smrekovega (levo) in bukovega lignina (desno) (vir: FENGEL 1989)

Figure 5: Structural concept of spruce (left) and beech lignin (right)(source: FENGEL 1989)

Pri analizi kemijske zgradbe komponent lesa smo z uporabo enačbe 2 izračunali masni delež posameznih elementov v komponentah lesa (enačba povzeta po ŠEGEDIN 1990).

$$w_j = \frac{m_j}{\sum_{j=1}^n m_j} \times 100\% \quad \dots (2)$$

Kjer je:  $w_j$  – masni delež elementa j v komponenti lesa [%]

$m_j$  – masa elementa j [g]

$\sum_{j=1}^n m_j$  – masa vseh elementov v sistemu (komponenti) [g]

n – število elementov v sistemu (komponenti)

Nato smo iz masnih deležev komponent v lesu in masnih deležev posameznih elementov v komponentah lesa z uporabo enačbe 3 izračunali masni delež posameznih elementov v lesu.

$$W_{jk} = w_j \times w_k \quad \dots (3)$$

Kjer je:  $W_{jk}$  – masni delež elementa j v lesu [%]  
 $w_j$  – masni delež elementa j v komponenti lesa [%]  
 $w_k$  – masni delež komponente k v lesu [%]

Ko smo izračunali delež ogljika v lesu, smo na osnovi molskega razmerja izračunali količino ogljikovega dioksida, ki je bila porabljena v procesu fotosinteze oz. bo v primeru 100% oksidacije ponovno sproščena v ozračje. Pri preračunu molskega razmerja smo izhajali iz enačbe 4, povzete po ATKINS s sod. (1997).

$$n = \frac{m}{M} \quad \dots (4)$$

Kjer je:  $n$  – množina spojine [mol]  
 $m$  – masa spojine [g]  
 $M$  – molska masa spojine [g/mol]

V nadaljevanju smo izračunali količino ogljikovega dioksida, ki se je v procesu fotosinteze porabila iz atmosfere in se vezala v komponentah lesa ter se tako "uskладиčila" kot vezan ogljik v lesu. Pri tem izračunu smo izhajali iz podatkov za povprečno gostoto zračno suhega lesa, povzetih iz knjige Zgradba in lastnosti lesa (TORELLI 1989) in formule za izračun lesne vlažnosti, povzete po GORIŠEK s sod. (1994), ki je predstavljena z enačbo 5.

$$u = \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} \times 100\% \quad \dots (5)$$

Kjer je:  $u$  – vlažnost lesa [%]  
 $m_{vl}$  – masa vlažnega lesa [kg]  
 $m_0$  – masa absolutno suhega lesa [kg]

Potek izračunov in dobljeni rezultati so predstavljeni v nadaljevanju.

### 3 IZRAČUNI, REZULTATI IN RAZPRAVA CALCULATIONS, RESULTS AND DISCUSSION

Masne deleže posameznih kemijskih elementov v komponentah lesa smo izračunali z uporabo enačbe 2. Izračun masnega deleža ogljika v celulozi, katere enostavna formula osnovnega gradnika je  $C_{12}H_{20}O_{10}$ , je naslednji:

$$w(C) = \frac{m(C)}{m(C) + m(H) + m(O)} \times 100\% = \frac{12 \times 12,011}{12 \times 12,011 + 20 \times 1,008 + 10 \times 15,999} = 44,5\%$$

V celulozi je torej masni delež ogljika 44,5%. Rezultati preostalih izračunov so predstavljeni v preglednici 2. Pri masnih deležih kemijskih elementov v ekstraktivih smo zaradi velikega števila kemijsko različnih spojin (ZULE 2001) upoštevali najpogostejše spojine, ki se pojavljajo v preučevanih lesovih. Podatki, predstavljeni v preglednici, ponazarjajo povprečne masne deleže elementov, izračunane na osnovi deležev najpogostejših skupin ekstraktivov v določenem lesu.

Preglednica 2: Masni deleži posameznih kemijskih elementov v komponentah lesa  
Table 2: Mass share of individual chemical elements in components of wood

Komponenta <i>Component</i>		Masni delež elementa [%] <i>Mass share of element [%]</i>			
		C	O	H	Drugi <i>Others</i>
Smrekov les <i>Wood of spruce</i>	Celuloza / <i>Cellulose</i>	44,5	49,3	6,2	
	Hemiceluloze / <i>Hemicelluloses</i>	44,5	49,3	6,2	
	Lignin / <i>Lignin</i>	63,0	31,1	5,9	
	Ekstraktivi / <i>Extractives</i>	53	6	8	33
Bukov les <i>Wood of beech</i>	Celuloza / <i>Cellulose</i>	44,5	49,3	6,2	
	Hemiceluloze / <i>Hemicelluloses</i>	44,5	49,3	6,2	
	Lignin / <i>Lignin</i>	63,7	30,4	5,9	
	Ekstraktivi / <i>Extractives</i>	65	5	12	18

Iz rezultatov, predstavljenih v preglednici 2, lahko ugotovimo, da je masni delež ogljika v celulozi nižji kot masni delež ogljika v ligninu. Za lignin pa lahko ugotovimo, da kljub zelo različni kemijski zgradbi lignina smrekovega in bukovega lesa v masnem deležu ogljika v spojini ni velikih odmikov. Razlike v masnem deležu ogljika v lesu nastanejo predvsem zaradi deleža posameznih komponent v lesu. Delež ogljika v lesu po posameznih komponentah je prikazan v preglednici 3, kjer so predstavljeni rezultati izračunov, s katerimi smo z uporabo enačbe 3 in podatkov iz preglednic 1 in 2 izračunali masni delež posameznih elementov v lesu. Primer izračuna za delež ogljika v celulozi smrekovega lesa je:

$$W(\text{C v celulozi iglavcev}) = 0,42 \times 0,445 \times 100\% = 19\%$$

Masni delež ogljika, ki je v celulozi smrekovega lesa, je 19%. Masni deleži ostalih kemijskih elementov v lesu so predstavljeni v preglednici 3.

Preglednica 3: Masni deleži posameznih kemijskih elementov v lesu

Table 3: Mass ratio of individual chemical elements in wood

Komponenta <i>Component</i>		Masni delež elementa [%] <i>Mass share of element [%]</i>			
		<b>C</b>	<b>O</b>	<b>H</b>	Drugi <i>Other</i>
Smrekov les <i>Wood of spruce</i>	Celuloza / <i>Cellulose</i>	19	21	2,6	
	Hemiceluloze / <i>Hemicelluloses</i>	12	13	1,7	
	Lignin / <i>Lignin</i>	18	9	1,6	
	Ekstraktivi / <i>Extractives</i>	1,6	0,2	0,2	1
	Skupaj v lesu / <i>Together in wood</i>	<b>50</b>	<b>43</b>	<b>6</b>	<b>1</b>
Bukov les <i>Wood of beech</i>	Celuloza / <i>Cellulose</i>	20	22	2,8	
	Hemiceluloze / <i>Hemicelluloses</i>	13	15	1,9	
	Lignin / <i>Lignin</i>	13	6	1,2	
	Ekstraktivi / <i>Extractives</i>	3,2	0,3	0,6	0,9
	Skupaj v lesu / <i>Together in wood</i>	<b>49</b>	<b>43</b>	<b>7</b>	<b>1</b>

Količino ogljikovega dioksida, ki je bila iz atmosfere porabljena v procesu fotosinteze, smo izračunali iz podatkov v preglednici 3 in z uporabo enačbe 4. Količino ogljikovega dioksida, ki je bila potrebna za nastanek enega kilograma absolutno suhega smrekovega lesa, smo izračunali tako, da smo najprej izračunali količino ogljika v enem kilogramu absolutno suhega lesa. Masa ogljika v enem kilogramu absolutno suhega smrekovega lesa torej je:

$$m(\text{C}) = m(\text{lesa}) \times W(\text{C}) = 1 \text{ kg lesa} \times 50\% \text{ ogljika} = 0,50 \text{ kg ogljika/1 kg lesa}$$

Nato smo z uporabo enačbe 4 izračunali množino ogljika v 0,50 kg ogljika.

$$n(\text{C}) = \frac{m(\text{C})}{M(\text{C})} = \frac{500 \text{ g}}{12,011 \text{ g/mol}} = 41,6 \text{ mol ogljika}$$

Ker iz enega mola ogljika nastane en mol ogljikovega dioksida  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ , se pravi, da iz 41,6 mol ogljika nastane 41,6 mol ogljikovega dioksida, smo z uporabo enačbe 4 izračunali količino ogljikovega dioksida, ki je bila porabljena v procesu fotosinteze.

$$m(\text{CO}_2) = n(\text{CO}_2) \times M(\text{CO}_2) = 41,6 \text{ mol} \times 44,009 \text{ g/mol} = 1832 \text{ g CO}_2$$

Za nastanek 1 kg absolutno suhega smrekovega lesa se torej v procesu fotosinteze iz atmosfere porabi 1,832 kg ogljikovega dioksida.

Z enakim postopkom smo izračunali tudi količino ogljikovega dioksida, potrebnega za nastanek 1 kg bukovega lesa.

$$m(\text{C}) = m(\text{lesa}) \times W(\text{C}) = 1 \text{ kg lesa} \times 49\% \text{ ogljika} = 0,49 \text{ kg ogljika/1 kg lesa}$$

$$n(\text{C}) = \frac{m(\text{C})}{M(\text{C})} = \frac{490 \text{ g}}{12,011 \text{ g/mol}} = 40,8 \text{ mol ogljika}$$

$$m(\text{CO}_2) = n(\text{CO}_2) \times M(\text{CO}_2) = 40,8 \text{ mol} \times 44,009 \text{ g/mol} = 1795 \text{ g CO}_2$$

Za nastanek 1 kg absolutno suhega bukovega lesa se torej v procesu fotosinteze iz atmosfere porabi 1,795 kg ogljikovega dioksida.

Kot vidimo iz izračunov, je razlika v deležu ogljika v lesni substanci oz. razlika v količini porabljenega ogljikovega dioksida iz atmosfere zelo majhna, kljub zelo različni zgradbi smrekovega in bukovega lesa. Razlika v količini je le približno 2%. Če upoštevamo še variabilnost deleža posameznih komponent v lesu, ki znaša od 2 do 5%, lahko rečemo, da so razlike v deležu ogljika v lesni substanci med posameznimi lesovi minimalne. Nekoliko višji delež ogljika je v lesovih, v katerih je delež lignina višji.

Navadno je poraba lesa pri proizvodnji izdelkov podana v prostorskih enotah in ne v utežnih, zato smo izračunali tudi količino ogljikovega dioksida, ki je bila pri procesu fotosinteze porabljena iz atmosfere in se nadalje pretvorila v komponente lesa, v katerih je vezan ogljik, in je tako vezana v 1 m<sup>3</sup> zračno suhega lesa. Pri izračunu smo izhajali iz predpostavke, da je vlažnost zračno suhega lesa  $u = 12\%$ , in teoretičnih podatkov za gostoto zračno suhega lesa, kjer TORELLI (1989) navaja, da je povprečna gostota zračno suhega smrekovega lesa 470 kg/m<sup>3</sup> in povprečna gostota zračno suhega bukovega lesa 690 kg/m<sup>3</sup>.

Z uporabo enačbe 5 smo izračunali maso absolutno suhe lesne substance v 1 m<sup>3</sup> zračno suhega lesa, ki za smrekov les znaša:

$$u = \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} \times 100\% \rightarrow m_0 = \frac{m_{vl}}{1 + u} = \frac{470 \text{ kg}}{1,12} = 419,6 \text{ kg}$$

Ekvivalentna količina ogljikovega dioksida v tem primeru znaša:

$$419,6 \text{ kg lesa/m}^3 \text{ lesa} \times 1,832 \text{ kg CO}_2/\text{kg lesa} = 768,7 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 \text{ zračno suhega lesa}$$

V 1 m<sup>3</sup> zračno suhega smrekovega lesa je torej "uskладиščeno" 768,7 kg ogljikovega dioksida. Z enakim postopkom smo izračunali tudi količino "uskладиščene" ogljikovega dioksida v 1 m<sup>3</sup> zračno suhega bukovega lesa. Masa absolutno suhe substance v 1 m<sup>3</sup> zračno suhega bukovega lesa je 616,1 kg, ekvivalentna količina ogljikovega dioksida pa je 1105,9 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> zračno suhega bukovega lesa.

Kot lahko razberemo iz zgornjih izračunov, je količina ogljika v 1m<sup>3</sup> lesa zelo odvisna od drevesne vrste oz. od gostote lesa. Les z višjo gostoto vsebuje v 1m<sup>3</sup> večjo količino ogljika kot les z nižjo gostoto. Tukaj se moramo zavedati, da gostota zaradi specifičnih

lastnosti rastišča zelo variira celo pri isti drevesni vrsti. GORIŠEK (1994) navaja, da gostota lesa variira v zelo širokih mejah. Gostota absolutno suhega bukovega lesa se na primer giblje od 490 pa do 880 kg/m<sup>3</sup>. Zaradi velike variabilnosti v gostoti lesa so izračuni na osnovi povprečne gostote lesa nenatančni in ponazarjajo le orientacijske vrednosti. Za izračun ekvivalenta iz atmosfere porabljenega ogljikovega dioksida zato predlagamo izračune na osnovi mase in ne na osnovi prostornine lesa.

#### **4 ZAKLJUČKI** **CONCLUSIONS**

Pri vrednotenju toplogrednih plinov je največja pozornost posvečena ogljikovemu dioksidu, saj njegova koncentracija v atmosferi v zadnjih letih strmo narašča. Mehanizma, ki ogljikov dioksid odstranjujeta iz atmosfere, sta karbonatni cikel in fotosinteza. Ponor ogljikovega dioksida, ki se s fotosintezo veže v biomaso, sestavlja znaten del celotnega ponora ogljikovega dioksida iz atmosfere. Vežava ogljikovega dioksida v biomaso pa je mogoča le do določene meje, ko se ponor ogljikovega dioksida izenači s ponovnimi emisijami zaradi biološkega razkroja. Les, ki ga pridobivamo iz gozdne biomase, torej omogoča gozdu nadaljnji oz. dodatni ponor ogljikovega dioksida. Ogljik, ki je kemijsko vezan v lesu, ostane v njem "uskладиščen" toliko časa, dokler se les ne razkroji. Pri razkroju lesa bi se v idealnih razmerah oksidacije v atmosfero emitirala enaka količina ogljikovega dioksida, kot je bila iz atmosfere porabljena v procesu fotosinteze. V realnih razmerah pa se v atmosfero emitirajo tudi drugi toplogredni plini, ki imajo na učinek tople grede znatno večji vpliv kot ogljikov dioksid. Z vidika monitoringa toplogrednih plinov je torej vsekakor smotrno les vrednotiti kot skladišče ogljika, saj z vgraditvijo lesa v trajne lesne izdelke preprečimo ponovne emisije ogljikovega dioksida zaradi biološkega razpada.

V prispevku smo ugotovili, da je delež ogljika v lesu odvisen od razmerja med celulozo in ligninom. Ugotovljeno je bilo, da je v celulozi vezano manj ogljika kot v ligninu. Za preučevana lignina smreke in bukve je bilo ugotovljeno, da kljub različni kemijski zgradbi med ligninoma ni večjih odklikov v vsebnosti ogljika. Za nastanek 1,000 kg absolutno suhega smrekovega lesa se v procesu fotosinteze iz atmosfere veže 1,826 kg ogljikovega dioksida, za nastanek 1,000 kg absolutno suhega bukovega lesa pa 1,781 kg

ogljikovega dioksida. Zaradi velike variabilnosti lesa lahko pride do določenih odmikov od izračunanih vrednosti, zato menimo, da bi bila za nadaljnje izračune količine ogljikovega dioksida, ki se veže v lesno maso, primerna splošna vrednost 1,8 kg ogljikovega dioksida za nastanek 1,0 kg absolutno suhe lesne mase. Pri računanju ponora ogljikovega dioksida priporočamo izračune na osnovi mase absolutno suhe lesne materije in ne na osnovi volumna, saj zaradi velike variabilnosti v gostoti lesa lahko prihaja do velikih odmikov med izračunanimi in dejanskimi vrednostmi.

Dobljeni rezultati o količini ogljikovega dioksida, ki se v procesu fotosinteze porabi za nastanek lesne mase, bodo nadalje rabili kot osnova za izračune okoljskega bilanciranja toplogrednih plinov. Na teh izračunih nadalje sloni vrednotenje vplivov na okolje, ki jih določen izdelek povzroča v celotnem življenjskem ciklusu, od izkoriščanja surovin do uničenja oz. odstranjevanja, ko se izrabi. Predstavljeni rezultati se lahko uporabijo tudi za izračune ponora ogljikovega dioksida iz atmosfere v gozdno maso ali kot osnovni podatki za izračune kakovosti izgorevanja lesne mase.

## 5 SUMMARY

*The concentration of greenhouse gases in the atmosphere has increased considerably in recent years and has already begun to exert natural anthropogenic impacts on the climatic system. Due to its large quantities, carbon dioxide is the most important greenhouse gas, which in the atmosphere accumulates mostly owing to the combustion of fossil fuels. The photosynthesis is an important mechanism as it removes carbon dioxide from the atmosphere and binds it into the biomass for a longer period of time. But the binding of carbon dioxide into biomass is possible only to a certain point, until it levels with a renewed release of carbon dioxide into the atmosphere due to the biological decomposition of biomass. If we wish the biomass to accept additional quantities of carbon dioxide from the atmosphere, the wood has to be removed from the forest and built into permanent wood products. From the point of view of monitoring greenhouse gases, we may value wood as a carbon depot.*

*In the present article we studied the wood of spruce and beech. On the basis of theoretical data on individual wood component shares and with chemical analysis of*



*these components, we calculated the share of carbon in wood and the equivalent quantity of carbon dioxide used in the process of photosynthesis for formation of 1 kg of absolutely dry wood matter. We established that the share of carbon in wood depends on the ratio between cellulose and lignin. Namely, there is a smaller amount of carbon in cellulose than there is in lignin. What was established for the studied lignin of spruce and beech is that in spite of their different chemical structures there is no greater deviation in the amount of carbon in them.*

*For the formation of 1.000 kg of absolutely dry spruce wood, 1.826 kg of carbon dioxide is used from the atmosphere in the process of photosynthesis, and for 1.000 kg of absolutely dry beech wood this number is 1.781 kg of carbon dioxide. Due to the great variability of wood, there can be some deviations from the calculated values. Therefore, it is believed that a general value of 1.8 kg of carbon dioxide for formation of 1.0 kg of wood matter is appropriate for calculating the quantity amounts of carbon dioxide bound in wood matter.*

*The equivalent quantity of carbon dioxide bound to 1 m<sup>3</sup> of air dry wood was also calculated. In the calculation of the average wood density, 766.3 kg of carbon dioxide is used from the atmosphere for the formation of 1.0 m<sup>3</sup> of air-dry spruce wood. For the formation of 1.0 m<sup>3</sup> of air-dry beech wood, however, 1097.2 kg of carbon dioxide is used from the atmosphere in the process of photosynthesis. Due to great variability of wood density, it is thought that the calculations are only of orientation value.*

*In calculating carbon dioxide sink, we recommend calculations on the basis of absolutely dry wood matter mass and not on the basis of volume, since due to the great variability of wood density some great deviations between the calculated and the actual values may arise.*

## 6 VIRI REFERENCES

- ATKINS, P.W. / CLUGSTON, M.J. / FRAZER, M.J. / JONES, R.A.Y. [prevedla KORNHAUSER, A. / GLAŽAR, S.A.], 1997. Kemija: zakonitosti in uporaba. 2 natis.- Ljubljana, Tehniška založba Slovenije, 543 s.
- BÖRJESSON, P. / GUSTAVSSON, L., 2000. Greenhouses gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives.- *Energy Policy* 28: 575-588.
- DINWOODIE, J.M., 2000. Timber: Its nature and behaviour.- London, E & FN Spon, 257 s.
- FENGEL, D., 1989. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions.- Berlin, Walter de Gruyter, s. 106-108, 144-156.
- GROBOVŠEK, B., 2000. Lesna biomasa.- URL: <http://gcs.gi-zrmk.si/lesnabiomasa.htm>
- GORIŠEK, Ž. / GERŠAK, M. / VELUŠČEK, V. / ČOP, T., MRAK, C., 1994. Sušenje lesa.- Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije, Lesarska založba, 235 s.
- <http://www.climateark.org>
- KEELING, C.D. / WHORF, T.P., 2003. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii.- <http://cdiac.ornl.gov/ftp/maunaloa-co2/maunaloa.co2>
- KIMMINS, J.P., 1997. Forest Ecology, A Fundation for Sustainable Management.- Vancouver, The University of British Columbia, s. 511-518.
- KIRSCHBAUM, M.U.F., 2003. To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances trough storing carbon or providing biofuels.- *Biomass and Bioenergy* 24: 297-310.
- MALOVRH, M. / PRAZNIK M., 2000. Ogrevanje z lesno biomaso.- URL: <http://gcs.gi-zrmk.si/biomasa3.htm>
- MONGER, G., 1985. Biology. Study guide I.- Revised Nuffield advanced science, s.211-241.
- MURRAY, D., 1997. Carbon dioxide and plant responses.- New York, J. Willey & Sons, 275 s.
- NDIEMA, C.K.W. / MPENDAZOE, F.M. / WILLIAMS, A., 1998. Emission of pollutants from a biomass stove.- *Energy Convers. Mgmt.* 39: 1357-1367.

- PETERSEN, A.K. / SOLBERG, B., 2002. Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction. Case: beams at Gardermoen airport.- *Environmental Science & Policy* 5: 169–182.
- RAVNIK, M., 1999. Pojav tople grede in podnebne spremembe, ki jih povzroča človek.- Ljubljana, Inštitut Jožef Stefan, 3 s.
- SIKIRICA, M., 1987. Stehiometrija. XI izdanje.- Zagreb, Školska knjiga, 245 s.
- Strategija in kratkoročni akcijski načrt za zmanjševanje emisij toplogrednih plinov. URL: [http://www.gov.si/mop/vsebina/strat\\_t.htm](http://www.gov.si/mop/vsebina/strat_t.htm)
- ŠEGEDIN, P., 1990. Osnove kemijskega računanja.- Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo, 145 s.
- TORELLI, N., 1989. Zgradba in lastnosti lesa : (za interno uporabo).- Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo, Katedra za tehnologijo lesa, 92 s.
- TORELLI, N., 2000. Globalni ogljikov cikel, gozd in les.- *Les* 52, 12: 415.
- TORELLI, N., 2001. Kaj zmorejo gozdovi.- *Delo* 14.2.2001, XLIII, št.36, s. 15
- ZULE, J., 2001. Problematika lesnih ekstraktivnih spojin v papirni industriji.- *Les* 53, 4: 113-118.
- ZULE, J., MOŽE, A., 2001a. Analiza ekstraktivnih spojin v bukovih sekancih.- *Les* 53, 9: 292-294.
- ZULE, J., MOŽE, A., 2001b. Analiza ekstraktivnih spojin v smrekovih sekancih.- *Les* 53, 10: 336-338.