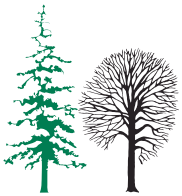




# Silva Slovenica

Studia Forestalia Slovenica

142



*Zbornik prispevkov znanstvenega srečanja*

**GOZD IN LES**

*Monitoring v gozdarstvu, lesarstvu in papirništvu*



[www.gozdis.si](http://www.gozdis.si)

[www.bf.uni-lj.si](http://www.bf.uni-lj.si)

Oblikovanje: akademik Hozo Dževad, Ljubljanska grafična šola



CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

630\*57(082)(0.034.2)

ZNANSTVENO srečanje Gozd in les (2015 ; Ljubljana)  
Monitoring v gozdarstvu, lesarstvu in papirništvu [Elektronski vir] : zbornik povzetkov znanstvenega srečanja Gozd in les, Ljubljana, 19. maj 2015 / glavna urednika Hojka Kraigher, Miha Humar.  
- El. knjiga. - Ljubljana : Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica, 2015. - (Studia Forestalia Slovenica, ISSN 0353-6025 ; 142)

Način dostopa (URL): <http://eprints.gozdis.si/id/eprint/1257>

ISBN 978-961-6425-91-9 (pdf)  
1. Gl. stv. nasl. 2. Kraigher, Hojka  
279589632



# SPREMLJANJE NASTAJANJA KSILEMA IN FLOEMA TER KAMBIJEVE AKTIVNOSTI PRI BUKVI IN SMREKI V SLOVENIJI

## Monitoring of xylem and phloem formation and cambial activity in beech and spruce in Slovenia

prof. dr. Katarina Čufar<sup>1\*</sup>, dr. Peter Prislan<sup>2\*\*</sup>, doc. dr. Maks Merela<sup>1\*\*\*</sup>, Luka Krže<sup>1\*\*\*\*</sup>, doc. dr. Jožica Gričar<sup>3\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno tehniko in ekonomiko, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>3</sup>Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za prirastoslovje in gojenje gozda, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

**Ključne besede:** navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.), navadna smreka (*Picea abies* (L.) Karst.), delovanje kambija, les, floem

Keywords: European beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), cambium activity, wood, phloem

### Summary

Temporal dynamics of cambial activity and wood and phloem formation was monitored in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) at the sites Panška reka near Ljubljana (400 m a.s.l.) and on Menina planina (1200 m a.s.l.) from 2006 until 2014. The monitoring is based on histometrical analysis of stem tissues of adult trees including cambial zone, xylem (wood) and phloem. Samples (micro cores) for analyses were taken from trees using a Trephor tool at weekly intervals during the growing seasons. Micro cores were embedded in paraffin in order to cut cross-sections and make permanent slides for observations under the light microscope. We always measured the width or counted the number of cells in the cambium, forming xylem and forming phloem increments. The measurements or counting were performed along three radial files of xylem and phloem growth rings and the cambial zone. We recorded the phases of xylem formation: PC – post-cambial extension growth, SW – deposition of secondary wall and lignification, MT – mature cells. In phloem we separately recorded the formation of early and late phloem. Research on beech was conducted in 2006 and from 2008 until 2014, and on spruce from 2009 until 2014. The monitoring and sampling continues. We present some main findings on the beginning,

dynamics and cessation of processes which lead to formation of wood and phloem annual growth layers in beech and spruce from both sites. We show how the processes depend on climatic factors. We also present how the spruce data included in a global data set of conifers helps to predict how tree productivity (and survival) will change due to climatic change. The described processes and their variability are still poorly understood; it is therefore necessary to continue the research presented. The results provide basic knowledge to better understand productivity of trees and forest stands, wood quality, the impact of climate change on tree growth and survival, accumulation of carbon and other processes.

### Uvod

Večletne raziskave sezonske dinamike kambijeve aktivnosti ter nastajanja lesa (ksilema) in floema pri drevesih z istih rastišč vedno bolj pridobivajo na pomenu. Za pridobljene podatke je značilna visoka časovna ločljivost, kar nam omogoča razumevanje vpliva sezonskih okoljskih sprememb na debelinsko rast in na anatomske posebnosti ksilema in floema. Pridobljeni rezultati so med drugim pomembni za izdelavo modelov vpliva predvidenih klimatskih sprememb na ekosisteme, debelinsko rast in produktivnost sestojev, kakovosti lesa in akumulacijo ogljika.

Visoko časovno ločljivost pridobljenih podatkov lahko zagotovimo z metodo odvzema mikro-izvrtkov, ki povzroča minimalne poškodbe na drevesu in omogoča ponavljajoče (običajno tedensko) zbiranje vzorcev tekom več rastnih sezon. Metoda odvzema mikro-izvrtkov z različnimi orodji se uporablja že od 70-ih let prejšnjega stoletja (Gričar 2007, Rossi in sod. 2006). V zadnjih letih se je najbolj uveljavilo orodje Trepbor (Rossi in sod. 2006). K razmahu raziskav pripomore tudi razvoj metodologije priprave preparatov (npr. Rossi in sod. 2006) in boljših sistemov za analizo slik (npr. Abramoff in sod. 2004). V zadnjih letih so aktivnosti mednarodno povezanih raziskovalnih skupin usmerjene predvsem v usklajevanje metodoloških postopkov priprave preparatov, histometričnih analiz tkiv, terminologije in nenazadnje postopkov urejanja in obdelave pridobljenih podatkov s ciljem vzpostavitve mednarodne baze podatkov.

Raziskave nastajanja lesa opravljajo številne raziskovalne skupine po svetu, na rastiščih različnih nadmorskih višin (npr. Moser in sod. 2010), zemljepisnih širin in dolžin (Mäkinen in sod. 2008, Rossi in sod. 2014, Li in sod. 2013) tekom več zaporednih rastnih sezon. Prevladujejo raziskave na iglavcih, kjer so s pomočjo t.i. meta-analiz, kjer so (npr. Rossi in sodelavci (2008)) z združevanjem podatkov določili kritične temperature za začetek nastajanja lesa pri iglavcih iz hladnejših rastišč. Raziskav nastajanja lesa in kambijeve aktivnosti listavcev je manj, a njihovo število narašča (Schmitt in sod. 2000, Romagnoli in sod. 2011, Michelot in sod. 2012, Prislán in sod. 2013).

Kambij v centrifugalni smeri (navzven) proizvaja sekundarni floem (ličje), ki je tako kot ksilem lahko sestavljen iz letnih prirastnih plasti (Gričar 2011). Dinamika letnega priraščanja floema je bila doslej manj raziskana (Gričar in Čufar 2008, Prislán in sod. 2013, Swidrak in sod. 2014, Jyske in Hölttä 2015). Floem v drevesu opravlja življenjsko pomembno funkcijo, saj sitaste cevi/celice prevajajo produkte fotosinteze do mest, kjer poteka rast in skladiščenje, pa tudi za transport drugih endogenih in eksogenih makromolekul (Taiz in Zeiger 2006). Poznavanje nastajanja in delovanja floema pa je ključno za izdelavo modelov vpliva okoljskih dejavnikov na rast dreves (Hölttä in sod. 2010, Schiestl-Aalto in sod. 2015).

V Sloveniji se z monitoringom kambijeve aktivnosti ter nastajanja lesa in floema ukvarjamo že več kot desetletje. V pričujočem prispevku želimo predstaviti raziskave, opravljene na bukvi in smreki, ki sta ekološko in gospodarsko najpomembnejši in najpogostejši lesni vrsti v Sloveniji.

## Materiali in metode

### Opis rastišč

Raziskave so bile opravljene na navadnih bukvah (*Fagus sylvatica* L.) in navadnih smrekah (*Picea abies* (L.) Karst.) z rastišč Panška reka (PA) iz okolice Ljubljane

(46°00'S, 14°40'V, 400 m n.m.v.) in Menina planina (ME) z območja Kamniško-Savinjskih Alp (46°16'S, 14°48'V, 1200 m n.m.v.). V obdobju 2009 do 2011 je povprečna letna temperatura in količina padavin na Panški reki znašala 11,4 °C in 1401 mm, na Menini planini pa 7,6 °C in 1668 mm.

### Odvzem in priprava vzorcev

V letih, ko smo izvajali eksperiment (Preglednica 1), smo na vsakem rastišču izbrali po šest dominantnih ali ko-dominantnih zdravih bukev in smrek, starih nad 100 let. V času rastne sezone (tj. od marca do oktobra na Panški reki ter od aprila do oktobra na Menini planini) smo v tedenskih intervalih na prsni višini debel odvzeli vzorce tkiv (t.i. mikro-izvrtke) s pomočjo orodja Trepbor (Rossi in sod. 2006). Vzorce, ki so vsebovali floem, kambij in ksilem, smo po odvzemu fiksirali v raztopini formalina, očetne kisline in etanola (FAA). Po enem tednu fiksacije smo jih prepojili s parafinom v komori za preparacijo tkiv Leica TP 1020-1 tako, da smo vzorce najprej dehidrirali v etanolu naraščajoče koncentracije (70 %, 90 %, 95 % in 100 %) in v organskem topilu bio-clear (D-limonen), nato pa jih prepojili s tekočim parafinom, segretim na 65 °C (Rossi in sod. 2006). Iz prečno orientiranih vzorcev, vklopljenih v parafinske bloke, smo nato s pomočjo rotacijskega mikrotoma Leica RM 2245 in nožev Feather N35H narezali prečne rezine tkiv debeline 10 µm – 12 µm, ki smo jih 10 minut barvali v mešanici barvil safranin in astra modro (raztopina 40 mg safranina in 150 mg astra modro v 100 ml deionizirane vode z dodatkom 2 ml očetne kisline) (van der Werf in sod. 2007) in jih vklopili v Euparal. Postopek je podrobno opisan v protokolu in prikazan v videu, ki smo ga pripravili v okviru COST akacije FP 1106 (Prislán in sod. 2014a, Prislán in sod. 2014b).

Za opazovanje, štetje in merjenje celic ter tkiv smo uporabili svetlobni mikroskop Nikon Eclipse 800 (svetlo polje in polarizirana svetloba), digitalno kamero DS-Fi1 in sistem za analizo slike NIS Elements BR3.

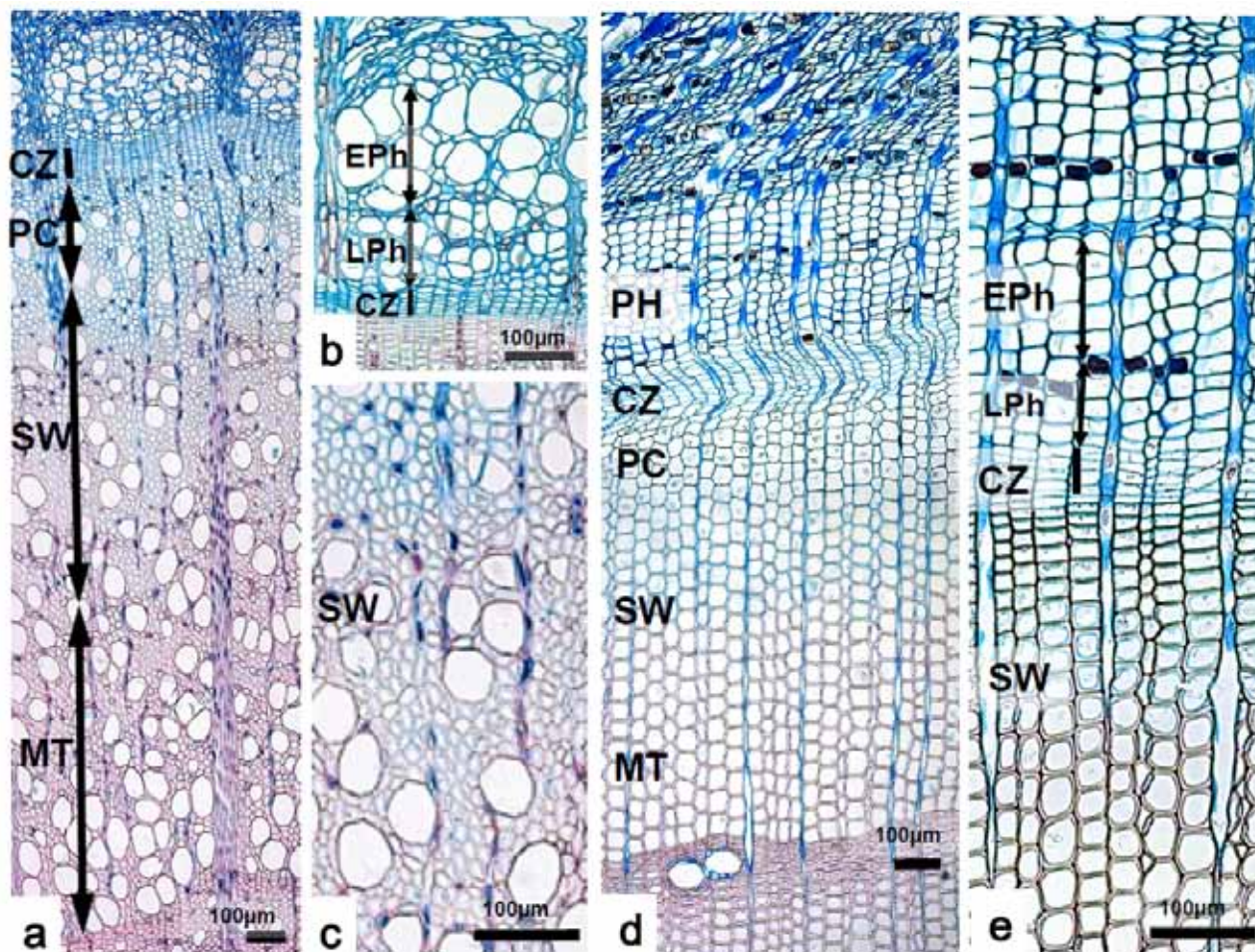
### Opazovanja in meritve

Na histoloških rezinah smo prešteli število kambijevih celic ter pri bukvi izmerili širino tekočega, pri smreki pa prešteli število celic ksilemskega in floemskega prirastka. Beležili smo nastop fenoloških faz kambijeve aktivnosti (dan v letu), kot so: (1) začetke kambijeve celične produkcije, (2) maksimalno stopnjo produkcije ksilemskih in floemskih celic, (3) konec kambijeve celične produkcije, (4) konec procesa diferenciacije v terminalnih ksilemskih celicah, (5) čas prehoda iz rane v kasni floem. Začetek kambijeve celične produkcije ustreza obdobju, ko prvič opazimo povečano število kambijevih derivatov s tanko celično steno. Obdobje maksimalne produkcije ksilemskih in floemskih celic smo določili s pomočjo Gompertzove funkcije. Zaključek kambijeve celične produkcije ustreza obdobju, ko poleg kambija nismo več opazili celic

s tanko celično steno. Konec diferenciacije ksilemskih celic pa ustreza obdobju, ko smo na podlagi selektivnega obarvanja s safraninom in astra modrim opazili popolnoma lignificirane (obarvane rdeče) celične stene terminalnih ksilemskih celic. Razmejitev ranega in kasnega floema je mogoča, ko nastane tangencialni pas aksialnega parenhima. Pri bukvi je poleg tega velikost sitastih cevi v kasnem floemu značilno manjša od sitastih cevi v kasnem

floemu (Prislan in sod. 2013).

V nastajajoči ksilemski braniki smo merili (pri bukvi) in šteli (pri smreki) širino območja oz. število celic v posameznih fazah diferenciacije: v fazi površinske / postkambialne rasti (PC), odlaganja sekundarne celične stene in lignifikacije (SW) in zrele celice (MT) v vsaj treh radialnih nizih (Preglednica1, Slika 1).



**Slika 1:** Tkiva bukve (a, b, c) in smreke (d, e) v različnih fazah razvoja: (a) prečni prerez kambija (CZ) in nastajajočega ksilema s celicami v fazi postkambialne rasti (PC), fazi razvoja sekundarne celične stene (SW), in zrele celice (MT); (b) CZ v floemska branika, ki jo sestavlja rani (EPh) in kasni floem (LPh); (c) SW celice v fazi odlaganja celične stene (modro) in lignifikacije (rdeče); (d, e) prečni prerez tkiv smreke

**Preglednica 1. Podatki o večletnem spremljanju nastajanja lesa in floema ter kambijeve aktivnosti**

Drevesna vrsta	Rastišče, leta	Analize tkiv
<i>Fagus sylvatica</i> , navadna bukev	Panška reka (6 dreves) 2006, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014	Merjenje širin tkiv (bukev) oz. štetje celic (smreka) vzdolž 3 radialnih nizov Kambij CZ Ksilem (les)
	Menina planina (6 dreves) 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014	Nastajajoča branika Celice v fazi površinske rasti PC Celice v fazi odlaganja sekundarne stene in lignifikacije SW
<i>Picea abies</i> , navadna smreka	Panška reka (6 dreves) 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014	Zrele celice MT Predhodne 1-3 branike
	Menina planina (6 dreves) 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014	Floem - Nastajajoča floemska branika Rani floem EPh Kasni floem LPh

Pri bukvi smo med leti 2008 in 2010 na opazovanih drevesih spremljali tudi fenologijo listov, t.j. dan olistanja in datum jesenskega obarvanja listov. Opazovanja smo izvedli v skladu z navodili za fenološka opazovanja (Koch in sod. 2007). Začetek olistanja smo zabeležili na dan, ko je bila na več mestih v krošnji opažena prva površina listov. Jesensko obarvanje listov pa smo določili, ko je več kot 50 % listov spremenilo barvo.

### **Analiza pridobljenih podatkov**

Ksilemske in floemske prirastke smo v primeru velike variabilnosti širin branik po obodu drevesa standardizirali (Rossi in sod. 2003) ter jih analizirali s pomočjo prilagojene Gompertzove funkcije, za analizo povezav med širino ksilemske branike, dolžino rastne sezone in stopnjo celične produkcije pa smo uporabili Pearson-ov koeficient korelacije.

Razlike določenih fenoloških faz listov, kambija ter nastajanja lesa in floema med leti in rastišči smo določili s pomočjo enosmerne ANOVA. Normalnost porazdelitev in homogenost variance smo preverili s Shapiro-Wilk  $W$  testom oziroma z Levene's testom (Quinn in Keough 2002).

Preverjali smo tudi ali fenološke faze na rastiščih nastopijo ob podobnih klimatskih pogojih. V ta namen smo primerjali minimalne in maksimalne temperature in vsoto padavin pred nastopom posamezne faze. Poleg tega smo določili kumulativne temperature ( $^{\circ}D$ ) zgodnjih fenoloških faz na podlagi temperaturnih vsot (eng. Growing degree days – GDD)(Gruber in sod. 2009, Schmitt in sod. 2004),(Prislan in sod. 2013).

## **Rezultati in razprava**

### **Izbrani rezultati raziskav bukve**

Raziskave debelinske rasti bukve v letih 2008–2010 so pokazale, da so olistanje (prvi listi), začetek kambijeve celične produkcije in povečano število floemskih celic sovpadali in smo jih zabeležili na Panški reki v prvi polovici aprila, na Menini planini pa v prvem tednu maja. Temperatura se je potrdila kot najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na omenjene tri dogodke. Najvišjo produkcijo ksilemskih celic smo na Panški reki zabeležili od 20. maja do 9. junija in približno dva tedna kasneje na Menini planini. Največjo produkcijo celic smo na floemski strani zabeležili več kot en mesec prej kot na ksilemski strani in to na obeh rastiščih. Prenehanje nastajanja ksilema smo na Panški reki zabeležili okoli 19. avgusta, na Menini planini pa v splošnem približno 10 dni prej. Proces nastajanja lesa je bil podoben na obeh rastiščih, dinamika in čas posameznih faz pa so se razlikovali.

Diferenciacija zadnjih ksilemskih celic v braniki je bila zaključena do sredine septembra na obeh rastiščih. Razlike v fazah nastanka ksilema in floema so bile

manjše v drugem delu rastne sezone in jih je mogoče pripisati klimatskim dejavnikom (zlasti temperaturi) saj v drugi polovici rastne sezone niso tako omejujoči za rast dreves kot v prvi polovici rastne sezone. Razlike raziskanih faz med leti niso bile statistično značilne, razlike pa so bile značilne med izbranimi rastiščema. Ksilemski prirastki so bili 5 do 12-krat večji kot floemski. Nastajanje floema se zdi manj podvrženo nihanjem okoljskih dejavnikov na istem rastišču, saj so bile širine floemskih branik primerljive na obeh rastiščih. Temperature in količina akumulirane toplote, ki so sprožile nastop posamezne fenološke faze, so se na obeh rastiščih zelo razlikovale. To nakazuje, da lahko opažene razlike v procesu nastajanja ksilema in floema med rastiščema pripišemo visoki intra-specifični oz. fenotipski plastičnosti bukve (Prislan in sod. 2013).

### **Izbrani rezultati raziskav smreke**

Pri smreki smo ovrednotili nastajanje lesa in floema v odvisnosti od klimatskih dejavnikov na Panški reki in Menini planini v letih 2009–2011 in jih razširili z raziskavami na rastišču Rajec, pri Brnu na Češkem (Gričar in sod. 2014).

Na vseh rastiščih, letih in drevesih je kambij začel in prenehal s produkcijo ksilemskih in floemskih celic istočasno. V vseh letih je bila kambijeva celična produkcija v proporcionalni zvezi z nadmorsko višino in se je najprej začela na Panški reki (sredi aprila), nato v Rajecu (druga polovica aprila) in nazadnje na Menini planini (konec aprila/začetek maja). Debelinska rast se je najprej zaključila na Menini planini (sredi avgusta) in najkasneje na Panški reki.

Kambijeva celična produkcija je bila v vseh primerih manj intenzivna na floemsko stran. Posledično je bil prirastek floema vedno občutno manjši kot prirastek ksilema. Primerjava debelinske rasti med rastišči je pokazala, da so začetek posamezne fenološke faze sprožile različne temperature in količine akumulirane toplote (GDD), kar kaže na plastičen odziv smreke na različne rastiščne pogoje (Gričar in sod. 2014).

S podatki smreke smo se vključili tudi v širšo študijo, ki je zajemala devet različnih vrst iglavcev iz Kanade in Evrope (Rossi in sod. 2013). Raziskave so pokazale, da je bila kljub različnim rastiščnim in klimatskim razmeram dinamika nastajanja lesa v vseh proučevanih vrstah iglavcev presenetljivo homogena. Izkazalo se je, da drevesa prilagajajo fenološke faze pojava celic v razvojnih fazah PC, SW in MT linearnim vzorcem. Pri tem je zamik ene fenološke faze povezan s sinhronim in primerljivim zamikom naslednje faze. Nasprotno pa je produkcija ksilemskih celic povezana s fenološkimi fazami nelinearno (eksponentno). Podaljšanje rastne sezone bi zato lahko imelo za posledico nadpovprečno povečanje celične produkcije. Vpliv okoljskih

sprememb na dolžino rastne sezone bi zato lahko obsežno vplival na celično produkcijo, vezavo ogljika in posledično na produktivnost gozda (Rossi in sod. 2013).

## Zahvala

Izvedbo projekta je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost republike Slovenije (ARRS), programa Lesarstvo P4-0015 in Gozdna biologija, ekologija in tehnologija P4-0107, program za usposabljanje mladih raziskovalcev (Peter Prislan) ter projekt V4-1419, ki ga financirata ARRS in Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP). Mednarodno sodelovanje je podprla akcija COST FP1106, STReESS, terensko delo pa Zavod za gozdove Slovenije, in podjetje Metropolitana d.o.o. Na terenu so nam bili v veliko pomoč Marko Beber, Franc Koncilja, Milko Detmar in Peter Pečnik, v laboratoriju pa Marko Željko, Primož Habjan ter študenti. Vsem lepa hvala.

## Viri:

- Abramoff M.D., Magalhaes P.J., Ram S.J. 2004. Image processing with imageJ. *Biophoton Int*, 11, 7: 34–42
- Gričar J. 2007. Ksilo- in floemogeneza pri beli jelki (*Abies alba* Mill.) in navadni smreki (*Picea abies* (L.) Karst.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 106 str.
- Gričar J. 2011. Kemijska zgradba skorje in njena uporaba. *Les*, 63, 1-2: 8–17
- Gričar J., Čufar K. 2008. Seasonal dynamics of phloem and xylem formation in silver fir and Norway spruce as affected by drought. *Russian Journal of Plant Physiology*, 55, 4: 538–543
- Gričar J., Prislan P., Gryc V., Vavřík H., de Luis M., Čufar K. 2014. Plastic and locally adapted phenology in cambial seasonality and production of xylem and phloem cells in *Picea abies* from temperate environments. *Tree Physiology*, In print,
- Gruber A., Baumgartner D., Zimmermann J., Oberhuber W. 2009. Temporal dynamic of wood formation in *Pinus cembra* along the alpine treeline ecotone and the effect of climate variables. *Trees - Structure and Function*, 23, 3: 623–635
- Hölttä T., Mäkinen H., Nöjd P., Mäkelä A., Nikinmaa E. 2010. A physiological model of softwood cambial growth. *Tree Physiology*, 30, 10: 1235–1252
- Jyske T., Hölttä T. 2015. Comparison of phloem and xylem hydraulic architecture in *Picea abies* stems. *New Phytologist*, 205, 1: 102–115
- Koch E., Bruns E., Chmielewski F.M., Defila C., Lipa W., Menzel A. 2007. Guidelines for plant phenological observations, WMO Technical Commission for Climatology, Open Program Area Group on Monitoring and Analysis of Climate Variability and Change (OPAG2). <http://www.omm.urv.cat/documentation.html> (May 23, 2011)
- Li X., Liang E., Gričar J., Prislan P., Rossi S., Čufar K. 2013. Age dependence of xylogenesis and its climatic sensitivity in Smith fir on the south-eastern Tibetan Plateau. *Tree Physiology*, 33, 1: 48–56
- Mäkinen H., Seo J.W., Nöjd P., Schmitt U., Jalkanen R. 2008. Seasonal dynamics of wood formation: a comparison between pinning, microcoring and dendrometer measurements. *Eur J For Res*, 127, 3: 235–245
- Michelot A., Simard S., Rathgeber C., Dufréne E., Damesin C. 2012. Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree Physiology*, 32, 8: 1033–1045
- Moser L., Fonti P., Buntgen U., Esper J., Luterbacher J., Franzen J., Frank D. 2010. Timing and duration of European larch growing season along altitudinal gradients in the Swiss Alps. *Tree Physiology*, 30, 2: 225–233
- Prislan P., Gričar J., Čufar K. 2014a. Wood sample preparation for microscopic analysis. In [http://streess-cost.eu/images/stories/Documents/protocol\\_wood\\_sample\\_preparation\\_for\\_microscopic\\_analysis.pdf](http://streess-cost.eu/images/stories/Documents/protocol_wood_sample_preparation_for_microscopic_analysis.pdf). (Ljubljana: University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology; Slovenian Forestry Institute: University of Zaragoza, Department of Geography and Regional Planning).
- Prislan P., Gričar J., de Luis M., Smith K.T., Čufar K. 2013. Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus sylvatica* from two contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 0: 142–151
- Prislan P., Martinez Castillo E., Krže L., Habjan P., Merela M., Reijnen H. 2014b. Wood sample preparation for microscopic analysis: based on a protocol by Peter Prislan. In [http://streess-cost.eu/images/stories/films/STReESS\\_Film\\_Peter\\_Prislan.mp4](http://streess-cost.eu/images/stories/films/STReESS_Film_Peter_Prislan.mp4). (Ljubljana: University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology; Slovenian Forestry Institute: University of Zaragoza, Department of Geography and Regional Planning).
- Quinn G.P., Keough M.J. 2002. Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press: 557 str.
- Romagnoli M., Cherubini M., Prislan P., Gricar J., Spina S., Cufar K. 2011. Main phases of wood formation in chestnut (*Castanea sativa*) in Central Italy - comparison of seasons 2008 and 2009. *Drv Ind*, 62, 4: 269–275
- Rossi S., Deslauriers A., Morin H. 2003. Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development. *Dendrochronologia*, 21, 1: 33–39
- Rossi S., Anfodillo T., Menardi R. 2006. Trephor: a new tool for sampling microcores from tree stems. *IAWA Journal*, 27, 1: 89–97
- Rossi S., Girard M.J., Morin H. 2014. Lengthening of the duration of xylogenesis engenders disproportionate increases in xylem production. *Global Change Biology*, 20, 7: 2261–2271
- Rossi S., Deslauriers A., Gričar J., Seo J.W., Rathgeber C.W.G., Anfodillo T., Morin H., Levanič T., Oven P., Jalkanen R. 2008. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 6: 696–707
- Rossi S., Anfodillo T., Cufar K., Cuny H., Deslauriers A., Fonti P., Frank D., Gricar J., Gruber A., King G., Krause C., Morin H., Oberhuber W., Prislan P., Rathgeber C. 2013. A meta-analysis of cambium phenology and growth: linear and nonlinear patterns in conifers of the northern hemisphere. *Ann Bot*, 112, 9: 1911–1920
- Schiestl-Aalto P., Kulmala L., Mäkinen H., Nikinmaa E., Mäkelä A. 2015. CASSIA – a dynamic model for predicting intra-annual sink demand and interannual growth variation in Scots pine. *New Phytologist*, 206, 2: 647–659
- Schmitt U., Möller R., Eckstein D. 2000. Seasonal wood formation dynamics of beech (*Fagus sylvatica* L.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) as determined by the "pinning" technique. *Journal of Applied Botany*, 74, 10–16
- Schmitt U., Jalkanen R., Eckstein D. 2004. Cambium dynamics of *Pinus sylvestris* and *Betula* spp. in the northern boreal forest in Finland. *Silva Fennica*, 38, 2: 167–178
- Swidrak I., Gruber A., Oberhuber W. 2014. Xylem and phloem phenology in co-occurring conifers exposed to drought. *Trees*, 28, 4: 1161–1171
- Taiz L., Zeiger E. 2006. Plant physiology. 4<sup>th</sup> ed. Sunderland, Massachusetts Sinauer Associates: 764 str.
- van der Werf G.W., Sass-Klaassen U., Mohren G.M.J. 2007. The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia*, 25: 103–112