

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA
ÚSTAV NAUKY O DŘEVĚ

**SESTAVENÍ LETOKRUHOVÝCH STANDARDNÍCH
CHRONOLOGIÍ Z RECENTNÍCH DUBŮ PRO ČESKOU A
SLOVENSKOU REPUBLIKU A JEJICH POROVNÁNÍ SE
STŘEDOEVROPSKÝMI CHRONOLOGIEMI**

DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR: Ing. ONDŘEJ PROKOP
ŠKOLITEL: Ing. MICHAL RYBNÍČEK, Ph.D.

BRNO 2016

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: „Sestavení letokruhových standardních chronologií z recentních dubů pro Českou a Slovenskou republiku a jejich porovnání se středoevropskými chronologiemi“ zpracoval sám a uvedl jsem všechny použité prameny. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1. autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V BRNĚ, DNE 11. 10. 2016

ONDŘEJ PROKOP

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali a pomáhali mi po celou dobu studia.

Chtěl bych velmi poděkovat především svému školiteli Ing. Michalu Rybníčkoví, Ph.D. za pomoc, ochotu a cenné rady, které mi poskytoval nejen při psaní této práce, ale i v průběhu celého studia. Po celou dobu mi byl příkladným vzorem v přístupu k práci, trpělivosti i v odhodlání dosáhnout stanoveného cíle.

Taktéž bych chtěl velmi poděkovat Ing. Tomáši Kolářovi, Ph.D., který mi pomáhal s řešením mnoha problémů.

Dále bych chtěl poděkovat všem členům Ústavu nauky o dřevě za pomoc, inspiraci a vytvoření přátelského pracovního prostředí.

V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat své rodině a přítelkyni za velkou podporu a důvěru.

Tato disertační práce byla vytvořena na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně – na Ústavu nauky o dřevě, a to díky finanční podpoře grantového projektu Interní grantové agentury LDF MENDELU v Brně IGA 28/2014 (*Sestavení recentní dubové letokruhové standardní chronologie pro oblast Slovenska*) a LDF_VP_2015004 (*Rekonstrukce klimatu na základě letokruhové chronologie dubu pro Slovensko*); v rámci grantového projektu 13-04291S GAČR (*Rekonstrukce hydroklimatických podmínek jara a léta posledního milénia v České republice na základě dubové standardní chronologie*); v rámci projektu „Indikátor vitality dřevin“ (CZ.1.07/2.3.00/20.0265); za podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci Národního programu udržitelnosti I (NPU I), grant č. LO1415; v rámci projektu EHP-CZ02-OV-1-019-2014 (*Rámce a možnosti lesnických adaptačních opatření a strategií souvisejících se změnami klimatu*); v rámci smlouvy č. APVV-0598-10 (*Agentúra na podporu výskumu a vývoja; Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu SR*); v rámci programu DF13P01OVV005 (*Program aplikovaného výzkumu a vývoje národní kulturní identity NAKI*); v rámci programu DG16P02M026 (*Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje národní a kulturní identity na léta 2016 až 2022 (NAKI II)*).

ABSTRAKT

PROKOP O. (2016): *Sestavení letokruhových standardních chronologií z recentních dubů pro Českou a Slovenskou republiku a jejich porovnání se střeoevropskými chronologiemi*, Disertační práce, Mendelova univerzita v Brně

Hlavním cílem předkládané disertační práce bylo sestavení chybějící dubové standardní chronologie pro oblast Slovenska, aktualizace stávající české dubové standardní chronologie, posouzení jejich paleoklimatického potenciálu a nejvhodnějšího způsobu odstranění věkového trendu z letokruhových křivek. Současně byla provedena analýza počtu bělových letokruhů v průběhu času.

Vzhledem k tomu, že historický a archeologický materiál může být zastoupen v letokruhových chronologiích křivkami různých druhů dubu o různém stáří a z různých oblastí, byly provedeny dvě srovnávací studie pro posouzení jejich využitelnosti při rekonstrukci klimatu. Letokruhové chronologie čtyř vybraných druhů dubu (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus polycarpa* Schur., *Quercus dalechampii* Ten.) ze stejného regionu prokázaly velmi podobnou reakci na klimatické parametry, přičemž rozdíly byly způsobeny spíše lokálními podmínkami stanoviště než druhem dubu. Dále byla celá recentní část české dubové chronologie rozdělena do pěti párů sub-chronologií podle různých kategorií (nadmořská výška, věk stromů, druh dřeviny, půdní vlhkost a geografická poloha). Velká podobnost všech sub-chronologií byla potvrzena nejvýznamnější růstovou reakcí dubu na množství srážek v období od května do července.

V posledních letech stále vylepšovaná tisíce let dlouhá česká dubová chronologie vykazovala nedostatečné pokrytí celého území přirozeného výskytu dubu v ČR a nedostatečné proložení v 19. století. Celkem 342 nově odebraných recentních vzorků ze západu Čech a vzorků z vytipovaných historických konstrukcí, převážně zvonových stolic, bylo použito pro pokrytí celého území přirozeného výskytu dubu v ČR a pro zlepšení napojení recentní a historické části chronologie. Studie byla doplněna analýzou počtu bělových letokruhů, která potvrdila klesající počet bělových letokruhů ve směru od západu k východu a ukázala, že počet bělových letokruhů se nemění v průběhu času (5–24).

Zcela nová standardní dubová chronologie pro území Slovenské republiky byla sestavena z 276 historických a 1028 recentních vzorků. Chronologie má rozsah od roku

967 do roku 2013 a vykazuje velkou podobnost s letokruhovými chronologiemi z ČR, Rakouska a Ukrajiny. Stejně jako česká chronologie vykazuje nejvýznamnější reakci na srážky v období květen až červenec s velkým propadem korelací kolem roku 1980. Analýzou negativních let bylo v chronologii odhaleno 26 období, přičemž nejextrémnějším rokem byl rok 1947, který se projevil u všech zkoumaných lokalit. Mezi jednotlivými způsoby odstranění věkového trendu z letokruhových křivek nebyly v dobře proložených obdobích nalezeny rozdíly mezi výslednými chronologiemi.

Tato práce rozšiřuje znalosti o chování dubu na letokruhové úrovni ve střední Evropě. Nově sestavená standardní dubová chronologie pro oblast Slovenska zaplňuje mezeru v husté síti evropských chronologií a spolu s aktualizací české dubové chronologie zvyšuje potenciál chronologií pro hydroklimatické rekonstrukce a spolehlivost dendrochronologického datování historických dubových konstrukcí a archeologických nálezů.

KLÍČOVÁ SLOVA: dendrochronologie, dub, klima, letokruh, standardní chronologie, Slovenská republika, Česká republika

ABSTRACT

PROKOP O. (2016): *Tree-ring chronology formation from living oak trees for the Czech and Slovak Republics and their comparison with Central European chronologies*, Dissertation Thesis, Mendel University in Brno

The main objectives of the thesis submitted were to create the missing oak tree-ring chronology for the area of Slovakia, update the existing Czech oak tree-ring chronology, assess their paleoclimatic potential, and find the best way to remove the age trend from tree-ring series. At the same time, the number of sapwood tree rings over time was analysed.

As the historical and archaeological material can be represented in tree-ring chronologies by curves from different oak species with different age and from different areas, two comparative studies have been carried out to assess their usefulness for the climate reconstruction. Tree-ring chronologies of four selected oak species (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus polycarpa* Schur., *Quercus dalechampii* Ten.) from the same region showed a very similar response to climatic parameters; the differences were caused by local site conditions rather than oak species. Further, the recent part of the Czech oak chronology was divided into five couples of sub-chronologies using various categories (altitude, age of trees, tree species, soil moisture, and geographic location). A great similarity of all the sub-chronologies was confirmed by the most significant growth response of oak to the precipitation sum in the period May to July.

The thousands-year-long Czech oak chronology, which has been gradually improved in recent years, still showed insufficient coverage of the entire territory of the oak natural distribution range and insufficient replication in the 19th century. A total of 342 newly collected samples from western Bohemia and samples from selected historical structures, mostly belfries, were used to cover the entire natural distribution range in the Czech Republic and to improve the connection of the recent and the historical parts of the chronology. The study was supplemented by the analysis of the number of sapwood tree rings, which confirmed the declining number of sapwood rings in the direction from the west to the east, and showed that the number of sapwood rings does not change over time (5–24).

A completely new tree-ring oak chronology for the territory of the Slovak Republic was made up of 276 historical and 1028 recent samples. The chronology ranges from 967 to 2013 and shows strong resemblance with the tree-ring chronologies from the Czech Republic, Austria and Ukraine. As the Czech chronology, it manifests the most significant response to precipitation in the May to July period with a huge drop in correlations around 1980. The analysis of negative pointer years in the chronology revealed 26 periods; the most extreme year was 1947, which stood out in all of the investigated sites. Comparing the resulting chronologies, no significant differences were found among the various ways of age trend removal from tree-ring series in the periods with sufficient replication.

This work extends the knowledge about the behaviour of the oak in Central Europe at the level of tree rings. The newly formed tree-ring oak chronology for the area of Slovakia fills the gap in the dense network of European chronologies and together with the update of the Czech oak chronology increases the potential for hydroclimatic reconstructions and the reliability of the dating of historical oak structures and archaeological finds.

KEYWORDS: dendrochronology, oak, climate, tree ring, tree-ring chronology, Slovak Republic, Czech Republic

SOUPIS ČLÁNKŮ

Tato disertační práce je sestavena z následujících článků:

ČLÁNEK I.

RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., **PROKOP O.**, ŽID T., TRNKA M., KOLÁŘ T. (2016): Oak (*Quercus* spp.) response to climate differs more among sites than among species in central Czech Republic. *Dendrobiology* 75: 55–65

ČLÁNEK II.

DOBROVOLNÝ P., KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M., BÜNTGEN B., TRNKA M., BRÁZDIL R., STACHOŇ Z., **PROKOP O.** (2016): Recent growth coherence in long-term oak (*Quercus* spp.) ring width chronologies in the Czech Republic. *Climate Research Special: Drought in Central Europe – from drought response to preparedness* (in press, DOI 10.3354/CR01402)

ČLÁNEK III.

PROKOP O., KOLÁŘ T., BÜNTGEN U., KYNCL J., KYNCL T., BOŠEĚA M., CHOMA M., BARTA P., RYBNÍČEK M. (2016): On the paleoclimatic potential of a millennium-long oak ring width chronology from Slovakia. *Dendrochronologia* 40: 93–101

ČLÁNEK IV.

PROKOP O., KOLÁŘ T., KYNCL T., RYBNÍČEK M. (2016): Updating the Czech millennia-long oak tree-ring width chronology. (Tree-Ring Research, in review)

OBSAH

1 ÚVOD	11
2 DUB A JEHO UŽITÍ V DENDROCHRONOLOGII	12
3 PRINCIP DENDROCHRONOLOGIE	14
3.1 LETOKRUHOVÉ KŘIVKY	15
3.2 STANDARDIZACE LETOKRUHOVÝCH KŘIVEK.....	17
3.3 DENDROCHRONOLOGICKÉ DATOVÁNÍ.....	19
3.4 STANDARDNÍ CHRONOLOGIE.....	21
3.4.1 DUBOVÉ STANDARDNÍ CHRONOLOGIE.....	22
3.4.2 PODOBNOST EVROPSKÝCH STANDARDNÍCH CHRONOLOGÍ.....	24
4 VLIV KLIMATU NA RADIÁLNÍ RŮST.....	26
4.1 ANALÝZA VÝZNAMNÝCH LET	27
5 ZÁVĚR	29
6 CONCLUSION	32
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35
8 ČLÁNEK I.....	43
8.1 MATERIALS AND METHODS	46
8.2 RESULTS	49
8.3 DISCUSSION	52
8.4 CONCLUSIONS.....	56
8.5 ACKNOWLEDGEMENTS.....	57
8.6 REFERENCES	57
9 ČLÁNEK II.....	65
9.1 INTRODUCTION	67
9.2 DATA AND METHODS	68
9.3 RESULTS	72
9.4 DISCUSSION	76
9.5 CONCLUSION.....	78
9.6 ACKNOWLEDGEMENTS.....	78
9.7 LITERATURE CITED	79
10 ČLÁNEK III.....	85
10.1 INTRODUCTION.....	87
10.2 MATERIALS AND METHODS	89
10.2.1 STUDY AREA.....	89

10.2.2	TREE-RING DATA	89
10.2.3	DENDROCLIMATOLOGICAL ANALYSIS	90
10.2.4	AGREEMENT AMONG SITE CHRONOLOGIES	92
10.3	RESULTS.....	94
10.4	DISCUSSION.....	96
10.4.1	REGIONAL SYNCHRONY AMONG SITE CHRONOLOGIES	96
10.4.2	CLIMATE SENSITIVITY	97
10.5	CONCLUSION.....	100
10.6	ACKNOWLEDGEMENTS.....	100
10.7	REFERENCES	101
11	ČLÁNEK IV	111
11.1	INTRODUCTION.....	113
11.2	MATERIAL AND METHODS	113
11.3	RESULTS.....	114
11.4	DISCUSSION.....	115
11.5	ACKNOWLEDGEMENTS.....	117
11.6	REFERENCES	117

1 ÚVOD

Dendrochronologie je jedním z nejdůležitějších oborů studující záznamy životního prostředí. Tento vědní obor je používán pro dekódování mnoha rozmanitých přírodních procesů, které panují na zemském povrchu. S její pomocí jsme schopni rozpoznat nejen přírodní změny prostředí v průběhu tisíciletí, ale i změny prostředí spojené v důsledku lidské činnosti. Tato vědní disciplína se zabývá datováním dřeva na základě analýzy letokruhů stromů. Podrobným rozborem letokruhů zkoumá události v čase, které jsou vepsány do jejich struktury (Speer 2010). Výsledný přírůst je ovlivněn především klimatickými podmínkami, které panovaly během vegetačního období (Fritts a Swetnam 1989). V našem klimatickém pásu rozlišujeme u dřevin vegetační dobu a vegetační klid. Díky tomuto faktu lze určit stáří dřeva s přesností na kalendářní rok (Speer 2010).

Lze zjednodušeně říci, že základní princip je založen na přesném měření šířek letokruhů, vzájemné synchronizaci hodnot tloušťkového přírůstu a na následném statistickém a matematickém zpracování (Drápela a Zach 1995). Oblastí, ve kterých v současné době dochází k uplatnění tohoto oboru, je hned několik. Nejrozšířenější oblastí je především ta historická, která pokrývá datování dřevěných prvků (zejména krovů) v historických stavbách, archeologické výzkumy včetně datování uhlíků, subfossilní nálezy, datování dřevěných obrazů, soch a nábytku (Haneca et al. 2009). Může však být použita i ke studiu mnoha ekologických problémů (Fritts a Swetnam 1989). Vzhledem k tomu, že velmi staré stromy poskytují dlouhodobé záznamy, lze tedy rekonstruovat informace týkající se například srážek, teplot, požárů, sesuvů půdy, četnosti hurikánů, napadení stromu hmyzem a mnohé jiné události. Strom tak lze použít jako dlouhodobý bioindikátor k posouzení stavu životního prostředí, jelikož zaznamenává environmentální faktor, který přímo nebo nepřímo omezuje proces, jenž ovlivňuje růst letokruhů v průběhu vegetačního období. To je užitečné například i pro sledování četnosti určitých událostí, povětšinou se opakujících v určitém cyklu. Velkou výhodou pak je, že i dřevo z odumřelých stromů lze použít k tvorbě letokruhové chronologie, což nám umožní získat cenné informace nejen z blízké, ale i z daleké minulosti (Speer 2010). Za pomoci dendrochronologie došlo ke zlepšení kalibrační křivky užívané při radiouhlíkovém datování. Použití radiouhlíkové metody umožňuje datování dřevěných vzorků, které nemohou být datovány pomocí dendrochronologie (Pilcher et al. 1984, Haneca et al. 2009).

2 DUB A JEHO UŽITÍ V DENDROCHRONOLOGII

Za nejvhodnější dřevinu pro sestavení dlouhých letokruhových standardních chronologií je ve střední Evropě považován dub (*Quercus* sp.). Jeho velmi časté užití v různých stavebních konstrukcích v minulosti a trvanlivost jádrového dřeva umožnilo sestavení až několik tisíc let dlouhých standardních chronologií (Bailie 1995). Ty jsou určeny především pro datování a také pro dendroklimatologické aplikace (Haneca et al. 2006 a 2009; Büntgen et al. 2011). Jsou tvořeny kombinací recentních, historických, archeologických a subfosilních dubových vzorků (Spurk et al. 1998; Čufar et al. 2007; Haneca et al. 2009), proto je vhodné se s touto dřevinou nejprve blíže seznámit.

Ve zdejších klimatickém pásmu narazíme při odběru především na dub letní (*Quercus robur* L.) a dub zimní (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Na základě morfologických znaků jako jsou např. listy, žaludy či letorosty, může být dub letní a dub zimní vzájemně rozlišen (Bruschi et al. 2000). Na úrovni makroskopických znaků dřeva není možné tyto druhy rozlišit a je i dokonce obtížné je odlišit podle mikroskopických znaků dřeva (Panshin de Zeeuw 1980; Schweingruber 1990; Čufar et al. 2014a; Hroš a Vavrčík 2014). Existuje však metodika na rozlišení obou druhů. Identifikace je založena na analýze anatomických prvků, kde hlavním rozlišovacím znakem je především rozdílná celková plocha a počet řad jarních makrocév, případně lze k identifikaci použít i rozdíl v extrahovatelných látkách (Feuillat et al. 1997). Nevýhodou takovéto identifikace je však její velká časová náročnost a omezená spolehlivost (**ČLÁNEK I**).

U dalších rozlišovacích znaků (průměrná plocha a tvar makrocév, průměrný přírůst v radiálním směru apod.) nebyly potvrzeny zásadní vzájemné rozdíly. Vzájemné křížení obou druhů je běžné. Při tvorbě chronologie proto kvůli ztížené identifikaci není rozlišováno mezi těmito dvěma dřevinami a jsou obvykle dohromady všeobecně uváděny jako evropský dub (*Quercus* sp.) (Grosser 1977; Feuillat et al. 1997; Schweingruber 1993; Haneca et al. 2009).

Dub zimní se vyskytuje v nižších nadmořských výškách, vyžaduje teplá léta a je citlivý na silné mrazy. Většinou roste v podmínkách značného nedostatku vláhy a vydrží na skalnatých či silně vysychavých podkladech. Nevyskytuje se na zaplavovaných územích, jelikož nesnáší stoupnutí hladiny spodní vody. Dub letní je v našich podmínkách dělen na dva ekotypy lišících se v požadavcích na vláhu. Běžně rozšířený ekotyp, který nalezneme zejména v lužních lesích, má značné nároky na

vláhu, snáší i jarní záplavy. Druhý ekotyp se vyznačuje schopností růst na mělkých, v létě silně vysychavých půdách a najdeme jej v lesostepních lokalitách. Je schopný snáze snášet rozdílné klimatické podmínky, ale oproti dubu zimnímu vyžaduje teplejší klima a je náročnější na světlo. Je dosti tolerantní k imisím a daří se mu obstojně v podmínkách velkých měst. Jeho výskyt je nejčastěji zaznamenán v nižších a středních nadmořských výškách (Schweingruber 1993; Úradníček et al. 2001).

3 PRINCIP DENDROCHRONOLOGIE

Dendrochronologie je postavena na několika základních principech, myšlenkách a konceptech, které jsou ve stručnosti prezentovány v následující části této práce. Tyto principy byly opakovaně potvrzeny na základě vědeckých důkazů z několika vědních disciplín a podpořeny experimentálním dendrochronologickým výzkumem (např. Pilcher et al. 1984; Wigley et al. 1984; Fritts a Swetnam 1989; Cook a Kairiūkštis 1990; Speer 2010). V základním pojetí je dendrochronologie chápána jako metoda zabývající se datováním letokruhů a studováním jejich struktury k objasnění informací týkajících se historických událostí a životního prostředí (Speer 2010).

Opakovanou činností dělivých pletiv (kambia a felogénu) se vytváří během jednoho vegetačního období tloušťkový přírůst dřeva, který nazýváme letokruh. Podle doby, kdy dojde k přírůstu buněk dřeva (začátek nebo konec vegetačního období), jsme zpravidla schopni rozlišit i dvě rozdílné zóny dřeva, nazývané jako „jarní“ a „letní“ dřevo. Tyto zóny jsou u většiny dřevin vzájemně barevně odlišeny. Výjimku tvoří dřeviny s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva, které bývají bez výrazného rozlišení hranice letokruhu. Sytost barevného odstínu závisí na anatomické stavbě konkrétní dřeviny (Požgaj et al. 1997). Kontrast mezi světlejším jarním a tmavším letním dřevem umožňuje rozlišit při vizuálním makroskopickém i mikroskopickém porovnání hranici letokruhu, která je nesmírně důležitá pro změření šířky letokruhů (Drápela a Zach 1995).

Šířka letokruhu kolísá v závislosti na faktorech, které ovlivňují přírůst stromů a je značně variabilní. Na velikost tloušťkového přírůstu působí několik hlavních faktorů, například věk, geneticky dané vlastnosti dřeviny, vlivy okolního prostředí, zdravotní stav stromu, apod. Zásadní vliv na tvorbu letokruhů však mají především klimatické podmínky, které se během vegetační sezóny do značné míry jeví zodpovědné za meziroční rozdíly ve velikosti letokruhů (García-González a Fonti 2006).

Předpokládá se, že podobné růstové podmínky (např. klimatické faktory, kvalita půdy apod.) způsobí, že vzájemné vztahy letokruhů pro určitou oblast budou u všech srovnávaných sérií stejné, i když se budou ve skutečnosti absolutní hodnoty šířek letokruhů lišit (Drápela a Zach 1995). Tyto specifické změny v šířkách letokruhů využívá metoda křížového datování. Princip metody je založen na vzájemném porovnání průběhu dvou či více letokruhových křivek. Pokud je synchronizace křivek

úspěšná, jsme pak schopni přiřadit ke každému letokruhu i letopočet, ve kterém byl letokruh vytvořen (Drápela a Zach 1995; Kaennel a Schweingruber 1995).

3.1 LETOKRUHOVÉ KŘIVKY

Termínem letokruhová křivka označujeme grafické vyjádření hodnot šířek po sobě následujících letokruhů (Vinař et al. 2005). K jejímu vytvoření i dalšímu vyhodnocení jsou v současnosti používány speciální počítačové programy, které naměřené data zobrazují a statisticky vyhodnotí. Důležitou kapitolou předcházející samotnému vytvoření křivky je především odběr vzorků a přesné měření šířek letokruhů. Přehled používaných technik odběru vzorků a základní postupy uplatňované při tvorbě letokruhové křivky jsou popsány podrobněji v následující části práce.

V rámci práce byla pro odběr vzorků na území České a Slovenské republiky vtipována vhodná místa reprezentující potřeby výzkumu. Jednalo se o živé dubové porosty, pilařské provozy zpracovávající dubovou kulatinu a dubové zvonové stolice (dřevěná konstrukce, na níž je umístěn kostelní zvon). Vyváženou kombinací odběrů v dubových porostech i v pilařských provozech jsme schopni simulovat podmínky při odběru historického dubového materiálu, u něhož nejsme schopni z anatomické stavby rozlišit jednotlivé druhy dubů.

Pro odběr z živých dubových stromů byl použit Presslerův přírůstový nebozez. Vývrt byl proveden ve výčetní výšce 1,3 m nad zemí v takové části kmene, aby byl co nejméně zatížen lokálními vlivy, jako jsou kořenové náběhy, poranění kmene, apod. Vývrty vzorků se provádí po vrstevnici, abychom mohli vyloučit výskyt reakčního dřeva. Takto odebraný vzorek má válcový tvar o průměru 5 mm, který je zafixován pomocí lepidla do dřevěné lišty s předem vyfrézovanou drážkou. Proti posunu je zajištěn omotáním papírové lepicí pásky. Po vytvrnutí lepidla je možné povrch vzorků snadno zbrousit či opracovat žiletkou (**ČLÁNEK I, II, III a IV**). Tento způsob odběru sice způsobuje poškození stromu, které otevírá cestu různým organismům způsobující hnilobu, nicméně zdravý jedinec má přirozenou obranyschopnost a je schopný efektivně bojovat i v případě rozsáhlejšího poškození (Drápela a Zach 1995).

Odběr vzorků z pilařských provozů byl prováděn za pomoci motorové pily. Z čela kmene byl odřezán 2–3 cm tenký vzorek ve formě kotouče, na němž je dobře patrný příčný řez. Díky němu můžeme zkoumat možné růstové vady (např. nepravé letokruhy, excentrický růst kmene, ovlivnění letokruhů suky apod.), které mohou negativně ovlivnit přesnost měření (**ČLÁNEK III a IV**).

Výběr historického materiálu a dubových zvonových stolic byl proveden na základě informací poskytnutých od památkového úřadu nebo za pomoci dendrochronologické laboratoře DendroLab Brno. Vytipovány byly především konstrukce, u kterých byl předpoklad výstavby v 19. století. Pro odběr vzorků z historických dřevěných konstrukcí (krovy, sloupy, vzpěry, pozednice atd.) byl taktéž používán Presslerův přírůstový nebozez. Technika odběru, uložení a opracování odebraných vzorků je v tomto případě plně shodná s postupem popisující odběr vzorků ze živých dubových stromů. Odběr byl zacílen především na dubové prvky zvonových stolic, které obsahují podkorní letokruh (poslední letokruh vytvořený před skácením stromu) nebo letokruhy bělového dřeva, díky čemuž je možné určit přesný letopočet smýcení stromů použitých na danou konstrukci (**ČLÁNEK III a IV**). Pokud to situace dovoluje, k odběru volíme nejméně viditelné místo na odebíraném prvku, aby bylo co nejvíce zachováno původní estetické vnímání konstrukce.

Aby bylo možné provést měření, musí se nejprve zdrsňený a nepravidelný povrch vzorku vzniklý při odběru vhodně upravit (nejčastěji broušením). Vzorky jsou tedy upraveny pomocí brusných papírů různých zrnitostí dle aktuální potřeby. Se zvyšující se zrnitostí brusného papíru klesá drsnost broušeného povrchu. Broušení je v první fázi prováděno brusnými papíry či brusnými kotouči nižší zrnitosti (nejčastěji o zrnitosti P240), s cílem srovnat broušenou oblast a připravit povrch na dočištění. Dočištění se provádí brusnými papíry o vyšší zrnitosti (nejčastěji o zrnitosti P400). Tím dojde k dostatečnému vyhlazení broušené plochy a zvýraznění hranice letokruhů. Pokud při odběru výřezových kotoučů vzniknou velké nerovnosti, lze použít nejdříve elektrický hoblík pro vytvoření rovné plochy. V případě zvýšené vlhkosti v povrchových vrstvách dřeva (např. archeologické vzorky) či snížené pevnosti vlivem degradace a napadení biotickými škůdci (např. vzorky z historických konstrukcí) lze vzorky opracovat žiletkou (Cook a Kairiūkštis 1990).

Vzorky dřeva jsou měřeny na speciálním měřicím stole, který umožňuje měřit s přesností 0,01 mm. Stůl je vybaven posuvným šroubovým mechanismem a impulsmetrem, který zaznamenává interval posunu desky stolu a přenáší ho přímo do počítače. Tento posun nám vyjadřuje šířku letokruhu. Měření se provádí vždy po jednom letokruhu, od dřeně (případně nejstaršího letokruhu) směrem k podkornímu letokruhu, a to vždy kolmo na následující letokruh (Vinař et al. 2005). K zaznamenání

měření byl použit speciální program PAST4 (©SCIEM). Po doměření vzorku je v počítači k dispozici grafické zobrazení šířek letokruhů v podobě letokruhové křivky.

3.2 STANDARDIZACE LETOKRUHOVÝCH KŘIVEK

Aby bylo možné provádět samotné datování, je potřeba vytvořit nejdříve konkrétní srovnávací standardní chronologii. Tu je možné zhotovit z předem neupravených letokruhových křivek, které jsou ovšem zatíženy určitým informačním šumem. Každý strom dokáže zaznamenat do struktury letokruhu měnící se podmínky prostředí ve svém okolí, které v konečném součtu ovlivňují i výslednou šířku letokruhu. K získání požadovaného informačního signálu je tak využíván proces standardizace.

Standardizace je proces matematického modelování a odstranění věkového trendu z časové řady spojený s dalšími postupy s cílem vytvořit stacionární časovou řadu (Drápela a Zach 1995). Při standardizaci je nestacionární letokruhová řada převedena na stacionární řadu letokruhových indexů pohybujících se kolem hodnoty jedna a s konstantním rozptylem. V nestandardizovaných řadách existuje výrazná závislost mezi šířkou letokruhů a jejich směrodatnou odchylkou. Po standardizaci je pak tato závislost výrazně oslabena (Cook a Kairiūkštis 1990). Proto je nutné v mnoha dendrochronologických aplikacích před sestavením průměrné letokruhové řady tento trend z letokruhových křivek odstranit a křivky detrendovat (Rybníček 2007).

Aby bylo možné dešifrovat charakteristické signály, byl sestaven lineární model (tzv. Cookův model) obsahující hlavní složky, které ovlivňují tloušťkový přírůst (Cook a Kairiūkštis 1990). Tento model obsahuje pět nejčastěji se vyskytujících složek, které nalezneme v jakékoliv letokruhové řadě.

COOKŮV MODEL

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t$$

R_t – šířka letokruhu v čase t , A_t – věkový trend letokruhové řady, C_t – klimatický signál obsažený v letokruhu, $\delta D1_t$ – endogenní faktor, $\delta D2_t$ – exogenní faktor, E_t – náhodná odchylka

Věkový trend letokruhové řady (A_t) souvisí se změnami v tloušťkovém přírůstu v závislosti na věku. V rané fázi růstu produkuje strom výrazně širší letokruhy (fáze juvenilního růstu), které v sestavené standardní chronologii ovlivňují její průběh. Přírůst stromu tedy zpočátku prudce stoupá, v určitém věku dosahuje maxima a s přibývajícím věkem dochází k pozvolnému snižování šířky letokruhů (Fritts a Swetnam 1989). Tento problém lze částečně omezit odstraněním juvenilní části, která sice zkrátí délku

záznamu, ale je tím dosaženo spolehlivějších dat. Pro statisticky správnou analýzu letokruhové řady je nutné eliminovat vliv věkového trendu, což se provádí standardizací (Drápela a Zach 1995).

Klimatický signál obsažený v letokruhu (C_t) je stálou součástí modelu, zahrnuje všechny klimaticky podmíněné vlivy prostředí (např. srážky, teploty, výška sněhové pokrývky apod.). Předpokládá se, že se projeví u všech stromů na stanovišti (Cook a Kairiūkštis 1990). Endogenní faktor (δDI_t) je zcela lokální faktor působící třeba jen na jeden strom. Projevuje se neočekávaným „pulzem“, který neodpovídá vlivu věku a neprojevuje se u ostatních letokruhových řad (např. provedení výchovného zásahu, lokálními změnami ve výživě apod.). Exogenní faktor ($\delta D2_t$) představuje charakteristickou reakci stromů v rámci porostu nebo určitého lesního segmentu na vliv působící v rámci celé této oblasti (např. požáry, kalamity škůdců apod.). Projevuje se ve všech nebo téměř ve všech letokruhových řadách zkoumaných oblastí určitou typickou změnou. Symbol δ je binární indikátor přítomnosti ($\delta=1$) nebo nepřítomnosti ($\delta=0$). Náhodná odchylka (E_t) představuje nevysvětlenou část celkového rozptylu hodnot letokruhové řady (Cook a Kairiūkštis 1990; Drápela a Zach 1995).

K odstranění trendu, který má s přibývajícím věkem u normálně rostoucích stromů klesající průběh, lze použít k proložení například lineární nebo negativní exponenciální funkce. V případě složitějšího průběhu trendu lze použít i jiné funkce například lineární regresní funkce, kubická spline funkce různé délky apod. (ČLÁNEK I, II a III). V dendrochronologii se však častěji setkáváme s neúplnými letokruhovými řadami, kterým chybí různě velká část. Většinou vzorek postrádá juvenilní část (nejmladší dřevo stromu), což je často způsobeno technikou odběru, kdy vývrt mine při vrtání dřev. Další možností je, že měřený prvek o tuto část přišel technologickou úpravou a tudíž tuto juvenilní část neobsahuje (např. střešní krokev, stropní trám apod.). V takovém případě nemůžeme uplatňovat proložení trendu růstovými funkcemi, jelikož by průběh křivky neodpovídal reálnému stavu (Fritts a Swetnam 1989; Cook a Kairiūkštis 1990; Drápela a Zach 1995; Speer 2010). Pro standardizaci neúplných letokruhových řad se používá např. nízkofrekvenční filtr (low-pass filter). Jako příklad lze uvést RCS filtr (Regional Curve Standardization), který je pravděpodobně nejpoužívanější a ve vyhlazené řadě ponechává „pulzy“ s dlouhou periodou (Büntgen et al. 2005; ČLÁNEK III).

Podrobněji o tomto tématu pojednává článek I, II a III.

3.3 DENDROCHRONOLOGICKÉ DATOVÁNÍ

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, princip dendrochronologického datování spočívá v přesném měření šířek letokruhů, jejich vzájemné synchronizaci a přiřazení konkrétního roku vzniku. Synchronizace letokruhových křivek je stanovena pomocí vizuálního a statistického porovnání (Pilcher et al. 1984).

Hlavní skupinou využívající dendrochronologického datování jsou ve většině případů archeologické vzorky a dřevěné prvky historických staveb. Méně často je datování prováděno u subfosilního dřeva, hudebních nástrojů, historického nábytku či uměleckých předmětů. Velmi často je tato metoda využívána i k datování vzorků z živých stromů. Zásady odběru, opracování a měření vzorků jsou podrobněji popsány v kapitole 3.1.

K vyhodnocení naměřených dat byly v rámci práce používány speciální programy (PAST4 (©SCIEM), COFECHA). V těchto programech byla provedena vzájemná synchronizace letokruhových křivek, která umožní rozdělení křivek do skupin navzájem synchronních vzorků, ze kterých je vytvořena průměrná letokruhová křivka. Tím, že dojde k vytvoření průměrné letokruhové křivky, se zvýrazní hledaný společný signál a potlačí se vliv jedince (Vinař et al. 2005). V této fázi se průměrná letokruhová křivka přikládá ke standardní chronologii za účelem nalezení nejvyšší hodnoty statistických parametrů. Při porovnání dvou letokruhových křivek mezi sebou je míra podobnosti posuzována pomocí koeficientu souběžnosti (Gleichläufigkeit (Eckstein a Bauch 1969)) a pomocí t-testu (TBP (Baillie a Pilcher 1973), THO (Hollstein 1980)), které jsou pouze pomocným prostředkem a slouží k usnadnění optického srovnání obou křivek. I přesto, že dosáhneme u obou křivek dostatečně statisticky významných hodnot, je nutné potvrdit optickým srovnáním setkání ve většině výrazných maximech a minimech (Drápela a Zach 1995). Splněním všech těchto požadavků je možné průměrnou letokruhovou křivku absolutně datovat. Zpětně se poté datují podle průměrné letokruhové křivky všechny individuální letokruhové křivky, ze kterých byla průměrná křivka vytvořena (Vinař et al. 2005; Rybníček 2007).

Ke spolehlivému datování a statistickému vyhodnocení je potřeba, aby měl vzorek alespoň 40–50 letokruhů (Cook a Kairiūkštis 1990) a pro zkoumanou dřevinu a oblast byla sestavena standardní chronologie. Úspěšnost datování je dána také dřevinou, stanovištěm, stupněm zachování vzorku, případně obsaženými růstovými vadami. Za ideální dřeviny pro datování jsou všeobecně považovány listnaté dřeviny s kruhovitě

pórovitou stavbou dřeva a jehličnaté dřeviny. Dřeviny s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva jsou obtížně datovatelné kvůli jejich nevýrazné anatomické stavbě, která nedovoluje zřetelně rozlišit roční přírůst dřeva (Rybníček et al. 2010). Velkým problémem však také mohou být velmi úzké letokruhy. Hranici dvou sousedících letokruhů je v takovémto případě často obtížné rozpoznat kvůli vzájemnému těsnému kontaktu buněk jarního dřeva (Schweingruber 1993).

Aby bylo možné provést absolutní datování vzorku s přesností na rok, je nutné, aby zkoumaný vzorek obsahoval poslední vytvořený letokruh s kůrou (tzv. podkorní letokruh). Pokud není tento letokruh součástí zkoumaného vzorku (např. z důvodu opracování dřeva, degradace povrchových vrstev vzorku biotickými či abiotickými činiteli atd.), nemůžeme s jistotou říci, kolik letokruhů daný vzorek postrádá. Při datování takového vzorku se musí konstatovat, že strom byl smýcen někdy po roce, jehož datum bylo zjištěno (Rybníček et al. 2010). Jestliže jsou u dubového vzorku zachovány letokruhy bělové dřeva, je možné chybějící letokruhy dopočítat s určitou tolerancí (Haneca et al. 2006). V Evropě se počet letokruhů bělového dřeva pohybuje v rozptylu od 7 do 50 letokruhů (Rybníček et al. 2006). Samotný počet letokruhů souvisí s geografickou polohou lokality a vykazuje určitou variabilitu od východu na západ (Baillie 1995). Například v severozápadní Anglii se počet bělových letokruhů pohybuje v rozmezí 20–45 letokruhů (Hughes et al. 1981), v severním Německu 10–30 letokruhů (Wrobel et al. 1993), v jižním Finsku 9–18 letokruhů (Baillie et al. 1985) a v Polsku 9–23 letokruhů (Ważny a Eckstein 1991).

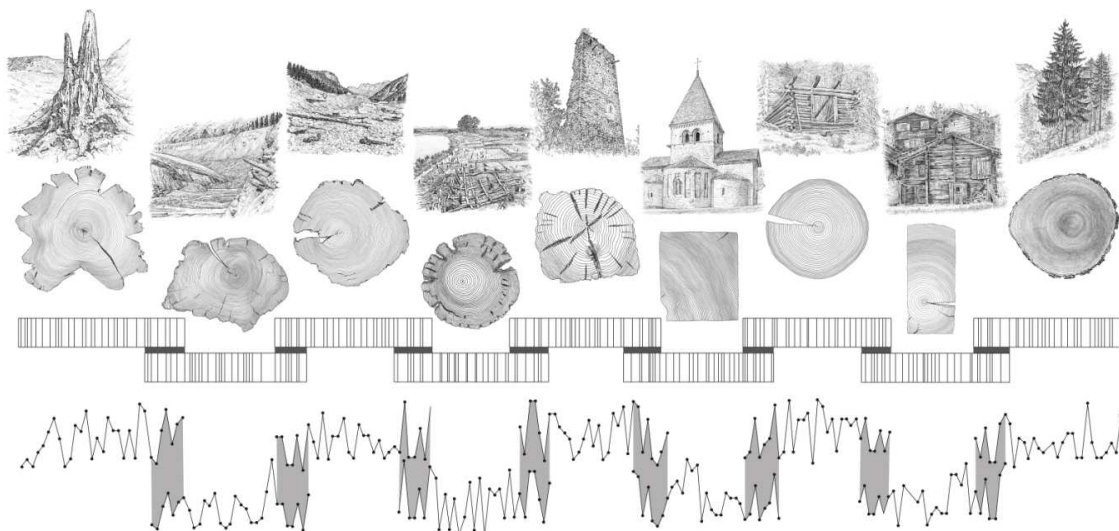
Předchozí studie provedená v jihovýchodní části České republiky uváděla počet bělových letokruhů v rozmezí 5–21 letokruhů (Rybníček et al. 2006). Z nově vyhodnocených výsledků pokrývajících již celé území přirozeného výskytu dubů v ČR vyplývá, že počet bělových letokruhů se v rámci celé České republiky pohybuje v rozmezí 5–24 letokruhů a dosahuje průměrné hodnoty 14,6 letokruhů. Ve skupině historických a recentních vzorků dosahují průměrné hodnoty bělových letokruhů stejného počtu a jejich počet je tedy v průběhu času neměnný (**ČLÁNEK IV**).

Je však také nezbytné brát v úvahu i charakter užití zkoumané konstrukce, neboť rok pokácení stromu nemusí vždy souhlasit s rokem, kdy byl datovaný prvek vyroben (např. kvůli době potřebné k vysušení dřeva).

Podrobněji o tomto tématu pojednává článek I, II, III a IV.

3.4 STANDARDNÍ CHRONOLOGIE

Základním předpokladem pro dendrochronologické aplikace je existence standardní chronologie, která se tvoří pro každou dřevinu zvlášť a vzniká postupným překrýváním letokruhových křivek směrem do minulosti (obr. 1) (Baillie 1995). Průměrný přírůstek pro každý rok, odvozený z určitého počtu stromů, utváří výslednou standardní



Obr. 1: *Princip křížového datování a prodloužení chronologie do minulosti (převzato z www.wsl.ch a upraveno autorem práce)*

letokruhovou chronologii (Pilcher et al. 1984). S rostoucím počtem letokruhových křivek použitých k sestavení standardní chronologie, vzrůstá i její reprezentativnost pro danou oblast. Vysoká míra proložení v celé délce standardní chronologie snižuje nebezpečí ovlivnění výsledné chronologie nežádoucím rušivým signálem. S vzrůstajícím počtem vzorků dochází ke zvýraznění společného klimatického signálu a současně k potlačení rušivého signálu stromu (Cooper et al. 2013). Jednotlivé standardní chronologie se od sebe liší oblastí, pro kterou se dají použít a délkou časového intervalu, do kterého spadají (Rybníček 2007).

Při tvorbě letokruhů občas dochází k poruchám, kdy se letokruh v daném roce nevytvoří vůbec, resp. je danou technikou neměřitelný nebo se během jednoho vegetačního období vytvoří dva letokruhy, resp. vytvoří se tzv. falešný letokruh. Vynechání jednoho letokruhu v letokruhové řadě vyvolá dokonalý nesouhlas a následné určení místa, ve kterém k poruše došlo, je velmi obtížné (Drápela a Zach 1995). Pro vyloučení těchto nežádoucích faktorů slouží právě metoda křížového datování („cross-dating“). Ta umožňuje vzájemným srovnáním dvou a více letokruhových křivek přiřadit ke každému letokruhu konkrétní rok vzniku (obr. 1) a určit tak stáří dřeva s přesností na

kalendářní rok (Fritts a Swetnam 1989; Baillie 1995; Speer 2010). Porovnáním letokruhových křivek s již vytvořenou standardní chronologií mohou být nepřesnosti v datování odhaleny.

Pro spolehlivé datování je však nutné, aby se synchronizované křivky také opticky shodovaly. Je však velmi nepravděpodobné, že by některé náhodně vybrané letokruhové křivky byly v hodnotách přírůstu naprosto identické a dosahovaly shody ve všech letokruzích. Proto je nutné vyhledávat v letokruhové křivce určité extrémní hodnoty. Předmětem zájmu jsou tedy výrazná maxima (mimořádně vysoké hodnoty přírůstu) nebo častěji však minima (mimořádně nízké hodnoty přírůstu). Vzájemné porovnání všech těchto výrazných hodnot tak umožní určit, zda jsou ve vzorku zastoupeny všechny letokruhy, případně který konkrétní letokruh ve vzorku chybí. Více pozornosti je obvykle věnováno velmi úzkým letokruhům (na zkoumané letokruhové křivce je jejich šířka obvykle výrazně pod průměrnou šířkou letokruhu). Tento stav většinou signalizuje negativní ovlivnění růstu některým z abiotických či biotických faktorů (Drápela a Zach 1995).

K hodnocení kvality proložení chronologií je užíván tzv. Expressed Population Signal (EPS). Ten vyjadřuje, do jaké míry chronologie reprezentuje signál bez daného šumu (Briffa a Jones 1990). Hodnoty EPS se pohybují v rozsahu od 0 do 1. Klesne-li hodnota signálu pod předem stanovenou hodnotu spolehlivosti (obvykle stanovenou na hodnotu 0,85 (Wigley et al. 1984)), začíná v chronologii spíše převládat signál z jednotlivých stromů oproti signálu ze stanoviště (Briffa a Jones 1990; Speer 2010).

Podrobněji o tomto tématu pojednává článek III.

3.4.1 DUBOVÉ STANDARDNÍ CHRONOLOGIE

Velmi málo dřevěného materiálu vydrží odolávat přirozenému rozpadu déle, než je doba pohybující se většinou v řádu stovek let. To značně omezuje délku použitelného záznamu získaného z letokruhů. Ve srovnání s mnoha jinými proxy daty (s nepřímými údaji umožňujícími rekonstruovat klimatické podmínky, které panovaly v minulosti Země např. geologické usazeniny, ledovcová jádra, korály atd.), dosahují záznamy z dendrochronologických měření relativně krátké délky. Někdy se však ve výjimečných případech vyskytne dřevěný materiál odolávající i více než tisíce let. Na světě se nalézají jen tři letokruhové chronologie, které dosahují délky přibližně okolo 10 000 let. Tyto chronologie byly sestaveny ze severoamerické borovice osinaté (*Pinus longaeva*) v Kalifornii (Ferguson et al. 1985) a z dubu (*Quercus* spp.) v Irsku (Pilcher et al. 1984)

a v Německu (Friedrich et al. 2004). Takto dlouhé chronologie je možné sestavovat jen za použití subfossilního dřeva, které mohou délku chronologie potencionálně prodloužit až na přibližně 15 000 let (Speer 2010). U historického, archeologického a částečně i subfossilního materiálu použitého pro sestavení dlouhých standardních chronologií však musíme vždy počítat s jeho možným transportem z jiných více či méně vzdálených území např. kvůli plavení dřeva, obchodu se dřevem a výrobky atd. (Ważny 2002).

Za nejdelší dubovou chronologii je považována chronologie z jihoněmeckého Hohenheimu, která sahá až do doby 8480 př. n. l. (Friedrich et al. 2004). Dlouhé letokruhové chronologie umožnily modelovat klimatické reakce stromů a rekonstrukci klimatu v minulosti (Büntgen et al. 2011). Nejvyšší hustotu dubových chronologií lze nalézt v západní (např. Baillie 1995; Lambert et al. 2005; Tegel et al. 2010; Wilson et al. 2012) a střední Evropě (např. Grynaeus 2003; Geihofer et al. 2005; Szanto et al. 2007; Čufar et al. 2008; Büntgen et al. 2010 a 2011; Kolář et al. 2012; Ważny et al. 2014; Domínguez-Delmás et al. 2015). Tvorba dubových chronologií však probíhá i na územích, která byla dříve považována za méně vhodná pro takový výzkum jako např. Belgie (Haneca et al. 2006), Estonsko (Sohar et al. 2014) nebo Litva (Pukienė a Ožalas 2007).

V České republice byl položen první základ dubové standardní chronologie v roce 1995 (Poláček 2002). Systematickým dendrochronologickým datování dubového archeologického materiálu se podařilo sestavit chronologii, která měla rozsah od roku 538 n. l. do roku 2000 n. l. V roce 2005 byla představena aktualizovaná chronologie CZGES2005, která byla podstatně více proložena a měla rozsah od roku 545 př. n. l. do roku 2004 n. l. (Rybníček 2007). V dalších letech byla díky datování subfossilního materiálu chronologie výrazně prodloužena a její nová verze CZGES2010 měla rozsah od roku 4682 př. n. l. do roku 2006 n. l. (Kolář et al. 2012). Poslední velkou aktualizací byla vytvořena standardní chronologie CZGES2013, která zlepšila proložení zejména recentní části (**ČLÁNEK II**). Nicméně i tato chronologie nedostatečně pokrývala období okolo 19. století a také nezahrnovala celé území přirozeného výskytu dubu v ČR. Proto byly na základě historických záznamů vytipovány dubové zvonové stolice s předpokládanou dobou výstavby v 19. století. Spolu s tím byly na území západních Čech provedeny odběry recentních vzorků, které doplnily mezeru v pokrytí celého přirozeného výskytu dubu na území ČR (**ČLÁNEK IV**).

Posledním územím ve střední Evropě, pro které nebyla sestavena samostatná dubová standardní chronologie, byla až donedávna oblast Slovenské republiky. Dendrochronologická problematika byla na tomto území řešena jen okrajově a vztahovala se většinou na jehličnaté dřeviny o charakteru malých lokálních oblastí např. lokalita Slovenské Beskydy (Bošela et al. 2014), lokalita Tatry (Büntgen et al. 2013), lokalita Gabčíkovo (Šmelko a Scheer 2000). Pro dubové porosty nebyla dendrochronologická problematika zkoumána vůbec nebo jen pouze okrajově např. byly zkoumány podmínky úhynu a přírůstu dubů v lokalitách bez vlivu člověka (Saniga et al. 2014) či byl zkoumán vývoj a růst dubových porostů postihnutých v minulosti hromadným úhynem dubů způsobený tracheomykózním onemocněním houbového původu (Štefančík a Strmeň 2012). Proto byla na území Slovenské republiky vytvořena zcela nová dubová standardní letokruhová chronologie. K jejímu sestavení bylo použito 1028 vzorků z živých stromů a 276 vzorků z historických konstrukcí, s rozsahem od roku 967 do roku 2013 (**ČLÁNEK III**).

3.4.2 PODOBNOST EVROPSKÝCH STANDARDNÍCH CHRONOLOGÍ

Evropské standardní chronologie byly primárně vytvářeny jako datovací nástroje a přesnému původu dřeva použitého pro vytvoření těchto chronologií nebyla věnována přílišná pozornost (Eckstein a Wrobel 2007). V minulosti bylo totiž dubové dřevo velmi cennou surovinou, která byla transportována i stovky kilometrů daleko (Wažny 2002; Haneca et al. 2005) a existuje zde tedy možnost zkreslení a ovlivnění chronologie letokruhovými křivkami pocházející z jiných oblastí. Pokud tedy chceme určit skutečnou podobnost mezi standardními dubovými letokruhovými chronologiemi pro jednotlivá evropská území, je nutné sestavit chronologie pouze z recentních dubů, u kterých je známa oblast jejich původu. Jedině tak budeme mít jistotu, odkud dřevo pochází (Eckstein a Wrobel 2007; Kolář et al. 2012).

Míra podobnosti letokruhových chronologií závisí na geografické poloze, délce chronologie, dřevině a kvalitě proložení (Pilcher et al. 1984; Čufar et al. 2008 a 2014b; Kolář et al. 2012). I když je míra podobnosti mezi evropskými dubovými standardními chronologiemi napříč západní a střední Evropou velmi vysoká, bylo přesto opakovaně prokázáno, že použitelnost standardních chronologií na daném území klesá se vzdáleností od místa nálezu datovaného dřeva (Bailie 1995). Geografický rozsah použití těchto standardních chronologií je omezený celou řadou okolností, z nichž nejvýznamnější jsou klimatické a růstové podmínky. Z tohoto důvodu je pro spolehlivé

dendrochronologické datování potřeba sestavovat hustou síť regionálních standardních chronologií. Tato skutečnost může být také využívána například pro identifikaci přesného původu dřeva nalézaného v historických konstrukcích (Wažny 1991; Büntgen et al. 2011; Kolář et al. 2012; Čufar et al. 2014b).

Pokud porovnáme chronologie na evropském kontinentu, tak nejvyšší vzájemná podobnost je všeobecně pozorována u středoevropských zemí. V těchto zemích se vyskytují podobné klimatické podmínky, s výjimkou v severní části Německa, kde je klima spíše více přímořské. U české chronologie je největší podobnost zaznamenána především mezi rakouskou a německou chronologií (Kolář et al. 2012). Slovenská chronologie vykazuje vysokou podobnost především s moravskou, východorakouskou a západoukrajinskou chronologií. Nižší podobnost české a slovenské chronologie s polskou chronologií je zřejmě způsobena pohořím Západních a Východních Karpat ovlivňující v této oblasti proudění vzduchu a tím i rozložení dešťových srážek. V této oblasti lze pozorovat přechod od kontinentálního k oceánskému podnebí (**ČLÁNEK III**). Stejný přechod může být viděn ve Francii, kde směrem na západ postupně slábne kontinentální vliv. Dobrá korelace byla také zjištěna v Nizozemsku a Belgii, kde převažuje mírné oceánské podnebí. Naopak Britské ostrovy mají v porovnání s Evropou zcela odlišné klimatické podmínky, jelikož jsou ovlivněny Golským proudem. Ten způsobuje časté deště a malé teplotní rozdíly mezi létem a zimou. Tyto extrémní rozdíly v klimatu se projevují nižší podobností anglických a irských chronologií při porovnání s těmi kontinentálními. Velmi malá korelace s italskou a španělskou chronologií lze vysvětlit stejným způsobem. Tyto dvě země jsou rozděleny ze střední Evropy pohořím (Alpy a Pyreneje) a lze zde už pozorovat subtropické podnebí (Kolář et al. 2012).

Podrobněji o tomto tématu pojednává článek III.

4 VLIV KLIMATU NA RADIÁLNÍ RŮST

I když nejsme schopni zcela přesně vysvětlit všechny biochemické procesy, které se ve stromě odehrávají, lze spolehlivě prokázat závislost mezi růstem stromu a okolním prostředím (Speer 2010). Aby bylo možné získat vypovídající data, je potřeba znát charakteristické vlastnosti růstu letokruhů, které se vyznačují drobnými odlišnostmi pro určitou dřevinu (**ČLÁNEK I a II**).

Obecně platí, že růst stromu závisí na nejvíce omezujícím činiteli v okolí stromu (Fritts 1976). Tedy například stromy rostoucí na suchých prostředích jsou obvykle omezeny množstvím srážek za rok, stromy ve vysoké nadmořské výšce mají tendenci být omezené teplotou, některé stromy jsou omezené nedostatkem živin v půdě apod. Limitující faktor dominuje růstu každý rok a je hlavní proměnnou zaznamenanou v letokruhu. Každý rok se tak vytváří různé šířky letokruhů, které jsou ovlivněné rozdílnými faktory. Stromy však mohou být omezeny několika faktory najednou, což značně komplikuje fyziologickou odezvu stromu (Fritts a Swetnam 1989; Speer 2010). Šířky letokruhů vyskytující se u stromů rostoucích na severních stranách svahu či ve vysokých nadmořských výškách mohou být ovlivněny chladnými podmínkami, které zpomalují růstové procesy. Oproti tomu šířky letokruhů vyskytující se u stromů rostoucích na jižních svazích a v nižších nadmořských výškách vykazují větší pravděpodobnost na ovlivnění růstu nedostatkem vlhkosti (Fritts 1976).

Jak již bylo výše zmíněno, radiální přírůst u dubů tedy výrazně závisí především na vlhkostních a na teplotních podmínkách. Hlavním klimatickým parametrem, který limituje dubové porosty v České a Slovenské republice jsou především srážky a s tím úzce související sucho (Šmelko a Scheer 2000; Horáček et al. 2003). Pozitivní korelace mezi šířkou letokruhů a srážkami potvrzují i mnohé evropské studie (např. Gray a Pilcher 1983; Santini et al. 1994; Cedro 2007; Van der Werf et al. 2007; Bronisz et al. 2012; Michelot et al. 2012; Čufar 2014b) a odhadují také velké vlhkostní nároky dubů v procesu tvorby letokruhu. V případě nedostatku vody (sucho v jarních a letních měsících doprovázené vysokými teplotami) se velikosti cév snižují (Sass a Eckstein 1995; García-González a Eckstein 2003; Bronisz et al. 2012). Toto množství vody obsažené v půdě je vyjadřováno pomocí indexu sucha PDSI (Palmer drought severity index). S dostupností vody během vzniku cév (dostatek srážek v jarních a letních měsících) se jejich velikost zvětšuje (Cedro 2007; Bronisz et al. 2012). Charakteristika velikosti jarních cév může být proto použita pro rekonstrukci srážek v minulosti

(García–González a Fonti 2006; Fonti a García–González 2008). Anatomické vlastnosti se mění také v závislosti na hydrologických podmínkách dané oblasti, a to dokonce i ve stejném porostu (Gričar et al. 2013).

Vysoká teplota v letních měsících je nepříznivým faktorem ovlivňující přírůstek stromů. Především v rozmezí období od května do srpna mají vysoké teploty negativní vliv na šířku letokruhů (Rozas 2005; Cedro 2007; Bronisz et al. 2012; Čufar 2014b). Vysoké letní teploty mohou u stromu vyvolat zvýšený vodní stres, který způsobí následný pokles radiálního růstu. Tento jev vzniká především z důvodu zvýšené ztráty vody a je dáván do souvislosti s evapotranspirací a odpařováním vody z půdy (Rozas 2005). Naopak teplejší konec vegetační sezóny má pozitivní vliv na šířku letokruhů (Cedro 2007; Bronisz et al. 2012; Čufar 2014b). Vliv teplot na radiální přírůst dubu však není v našich klimatických podmínkách zdaleka tak zásadní jako vliv sucha a množství srážek (**ČLÁNEK II**).

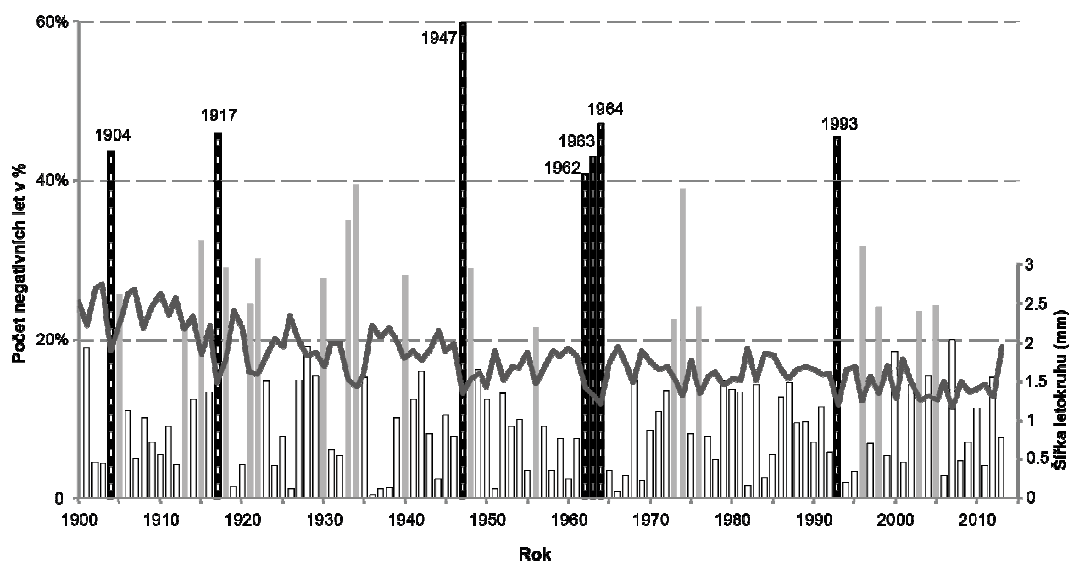
Podrobněji o tomto tématu pojednává článek I, II, III a IV.

4.1 ANALÝZA VÝZNAMNÝCH LET

Předkládaná analýza byla zaměřena na průzkum negativních let na území Slovenska. Negativní významný rok je definován jako extrémně úzký letokruh stromu, u kterého došlo ke snížení růstu minimálně o 40% ve srovnání s průměrnou šířkou letokruhu v předchozích čtyřech letech a tato reakce se projevila minimálně u 20 % stromů ve sledované oblasti (Schweingruber et al. 1990). Pro lepší orientaci byly negativní významné roky rozděleny do čtyř skupin (20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100%), vyjadřujících procentuální výskyt významného roku z celkového počtu letokruhových řad (obr. 2).

Takovéto letokruhy jsou brány jako ekologické ukazatele místních nebo regionálních událostí, které ovlivňují růst stromu (Cook a Kairiūkštis 1990). Využití studia významných let rozšiřuje spektrum metod užívaných v dendrochronologickém výzkumu. Zatímco ve výzkumu založeném na měření šířky letokruhů jsou zdrojem informací průměrné hodnoty a nepřerušené časové řady, tak u datování určité události či významných let je zdrojem informací frekvence a intenzita událostí během zkoumaného období. Významné roky tak poskytují informace o extrémních situacích, kterým byly stromy v minulosti vystaveny např. období sucha, napadení porostu škůdci, apod. (Schweingruber et al. 1990).

Výsledky analýzy negativních let odhalily ve slovenské chronologii 26 období, ve kterých došlo vlivem nepříznivých podmínek (v převážné většině případů z důvodu nízkého množství srážek během vegetačního období) k velmi nízkému přírůstu dřeva (obr. 2). Nejextrémnější nalezený rok byl v roce 1947, ve kterém se v dané populaci stromů negativně projevilo téměř 60% stromů. Tento výrazný negativní rok byl pozorován také například u dubových porostů v sousedním Polsku (Bronisz et al. 2012).



Obr. 2 - Výsledky analýzy významných negativních let pro slovenskou chronologii. Hodnoty 0-20% bez negativních let (bílá), negativní roky pro 20-40% stromů (světle šedá), výrazné negativní roky pro 40-60% stromů (černě); standardní chronologie (tmavě šedá).

5 ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce se zabývá sestavením letokruhové standardní dubové chronologie pro oblast Slovenské republiky a zkoumá problémy s tím spojené. Dále se zabývá aktualizací české standardní chronologie.

Při tvorbě chronologie byly nejprve provedeny lokální studie čtyř dubových porostů (dub letní – *Quercus robur* L.; dub zimní – *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; dub mnohoplodý – *Quercus polycarpa* Schur., dub žlutavý – *Quercus dalechampii* Ten.). Cílem bylo porovnat růstové reakce jednotlivých druhů dubů na klimatické faktory. Na úrovni šířky letokruhů však vzájemné rozdíly mezi jednotlivými druhy nebyly významné a nelze je tudíž jednoznačně identifikovat. Mnohem více podstatný se na ovlivnění růstové reakce ukázal vliv stanoviště. Tento vliv se ještě navyšuje zejména u extrémních stanovišť, u kterých dochází např. k rychlému odtoku vody, snížené hladině podzemní vody apod. Byla také pozorována změna v rozložení dešťových srážek v rámci vegetačního období. Po roce 1990 byl prokázán pokles srážek v dubnu a květnu, díky čemuž došlo ke snížení nasycení půdního profilu vodou v porovnání s předchozím porovnávaným obdobím (1961–1990). Tento faktor lze považovat za limitující pro radiální růst dubu (ČLÁNEK I).

Dále bylo z recentních dubových porostů na území ČR sestaveno pět párů chronologií, které byly rozděleny na základě vlhkosti půdy (mokrý/suché stanoviště), nadmořské výšky (nízká/vysoká), věku (mladé/staré stromy), druhu (dub letní/dub zimní) a geografické polohy (východ/západ). Jednotlivé chronologie jsou odvozené ze vzorků reprezentujících data z horního a dolního kvartilu každé zkoumané skupiny. Díky náhodnému odběru vzorků lze předpokládat, že získané výsledky budou obecně platné v celé délce české dubové chronologie. Vzájemným porovnáním byla prokázána shodná reakce na klimatické parametry. Porovnání bylo provedeno pro období od roku 1920 až do roku 2013, které je společné pro všech pět párů chronologií. Nejlepší korelaci se srážkami dosahují chronologie v době od května do července aktuálního roku (ČLÁNEK II).

Na základě výše zmíněných výsledků byla sestavena jedna dubová letokruhová standardní chronologie pro celou oblast Slovenska. Pro zdejší území se jedná o vůbec první dubovou letokruhovou standardní chronologii. Tento výzkum zároveň otevírá nové možnosti v dendroarcheologické a paleoklimatické oblasti. Slovensko bylo poslední středoevropskou zemí, která neměla sestavenou dubovou standardní

chronologii. Systematickým odběrem bylo získáno 1028 vzorků z živých stromů a 276 vzorků z historických konstrukcí, z nichž byla sestavena výsledná chronologie s rozsahem od roku 967 do roku 2013. Hodnoty EPS překračují limit 0,85 v období od roku 1585 až do současnosti. Vytvořením této standardní chronologie bude nyní také možné provést datování dřevěných vzorků, které nemohly být v této oblasti prozatím datovány. Také dojde ke zvýšení pravděpodobnosti datování, které bylo ještě donedávna řešeno použitím chronologií ze vzdálenějších oblastí, čímž se ovšem pravděpodobnost úspěšného datování snižovala. Tato chronologie tak výrazně posílí síť evropských dubových chronologií, která v této části Evropy není tak hustá jako v západní a střední Evropě (**ČLÁNEK III**).

V rámci výzkumu byla nově vzniklá slovenská dubová chronologie vzájemně porovnávána s ostatními dubovými chronologiemi ve střední Evropě, aby bylo možné zjistit podobnost napříč geografickými celky. K porovnání byla použita jen recentní část, aby bylo vyloučeno případné zkreslení chronologie materiálem transportovaným z jiného území. Výsledky potvrzují, že podobnost klesá s narůstající vzdáleností. Ke srovnání byly použity chronologie České republiky, Polska, Ukrajiny, Maďarska, Rakouska a Slovinska. Vysokou podobnost vykazuje slovenská chronologie především s moravskou, východorakouskou a zakarpatskou (západní oblast Ukrajiny) chronologií. To je dáno zejména stejným středoevropským klimatem. Naopak velmi nízká podobnost se slovinskou chronologií je dána odlišným klimatem, jelikož růst letokruhu zde ovlivňuje středomořské a alpské podnebí. Také nižší podobnost s polskou chronologií je patrně způsobena pohořím Západních a Východních Karpat, které ovlivňují v této oblasti proudění vzduchu a způsobují tak nerovnoměrné rozložení dešťových srážek (**ČLÁNEK III**).

Současně byla u slovenské chronologie provedena analýza negativních významných let. Hodnocení proběhlo v několika kategoriích (20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100%), vyjadřujících procentuální výskyt významného roku z celkového počtu letokruhových řad. V první skupině (negativní reakce se projevila u 20–40% stromů) nalezneme 19 negativních roků, u druhé skupiny (reakce u 40–60% stromů) nalezneme 7 negativních roků. Ve třicátých letech 21. století bylo zaznamenáno nejvíce negativních let (1930, 1933, 1934, 1940). Avšak nejdelší období sníženého přírůstu bylo zaznamenáno v letech 1962–1964, kdy ve všech třech letech reagovalo negativně více jak 40% stromů. Nejextrémnější rok byl v roce 1947, u kterého v dané populaci stromů reagovalo

negativně téměř 60% stromů (obr. 2). Jako nejpravděpodobnější příčina růstové deprese v těchto letech se jeví nízké množství srážek během vegetačního období.

Ze vzorků odebraných v České republice byla také provedena analýza počtu letokruhů bělového dřeva, která je důležitá pro dendrochronologické datování historických dubových vzorků. K analýze byly použity pouze vzorky ukončené podkorním letokruhem. Počet bělových letokruhů byl zjišťován z příčného řezu. Hranice mezi jádrovým a bělovým dřevem byla stanovena vizuálně pomocí barevného rozdílu. V České republice byla získaná data rozdělena do kategorie podle geografické polohy (východ/západ) a podle stáří vzorků (historické/recentní). Recentní vzorky, které byly k analýze použity, pokrývají celé území přirozeného výskytu dubu na území ČR. Z výsledků vyplývá, že se počet bělových letokruhů u recentních vzorků pohybuje v rámci celé republiky v rozmezí 5–24 letokruhů a dosahuje průměrného počtu 14,6 letokruhu. Vyšší počet letokruhů bělového dřeva byl vypočten pro západní oblasti (15,1) než pro východní (13,4). Výsledky v České republice tak potvrdily předpokládaný pokles počtu bělových letokruhů ve směru od západu na východ. V historických vzorcích byl počet letokruhů bělového dřeva zaznamenán na téměř stejné hodnotě (14,5), z čehož vyplývá, že je jejich počet v průběhu času neměnný (ČLÁNEK IV).

Zároveň došlo k aktualizaci české dubové chronologie, ke které bylo použito 252 křivek z živých stromů a 90 křivek z historických konstrukcí (převážně z kostelních zvonových stolic). Celkově je v současné době česká chronologie tvořena 3536 letokruhovými křivkami, které pokrývají souvislé období od roku 352 až do roku 2014. Podařilo se odebrat vzorky ze západní části České republiky, takže nyní už je pokryto celé území přirozeného výskytu dubu na území ČR. V první polovině 19. století se nově odebranými vzorky podařilo trojnásobně zvýšit proložení chronologie (z 19 na 57 vzorků). Zvýšení proložení je potvrzeno navýšením hodnot EPS nad kritickou hodnotu 0,85. Tímto také došlo ke zlepšení napojení chronologie v období přechodu historických a recentních vzorků (obvykle období 2. poloviny 19. století). To bývá často silně ovlivněno velkým podílem juvenilního dřeva, které může komplikovat využití chronologie pro rekonstrukci klimatu. Nově aktualizovanou dubovou chronologii bude možné využít pro rekonstrukci hydroklimatických podmínek v minulosti (ČLÁNEK IV).

6 CONCLUSION

This submitted dissertation thesis deals with the creation of oak tree-ring chronology for the area of the Slovak Republic and examines the problems associated with it. It also deals with the updating of the Czech oak tree-ring chronology.

When creating the chronology, first local studies of four selected oak stands (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus polycarpa* Schur., *Quercus dalechampii* Ten.) were carried out. The aim was to compare the growth response of each species of oaks to climatic factors. At the level of ring width, the mutual differences between the species were not significant and therefore cannot be positively identified. The effect of the local site conditions on the growth response proved to be much more significant. This effect is even more pronounced at extreme sites, e.g. sites with rapid runoff, reduced groundwater level, etc. Additionally, a change in the distribution of rainfall within the growing season was observed. After 1990 the rainfall decreased in April and May, thus reducing the saturation of the soil water profile in comparison with the previous period (1961–1990). This factor can be considered limiting for the radial growth of oak (**ARTICLE I**).

Further, five specific pairs of chronologies were compiled from living oak stands in the Czech Republic. They were divided into ten specific sub-chronologies based on soil moisture conditions (wet/dry), elevation (low/high), age (young/old trees), species (*Quercus robur/Quercus petraea*), and geographical position (east/west). These chronologies are derived from samples representing data from the upper and the lower quartiles of each group investigated. Due to the random sampling it may be assumed that the results should be generally valid for the entire CZ oak TRW chronology. Mutual comparison demonstrated consistent response to climatic parameters. The comparison was made for the period from 1920 to 2013, which is common to all five pairs of chronologies. TRW chronologies reach the best correlations with precipitation in the period from May to July (**ARTICLE II**).

Based on the above mentioned results, oak TRW chronology for the entire region of Slovakia was compiled. It is the first oak TRW chronology for the area given. This research opens up new possibilities in the field of paleoclimatology and dendroarchaeology. Slovakia was the last country in Central Europe for which tree-ring chronologies of living and relict material were still missing. Systematic sampling yielded 1,028 samples from living trees and 276 samples from historic structures, from

which the resulting chronology was compiled ranging from 967 to 2013. The EPS exceeds the limit of 0.85 in the period from 1585 to the present. Thanks to the new chronology it will now also be possible to carry out the dating of wood samples that could not be dated in this area yet. Furthermore, the probability of dating will increase as until recently it was done using the chronologies from distant areas, thus reducing the likelihood of successful dating. This chronology will also significantly strengthen the network of European oak chronologies, which is not as dense in this part of Europe as in Western and Central Europe (**ARTICLE III**).

The new oak TRW chronology was compared with other oak chronologies in Central Europe, in order to identify similarities across countries. Only the recent part of the chronology was used for the comparison to exclude any bias in the chronology by material transported from another area. The results confirm that the similarity decreases with an increasing distance. Chronologies from the Czech Republic, Poland, Ukraine, Hungary, Austria, and Slovenia were used for comparison. The Slovak chronology shows a high similarity mainly with Moravian, Weinviertel (east Austria) and Transcarpathian (western Ukrainian) chronologies. This is mainly due to the same central European climate. By contrast, very little similarity to the Slovenian chronology is given by the different climate because the tree-ring growth is influenced by the Mediterranean and the Alpine climates. Also the lower similarity with the Polish chronology is probably caused by the Western and Eastern Carpathians, because the air flow influence in this area causes uneven distribution of rainfall (**ARTICLE III**).

The analysis of significant negative years within the Slovak chronology has also been performed. The analysis was conducted for several categories (20–40%, 40–60%, 60–80%, 80–100%), representing the percentage of incidence of the significant year out of the total number of tree-ring series. In the first group (negative reactions occurred in 20–40% of the trees) 19 negative years were found; in the second group (reaction in 40 to 60% of the trees) 7 negative years were found. The most negative years are found in the 1930s: 1930, 1933, 1934, 1940. However, the longest period of reduced increment was recorded in the years 1962–1964, when more than 40% of the trees responded negatively in all the three years. The most extreme year was 1947, when almost 60% of trees reacted negatively in the tree population (Fig. 2). The most likely cause of the growth depression in the years mentioned seems to be the low rainfall during the growing season.

The samples collected in the Czech Republic were used to analyse the number of sapwood tree rings, which is important for dendrochronological dating of historic oak samples. Only samples with the outermost tree rings were used. The number of sapwood tree rings was determined from the cross section. The boundary between the heartwood and the sapwood was determined visually using the colour difference. In the Czech Republic the data obtained were divided into categories based on geographical position (east/west) and age (young/old trees). Recent samples that were used for the analysis cover the entire territory of the natural distribution of oak in the Czech Republic. The results show that the number of sapwood tree rings in recent samples varies throughout the country from 5 to 24 growth rings, reaching an average of 14.6 tree rings. The number of sapwood tree ring calculated was higher for the western areas (15.1) than for the eastern (13.4). The results in the Czech Republic confirm the anticipated decline in the number of sapwood tree rings in the direction from the west to the east. The number of sapwood tree rings recorded in historical samples has almost the same value (14.5) - it follows that the number does not change over time (**ARTICLE IV**).

At the same time, the Czech oak chronology was updated: we used 252 recent and 90 historical tree-ring width series (mostly from church belfries). In total, the current Czech chronology consists of 3536 tree-ring series that cover a continuous period from 352 to 2014. We took samples from the western part of the Czech Republic, so now the entire area of the oak distribution in the Czech Republic is covered. We have increased the chronology replication in the first half of the 19th century three times (from 19 to 57 samples) using the newly collected samples. The increase in replication has raised the value of EPS above the critical value of 0.85. This also improved the connection of the chronology in the transition area between the historical and the recent samples (usually the second half of the 19th century). It is often heavily influenced by a large proportion of juvenile wood, which can complicate the use of the chronology for climate reconstructions. The updated oak chronology will thus be usable for the reconstruction of hydroclimatic conditions in the past (**ARTICLE IV**).

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- BAILLIE M.G.L., PILCHER J.R. (1973) A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33: 7–14
- BAILLIE M., HILLAM J., BRIFFA K., BROWN D.M. (1985) Redating the English art-historical tree-ring chronologies. *Nature* 315: 317–319
- BAILLIE M.G.L. (1995) A Slice Through Time. *B.T. Batsford Ltd, London*, 177 s.
- BOŠELA M., SEDMÁK R., SEDMÁKOVÁ D., MARUŠÁK R., KULLA L. (2014) Temporal shifts of climate-growth relationships of Norway spruce as an indicator of health decline in the Beskids, Slovakia. *Forest Ecology and Management* 325: 108–117
- BRIFFA K.R., JONES P.D. (1990) Basic chronology statistics and assessment. In: Cook E.R., Kairiukstis L.A. (eds) *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht* 137–152
- BRONISZ A., BIJAK S., BRONISZ K., ZASADA M. (2012) Climate influence on radial increment of oak (*Quercus* sp.) in central Poland. *Geochronometria* 39(4): 276–284
- BRUSCHI P., VENDRAMIN G. G., BUSSOTTI F., GROSSONI P. (2000) Morphological and Molecular Differentiation between *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus pubescens* Willd. (Fagaceae) in Northern and Central Italy. *Annals of Botany* 85: 325–333
- BÜNTGEN U., ESPER J., FRANK D.C., NICOLUSSI K., SCHMIDHALTER M., SEIFERT M. (2005) The effect of power transformation on RCS – case study from 3 millennial-length alpine chronologies. In: Gärtner H., Esper J., Schleser G. (eds) *TRACE 3*: 141–149
- BÜNTGEN U., TROUET V., FRANK D., LEUSCHNER H.H., FRIEDRICHS D., LUTERBACHER J., ESPER J. (2010) Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 29: 1005–1016
- BÜNTGEN U., TEGEL W., NICOLUSSI K., MCCORMICK M., FRANK D., TROUET V., KAPLAN J., HERZIG F., HEUSSNER K-U., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331(6017): 578–582
- BÜNTGEN U., KYNCL T., GINZLER C., JACKS D.S., ESPER J., TEGEL W., HEUSSNER K.U., KYNCL J. (2013) Filling the Eastern European gap in millennium-long temperature reconstructions. *Proceedings of the National Academy of Science, USA* 110: 1773–1778

- CEDRO A. (2007) Tree-ring chronologies of downy oak (*Quercus pubescens*) pedunculate oak (*Quercus robur*) and sessile oak (*Quercus petraea*) in the Bielinek Nature Reserve: comparison of the climatic determinants of tree-ring width. *Geochronometria* 26: 29–45
- COOK E.R., KAIRIŪKŠTIS L.A. (1990) Methods of Dendrochronology. *International Institute for Applied System Analysis*, 393 s.
- COOPER R.J., MELVIN T.M., TYERS I., WILSON R.J.S., BRIFFA K.R. (2013) A tree-ring reconstruction of East Anglian (UK) hydroclimate variability over the last millennium. *Climate Dynamics* 40(3–4): 1019–1039
- ČUFAR K. (2007) Dendrochronology and past human activity - A review of advances since 2000. *Tree Ring Research* 63(1): 47–60
- ČUFAR K., LUIS M.D., ZUPANČIČ M., ECKSTEIN D. (2008) A 548-Year Tree-Ring Chronology of Oak (*Quercus spp.*) for Southeast Slovenia and its Significance as a Dating Tool and Climate Archive. *Tree-Ring Research* 64(1): 3–15
- ČUFAR K., ŠEFC B., DE LUIS M., MORGÓS A., GRABNER M., MERELA M., TRAJKOVIĆ J. (2014a) Tree-ring chronology of pedunculate oak (*Quercus robur*) and its potential for development of dendrochronological research in Croatia. *Drvna Industrija* 65(2): 129–137
- ČUFAR K., GRABNER M., MORGÓS A., MARTINEZ DEL CASTILO E., MERELA M., LUIS M. (2014b) Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees* 28(5): 1267–1277
- DOBROVOLNÝ P., RYBNÍČEK M., KOLÁŘ T., BRÁZDIL R., TRNKA M., BÜNTGEN U. (2015) A tree-ring perspective on temporal changes in the frequency and intensity of hydroclimatic extremes in the territory of the Czech Republic since 761 AD. *Climate of the Past* 11: 1453–1466
- DRÁPELA K., ZACH J. (1995) Dendrometrie (Dendrochronologie). *Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno*, 152 s.
- DOMÍNGUEZ-DELMÁS M., ALEJANO-MONGE R., VAN DAALEN S., RODRÍGUEZ-TROBAJO E., GARCÍA-GONZÁLEZ I., SUSPERREGI J., WAZNY T., JANSMA E. (2015) Tree-rings, forest history and cultural heritage: current state and future prospects of dendroarchaeology in the Iberian Peninsula. *Journal of Archaeological Science* 57: 180–196

- ECKSTEIN D., BAUCH J. (1969) Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88: 230–250
- ECKSTEIN D., WROBEL S. (2007) Dendrochronological proof of origin of historic timber—retrospect and perspectives. In: Haneca, K., Verheyden, A., Beekmann, H., Gärtner, H., Helle, G., Schleser, G. (Eds.), Vol. 5: Proceedings of the Symposium on Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. *Tervuren, Belgium. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Umwelt/Environment* 74: 8–20
- FERGUSON C.W., LAWN B., MICHAEL H.N. (1985) Prospects for the extension of the bristlecone pine chronology: radiocarbon analysis of H-84-1. *Meteoritics* 20(2): 415–421
- FEUILLAT F., DUPOUEY J-L., SCIAMA D., KELLER R. (1997) A new attempt at discrimination between *Quercus petraea* and *Quercus robur* based on wood anatomy. *Canadian Journal of Forest Research* 27 (3): 343–351
- FONTI P., GARCÍA-GONZÁLEZ I. (2008) Earlywood vessel size of oak as a potential proxy for spring precipitation in mesic sites. *Journal of Biogeography* 35(12): 2249–2257
- FRIEDRICH M., REMMELE S., KROMER B., HOFMANN J., SPURK M., KAUSER K.F., ORCEL C., KUPPERS M. (2004) The 12 460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe; a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon* 46(3): 1111–1122
- FRITTS H.C. (1976) Tree rings and climate. *Academic Press, London*, 567 s.
- FRITTS H.C., SWETNAM T.W. (1989) Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments. *Advances in Ecological Research* 19: 111–188
- GARCÍA-GONZÁLES I., ECKSTEIN D. (2003) Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology* 23: 497–504
- GARCÍA-GONZÁLES I., FONTI P. (2006) Selecting earlywood vessels to maximize their environmental signal. *Tree Physiology* 26: 1289–1296
- GARCÍA-GONZÁLES I., FONTI, P. (2008) Ensuring a representative sample of earlywood vessels for dendroecological studies: An example from two ring-porous species. *Trees - Structure and Function* 22(2): 237–244

- GEIHOFFER D., GRABNER M., GELHART J., WIMMER R., FUCHSBERGER H. (2005) New master chronologies from historical and archaeological timber in Eastern Austria. In: Sarlatto M., Di Filippo A., Piovesan G., Romagnoli M. (eds), EuroDendro 2005. *Proceedings of the EuroDendro 2005. Viterbo, Italy*, 50–51.
- GRAY B.M., PILCHER J.R. (1983) Testing the significance of summary response functions. *Tree-Ring Bulletin* 43: 31–37
- GRIČAR J., LUIS M., HAFNER P., LEVANIČ T. (2013) Anatomical characteristics and hydrologic signals in tree-rings of oaks (*Quercus robur* L.). *Trees* 27:1669–1680
- GROSSER D. (1977) Die Hölzer Mitteleuropas: Ein mikrophotographischer Lehratlas. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York*, 208 s., ISBN 3-540-08096-1
- GRYNAEUS A. (2003) In: Laszlovszky J., Szabó P. (Eds.), Dendrochronology and Environmental History. *People and Nature, Budapest*, 175–193 s.
- HANECA K., WAŻNY T., VAN ACKER J., BEECKMAN H. (2005) Provenancing Baltic timber from art historical objects: Success and limitations. *Journal of Archaeological Science* 32: 261–271
- HANECA K., BOEREN I., VAN ACKER J., BEECKMAN H. (2006) Dendrochronology in suboptimal conditions: tree rings from medieval oak from Flanders (Belgium) as dating tools and archives of past forest management. *Vegetation, History and Archaeobotany* 15(2): 137–144
- HANECA K., ČUFAR K., BEECKMAN H. (2009) Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36(1): 1–11
- HOLLSTEIN E. (1980) Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte. *Trierer Grabungen und Forschungen. Mainz am Rhein*, 274 s.
- HORÁČEK P., ŠLEZINGEROVÁ J., GANĎELOVÁ L. (2003) Analysis of cambial activity and formation of wood in *Quercus robur* L. under conditions of a floodplain forest. *Journal of Forest Science* 49(9): 412–418
- HROŠ M., VAVRČÍK H. (2014) Comparison of earlywood vessel variables in the wood of *Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. growing at the same site. *Dendrochronologia* 32: 284–289
- HUGHES M.K., MILSOM S.J., LEGGETT P.A. (1981) Sapwood estimates in the interpretation of tree-ring dates. *Journal of Archaeological Science* 8: 381–390

- KAENNEL M., SCHWEINGRUBER F.H. (1995) Multilingual Glossary of Dendrochronology: Terms and definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian. *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Paul Haupt, Bern*, 467 s., ISBN 3-258-05259-X
- KOLÁŘ T., KYNCL T., RYBNÍČEK M. (2012): Oak chronology development in the Czech Republic and its teleconnection on a European scale. *Dendrochronologia* 30(3): 243–248
- KNIESEL B.M., GÜNTHER B., ROLOFF A., VON ARX G. (2015) Defining ecologically relevant vessel parameters in *Quercus robur* L. for use in dendroecology: a pointer year and recovery time case study in Central Germany. *Trees* 29: 1041–1051
- LAMBERT G.N., DUROST S., CUAZ J. (2005) 2500 years from dendrochronology back to ancient French human biotopes. Trees studied: low altitude oaks. Annual conference on Tree Ring, Climate, Archaeology and Environment (TRACE), Fribourg, 21–23 Apr. 2005. Association for Tree Ring Research (ATR), *Fribourg, Switzerland. HEINRICH (I.) et MONBARON (M.) ed. 4*, 244–264 s.
- MICHELOT A., BREDA N., DAMESIN C., DUFRENE E. (2012) Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 265: 161–171
- PANSHIN J. A., DE ZEEUW C. (1980) Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada. 4. vyd. *New York: McGraw-Hill*, 722 s. ISBN 0-07-048441-4
- PILCHER J.R., BAILLIE M.G.L., SCHMIDT B., BECKER B. (1984) A 7272-year tree-ring chronology for western Europe. *Nature* 312(5990): 150–152
- POLÁČEK L. (2002) Dendrochronologické fórum 2002 – Dendrochronologie v české archeologii dnes a zítra. *Archeologický ústav AV ČR Brno*, ISBN: 80-86023-43-5
- POŽGAJ A., CHOVANEC D., KURJATKO S., BABIAK M. (1997) Štruktúra a vlastnosti dreva. *Bratislava: Príroda*, ISBN 80-07-00960-4
- PUKIENÉ R., OŽALAS E. (2007) Medieval oak chronology from the vilnius lower castle. *Dendrochronologia* 24(2-3): 137–143
- ROZAS V. (2005) Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. *Annals of Forest Science* 62: 209–218

- RYBNÍČEK M., VAJRČÍK H., HUBENÝ R. (2006) Determination of the number of sapwood annual rings in oak in the region of southern Moravia. *Journal of Forest science* 2006(3): 141–146
- RYBNÍČEK M. (2007) Dendrochronologické datování dřevěných částí historických staveb, archeologických vzorků a výrobků ze dřeva – sestavení národní dubové standardní chronologie, *Disertační práce, MZLU v Brně*, 111 s
- RYBNÍČEK M., KOLÁŘ T., KYNCL T., KYNCL J. (2010) Možnosti dendrochronologického datování uměleckých předmětů. In: *ACTA ARTIS ACADEMICA 2010. 1. vyd. Praha: Akademie výtvarných umění v Praze*, 243–250 s., ISBN 978-80-87108-14-7
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., ŽID T., KOLÁŘ T., TRNKA M., BÜNTGEN U. (2015) Exploring Growth Variability and Crown Vitality of Sessile Oak (*Quercus petraea*) in the Czech Republic. *Geochronometria* 42(1): 17–27
- SANIGA M., BALANDA M., KUCBEL S., PITTNER J. (2014) Four decades of forest succession in the oak-dominated forest reserves in Slovakia. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 7: 324–332
- SANTINI A., BOTTACCI A., GELLINI R. (1994) Preliminary dendroecological survey on pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Tuscany, Italy. *Annales des Sciences Forestieres* 51(1): 1–10
- SASS U., ECKSTEIN D. (1995) The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation. *Trees – Structure and Function* 9: 247–52
- SOHAR K., LÄÄNELAID A., ECKSTEIN D., HELAMA S., JAAGUS J. (2014) Dendroclimatic signals of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in Estonia. *European Journal of Forest Research* 133(3): 535–549
- SPEER J. H. (2010) Fundamentals of tree-ring research. *Tucson: University of Arizona Press*, 333 s., ISBN 978-0-8165-2684-0
- SPURK M., FRIEDRICH M., HOFMANN J., REMMELE S., FRENZEL B., LEUSCHNER H.H., KROMER B. (1998) Revisions and extensions of the hohenheim oak and pine chronologies – New evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal-Transition. *Radiocarbon* 40(3): 1–10
- SCHWEINGRUBER F. H. (1990) Anatomie europäischer Hölzer/Anatomy of European woods Ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum-, Strauch- und Zwergstrauchhölzer. *Bern: Verlag Paul Haupt*, 799 s., ISBN 3-258-04258-6

- SCHWEINGRUBER F.H, ECKSTEIN D., SERRE-BACHET F., BRÄKER O.U. (1990) Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8: 9–38
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1993) Trees and Wood in Dendrochronology: Morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology. *Berlin: Springer-Verlag*, 402 s., ISBN 3-540-54915-3
- SZANTO Z., KERTESZ R., MORGÓS A., NAGY D., MOLNAR M., GRABNER M., RINYU L., FUTO I. (2007) Combined techniques to date the first Turkish bridge over the Tisza river, Hungary. *Radiocarbon* 49(2): 515–526.
- ŠMELKO Š., SCHEER L. (2000) Dendrochronological analysis of diameter growth and increment of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) in Danube floodplain forests. *Ekológia* 19(2): 125–140
- ŠTEFANČÍK I., STRMEŇ S. (2012) Assessment of structure, growth and development of oak stand (*Quercus petraea* (Mattusch.) Liebl.) affected by mass decay in the past. *Lesnícky časopis – Forestry Journal* 58 (1): 10–21
- TEGEL, W., VANMOERKERKE J., BÜNTGEN U. (2010) Updating historical tree-ring records for climate reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 29: 1957–1959
- ÚRADNÍČEK L., MADĚRA P., KOLIBÁČOVÁ S., KOBLÍŽEK J., ŠEFL J. (2001) Dřeviny České republiky (Woody species of the Czech Republic). *Matice lesnická, spol. s.r.o., Písek*, 333 s.
- VAN DER WERF G.W., SASS-KLASSEN U.G.W., 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(2): 103–112
- VINAŘ J., KYNCL J., RŮŽIČKA P., ŽÁK J. (2005) Historické krovy II. – průzkumy a opravy, Grada, Praha, 301 s.
- WAŻNY T., ECKSTEIN D. (1991) The dendrochronological signal of oak (*Quercus spp.*) in Poland. *Dendrochronologia* 9: 35–49
- WAŻNY T. (2002) Baltic timber in Western Europe – An exciting dendrochronological question. *Dendrochronologia* 20(3): 313–320
- WAŻNY T., LORENTZEN B.E., KÖSE N., AKKEMIK Ü., BOLTRYK Y., GÜNER T., KYNCL J., KYNCL T., NECHITA C., SAGAYDAK S., VASILEVA J.K. (2014) Bridging the gaps in

tree-ring records: creating a high-resolution dendrochronological network for Southeastern Europe. *Radiocarbon* 56(4): 39–50

WIGLEY T.M.L., BRIFFA K.R., JONES P.D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213

WILSON R., MILES D., LOADER N.J., MELVIN T., CUNNINGHAM L., COOPER R., BRIFFA K. (2012) A millennial long March-July precipitation reconstruction for southern-central England. *Climate Dynamics* 40(3–4): 997–1017

WROBEL S., HOLST J., ECKSTEIN D. (1993) Dendrochronologisch-bauhistorische Reihen-untersuchungen zum Hausbau des 13.–17. *Jahrhunderts in Lübeck*. 183–195, 207–215, 237–249

**OAK (*QUERCUS* SPP.) RESPONSE TO CLIMATE DIFFERS
MORE AMONG SITES THAN AMONG SPECIES IN CENTRAL
CZECH REPUBLIC**

RYBNÍČEK, M., ČERMÁK, P., PROKOP, O., ŽID, T., TRNKA, M., KOLÁŘ, T. (2016)

(DENDROBIOLOGY 75: 55–65)

OAK (*QUERCUS* SPP.) RESPONSE TO CLIMATE DIFFERS MORE AMONG SITES THAN AMONG SPECIES IN CENTRAL CZECH REPUBLIC

RYBNÍČEK, M.^{1,2}, ČERMÁK, P.³, PROKOP, O.¹, ŽID, T.³, TRNKA, M.⁴, KOLÁŘ, T.^{1,2}

¹*Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University in Brno, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic*

²*Global Change Research Institute, the Czech Academy of Science, Bělidla 986/4a, 603 00 Brno, Czech Republic, e-mail: michalryb@post.cz*

³*Department of Forest Protection and Wildlife Management, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University in Brno, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic*

⁴*Department of Agrosystems and Bioclimatology, Faculty of Agronomy, Mendel University in Brno, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic*

ABSTRACT

Climatic parameters are the main environmental factors affecting tree growth. The main aim of the presented study was to determine whether different oak species growing under contrasting environmental conditions show different sensitivity to climatic parameters. Four oak stands with *Quercus robur*, *Quercus petraea*, *Quercus polycarpa* and *Quercus dalechampii* growing in the same area were evaluated. Standard dendrochronological methods were used for sample preparation, ring width measurements, cross-dating, chronology development, and the assessment of growth-climate response patterns. Although the species grew under different environmental conditions, their local tree-ring chronologies are highly correlated. The radial growth responses to climatic parameters differ slightly, but the response depends more on local site conditions than on the oak species. At the same time, the strongest correlations between radial growth and climatic parameters were identical among species and sites. The amount of water available in the soil was the main climate-dependent factor limiting radial growth. Approximately since the 1990s, the distribution of rainfalls within the growing season has changed at the expense of spring precipitation. The significance of relative soil moisture content during spring for oak growth increased and the significance of summer values decreased.

KEYWORDS: Central Europe, oak, precipitation, temperature, tree rings

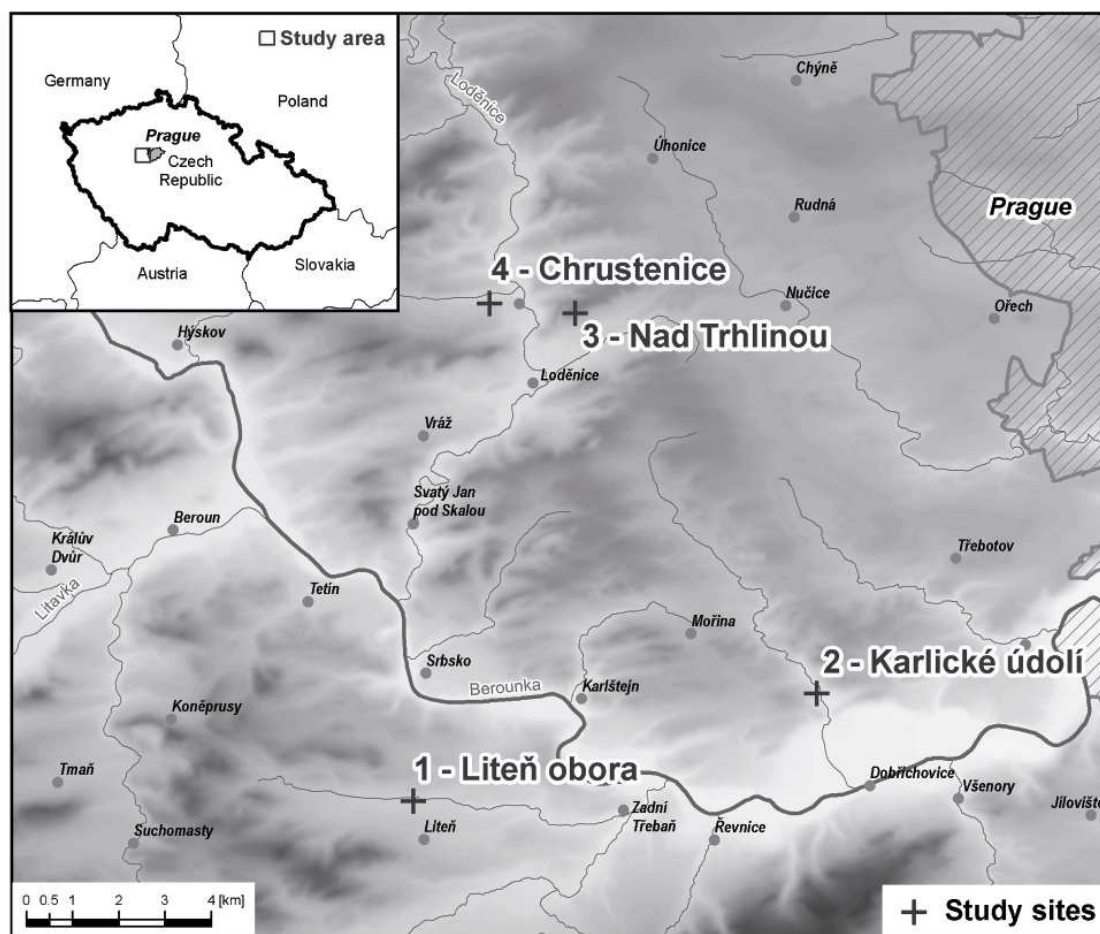
Deciduous oaks (*Quercus* spp.) are among the most important tree species for forestry in Central Europe. Oaks grow at low altitudes, which are increasingly vulnerable to drought given the regional topographic patterns and climatic predictions (e.g. Trnka et al. 2009a,b). Climatic changes observed in the last twenty years (Parry 2000; Tolasz 2007) as well as those predicted for the future include an increase in the frequency of “very wet days” followed by short or long dry periods. These changes in the dynamics of precipitation would be reflected in changes of available soil moisture (Trnka et al. 2009a; Trnka et al. 2014) and in the radial growth of trees (Rybníček et al. 2010a, 2012a,b). Studies dealing with climate characteristics in the Czech Republic and their impact on plants (e.g. Brázdil et al. 2009; Hlavinka et al. 2009; Možný et al. 2009) showed that there is no detectable reduction of spring precipitation after 1990, but that higher global radiation, temperature and water vapour pressure deficit increased evapotranspiration rates. This together with an earlier start of the growing season (e.g. Bauer et al. 2010; Olesen et al. 2012) essentially leads to a faster depletion of soil moisture reserves (e.g. Trnka et al. 2014). Spring and summer dry spells then potentially limit plant growth as shown on the example of field crops and grasslands (e.g. Hlavinka et al. 2009; Trnka et al. 2012). Drought increases the sensitivity to some biotic diseases and insect pest attacks and, as a consequence, it can lead to an increased risk of tree disease and mortality (e.g. Thomas et al. 2002; Allen et al. 2010, Kolář et al. 2013).

The existence of different climatic responses of the deciduous oak species growing in contrasting sites in the Czech Republic may be of key importance to assess future tree vitality and further development of diseases. Dendrochronological comparisons of oaks published so far have been based on a comparison of several oak species over large areas in Central Europe (e.g. Cedro 2007; Friedrichs et al. 2009; Čufar et al. 2014; Ważny et al. 2014). Case studies in specific small areas have seldom been performed (e.g. Sanders et al. 2014), and never in the Czech Republic.

The main questions are: *i*) Do local tree-ring chronologies of different oak species differ? *ii*) What are the main climatic parameters affecting radial growth? *iii*) How does growth response to climatic factors differ in different oak species under comparable climatic conditions? *iv*) Have climatic parameters changed in the past decades? *v*) Have changes in the climate already affected the response?

8.1 MATERIALS AND METHODS

This research was conducted in four selected forest sites with a predominance of *Quercus* spp. in the protected landscape area Český kras, Czech Republic (Fig. 1) in 2012. The maximum distance between sites was less than 10 km. All trees within the sites were located at altitudes from 305 to 350 m a.s.l. in the beech-oak forest vegetation zone, with an average annual precipitation of 543 mm. The average annual temperature during the 1961–2011 monitoring period was 8.9 °C.



ČLÁNEK I - Fig. 1: Location of the study area and the sites

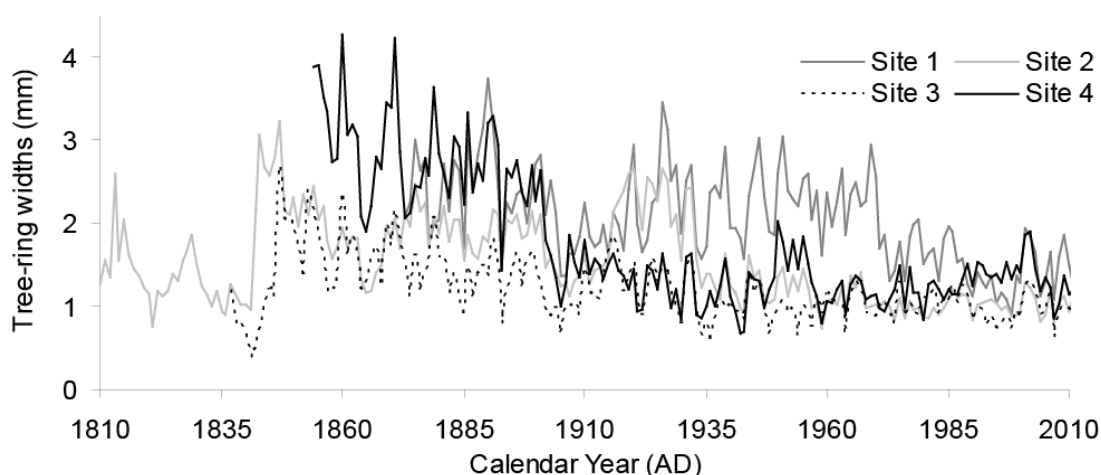
The four sites are a stand with *Quercus robur* on enriched-colluvial soil, a *Quercus petraea* on nutrient-rich soil on limestone, a stand with *Quercus polycarpa* and *Quercus dalechampii* and their hybrids on dry and shallow soil, and a stand with *Quercus petraea* on normal mesotrophic soil (Tab. 1). Some studies consider these oaks as hybrids, but several authors have described both as separate species (Matyas 1971; Požgaj and Horváthová 1986; Dostál 1989; Koblížek 1990; Jovanovič 2000; Magic

2006). The *Quercus polycarpa* and *Quercus dalechampii* were identified in this area (Šíma 2007).

ČLÁNEK I - Tab. 1: A detailed overview of the study sites. Edaphic category and Forest site complex are Czech ecosystem classification categories (Typological System of Forest Management Planning Institute) based on Viewegh et al. (2003).

Site	Location	Position	Altitude (m a.s.l.)	Slope gradient		Slope orientation	Edaphic category	Prevailing soil types	Forest site complex	Quercus species
		Lat-Long (deg., min., sec.)		degree	%					
1	Liteň obora	N 49 54 40.519 E 14 08 16.511	310	7	11	SE	deluvia	eutrophic cambisol	<i>Fageto-Quercetum acerosum deluvium</i>	<i>Quercus robur</i>
2	Karlícké údolí	N 49 56 46.573 E 14 14 52.067	305	12	21	NE	calcaria	calcaric cambisol	<i>Fageto-Quercetum calcarium</i>	<i>Quercus petraea</i>
3	Nad Trhlinou	N 50 00 23.431 E 14 10 00.308	350	21	36	SE	subxerothermica	cambic ranker	<i>Fageto-Quercetum subxerothermicum</i>	<i>Quercus polycarpa</i> <i>Quercus dalechampii</i>
4	Chrustenice	N 50 00 22.944 E 14 08 04.968	320	7	11	N	eutrophica	mesotrophic cambisol	<i>Fageto-Quercetum eutrophicum</i>	<i>Quercus petraea</i>

Twenty dominant and codominant trees were randomly selected within each site. All samples were extracted using a Pressler borer at breast height. Because the between-tree variability within a site is much higher than the within-tree variability around the stem (Bošeřa et al. 2014), one core per tree was extracted. Likewise Fritts (1976) suggested that for climate studies, one core per tree is sufficient if more than 14 trees are sampled. The samples were measured using the VIAS TimeTable measuring system, and the measurement and synchronization of tree-ring sequences were carried out using PAST4 (©SCIEM). The tree-ring widths were measured with 0.01 mm accuracy. After measuring tree-ring widths, individual tree-ring series were cross-dated. The tree-ring series which correlated significantly with each other at the p=0.01 confidence limit was used to create an average tree-ring series. The degree of similarity between the tree-ring series and chronologies was assessed using the T-test according to Baillie and Pilcher (1973) and T-test according to Hollstein (1980), the coefficient of agreement



ČLÁNEK I - Fig. 2: Growth trends of the tree-ring width chronologies

(Gleichläufigkeit; Eckstein and Bauch, 1969), and a visual comparison of tree-ring series, which is crucial for the final dating (Rybníček et al. 2010b).

The tree-age-related growth trends and the autocorrelation structures were removed by using the ARSTAN application (Grissino–Mayer et al. 1992) using a single detrending method (Holmes et al. 1986). The site residual index of the tree-ring chronologies were then used to calculate the climate-growth relationship. The negative exponential function or a linear regression (Fritts et al. 1969), which best resemble the growth trends (Fig. 2), was used. Indices were calculated as a ratio between the measured tree-ring widths and their corresponding values fitted by the function. Site chronologies for each stand were calculated using a biweight robust mean. Expressed Population Signal (EPS; Wigley et al. 1984) for the period 1916–2011, when all chronologies have a minimum replication of 10 series, inter-series correlation (Rbar) and Signal-to-noise ratio (SNR; Fritts and Swetnam 1989) were calculated to assess the quality of each chronology (Tab. 2).

ČLÁNEK I - Tab. 2: Statistical characteristics of the site chronologies (TRW – tree-ring width chronology, TRWi – tree-ring width index chronology, MSL – mean segment length, AGR – average growth rate (mm), SD – standard deviation, Rbar – mean inter-series correlation, EPS – Expressed Population Signal (for the period 1916–2011), AC1 – first autocorrelation, SNR – Signal-to-noise ratio).

	TRW						TRWi	Site chronology		
	MSL	AGR	SD	Rbar	EPS	AC1	SNR	Start	End	Length
Site 1	117	2.1	0.81	0.64	0.92	0.65	9.74	1854	2011	158
Site 2	156	1.51	0.75	0.53	0.89	0.77	15.88	1807	2011	205
Site 3	156	1.18	0.52	0.69	0.93	0.62	10.93	1837	2011	175
Site 4	140	1.64	1.00	0.62	0.88	0.74	6.47	1851	2011	161

Climatic data needed for calculations for each site were derived from the 500 m resolution gridded daily dataset created by applying locally weighted regression and accounting for the effect of altitude. The original station based measurements used for interpolation were subjected to quality control and homogenization using ProClimDB (Štěpánek 2007). The gridded dataset covers the whole Czech Republic and is based 268 meteorological (providing fully range of weather parameters) and 787 precipitation stations providing daily precipitation data only. Using AgriClim (Trnka et al. 2011) and SoilClim (Hlavinka et al. 2011) software packages, daily RSMC values in 0–1.3 m below soil surface were calculated. The RSMC is estimated in a daily time step accounting not only for the balance between evapotranspiration, precipitation and antecedent soil moisture but also on the snow presence/absence, aspect and slope of the

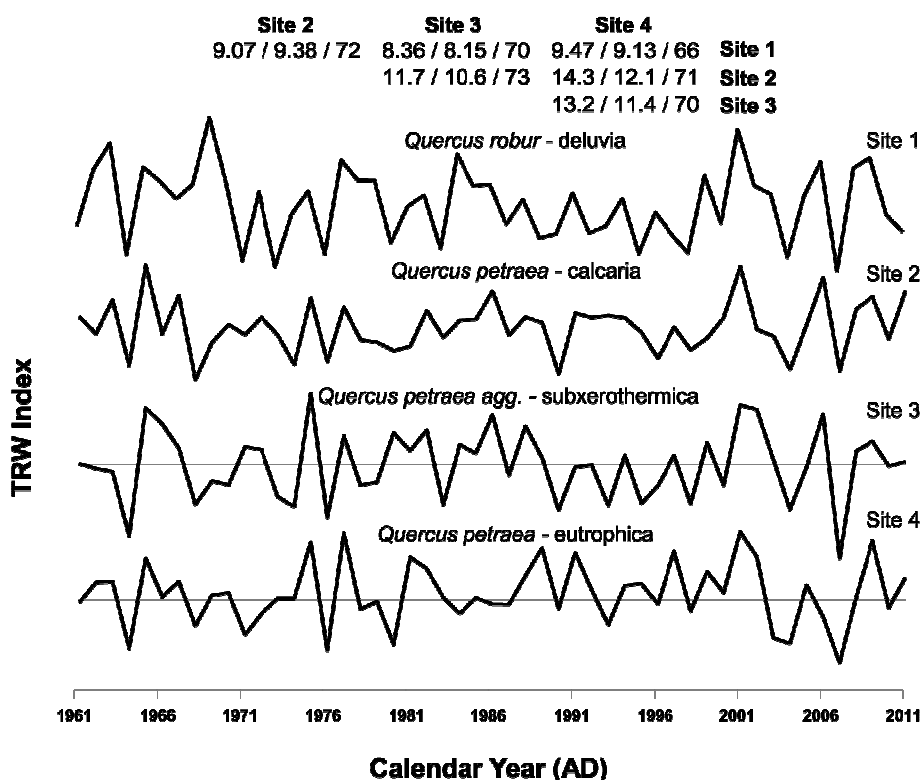
site, critical soil water holding properties, as well as phenological stage of the canopy. The routine is based on the Allen et al. (1998) approach and has been described in more detailed by Hlavinka et al. (2011) and Trnka et al. (2015).

DendroClim2002 was used to calculate correlation coefficients between the site residual oak chronologies and climatic drivers (i.e. temperature, precipitation, global radiation and RSMC – relative soil moisture content) in the period 1961–2011 (Biondi and Waikul, 2004). The correlation coefficients were calculated for a seasonal window from April of the previous year until September of the year of tree-ring formation (referred to as “the current year”), i.e., for a period of 18 months. This interval has the highest influence on the radial increment of oak in Central Europe (Horáček et al. 2003; Gričar 2010). The correlations of the current year were also calculated from March to May (when earlywood is assumed to be formed) and from June to August (typical summer months); additionally, correlations were analyzed from July to September of the previous year (thought to be a period of energy reserve formation for the next season).

8.2 RESULTS

Site chronologies were created from twenty trees at each site. The lowest mean segment length (117) corresponds to the highest value of the average growth rate (2.01 mm) at site 1. An opposite dependence can be observed at the most extreme site 3, where narrow tree-ring widths were expected. The inter-series correlation (R_{bar}), Signal-to-noise ratio (SNR) and the Expressed Population Signal (EPS) reveal the signal strength (Tab. 2). The mean EPS for the well replicated period (>10 series) reliably exceeds the threshold of 0.85 (Wigley et al. 1984) at all sites. The values of the signal-to-noise ratio reach above 6 and are comparable with those achieved in other dendroclimatological analyses of oak, e.g. Rozas (2005).

High similarity between site TRW chronologies was found. When the tree-ring series overlap by at least one hundred and twenty years, the critical value of Student's t-distribution with $p=0.001$ level of significance is 3.373 (Šmelko and Wolf 1977). The values of our t-tests markedly exceed the threshold which shows a high reliability of the synchronization. The correctness of the synchronization is also proved by the agreement of the average tree-ring series in most of the extreme values (Fig. 3). Strongly reduced increments common for all sites were observed in e.g. 1964, 1976, 2004, 2007 (Fig. 3).

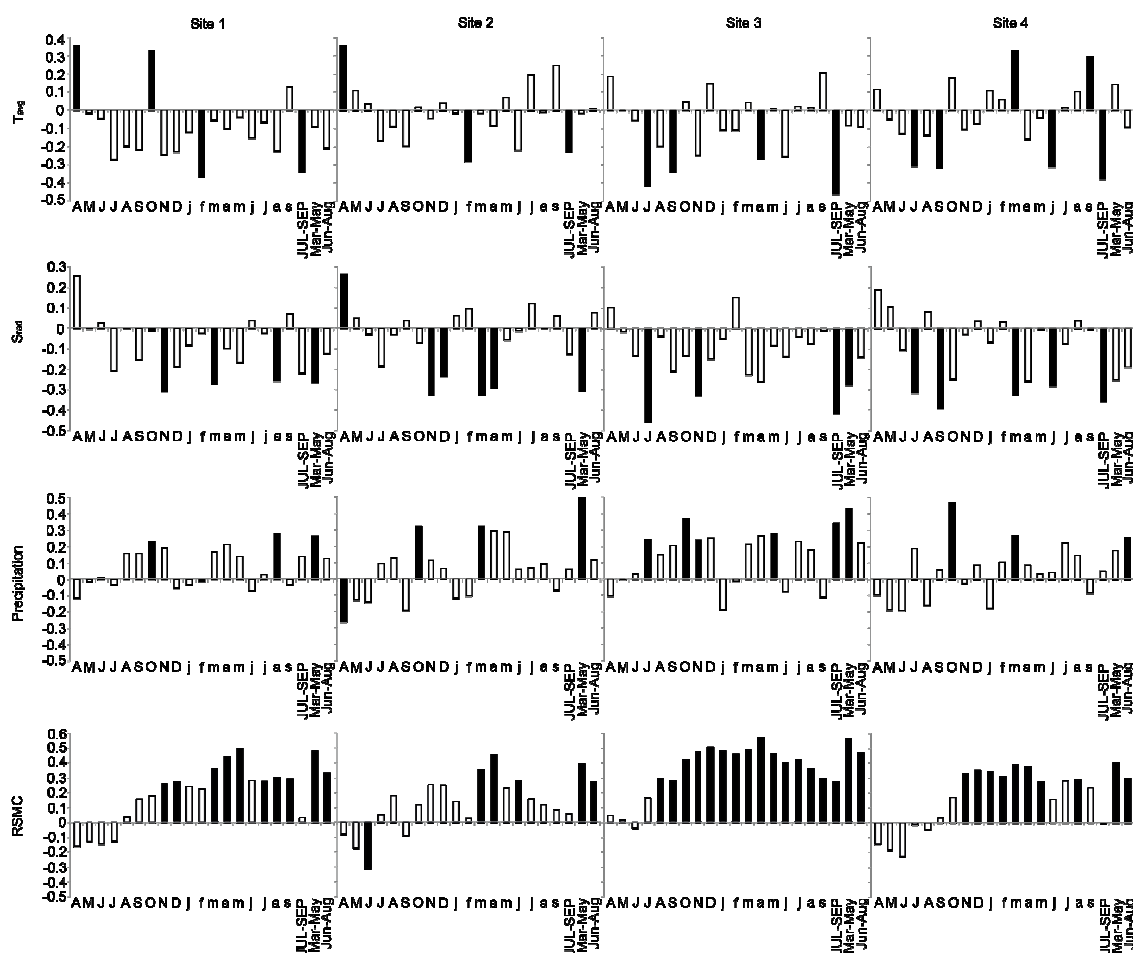


ČLÁNEK I - Fig. 3: Synchronization of site TRW chronologies (T-test according to Baillie and Pilcher / T-test according to Hollstein / synchronization of tree-ring series in % (Gleichläufigkeit))

Statistically significant correlations of the tree-ring width with average temperatures in summer (July–September) of the previous year are negative at all sites; the highest significance has been found at site 3. Negative correlations prevail for the current year. They are always significant for one or two sites (Fig. 4).

The statistically significant tree-ring width correlations with monthly precipitation sums are only positive, with the unique exception of April of the previous year at site 2. The highest correlations at all sites have been found for October of the previous year. The prevailing significant correlations for the current year are those with spring precipitation, with the exception of site 4, the most significant being the correlations for sites 2 and 3.

Monthly RSMC shows the most significant effect on tree growth. The highest correlations have been found for site 3, from previous August to September of the current year. The period from previous November to August of the current year plays the key role at the other three sites with a predominant effect of March, April, and May.

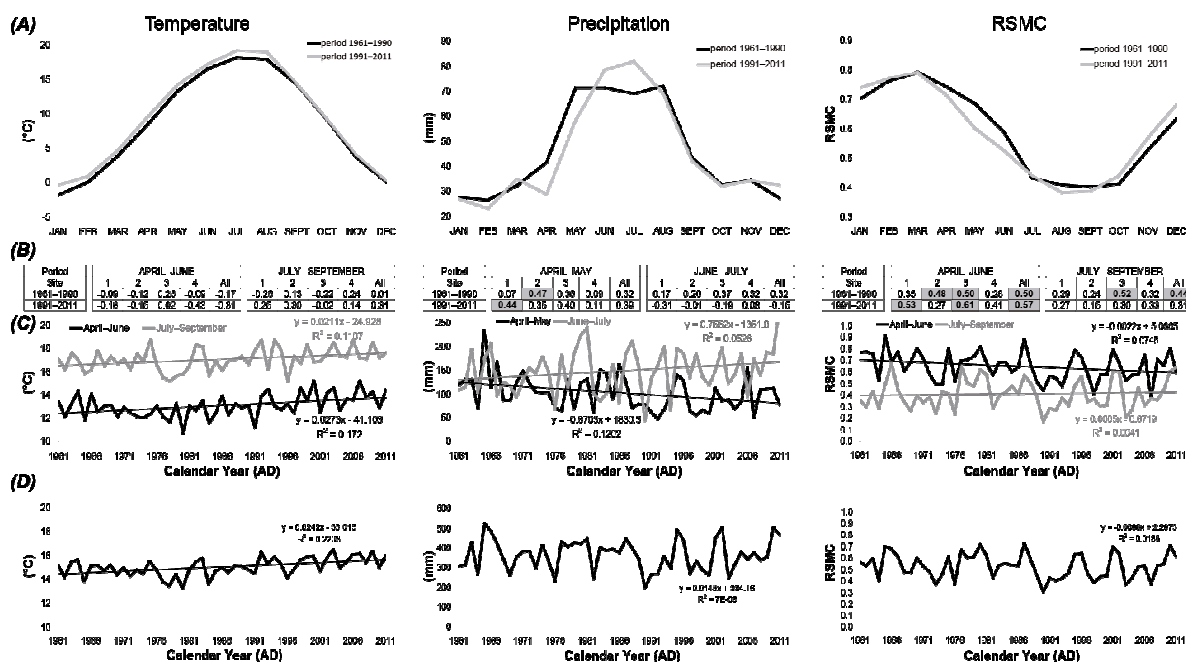


ČLÁNEK I - Fig. 4: Values of correlation coefficients of the site residual index tree-ring chronologies with T_{avg} = average monthly temperature, $Precipitation$ = monthly precipitation, $RSMC$ = relative saturation of soil profile by soil water from top to 130 cm of depth and $Sradi$ = global radiation sums from previous April to September of the current year and the period July–September of the previous year (JUL-SEP) and the period March–May (Mar-May) and June–August (Jun-Aug) of the current year for 1961–2011. Values highlighted in black are statistically significant ($\alpha = 0.05$)

The negative influence of the global radiation on tree-ring width prevails at all sites during the entire period analysed. The importance of spring months of the current year (mainly March and April) is common for all sites. Significant correlations with previous summer and autumn months were proved only at some sites (summer – sites 3 and 4, and autumn – sites 1, 2 and 3).

Distinct changes in trends of average monthly temperatures and precipitation in the period 1961–2011 have been revealed (Fig. 5). The average monthly temperatures increased in the first eight months of the year, with the most pronounced increase in January by 1.44 °C. The spring (April–June) and the summer (July–September) trends are similar. The considerable reduction of spring precipitation (mainly April and May)

is highly important for the growth of oaks. By contrast, a high rise of summer precipitation was observed especially in June and July. In consequence of the changed precipitation distribution, also the RSMC considerably decreased at the end of spring (May). The summer values of RSMC have no significant trend (Fig. 5). The changes in global radiation were negligible and they are not presented in Fig. 5.



ČLÁNEK I - Fig. 5: (A) The progress of monthly temperature, precipitation and relative soil moisture content (RSMC in WMO (World Meteorological Organization) normal period 1961–1990 (black line) and 1991–2011 (grey line). (B) Mean temperatures, mean RSMC and sum precipitation for selected periods were correlated with the site chronologies. Statistically significant correlation coefficients are highlighted ($\alpha = 0.05$). (C) Temporal trends of the analysed climatic parameters for the selected periods. (D) Temporal trends of the analysed climatic parameters for the whole vegetation period.

The decline in spring precipitation leading to the reduction of RSMC resulted in a higher significance of the relationships between April–May precipitation (especially site 1) and April–June RSMC (all sites except 2) with the tree-ring width (Fig. 5). By contrast, the correlation coefficients of June–July precipitation changed from positive to negative and the correlation coefficients of July–September RSMC decreased.

8.3 DISCUSSION

Some of the ascertained correlations between climatic parameters and tree-ring width are well known. The positive significant correlations between precipitation and tree-ring width or between RSMC and tree-ring width predominate (e.g. Mérian et al. 2011;

Petráš and Mecko 2011; Michelot et al. 2012; Gillner et al. 2013; Sanders et al. 2014; Rybníček et al. 2015). A negative effect of summer temperatures on tree-ring width has been reported in other European areas, such as France (Michelot et al., 2012), Germany (Gillner et al. 2013), Slovakia (Petráš and Mecko 2011), and Austria, Hungary, Slovenia, Croatia and Serbia (Čufar et al. 2014). Petráš and Mecko (2011) also determined a positive effect of precipitation at the end of the previous growing season on radial growth. The positive significant correlations with October precipitation were also found in many European studies (Friedrichs et al. 2009; Mérian and Lebourgeois 2011; Petráš and Mecko 2011; Michelot et al. 2012; Gillner et al. 2013). Oaks can profit from higher temperatures and sufficient precipitation in the previous October. The photosynthetic activity ending in the October and the character of weather determine speed of leaf colour changes and the term of leaf fall. Barbaroux and Bréda (2002) showed for sessile oak in France that October is very important for the translocation of sugar and starch to the main stem, i.e. for the final carbohydrate reserve in stem wood. The higher temperature and sufficient precipitation enable later leaf fall and higher final non-structural carbohydrate concentration. The significance of water available for oaks from the soil in autumn of the previous year has been confirmed by the positive significant correlations between RSMC and tree-ring width for October, November, and December (Fig. 4). Significant negative correlations with radiation sums in November and December (Fig. 4) show that earlywood formation can be affected by soil moisture loss caused by higher evaporation on bright days without snow cover after the leaves fall (Vanassche, 2011). The bigger global radiation sums lead to smaller water supply in spring.

The correlation between tree-ring width index and RSMC or radiation sum probably demonstrates the positive influence of a sufficient water supply for the optimal development of foliage at the beginning of the growing season (Lebourgeois et al. 2003).

There were other significant relations between RSMC and tree-ring width at the following time periods; it was the case of the dry site 3 for all months until autumn, in the case of the other sites for some of the months. As regards precipitation, significance has been mainly observed for the precipitation sums in spring (March–May) at all sites, except site 4. Probable reasons for the higher values of correlation coefficients of RSMC when compared to precipitation are the higher evaporation in higher

temperatures and a high variability of rainfall intensity. The same monthly precipitation sum may be caused by numerous light and moderate rains or only several heavy rains. The surface runoff in both situations will differ as different amounts of water will be supplied to the soil profile.

Growth response of site 1 with *Quercus robur* is similar to site 2 with *Quercus petraea*; both of these sites have more similar correlations than site 2 compared to site 3 with *Quercus polycarpa*, *Quercus dalechampii*, and site 4 with *Quercus petraea* (Fig. 4). According to some of the published studies, *Quercus robur* had a greater response to climate, especially to precipitation, than *Quercus petraea* (e.g. Friedrichs et al. 2009); other studies claim the opposite, that *Quercus petraea* is the more sensitive species (e.g. Popa et al. 2013; Sanders et al. 2014). This discrepancy additionally leads us to the understanding that the differences between sites are more important than the difference between oak species. From the perspective of site differences, mainly the considerably stronger growth response to RSMC at site 3, i.e. the site with dry shallow soil on a steep south-eastern slope, is notable. The majority of trees at this site have small tree-ring width variability (Tab. 2) and the tree-ring width is significantly affected by RSMC in all months starting from previous August to September of the current year (Fig. 4). The explanation by site characteristics is also applicable to the significant positive correlation between temperature and tree-ring width at site 4 in March (Fig. 4). The site has a north exposition, it is a valley bottom where cool water flows and it is a location prone to temperature inversion. The March temperatures can thus be limiting for the beginning of ring formation.

In spite of the above listed differences of response to climatic parameters, the TRW chronologies of the individual sites manifest high values of statistical indicators (t-tests and Gleichläufigkeit). Most of the pointer years found in TRW chronologies also coincide at the different sites (Fig. 3). The results show that the similarity of the chronologies at the regional level is mainly dependent on the oak species and site conditions, and less on the distance of the stands. Lower correlations were found for nearby sites 3 and 4 (distance app. 2 km) than for more distant sites 2 and 4 (app. 10 km). This relationship can be caused either by the same oak species at the sites (both *Quercus petraea*) and a different species at site 3 (*Quercus polycarpa* and *Quercus dalechampii*), or by the more extreme conditions at site 3. Site 3 differs by a stronger dependence of radial growth on soil moisture when compared with the other sites. The

species difference has likely also caused the lowest resemblance in the TRW chronology of site 1 (*Quercus robur*) with the other TRW chronologies; its distance is approximately the same as in the case of sites 2 and 3 or 4. Despite all these differences, the achieved values of statistical indicators are very high (Fig. 3) and totally applicable for the purposes of dendrochronological dating and creation of TRW chronologies.

The observed climate trends, i.e., the precipitation decrease in the first half and the increase in the second half of the growing season (Fig. 5), were reported from other parts of the Czech Republic in the last twenty years (Možný et al. 2009, 2012; Bauer et al. 2010; Trnka et al. 2014). As a consequence of the decreased April and May monthly precipitation sums, the significance of spring rainfalls and spring RSMC increased after 1990 (except site 2). Our results show that the observed changes in the climate seriously affect the climate response of tree rings. The longterm trends in the frequency of drought-conducive circulation patterns have contributed to a change in the duration and intensity of drought episodes, especially during the early growing season (Trnka et al. 2009a) and at drier sites. This is very important for the radial growth of *Quercus* spp. as well as for the net primary production of Central European forests as a whole. As a number of studies predicted, increased drying during the growing seasons all over Central Europe (e.g. Seneviratne et al. 2006; Olesen et al. 2012; Trnka et al. 2013) might lead to an increased frequency of years during which the growth will be negatively affected. In fact, tree mortality and forest decline due to severe drought events have been observed in forest populations in Southern Europe (e.g. Affolter et al. 2010) but also in Belgium (Kint et al. 2012), Switzerland (Rigling et al. 2013) and the pre-Alps in France (e.g. Charru et al. 2010). This, together with other abiotic and biotic risks reported by IPCC: Climate Change 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change; [cited 2014 Jan 18]. Available from: <http://ipcc-wg2.gov/AR5/press-events/press-kit>, is likely to constitute a major challenge for forestry in Europe.

The high resemblance of the stands analysed supports the present day practice i.e. that millenia-long oak chronologies (e.g. Tegel et al. 2010; Büntgen et al. 2011; Kolář et al. 2012a) can contain any species from the group of ‘white oaks’. This approach is partly forced by the fact that the wood of these species is hardly distinguishable at the macroscopic level and distinction is also difficult at the microscopic level. Differentiation of *Quercus robur* and *Quercus petraea* has also been dealt with by e.g. Feuillat et al. (1997) or Hroš and Vavrčík (2014), but without a clear conclusion. The

methodology of Feuillat et al. (1997) was applied to research into subfossil oak trunks in Tovačov (Kolář et al. 2012b), but the method success rate is around 78% (Feuillat et al. 1997). The method is also highly time consuming and difficult to use for e.g. archaeological wood as its condition often prevents this method application. Oak TRW chronologies are often used for the reconstruction of past climatic conditions (e.g. Büntgen et al. 2010; Tegel et al. 2010; Wilson et al. 2012). There is the question whether the species variability can reduce the climatic signal contained within tree rings. The results achieved indicate that the same species growing at different sites responds differently than two different species growing at similar sites. In addition, TRW chronologies manifest the same growth trends throughout the species and sites.

8.4 CONCLUSIONS

1. At the level of tree-ring width, no significant differences have been found between the particular species and particular sites; by contrast, the particular TRW chronologies manifested a high resemblance.

2. The amount of water available in the soil (RSMC) is the main climate affected limiting factor of radial growth in the conditions of Český kras. The same situation can be expected in other locations of Central Europe. With respect to the ongoing and expected changes in rainfall distribution, the RSMC is clearly a more suitable parameter to evaluate tree growth response to drought than precipitation sums.

3. The growth response of the particular oak species to climatic factors (correlations) at the same or close locations differed negligibly; in other words, differences caused by oak species cannot be clearly identified. On the other hand, the effect of the site has proved to be essential. Mainly in the case of moisture extreme sites (fast runoff, low groundwater levels, low soil water holding capacity), we can expect that radial growth will be more responsive to the climate drivers during extreme years.

4. After 1990 the distribution of rainfalls has changed within the growing season at the expense of spring (April, May) rainfalls.

5. The significance of RSMC spring values for oak growth has increased and the significance of summer values for oaks has decreased as a result. If this trend continues, we can expect the reduction of radial growth.

8.5 ACKNOWLEDGEMENTS

The paper was prepared within the European Social Fund, the state budget of the Czech Republic – “Project Indicators of Tree Vitality” (reg. no. CZ.1.07/2.3.00/20.0265); the Czech Republic Grant Agency through the grant numbered 13-04291S; with funding from Ministry of Education, Youth and Sports of CR within the National Sustainability Program I (NPU I), grant number LO1415 and of the KONTAKT project LD13030 and the “Frameworks and possibilities of forest adaptation measures and strategies connected with Climate change” (no. EHPCZ02-OV-1-019-2014) and project IGA 28/2014.

8.6 REFERENCES

- AFFOLTER P., BÜNTGEN U., ESPER J., RIGLING A., WEBER P., LUTERBACHER J., FRANK D. (2010) Inner Alpine conifer response to 20th century drought swings. *European Journal of Forest Research* 129: 289–298
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES SMITH D. (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome* 300(9): D05109
- ALLEN C.D., MACALADY A.K., CHENCHOUNI H., BACHELET D., MCDOWELL N., VENNETIER M., KITZBERGER T., RIGLING A., BRESHEARS D.D., HOGG E.H., GONZALEZ P., FENSHAM R., ZHANG Z., CASTRO J., DEMIDOVA N., LIM J.H., ALLARD G., RUNNING S.W., SEMERCI A., COBY N. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660–684
- BAILLIE M.G.L., PILCHER J.R. (1973) A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33: 7–14
- BARBAROUX C., BRÉDA N. (2002) Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology* 22: 1201–1210
- BAUER Z., TRNKA M., BAUEROVÁ J., MOŽNÝ M., ŠTĚPÁNEK P., BARTOŠOVÁ L., ŽALUD Z. (2010) Changing climate and the phenological response of great tit and collared flycatcher populations in floodplain forest ecosystems in Central Europe. *International Journal of Biometeorology* 54: 99–111

- BIONDI F., WAIKUL K. (2004) DendroClim2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree ring chronologies. *Computers and Geosciences* 30: 303–311
- BOŠELA M., SEDMÁK R., MARUŠÁK R., SEDMÁKOVÁ D., PETRÁŠ R., BARNA M. (2014) Evaluating similarity of radial increments around tree stem circumference of European beech and Norway spruce from Central Europe. *Geochronometria* 41(2): 136–146
- BRÁZDIL R., TRNKA M., DOBROVOLNÝ P., CHROMÁ K., HLAVINKA P., ŽALUD Z. (2009) Variability of droughts in the Czech Republic, 1881–2006. *Theoretical and Applied Climatology* 97: 297–315
- BÜNTGEN U., TROUET V., FRANK D., LEUSCHNER H.H., FRIEDRICHS D., LUTERBACHER J., ESPER J. (2010) Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 29: 1005–1016
- BÜNTGEN U., TEGEL W., NICOLUSSI K., MCCORMICK M., FRANK D., TROUET V., KAPLAN J., HERZIG F., HEUSSNER U., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331: 578–582
- CEDRO A. (2007) Tree-ring chronologies of downy oak (*Quercus pubescens*), pedunculate oak (*Quercus robur*) and sessile oak (*Quercus petraea*) in the Bielinek Nature Reserve: Comparison of the climatic determinants of tree-ring width. *Geochronometria* 26(1): 39–45
- CHARRU M., SEYNAVE I., MORNEAU F., BONTEMPS J. (2010) Recent changes in forest productivity: an analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management* 260: 864–874
- ČUFAR K., GRABNER M., MORGOS A., MARTINEZ DEL CASTILLO E., MERELA M., DE LUIS M. (2014) Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees* 28(5): 1267–1277
- DOSTÁL J. (1989) Nová květena ČSSR [New flora in the ČSSR]. *Praha: Academia*
- ECKSTEIN D., BAUCH J. (1969) Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88: 230–250

- FEUILLAT F., DUPOUEY J.L., SCIAMA D., KELLER R. (1997) A new attempt at discrimination between *Quercus petraea* and *Quercus robur* based on wood anatomy. *Canadian Journal of Forest Research* 27(3): 343–351
- FRIEDRICHS D., BÜNTGEN U., ESPER J., FRANK D., NEUWIRTH B., LÖFFLER J. (2009) Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. *Tree Physiology* 29: 39–51
- FRITTS H.C., MOSIMANN J.E., BOTTORFF C.P. (1969) A Revised Computer Program for Standardizing Tree – Ring Series. *Tree Ring Bulletin* 29: 15–20
- FRITTS H.C. (1976) Tree ring and climate. *Academic Press. London, New York, San Francisco*, pp. 567
- FRITTS H.C., SWETNAM T.W. (1989) Dendroecology Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research* 19: 111–188
- GILLNER S., VOGT J., ROLOFF A. (2013) Climatic response and impacts of drought on oaks at urban and forest sites. *Urban Forestry and Urban Greening* 12(4): 597–605
- GRIČAR J. (2010) Xylem and phloem formation in sessile oak from Slovenia in 2007. *Wood Research* 55(4): 15–22
- GRISSINO-MAYER H.D., HOLMES R., FRITTS H.C. (1992) International tree–ring data bank program library. Version 1.1. *Laboratory of Tree–Ring Research, University of Arizona, Tucson*
- HLAVINKA P., TRNKA M., BALEK J. (2011) Development and evaluation of the SoilClim model for water balance and soil climate estimates. *Agricultural Water Management* 98(8): 1249–1261
- HLAVINKA P., TRNKA M., SEMERÁDOVÁ D., DUBROVSKÝ M., ŽALUD Z., MOŽNÝ M. (2009) Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 431–442
- HOLMES R.L., ADAMS R.K., FRITTS H.C. (1986) Tree–Ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin with Procedures Used in the Chronology Development Work Including Users Manuals for Computer programs Cofecha and Arstan. – Chronology Series VI. *Laboratory of Tree – Ring Research, University of Arizona, Tuscon, AZ*

- HOLLSTEIN E. (1980) Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte. *Trierer Grabungen und Forschungen 11. Mainz am Rhein*
- HORÁČEK P., ŠLEZINGEROVÁ J., GANDELOVÁ L. (2003) Analysis of cambial activity and formation of wood in *Quercus robur* L. under conditions of a floodplain forest. *Journal of Forest Science* 49(9): 412–418
- HROŠ M., VAVRČÍK H. (2014) Comparison of earlywood vessel variables in the wood of *Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. growing at the same site. *Dendrochronologia* 32(3): 284–289
- JOVANOVIĆ B. (2000) Dendrologija. Belgrade: Belgrade University.
- KINT V., AERTSEN W., CAMPIOLI M., VANSTEENKISTE D., DELCLOO A., MUYS B. (2012) Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901–2008. *Climatic Change* 115: 343–363
- KOBLÍŽEK J. (1990) *Quercus* L.: Květena ČR 2 (ed. by S. Hejný and B. Slavík) *Academia, Praha*, pp. 21–35
- KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M., KYNCL T. (2012a) Oak chronology development in the Czech Republic and its teleconnection on a European scale. *Dendrochronologia* 30(3): 243–248
- KOLÁŘ T., GRYC V., RYBNÍČEK M., VAVRČÍK H. (2012b) Anatomical Analysis and Species Identification of Subfossil Oak Wood. *Wood Research* 57(2): 251–264
- KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M., TEGEL W. (2013) Dendrochronological evidence of cockchafer (*Melolontha* sp.) outbreaks in subfossil tree-trunks from Tovačov (CZ Moravia). *Dendrochronologia* 31(1): 29–33
- LEBOURGEOIS F., COUSSEAU G., DUCOS Y. (2003) Étude d'une chênaie sessiliflore exceptionnelle: la futaie des Clos (Sarthe). *Revue forestière française* 4: 333–346
- MAGIC D. (2006) *Quercus* L.: Flóra Slovenska V/3 (ed. by K Goliášová K and N Micháľková) Veda, Bratislava. Matyas V. 1971. Short taxonomic review of the oaks of Hungary. *Erdészeti Kutatások Budapest* 67: 55–68
- MÉRIAN P., BONTEMPS J.D., BERGÈS L., LEBOURGEOIS F. (2011) Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecology* 212(11): 1855–1871

- MÉRIAN P., LEBOURGEOIS F. (2011) Size-mediated climate–growth relationships in temperate forests: A multi-species analysis. *Forest Ecology and Management* 261(8): 1382–1391
- MICHELOT A., BRED A N., DAMESIN C., DUFRENE E. (2012) Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 265: 161–171
- MOŽNÝ M., TOLASZ R., NEKOVÁŘ J., SPARKS T., TRNKA M., ŽALUD Z. (2009) The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 913–919
- MOŽNÝ M., BRÁZDIL R., DOBROVOLNÝ P., TRNKA M. (2012) Cereal harvest dates in Czech Republic between 1501 and 2008 as proxy for March–June temperature reconstruction. *Climatic Change* 110: 801–821
- OLESEN J.E., BØRGESEN C.D., ELSGAARD L., PALOSUO T., RÖTTER R.P., SKJELVÅG A.O., PELTONEN-SAINIO P., BÖRJESSON T., TRNKA M., EWERT F., SIEBERT S., BRISSON N., EITZINGER J., VAN ASSELT E.D., OBERFORSTER M., VAN DER FELS-KLERX H.J. (2012) Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food Additive and Contaminants* 29(10): 1527–42
- PARRY M.L. (2000) Assessment of Potential Effects and Adaptation for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project. *Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom*, pp.320
- PETRÁŠ R., MECKO J. (2011) Effect of climatic factors on the dynamics of radial increments of Norway spruce, European beech and Sessile oak. *Journal of Forest Science* 57(7): 293–302
- POPA I., LECA S., CRĂCIUNESCU A., SIDOR C., BADEA O. (2013) Dendroclimatic Response Variability of *Quercus* species in the Romanian Intensive Forest Monitoring Network. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 41(1): 326–332
- POŽGAJ J., HORVÁTHOVÁ J. (1986) Variabilita a ekológia druhov rodu *Quercus* L. na Slovensku. *Bratislava, Veda*, pp. 151
- RIGLING A., BIGLER C., EILMANN B., FELDMEYER-CHRISTE E., GIMMI U., GINZLER C., GRAF U., MAYER P., VACCHIANO G., WEBER P., WOHLGEMUTH T., ZWEIFEL R.,

- DOBBERTIN M. (2013) Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Global Change Biology* 19: 229–240
- ROZAS V. (2005) Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. *Annals of Forest Science* 62: 209–218
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., KOLÁŘ T., ŽID T. (2010a) Radial Growth and Health Condition of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) Stands in Relation to Climate (Silesian Beskids, Czech Republic). *Geochronometria* 36(1): 9–16
- RYBNÍČEK M., KOŇAS P., KOLÁŘ T. (2010b) The Benefits of Tree-Ring Curves Detrending for Dating Archaeological Wood. *Geochronometria* 35: 85–90
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., HADAŠ P., KOLÁŘ T., ŽID T. (2012a) Dendrochronological Analysis and Habitual Stress Diagnostic Assessment of Norway Spruce (*Picea abies*) Stands in the Drahany Highlands. *Wood Research* 57(2): 189–206
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., ŽID T., KOLÁŘ T. (2012b) Growth Responses of *Picea abies* to Climate in the Central Part of the Českomoravská Upland (Czech Republic). *Dendrobiology* 68(1): 21–30
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., ŽID T., KOLÁŘ T., TRNKA T., BÜNTGEN U. (2015) Exploring Growth Variability and Crown Vitality of Sessile Oak (*Quercus petraea*) in the Czech Republic. *Geochronometria* 42(1): 17–27
- SANDERS T.G.M., PITMAN R., BROADMEADOW M.S.J. (2014) Species-specific climate response of oaks (*Quercus* spp.) under identical environmental conditions. *iForest* 7: 61–69
- SENEVIRATNE S.I., LUTHI D., LITSCHI M., SCHAR C. (2006) Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443: 205–209
- ŠÍMA P. (2007) Květena východní části Českého krasu. *Bohemia centralis* 28: 117–202
- ŠMELKO Š., WOLF J. (1977) Štatistické metódy v lesníctve. *Príroda, Bratislava*
- ŠTĚPÁNEK P. (2007) ProClimDB – software for processing climatological datasets. CHMI, regional office Brno. Available from: <http://www.climahom.eu/ProcData.html>
- TEGEL W., VANMOERKERKE J., BÜNTGEN U. (2010) Updating historical tree-ring records for climate reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 29: 1957–1959
- THOMAS F.M., BLANK R., HARTMANN G. (2002) Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32: 277–307

- TOLASZ R. (2007) Atlas podnebí Česka. *Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, Praha.*
- TRNKA M., KYSELÝ J., MOŽNÝ M., DUBROVSKÝ M. (2009a) Changes in Central-European soil-moisture availability and circulation patterns in 1881–2005. *International Journal of Climatology* 29: 655–672
- TRNKA M., DUBROVSKÝ M., SVOBODA M., SEMERÁDOVÁ D., HAYES M., ŽALUD Z., WILHITE D. (2009b) Developing Regional Drought Climatology for the Czech Republic. *International Journal of Climatology* 29: 863–883
- TRNKA M., OLESEN J.E., KERSEBAUM K.C., SKJELVAG A.O., EITZINGER J., SEGUIN B., PELTONEN-SAINIO P., RÖTTER R., IGLESIAS A., ORLANDINI S., DUBROVSKY M., HLAVINKA P., BALEK J., ECKERSTEN H., CLOPPET E., CALANCA P., GOBIN A., VUCETIC V., NEJEDLIK P., KUMAR S., LALIC B., MESTRE A., ROSSI F., KOZYRA J., ALEXANDROV V., SEMERADOVA D., ZALUD Z. (2011) Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology* 17(7): 2298–2318
- TRNKA M., BRÁZDIL R., OLESEN J.E., EITZINGER J., ZAHRADNÍČEK P., KOČMÁNKOVÁ E., DOBROVOLNÝ P., ŠTĚPÁNEK P., MOŽNÝ M., BARTOŠOVÁ L., HLAVINKA P., SEMERÁDOVÁ D., VALÁŠEK H., HAVLÍČEK M., HORÁKOVÁ V., FISCHER M., ŽALUD Z. (2012) Could the changes in regional crop yields be a pointer of climatic change? *Agricultural and Forest Meteorology* 166: 62–71
- TRNKA M., KERSEBAUM K.C., EITZINGER J., HAYES M., HLAVINKA P., SVOBODA M., DUBROVSKÝ M., SEMERÁDOVÁ D., WARDLOW B., POKORNÝ E., MOŽNÝ M., WILHITE D., ŽALUD Z. (2013) Consequences of climate change for the soil climate in Central Europe and the central plains of the United States. *Climatic Change* 120: 405–418
- TRNKA M., BRÁZDIL R., MOŽNÝ M., ŠTĚPÁNEK P., DOBROVOLNÝ P., ZAHRADNÍČEK P., BALEK J., SEMERÁDOVÁ D., DUBROVSKÝ M., HLAVINKA P., EITZINGER J., WARDLOW B., SVOBODA M., HAYES M., ŽALUD Z. (2015) Soil moisture trends in the Czech Republic between 1961 and 2012. *International Journal of Climatology* 35: 3733–3747
- VANASSCHE J. (2011) Sap flow dynamics in sessile oak during drought stress events in the Czech Republic: 1976–1977 and 2007–2008 [dissertation]. *Gent: Universiteit Gent.*

- VIEWEGH J., KUSBACH A., MIKESKA M. (2003) Czech forest ecosystem classification. *Journal of Forest Science* 49(2): 85–93
- WAŽNY T., LORENTZEN B., KÖSE N., AKKEMIK Ü., BOLTRYK Y., GÜNER T., KYNCL J., KYNCL T., NECHITA C., SAGAYDAK S., VASILEVA J.K. (2014) Bridging the Gaps in Tree-Ring Records: Creating a High-Resolution Dendrochronological Network for Southeastern Europe. *Radiocarbon* 56(4): 39–50
- WIGLEY T.M.L., BRIFFA K.R., JONES P.D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213
- WILSON R., MILES D., LOADER N.J., MELVIN T., CUNNINGHAM L., COOPER R., BRIFFA K. (2012) A millennial long March-July precipitation reconstruction for southern-central England. *Climate Dynamics* 40(3–4): 997–1017

**RECENT GROWTH COHERENCE IN LONG-TERM OAK
(*QUERCUS* SPP.) RING WIDTH CHRONOLOGIES IN THE
CZECH REPUBLIC**

DOBROVOLNÝ, P., KOLÁŘ, T., RYBNÍČEK, M., BÜNTGEN, B., TRNKA, M., BRÁZDIL, R.,
STACHOŇ, Z., **PROKOP, O.** (2016)

(CLIMATE RESEARCH - SPECIAL, IN PRESS, DOI 10.3354/cr01402)

**RECENT GROWTH COHERENCE IN LONG-TERM OAK (*QUERCUS* SPP.)
RING WIDTH CHRONOLOGIES IN THE CZECH REPUBLIC**

DOBROVOLNÝ P.^{1,2}, RYBNÍČEK M.^{2,3}, BÜNTGEN U.^{2,4,5}, TRNKA T.^{2,6}, BRÁZDIL R.^{1,2},
STACHOŇ Z.¹, PROKOP O.³, KOLÁŘ T.^{2,3}

¹*Department of Geography, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic*

²*Global Change Research Institute, Czech Academy of Sciences, Bělidla 986/4a, 603 00 Brno, Czech Republic*

³*Department of Wood Science, Mendel University in Brno, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic*

⁴*Swiss Federal Research Institute for Forest, Snow and Landscape WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, Switzerland*

⁵*Oeschger Centre for Climate Change Research, Falkenplatz 16, CH-3012 Bern, Switzerland*

⁶*Department of Agrosystems and Bioclimatology, Mendel University in Brno, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic*

ABSTRACT

Oak ring width measurements compiled from 44 sampling sites throughout the territory of the Czech Republic are analysed for the 1655–2013 period. Measurements taken at all these sites are sorted into ten sub-chronologies on the basis of various environmental factors, such as soil moisture (dry/wet), elevation (low/high), age (young/old), species (*Quercus robur* or *Quercus petraea*), and geographical position (east/west). Several statistical tests are applied to investigate existing significant differences between chronologies over the common period of 1920–2013. Further, the sensitivities of individual chronologies to precipitation are compared. Three tests indicate five pairs of very similar sub-chronologies. Moreover, the growth-response to May–July precipitation totals is very much the same in these sub-chronologies. This analysis demonstrates that, even in the absence of certainty about age structure, species composition and some environmental factors in the earlier parts of oak ring width chronologies, the internal homogeneity of the chronology remains essentially unaffected, and such a lack does not preclude their use in dendroclimatology.

KEY WORDS: tree-ring width chronology, oak species, tree-age structure, site specific conditions, hydroclimate sensitivity, Czech Republic

9.1 INTRODUCTION

Several millennium-long composite tree-ring width (TRW) oak chronologies exist for Europe: Ireland (Pilcher et al. 1984), Poland (Krapiec 2001), Germany (Friedrich 2004), and France (Tegel et al. 2010) among them. A number of recent studies have also highlighted the great palaeoclimatic potential of oak data for reconstruction of precipitation/drought characteristics: Čufar et al. (2008) for Slovenia; Friedrichs et al. (2009a, 2009b) for Germany; Kern et al. (2009) for Hungary; Büntgen et al. (2010, 2011b) for central and western Europe; Cooper et al. (2012) for East Anglia (UK); Wilson et al. (2012) for southern-central England and Sohar et al. (2014) for Estonia.

Long oak TRW chronologies are invaluable sources of information for dating purposes, especially in archaeology (Kolář and Rybníček 2011; Čufar et al. 2015). However, their use for climate reconstruction may be complicated by the fact that they sometimes convey climate signals that appear ambiguous (Büntgen et al. 2008, 2010). Tegel et al. (2010) have indicated certain problems in the use of long oak TRW chronologies for late-Holocene climate reconstructions. These include insufficient knowledge on site specific conditions of historical and sub-fossil woods, fluctuations in sample size, and inadequate coverage of tree-age structure. Severe problems for the strength of climate signal may also arise out of exceptional environmental changes over time, among them high concentrations of atmospheric greenhouse gases in recent decades, levels of biospheric fertilization, changes in forest management and variations in degree of habitat alteration and clearance (Kaplan et al. 2009).

An oak TRW chronology for the territory of the Czech Republic (CZ) has been constructed and systematically updated in the course of recent decades (Kolář et al. 2012). The current version of this chronology provides continuous cover, in adequate sample depth, for the period from AD 761 to the present. It has been used in palaeoclimatology for the analysis of the temporal distribution of wet and dry years (Dobrovolný et al. 2015). Two widespread species, the English oak (*Quercus robur* L.) and the sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.), predominate in Czech oak TRW measurements. In terms of their wood anatomy, the species are far from distinguishable (Schoch et al. 2004). However, the natural habitat of the English oak consists primarily of river valleys at lower altitudes, below 500 m, whereas sessile oak tends towards

higher elevations. As these species often occupy quite different natural habitats, one may assume that their responses to climate conditions differ accordingly.

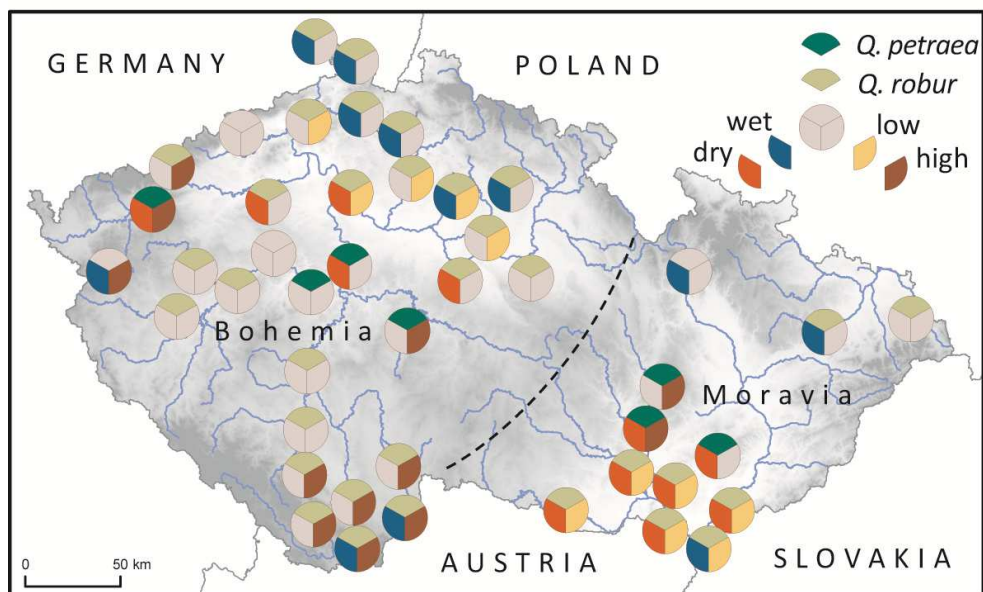
This may present a serious problem, since it is common in palaeoclimatology that the relative proportions of oak species numbers, and sufficient knowledge of site conditions, may only exist in precise form for living trees, just the recent parts of chronologies. The roles of these factors are unknown in the more distant parts of chronologies derived from historical and sub-fossil woods. This introduces additional uncertainties to proxy-based quantitative climate reconstructions and may even preclude the use of such chronologies in palaeoclimatology altogether.

This contribution employs the more recent part of the CZ oak TRW chronology as a benchmark for testing “internal homogeneity”. The samples from all sites are divided into ten specific sub-chronologies based on soil moisture conditions (dry/wet), elevation (low/high), age (young/old), species (*Quercus robur*/*Quercus petraea*), and geographical position (east/west). The main objective of this study is to test whether there are obvious differences between the sub-chronologies.

We hypothesize that the existence of no significant differences between west/east, dry/wet or low/high sub-chronologies demonstrates an “internal homogeneity” in Czech oak TRW chronology and suggest that the full chronology can be employed as a single dataset to represent the past hydroclimate variability on the CZ territory. Further, this analysis addresses the issue of tree-age structure and may also provide an answer to the question as to the degree of significance of problems arising out of the combination of the two main oak species in the chronology.

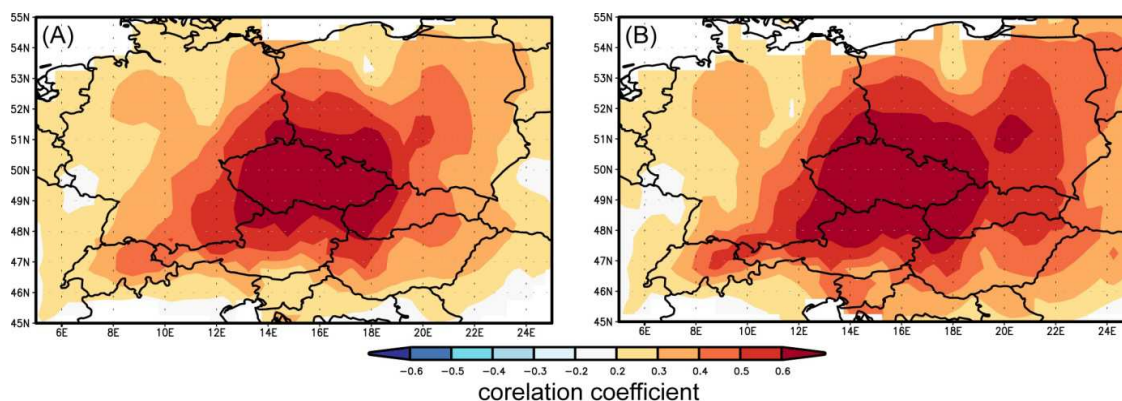
9.2 DATA AND METHODS

The recent part of the CZ oak TRW chronology is used herein, covering the 1655–2013 period. It consists of annually-resolved and absolutely dated TRW measurements from 1283 randomly-sampled living oaks of various ages (22–359 years), taken at 44 sampling sites in the Czech Republic (area 79,000 km²) between 1998 and 2014, especially during 2012–2014 (Fig. 1).



ČLÁNEK II - Fig. 1: Spatial distribution of 44 sampling sites and their distribution in terms of west/east, *Q. robur*/*Q. petraea*, dry/wet and high/low-altitude oak TRW sub-chronologies over the territory of the Czech Republic; dashed line marks boundary between west and east chronologies

Most of samples come from two lowland regions: Bohemia (western CZ) and Moravia-Silesia (eastern CZ), regions of natural oak forest occurrence. The two regions are characterized by relatively warm (mean annual temperature 9–10°C) and dry (annual precipitation 450–500 mm, maximum in summer) climate conditions. Precipitation totals in these regions are significantly lower than evapotranspiration (Dobrovolný et al. 2015). Thus oak growth is mainly limited by water shortage and therefore sensitive to hydroclimate changes. From point of view of moisture regime the CZ territory is quite homogeneous as follows from spatial correlation analysis comparing Czech May–July precipitation totals and May–July Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index for one month (SPEI1) with those characteristics from European gridded databases (Fig. 2). The two maps indicate that mean CZ series of precipitation and SPEI are significantly representative for the whole CZ territory.



ČLÁNEK II - Fig. 2: Spatial correlations between (A) May–July Czech precipitation series (Brázdil et al. 2012) and CRU TS3.23 gridded precipitation (Harris et al. 2013) and (B) May–July Czech SPEI-1 (Brázdil et al. 2015) and gridded CSIC SPEI drought index (Vicente-Serrano et al. 2010) for the 1901–2000 period

In order to investigate individual environmental factors, the whole dataset was first divided into two sub-chronologies. One was compiled from samples collected at localities where the English oak predominates, while the other came from sites where the sessile oak is in the clear majority. A detailed map of the CZ distribution of the two species in 2014 was used for discrimination. Site chronologies from the areas in which the species co-exist equally were not further considered. Thus two species-based series (*Quercus robur* and *Quercus petraea*) were obtained and their differences tested for mean segment length (MSL), average growth rate (AGR), mean sensitivity and autocorrelation structure. Mean sensitivity indicates if the series is useful for cross-dating or responsive to climate (Bunn et al. 2013). A similar approach was adopted as that for the four other factors (Fig. 1). Sub-chronologies were compiled for Bohemia (“west”) and Moravia-Silesia (“east”). The Bohemian-Moravian Highlands were considered the boundary limit, since oak occurs only sparsely in them. Moreover, from the phytogeographical perspective, the western part of CZ is part of the Hercynian Region while the eastern part is related to the Pannonian Basin (Chytrý et al. 2001).

Based on the relative availability of soil water, on mean elevation and on mean tree-age data, the sampling sites were ranked in ascending order. Only site chronologies belonging to the lower and upper quartiles were used for compilation of specific chronologies: “wet” and “dry” according to soil water content (<62 mm and >74 mm for lower and upper quartiles respectively); “high” and “low” by altitude (<245 m and >430 m for the lower and upper quartiles respectively); and finally “young” and “old” according to mean age (<80 years and >118 years for lower and upper quartiles

respectively). The remaining site chronologies, belonging to the second and third quartiles, were excluded from further analysis.

A total of ten specific sub-chronologies for raw oak TRW measurements were obtained – five pairs according to specific factors (above) and one from all data in addition. The expressed population signal (EPS; Wigley et al. 1984) and inter-series correlation (R_{bar}) were calculated to assess the quality of each chronology. Moreover, the degree of similarity between the sub-chronologies was addressed by the statistical metrics frequently used in dendrochronological dating, such as T-test after Baillie and Pilcher (1973), further TPB and T-test after Hollstein (1980), further THO, coefficient of agreement (“Gleichläufigkeit”; Eckstein and Bauch 1969) and Date Index 1 (Knibbe 2004). When the tree-ring series overlap by at least sixty years, the critical value of Student’s t-distribution, at $p = 0.001$ level of significance, is 3.460 (Šmelko and Wolf 1977). As well as direct comparison between individual pairs of sub-chronologies, possible differences in sensitivity to precipitation were also examined. For that purpose, sub-chronologies of raw oak TRW measurement series were first standardized in order to suppress non-climatic factors, as below.

Negative exponential curves together with cubic smoothing splines with a 50% frequency response cut-off at 60 and 120 years were used for detrending to remove age-related growth trends. TRW indices were calculated as residuals from estimated growth curves after applying an adaptive power transformation to the raw measurement series (Cook and Peters 1997). The final oak TRW chronologies from each of the three detrending techniques were calculated using robust bi-weighted means. All three chronology versions (standard, residual and ARSTAN) generated from ARSTAN software (Cook and Krusic 2005) were considered. The first-order autocorrelation (AC1) was calculated for all nine, slightly different, variants of each sub-chronology and for the mean CZ precipitation series (Brázdil et al. 2012) that was used as a target. A suitable detrending technique was chosen, based on the highest similarity of autocorrelation structure between proxy and climate data. Very low values of precipitation AC1 correspond to a residual chronology generated from detrending by 120-year spline function.

Residual index tree-ring chronology (TRWI) was used to calculate any correlation between radial increments and precipitation in DendroClim2002 software (Biondi and Waikul 2004) for the 1920–2013 period. In this period, all ten specific sub-chronologies

provided a sufficient number of samples and their quality evaluated by EPS also proved acceptable (EPS >0.85). Pearson’s correlation coefficients were calculated for the seasonal window from April of the previous year until September of the year of tree-ring formation (“the given year”), i.e. for a period of 18 months. The climate in this interval has the highest influence on the radial increment of oak in central Europe (Horáček et al. 2003; Gričar 2010; Rybníček et al. 2015, 2016).

9.3 RESULTS

The basic characteristics of ten oak TRW sub-chronologies and the chronology for all data are summarized in Table 1. All the chronologies are well replicated by at least 296 TRW series (“wet” chronology). Cambial age expressed by mean segment length (MSL) of all TRW records varies from 64-year (“young”) to 136-year (“old”). Average

ČLÁNEK II - Tab. 1: Characteristics of raw TRW chronologies: MSL – mean segment length; AGR – average growth rate; SD – standard deviation; MS – mean sensitivity; AC1 – first-order autocorrelation; Rbar – mean inter-series correlation (calculated in COFECHA; Grissino-Mayer 2001); EPS – mean expressed population signal.

TRW chronology	Start year	End year	Series	MSL (year)	AGR (mm/year)	SD	MS	AC1	Rbar	EPS
dry	1655	2013	401	107	1.625	0.671	0.239	0.683	0.527	0.93
wet	1826	2014	296	88	1.869	0.795	0.255	0.643	0.434	0.95
high	1655	2013	416	109	1.745	0.722	0.239	0.684	0.485	0.86
low	1841	2013	428	101	1.837	0.801	0.244	0.683	0.429	0.98
old	1655	2014	347	136	1.478	0.686	0.239	0.716	0.455	0.88
young	1919	2014	311	64	2.207	0.832	0.255	0.585	0.416	0.98
<i>Q. petraea</i>	1655	2013	351	117	1.493	0.644	0.243	0.684	0.524	0.93
<i>Q. robur</i>	1750	2014	839	97	1.949	0.823	0.244	0.671	0.412	0.85
west	1655	2013	721	102	1.797	0.788	0.252	0.665	0.448	0.88
east	1826	2014	562	100	1.776	0.716	0.236	0.675	0.494	0.98
all	1655	2014	1283	101	1.788	0.757	0.245	0.670	0.436	0.89

growth rate (AGR) ranges from 1.478 mm/year (“old”) to 2.207 mm/year (“young”). MSL and AGR parameters show high similarities between western and eastern chronologies. However, statistically significant differences were disclosed between the remainder of the TRW sub-chronologies, with the highest of them between “old” and “young” chronologies (MSL $t = 44.61$, $p < 0.01$; AGR $t = 14.16$, $p < 0.01$). The least, but still statistically significant, difference appeared between AGRs for “low” and “high” chronologies ($t = 2.01$, $p < 0.05$). Compared to the *Quercus petraea* chronology, the *Quercus robur* chronology displays lower MSL, higher AGR and especially higher variability expressed as standard deviation. Mean sensitivity is comparable for all sub-

chronologies, as are first-order autocorrelations, except for “young/old” TRW series. The “old” chronology has considerably higher values, and the “young” chronology lower, compared with AC1 of the chronology compiled from all TRW series. The inter-series correlation (R_{bar}) and the expressed population signal (EPS) indicate robust signal strength. Mean R_{bar} and mean EPS values are at least 0.41 and 0.85 respectively for the full length of all sub-chronologies.

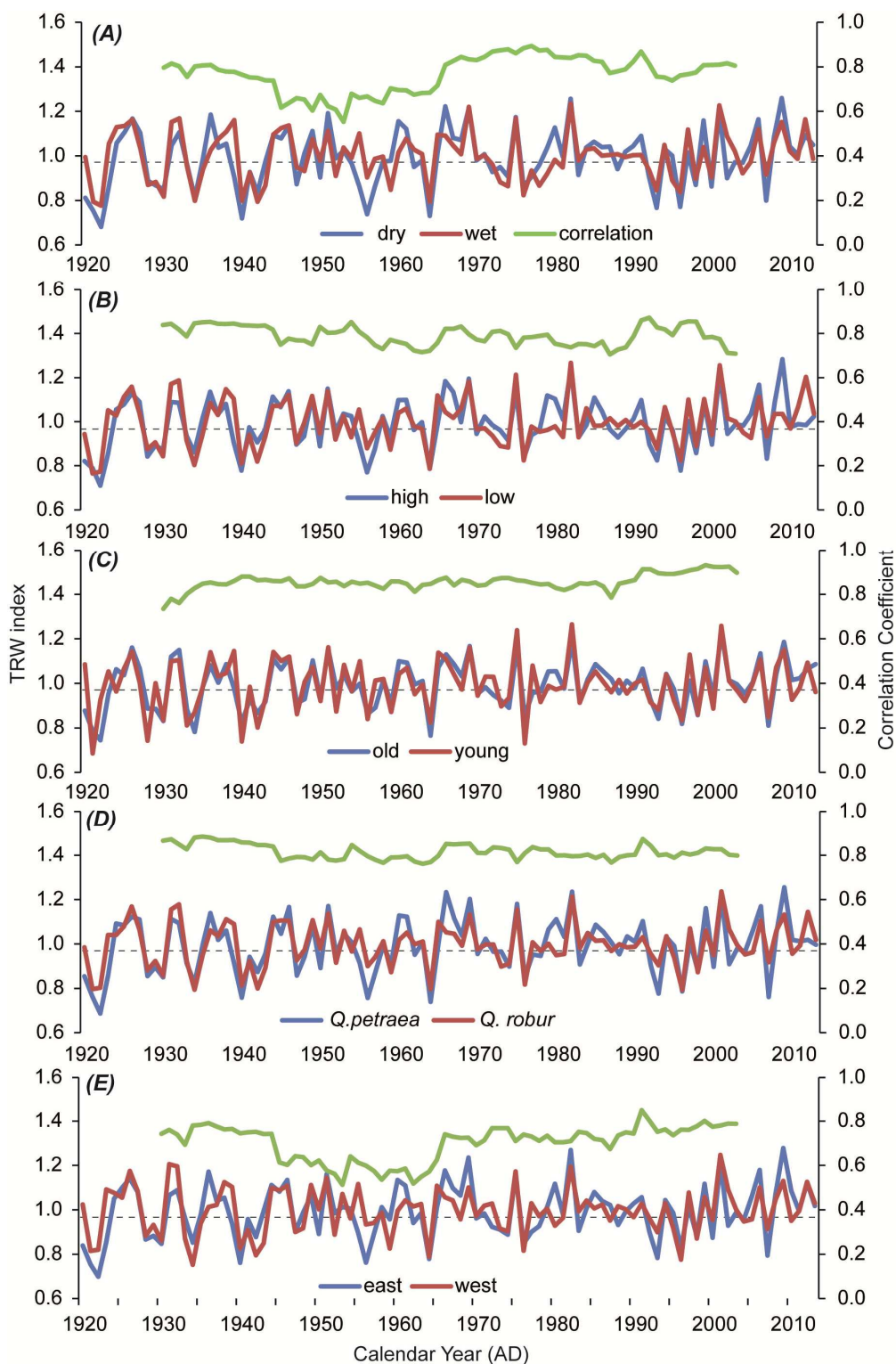
Direct comparison of the raw TRW measurements in all 10 sub-chronologies was made for the common period (1920–2013), of comparable data quality and quantity. The common period was also chosen because the TBP and THO test statistics employed are influenced by an overlap of tree-ring series. T-test (both TBP and THO) values ranged from 9.0 to 15.0 (Table 2). The t-tests markedly exceed threshold, which demonstrates a high degree of similarity between sub-chronologies. The coefficient of agreement also gives a significant relationship between all pairs. Date index 1, calculated as a combination of all three previous statistical metrics, displays the highest similarity between *Quercus petraea* and *Quercus robur* chronologies (511). On the other hand, the lowest correlations appeared between the “dry/wet” and “high/low” pairs (335).

ČLÁNEK II - Tab. 2: Coherence of raw TRW chronologies over a common period (1920–2013) expressed by TBP: T-value after Baillie and Pilcher (1973); THO: T-value after Hollstein (1980); GL: Gleichläufigkeit (“coefficient of agreement”) (Eckstein and Bauch 1969); DI1: Date index 1 (Knibbe 2004); * $p = 0.1$; ** $p = 0.001$

TRW chronologies	common period 1920–2013			
	TBP	THO	GL	DI1
dry/wet	9.1**	10.2**	83.0*	335.0
high/low	11.8**	11.3**	79.8*	335.0
old/young	14.9**	15.0**	80.9*	463.0
<i>petraea/robur</i>	9.9**	15.0**	84.0*	511.0
west/east	11.9**	11.3**	80.9*	347.0

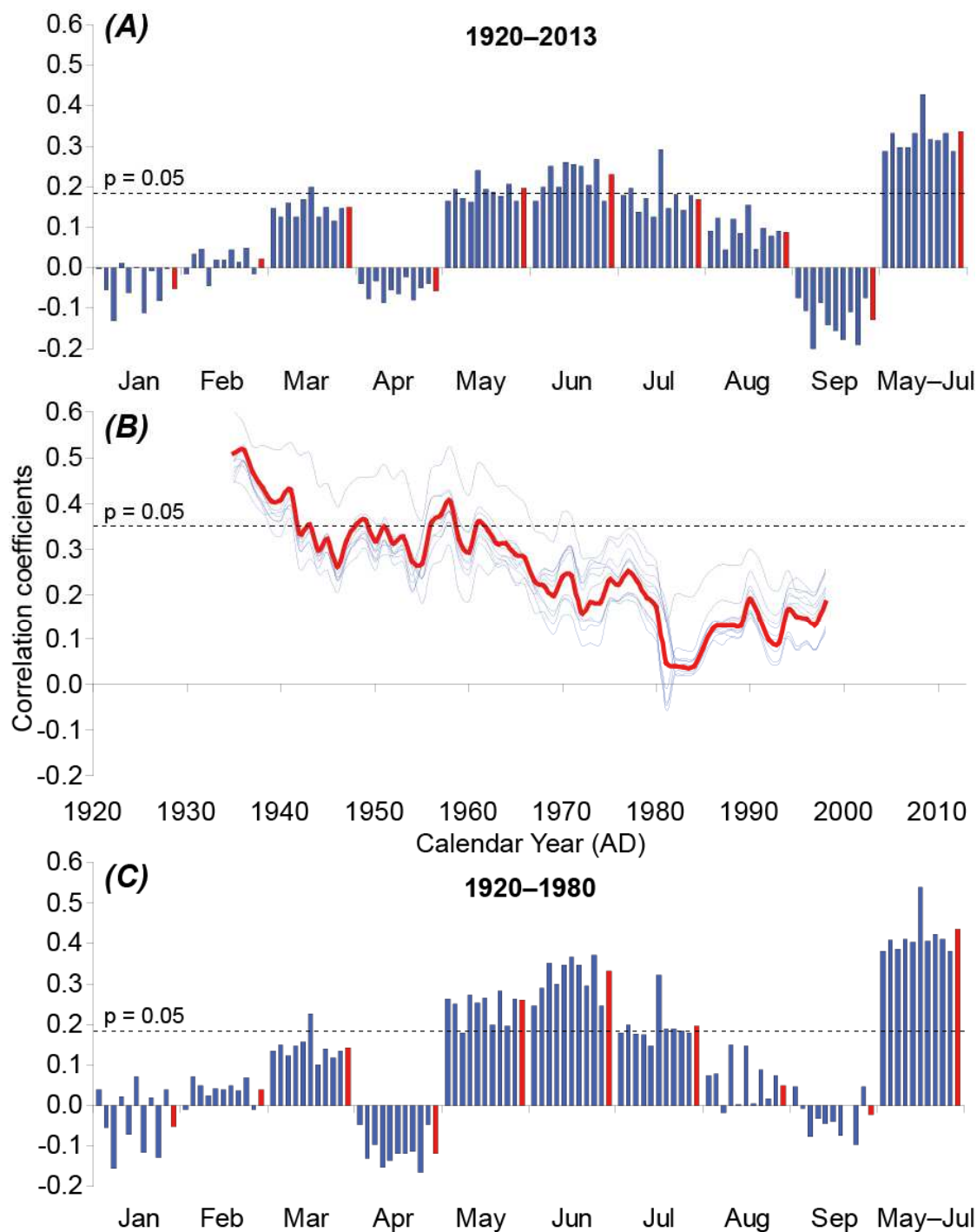
Fig. 3 shows a direct comparison of all pairs of indexed TRW sub-chronologies in the study period, while their common variability is expressed as running correlations. The latter are statistically significant for all pairs and for the whole study period. While common variability is quite stable over time for the series differentiated by altitude, age and species, there is a distinct period of lower coherence spanning approximately from the mid-1940s to the mid-1960s for “dry/wet” and for “east/west”. The overall

correlations between all five pairs of raw oak TRW sub-chronologies in the 1920–2013 period are highly significant, varying from 0.705 (“west/east”) to 0.821 (“old/young”).



ČLÁNEK II - Fig. 3: Running correlations (21-year window) and differences between dry/wet (A), low/high-altitude (B), young/old (C), *Q. robur*/*Q. petraea* (D), and east/west (E) oak TRW chronologies in the 1920–2013 period

Potential differences between specific TRW chronologies were also explored in terms of their ability to simulate hydroclimate variability. All the indexed TRW sub-chronologies and the chronology from all data were correlated against CZ precipitation totals to reveal possible differences. Precipitation totals in the previous year were not



ČLÁNEK II - Fig. 4: Correlations of individual TRW sub-chronologies (blue) and chronology from all data (red) with monthly precipitation totals for the common period 1920–2013 (A) and for the shorter 1920–1980 period (C). 31-year running correlations of TRW indices with May–July precipitation totals (B)

significantly reflected in our data and are therefore not presented.

Correlation analysis demonstrated that all TRW chronologies respond consistently and correlate best for May–July precipitation totals in the 1920–2013 period. Correlation coefficients in individual months (May, June, July) are around the level of significance but the May–July period exceeds the threshold considerably, varying from 0.288 for “dry” and “west” chronologies to 0.428 for the “young” chronology (Fig. 4a).

The greatest difference was observed between correlations of “old” (0.332) and “young” (0.428) chronologies. The remainder of the pairs responded to precipitation totals in very similar fashion. However, 31-year running correlations exhibited temporal instability within the relationship. Correlation coefficients were quite stable and around the significance level until the 1960s. A slow decrease of all TRW chronology correlations culminated in a significant decline in the early 1980s persisting to the present (Fig. 4b). Recalculation of the relationship for a shorter period (1920–1980) shows the same response of all chronologies and increased correlation values in comparison with the full common period. Correlations for the most important May–July precipitation totals vary from 0.381 for “dry” and “west” chronologies to 0.538 for the “young” chronology. Possible sources of this temporal instability are discussed in the next section.

9.4 DISCUSSION

Some important outcomes arise out of our analysis. *(i)* All CZ oak sub-chronologies are well replicated, their quality is high and mean sensitivities are similar. *(ii)* The sub-chronologies exhibit significant differences in some of their descriptive characteristics, such as MSL and AGR. The latter is, however, a result that may be anticipated, given the design of the study, since the TRW sub-chronologies were defined to maximise differences between one another in terms of the parameter examined. *(iii)* Despite *(ii)*, it transpired that all five pairs of sub-chronologies are highly similar in the light of three different tests. *(iv)* Moreover, the sub-chronologies are very much the same in their growth response to May–July precipitation totals. These findings are discussed in more detail below.

In general, species and soil moisture conditions had greater influences on TRW growth than elevation gradient. In addition, higher values of MSL corresponded to lower AGR values, resulting from the impact of age trend in particular. Differences between old and young chronologies were rendered especially clear by the relative

proportions of juvenile wood, since younger trees contain a higher proportion of it than older ones. This may also account for differences between other specific chronologies. However, the statistical differences between “dry” and “wet” TRW chronologies may be influenced by water availability; tree-ring widths may be narrower at sites stressed by drought.

There were distinct differences between the selected characteristics in species-specific chronologies, such as AGR and mean variability. For instance, narrower tree-ring widths accompanied by lower variability occurred in sessile oak, in agreement with other studies conducted on the territory of CZ (Vavřík and Gryc 2012). However, such differences may arise out of site-specific conditions for both species (Rybníček et al. 2016). Our analysis demonstrated that the hydroclimate sensitivity of the two oak species is similar in CZ, in line with several other European studies (Friedrichs et al. 2009a, 2009b; Büntgen et al. 2010, 2011c; Tegel et al. 2010). Moreover, significant spatial correlations have been observed between different oak chronologies from various locations in Central Europe. These correlations, however, decrease with increasing geographical distance (Pilcher et al. 1984; Ważny and Eckstein 1991; Haneca et al. 2009; Kolář et al. 2012).

Czech oak TRW chronologies responded most strongly to changes in May–July precipitation totals, and young trees exhibited the response most sensitive to precipitation. This has been demonstrated by Czech oaks before (Doležal et al. 2010), and positive response to summer precipitation has also been shown for oak chronologies from France (Mérián et al. 2011), Romania (Popa et al. 2013), Germany (Friedrichs et al. 2009a), Slovakia (Petráš and Mecko 2011), and Poland (Bronisz et al. 2012). However, responses to hydroclimate in CZ were quite weak and unstable over time. The most dramatic drop in the hydroclimate sensitivity of CZ oak TRW chronologies takes place between the 1960s and the present. This may be associated with recent global warming; the physiological thresholds of tree growth may also have influenced this result (Rozas 2005; Geßler et al. 2007; Friedrichs 2009a). Although Czech oak TRW chronologies demonstrate no direct relation to air temperature, rising temperatures and changes in precipitation distribution during the growing season are obviously associated with a higher risk of drought occurrence. For example, a precipitation decrease in the first half of the growing season and an increase in the second half have been reported for some parts of the Czech Republic and for central Europe in the past two decades

(Bauer et al. 2010; Možný et al. 2012; Brázdil et al. 2015). Consequently, a higher intensity of drought, together with a higher variability of precipitation regime, has a potential for negative effects on tree growth.

Reduced sensitivity of Czech TRW chronologies to hydroclimate has been already discussed by Büntgen et al. (2011a) for fir TRWs in southern Moravia. Authors mentioned air pollution as a possible factor bearing upon the temporal instability of the growth-climate relationship. Further, a significant tree growth reduction in conifers due to high SO₂ concentrations and air pollution in northern Bohemia has already been demonstrated (Rydval and Wilson 2012; Kolář et al. 2015). If global warming and air pollution lie behind the reduced sensitivity of trees to climate, then the modern loss of coherence is exceptional and may not pose a serious problem in earlier parts of TRW chronologies.

9.5 CONCLUSION

Our analysis aimed to evaluate a possible “extreme” data model, since the study was designed to examine possible differences between five specific pairs of chronologies as far as possible from one another in terms of the factor in question. This is because the chronologies are derived from samples representing data of lower and upper quartiles. The mode of data collection for sub-fossil woods, and historical woods in particular, for the earlier parts of chronologies lies close to “random sampling”, which then splices samples from the whole range of values of environmental factors examined here to the resulting chronology. Thus our results, indicating no significant differences between specific sub-chronologies, should be generally valid for the entire CZ oak TRW chronology.

Moreover, results from this analysis of the influence of site, species, age, elevation, and soil moisture on oak TRW are of great importance to hydroclimate reconstructions of the past millennium in a central European context. We have demonstrated that even if the above parameters are not perfectly known for the earlier parts of oak TRW chronologies, the resulting reconstructions may not be significantly biased by such a lack.

9.6 ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported from the Czech Science Foundation project no. 13–04291S “Spring-summer hydroclimate reconstruction of the past millennium for the

Czech Republic using oak standard chronology”, from the project ‘Establishment of International Scientific Team Focused on Drought Research’ (No. OP VK CZ.1.07/2.3.00/20.0248), and from the Ministry of Education, Youth and Sports of CZ within the National Sustainability Program I (NPU I), grant number LO1415. Tony Long (Svinošice) helped work up the English.

9.7 LITERATURE CITED

- BAILLIE M.G.L, PILCHER J.R. (1973) A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33: 7–14
- BAUER Z., TRNKA M., BAUEROVÁ J., MOŽNÝ M., ŠTĚPÁNEK P., BARTOŠOVÁ L., ŽALUD Z. (2010) Changing climate and the phenological response of great tit and collared flycatcher populations in floodplain forest ecosystems in Central Europe. *International Journal of Biometeorology* 54: 99–111
- BIONDI F., WAIKUL K. (2004) DendroClim2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree ring chronologies. *Computers and Geosciences* 30: 303–311
- BRÁZDIL R., BĚLÍNOVÁ M., DOBROVOLNÝ P., MIKŠOVSKÝ J., PIŠOFT P., ŘEZNÍČKOVÁ L., ŠTĚPÁNEK P., VALÁŠEK H., ZAHRADNÍČEK P. (2012) Temperature and Precipitation Fluctuations in the Czech Lands during the Instrumental Period. *Masaryk University, Brno*, 236 s. ISBN 978-80-210-6052-4.
- BRÁZDIL R., TRNKA M., MIKŠOVSKÝ J., ŘEZNÍČKOVÁ L., DOBROVOLNÝ P. (2015) Spring-summer droughts in the Czech Land in 1805–2012 and their forcings. *International Journal of Climatology* 35: 1405–1421
- BRONISZ A., BIJAK S., BRONISZ K., ZASADA M. (2012) Climate influence on radial increment of oak (*Quercus* sp.) in central Poland. *Geochronometria* 39: 276–284
- BUNN A.G., JANSMA E., KORPELA M., WESTFALL R.D., BALDWIN J. (2013) Using simulations and data to evaluate mean sensitivity (ζ) as a useful statistic in dendrochronology. *Dendrochronologia* 31: 250–254
- BÜNTGEN U., BRÁZDIL R., DOBROVOLNÝ P., TRNKA M., KYNCL T. (2011) Five centuries of Southern Moravian drought variations revealed from living and historic tree rings. *Theoretical and Applied Climatology* 105: 167–180
- BÜNTGEN U., BRÁZDIL R., HEUSSNER K.U., HOFMANN J., KONTIC R., KYNCL T., PFISTER C., CHROMÁ K., TEGEL W. (2011) Combined dendro-documentary evidence of

- Central European hydroclimatic springtime extremes over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 30:3947–3959
- BÜNTGEN U., FRANK D.C., WILSON R., CAREER M., URBINATI C., ESPER J. (2008) Testing for tree-ring divergence in the European Alps. *Global Change Biology* 14: 2443–2453
- BÜNTGEN U., TEGEL W., NICOLUSSI K., MCCORMICK M., FRANK D., TROUET V., KAPLAN J.O., HERZIG F., HEUSSNER K.U., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331: 578–583
- BÜNTGEN U., TROUET V., FRANK D., LEUSCHNER H.H., FRIEDRICH D., LUTERBACHER J., ESPER J. (2010) Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 29: 1005–1016
- CHYTRÝ M., KUČERA T., KOČÍ M. (2001) Katalog biotopů České republiky (Catalogue of Biotopes of the Czech Republic). *Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha*
- COOK E.R., KRUSIC P.J. (2005) ARSTAN v. 41d: A Tree-ring Standardization Program Based on Detrending and Auto-regressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics. Tree-Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, New York, U.S.A (<http://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software>)
- COOK E.R., PETERS K. (1997) Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *Holocene* 7: 361–370
- COOPER R.J., MELVIN T.M., TYERS I., WILSON R.J.S., BRIFFA K.R. (2012) A tree-ring reconstruction of East Anglian (UK) hydroclimate variability over the last millennium. *Climate Dynamics* 40: 1019–1039
- ČUFAR K., LUIS M.D., ZUPANČIČ M., ECKSTEIN D. (2008) A 548-year tree-ring chronology of oak (*Quercus* spp.) for Southeast Slovenia and its significance as a dating tool and climate archive. *Tree-Ring Research* 64: 3–15
- ČUFAR K., TEGEL W., MERELA M., KROMER B., VELUŠČEK A. (2015) Eneolithic pile dwellings south of the Alps precisely dated with tree-ring chronologies from the north. *Dendrochronologia* 35: 91–98
- DOBROVOLNÝ P., RYBNÍČEK M., KOLÁŘ T., BRÁZDIL R., TRNKA M., BÜNTGEN U. (2015) A tree-ring perspective on temporal changes in the frequency and intensity of

- hydroclimatic extremes in the territory of the Czech Republic since 761 AD. *Climate of the Past* 11: 1453–1466
- DOLEŽAL J., MAZŮREK P., KLIMEŠOVÁ J. (2010) Oak decline in southern Moravia: the association between climate change and early and late wood formation in oaks. *Preslia* 82: 289–306
- ECKSTEIN D., BAUCH J. (1969) Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88: 230–250
- FRIEDRICH M., REMMELE S., KROMER B., HOFMANN J., SPURK M., FELIX K.K., ORCEL C., KÜPPERS M. (2004) The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe – a unique annual record for radiocarbon calibration and palaeoenvironment reconstruction. *Radiocarbon* 46: 1111–1122
- FRIEDRICH D., BÜNTGEN U., ESPER J., FRANK D., NEUWIRTH B., LÖFFLER J. (2009a) Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. *Tree Physiology* 29: 39–51
- FRIEDRICH D., TROUET V., BÜNTGEN U., FRANK D.C., ESPER J., NEUWIRTH B., LÖFFLER J. (2009b) Twentieth century climate sensitivity of Central European tree species. *Trees, Structure and Function* 23: 729–739
- GEßLER A., KEITEL C., KREUZWIESER J., MATYSSEK R., SEILER W., RENNENBERG H. (2007) Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1–11
- GRIČAR J. (2010) Xylem and phloem formation in sessile oak from Slovenia in 2007. *Wood Research* 55: 15–22
- GRISSINO-MAYER H.D. (2001) Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57: 205–221
- HANECA K., ČUFAR K., BEECKMAN H. (2009) Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36: 1–11
- HARRIS I., JONES P.D., OSBORN T.J., LISTER D.H. (2013) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc.3711

- HOLLSTEIN E. (1980) Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte. *Trierer Grabungen und Forschungen. Mainz am Rhein*
- HORÁČEK P., ŠLEZINGEROVÁ J., GANDELOVÁ L. (2003) Analysis of cambial activity and formation of wood in *Quercus robur* L. under conditions of a floodplain forest. *Journal of Forest Science* 49: 412–418
- KAPLAN J.O., KRUMHARDT K.M., ZIMMERMANN N. (2009) The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quaternary Science Reviews* 28: 3016–3034
- KERN Z., GRYNAEUS A., MORGOS A. (2009) Reconstructed precipitation for southern Bakony Mountains (Transdanubia, Hungary) back to 1746 AD based on ring widths of oak trees. *Időjárás* 113: 299–314
- KNIBBE B. (2004) Personal Analysis System for Treering Research – Instruction Manual (Version 4). *SCIEM. Brunn/Geb.*
- KOLÁŘ T., ČERMÁK P., OULEHLE F., TRNKA M., ŠTĚPÁNEK P., CUDLÍN P., HRUŠKA J., BÜNTGEN U., RYBNÍČEK M. (2015) Pollution control in the 1980s contributed to unprecedented spruce growth in the “Black Triangle”, the Czech-Polish border region. *Science of the Total Environment* 538: 703–711
- KOLÁŘ T., KYNCL T., RYBNÍČEK M. (2012) Oak chronology development in the Czech Republic and its teleconnection on a European scale. *Dendrochronologia* 30: 243–248
- KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M. (2011) Dendochronological and radiocarbon dating of subfossil wood from the Morava River basin. *Geochronometria* 38: 155–161
- KRAPIEC M. (2001) Holocene dendrochronological standards for subfossil oaks from the area of Southern Poland. *Studia Quaternaria* 18: 47–63
- MÉRIAN P., BONTEMPS J.D., BERGÈS L., LEBOURGEOIS F. (2011) Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecology* 212: 1855–1871
- MOŽNÝ M., BRÁZDIL R., DOBROVOLNÝ P., TRNKA M. (2012) Cereal harvest dates in Czech Republic between 1501 and 2008 as proxy for March–June temperature reconstruction. *Climatic Change* 110: 801–821
- PETRÁŠ R., MECKO J. (2011) Effect of climatic factors on the dynamics of radial increments of Norway spruce, European beech and Sessile oak. *Journal of Forest Science* 57: 293–302

- PILCHER J. R., BAILLIE M. G. L., SCHMIDT B., BECKER B (1984) A 7,272 year tree-ring chronology for Western Europe. *Nature* 312: 150–152
- POPA I., LECA S., CRĂCIUNESCU A., SIDOR C., BADEA O. (2013) Dendroclimatic response variability of *Quercus* species in the Romanian Intensive Forest Monitoring Network. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 41: 326–332
- ROZAS V. (2005) Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. *Annals of forest science* 62:209–218
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., PROKOP O., ŽID T., TRNKA M., KOLÁŘ T. (2016) Oak (*Quercus* spp.) response to climate differs more among sites than among species in central Czech Republic. *Dendrobiology* 75:55–65
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., ŽID T., KOLÁŘ T., TRNKA M., BÜNTGEN U. (2015) Exploring growth variability and crown vitality of sessile oak (*Quercus petraea*) in the Czech Republic. *Geochronometria* 42:17–27
- RYDVAL M., WILSON R. (2012) The impact of industrial SO₂ pollution on North Bohemia conifers. *Water, Air, and Soil Pollution* 223: 5727–5744
- SCHOCH W., HELLER I., SCHWEINGRUBER F. H., KIENAST F. (2004) Wood anatomy of central European species. *Online version* <http://www.woodanatomy.ch>
- SOHAR K., LÄÄNELAID A., ECKSTEIN D., HELAMA S., JAAGUS J. (2014) Dendroclimatic signals of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in Estonia. *European Journal of Forest Research* 133: 535–549
- ŠMELKO Š., WOLF J. (1977) Štatistické metódy v lesníctve (Statistical Methods in Forestry). *Príroda, Bratislava*
- TEGEL W., VANMOERKERKE J., BÜNTGEN U. (2010) Updating historical tree-ring records for climate reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 29: 1957–1959
- VAVRČÍK H., GRYC V. (2012): Analysis of the annual ring structure and wood density relations in English oak and sessile oak. *Wood Research* 57: 573–580
- VICENTE-SERRANO S. M., BEGUERÍA S., LÓPEZ-MORENO J. I. (2010) A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate* 23: 1696–1718
- WAŻNY T., ECKSTEIN D. (1991) The dendrochronological signal of oak (*Quercus* spp.) in Poland. *Dendrochronologia* 9: 35–49

- WIGLEY T. M. L., BRIFFA K. R., JONES P. D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:201–213
- WILSON R., MILES D., LOADER N. J., MELVIN T., CUNNINGHAM L., COOPER R., BRIFFA K. (2012) A millennial long March–July precipitation reconstruction for southern-central England. *Climate Dynamics* 40: 997–1017

**ON THE PALEOCLIMATIC POTENTIAL OF A
MILLENNIUM-LONG OAK RING WIDTH CHRONOLOGY
FROM SLOVAKIA**

**PROKOP, O., KOLÁŘ, T., BÜNTGEN, U., KYNCL, J., KYNCL, T., BOŠELA, M., CHOMA,
M., BARTA, P., RYBNÍČEK, M. (2016)**
(DENDROCHRONOLOGIA 40: 93–101)

**ON THE PALEOCLIMATIC POTENTIAL OF A MILLENNIUM-LONG OAK
RING WIDTH CHRONOLOGY FROM SLOVAKIA**

PROKOP O.¹, KOLÁŘ T.^{1,2}, BÜNTGEN U.^{2,3,4}, KYNCL J.⁵, KYNCL T.⁵, BOŠELA M.^{6,7},
CHOMA M.⁸, BARTA P.⁸, RYBNÍČEK M.^{1,2}

¹*Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University in Brno, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic*

²*Global Change Research Centre, Bělidla 4a, 603 00 Brno, Czech Republic*

³*Swiss Federal Research Institute WSL, Zuercherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Switzerland*

⁴*Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, 3012 Bern, Switzerland*

⁵*DendroLab Brno, Eliášova 37, 616 00 Brno, Czech Republic*

⁶*Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Technical University in Zvolen, Slovakia*

⁷*Department of Silviculture and Forest Production, National Forest Centre, Zvolen, Slovakia*

⁸*Department of Archaeology, Faculty of Arts, Comenius University in Bratislava, Gondova 2, 814 99 Bratislava, Slovakia*

ABSTRACT

Although Slovakia is largely forested and rich in historical buildings, it is one of the few European countries without a millennium-long tree-ring chronology. In this study, we gather all available oak ring width data from Slovakia, establish a new composite chronology and assess its climate sensitivity. The nation-wide oak network includes 276 samples from historical buildings and 1028 modern series from material that was randomly collected at sawmills and wood submission sites across Slovakia. The final composite oak record covers the period from CE 967- 2013, reflects a distinct hydroclimatic signal from late spring to early summer, and is highly correlated with other oak chronologies from surrounding countries. Although this study reveals a high degree of growth coherency and climate sensitivity inherent to the new Slovakian oak

ring width chronology, changes in sample size at the transition from modern to relict material and further back in time limit any applicability to palaeoclimatic analysis.

KEYWORDS: composite tree-ring chronology, European oak, palaeoclimatology, random update sampling, ring width, Slovakia

10.1 INTRODUCTION

Thanks to its longevity, broad distribution, clear tree-ring boundaries and frequent use in constructions (Haneca and Debonne 2012), oak is among the most suitable species for the development of multi-centennial to millennial long tree-ring chronologies. Tree-ring width (TRW) chronologies of this species have been developed for the British Isles (Baillie 1995; Wilson et al. 2012; Cooper et al. 2013), Western and Central Europe (Eckstein et al. 1972; Hollstein 1980; Wazny and Eckstein 1991; Jansma 1995; Friedrich et al. 2004; Geihofer et al. 2005; Haneca et al. 2006; Büntgen et al. 2010 and 2011; Kolář et al. 2012), the Iberian Peninsula (Leal et al. 2015), the eastern coast of the Baltic Sea (Pukienė and Ožalas 2007; Sohar et al. 2014), and the south-eastern surroundings of the Alpine arc (Čufar et al. 2008a and 2014a), for instance.

The level of agreement between various oak TRW chronologies from different parts of Europe mainly depends on the ecological conditions at the sampling sites, as well as the overall sample size of the datasets (Čufar et al. 2008a and 2014b; Kolář et al. 2012; Sohar et al. 2014, Wazny et al. 2014). Because oak was a significant trade commodity (Wazny 2002), the correlations among chronologies can be distorted by TRW series that represent timber transported from other regions. Therefore, studying differences in the TRW patterns of oaks growing in different areas of Europe is only possible when it is based on chronologies from oaks with known origins.

The replication of long oak chronologies that are primarily utilized for dating purposes is often reduced towards the modern ends (e.g., Kolář et al. 2012). In such cases, recent samples are generally used for the absolute dating of historical material (Tegel et al. 2010). However, if these chronologies are used for the reconstruction of (hydro)climatic variability, it is necessary to increase the sample size during the period that overlaps with instrumental measurements and at the transition between modern (living) and relict (timber) wood. A novel way to increase the modern replication of TRW composite chronologies is the so-called “random sampling strategy” (Tegel et al. 2010; Büntgen et

al. 2011), which integrates recent material from sawmills and lumberyards scattered across the region from which the historical data most likely originate (Büntgen et al. 2012). Due to artificial signal degradation, the amount of site control and the ecological understanding of the modern samples are expected to be as low as they are for the historical subset; therefore, the internal signal-to-noise ratio of the chronology remains more or less equal over time (Büntgen et al. 2011).

Slovakia is one of the last countries in Central Europe for which a composite oak TRW chronology of living and relict material is still missing. Moreover, there are currently no TRW data from Slovakia stored in the ITRDB (<https://www.ncdc.noaa.gov/>). The few dendro analyses of Slovakian oaks were conducted at the local scale only (Šmelko and Scheer 2000; Petráš et al. 2007; Petráš and Mecko 2011).

The creation of a new nation-wide TRW chronology for Slovakia is in line with the overall aim of building new reference chronologies for those areas where data are still missing (Büntgen et al. 2013). In so doing, the Slovakian effort would contribute to the improvement of a large-scale network of TRW chronologies (Haneca et al. 2009). A dense spatial network of long TRW chronologies is the key to bridge spatial and temporal gaps in the existing tree-ring records for north-central Europe and the eastern Mediterranean. A denser network would also allow us to define the boundaries of distinct dendrochronological “growth” zones within Europe, which, in turn, would improve the precision with which one can determine the provenance of wood used in historical buildings, ships, artworks, and other ancient objects (Wazny et al. 2014). In addition to the exact dating of historical wood, long TRW chronologies may provide valuable information for a wide range of environmental tasks, such as the reconstruction of past climate conditions and the evaluation of ongoing environmental changes (e.g., Čufar et al. 2008b; Friedrichs et al. 2009; Büntgen et al. 2010 and 2011; Tegel et al. 2010; Čufar et al. 2014b; Sohar et al. 2014).

Here, we aim at developing the first oak TRW chronology of living and relict material from Slovakia. We first compare the new nation-wide composite record with oak TRW chronologies from surrounding countries, then assess its dominant climate signal, and finally evaluate its potential for palaeoclimatic reconstructions.

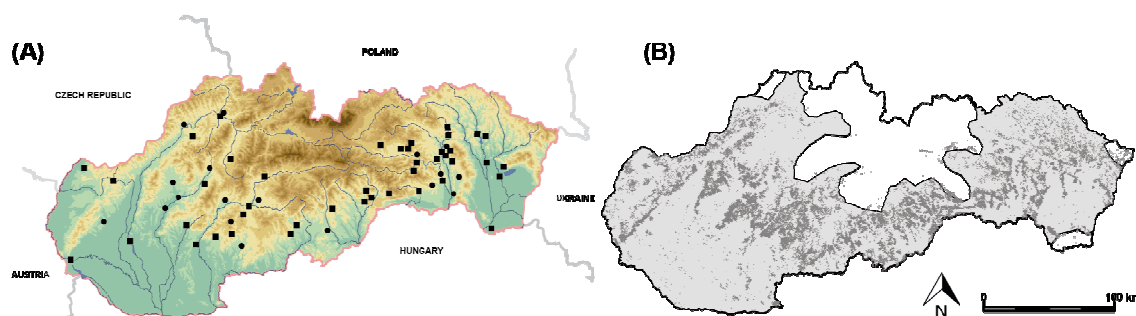
10.2 MATERIALS AND METHODS

10.2.1 STUDY AREA

The northern and central parts of Slovakia are characterized by the mountains of the western Carpathian arc. Forests cover ~41% of Slovakia, with broadleaved species being most widespread (61.4 %). The most abundant Slovakian tree species after beech (*Fagus sylvatica* L.) (32.7 %) and spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) (24.1 %) is oak (represented by *Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), which makes up 10.6 % of the tree species (Zelená správa 2013). Oak mainly appears in stands between the oak and the oak-beech vegetation zones, which roughly corresponds to altitudes of up to 550 m a.s.l. The mean annual precipitation in Slovakia ranges from 500 mm (around Bratislava) to 2000 mm (in the High Tatras) and averages 879 mm (Bošeľa 2010). The mean annual temperature is approximately 6°C and varies from the west to the east by up to 3°C (www.shmu.sk). In addition, annual mean temperatures range from 1°C to 9°C, depending on the altitude. The average length of the growing season (expressed as the number of days with an average daily temperature that is above 5°C) varies roughly between 130 and 235 (Bošeľa 2010).

10.2.2 TREE-RING DATA

Oak (*Quercus* sp.) samples were either collected from modern trees or historical constructions across Slovakia, where the genus *Quercus* is mainly represented by two species, the pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and the sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). These two species can be differentiated by basic morphological tree features (Bruschi et al. 2000; Steinbrecher et al. 2013), although a number of studies report hybridization of these species (e.g., Gerber et al. 2014; VanDer Mijnsbrugge et al. 2011). In contrast, the wood of the two species is very difficult to differentiate on the basis of macroscopic and microscopic features (Panshin and de Zeeuw 1980; Schweingruber 1990; Čufar et al. 2014a, Hroš and Vavrčík 2014). Because the TRW series of the two species can be cross-dated very well (Rybníček et al. 2016), they are usually treated as one species in dendrochronological studies, and are referred to as the European oak (*Quercus* sp.) (Haneca et al. 2009).



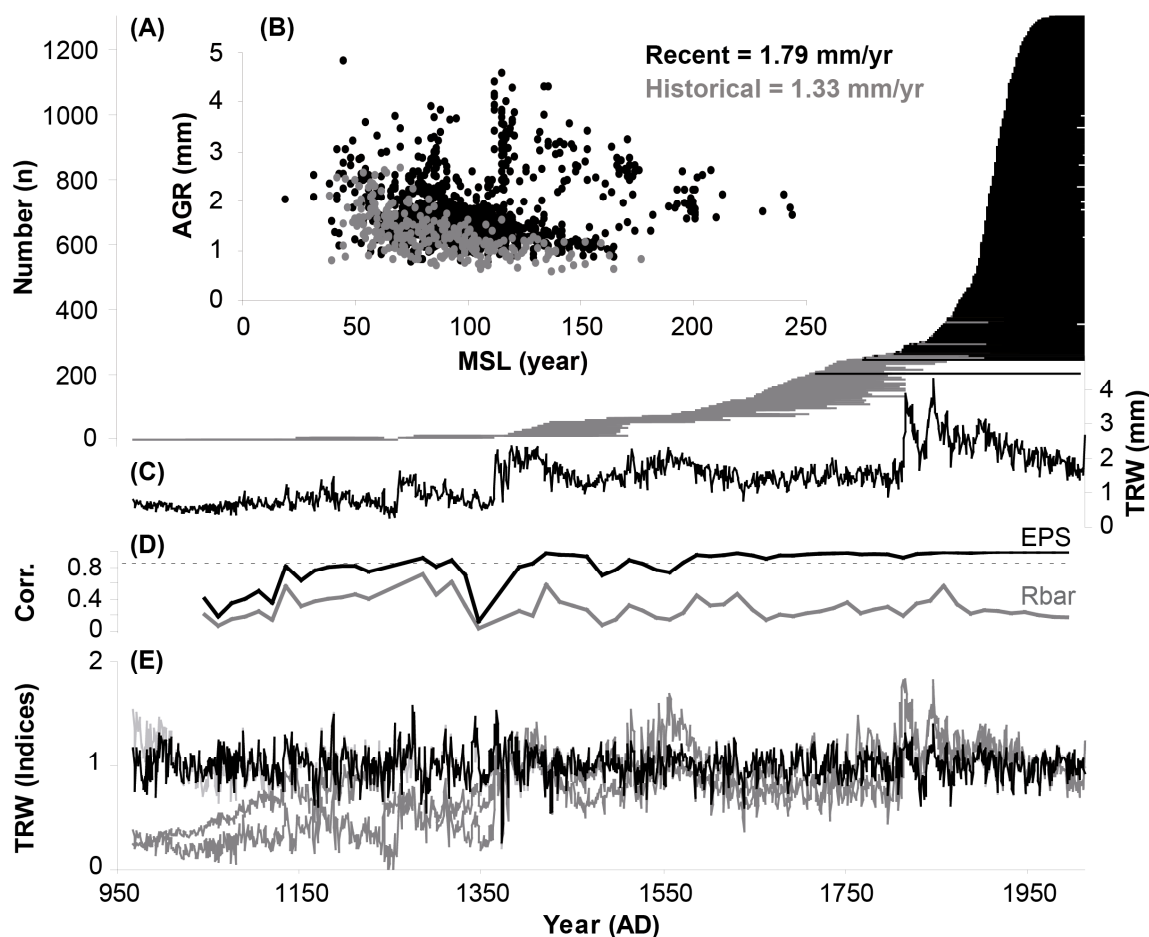
ČLÁNEK III - Fig. 1: (A) The study sites in Slovakia (circle – recent samples, square – historical samples), (B) Distribution of oak in Slovakia (light grey – current distribution sourced from Euforgen (2015), dark grey – current distribution obtained from Management Plans (source: National Forest Centre 2015)).

We collected 1304 samples – 276 historical and 1028 recent – which cover almost the entire territory of the natural oak distribution in Slovakia (Fig. 1). The historical material, which was sampled using a Pressler borer, mainly originates from 44 churches and rural buildings that have been dated using the Moravia/Silesia TRW oak chronology (Kolář et al. 2012). The recent samples were extracted in two different ways. Cores were sampled at selected forest sites using a Pressler borer at breast height along the contour line so that the increments were not influenced by the presence of tension wood. Disc samples (2–3 cm thick) were collected randomly in sawmills and lumberyards using a chain saw (Tegel et al. 2010). The recent samples were from the same regions as the historical ones.

All samples were measured using the VIAS TimeTable measuring system. Measurement (with an accuracy of 0.01 mm) and synchronization of tree-ring sequences were performed using PAST4 (©SCIEM). The degree of similarity between the TRW series was assessed using the T-test following Baillie and Pilcher (1973) (TBP) and Hollstein (1980) (THO), the coefficient of agreement (Gleichläufigkeit; Eckstein and Bauch 1969), and a visual comparison of the TRW series, which is crucial for the final dating (Rybníček et al. 2010).

10.2.3 DENDROCLIMATOLOGICAL ANALYSIS

The age-related growth trends were removed using ARSTAN (Grissino-Mayer et al. 1992) with a single detrending method (Holmes et al. 1986). Four different detrending methods after power transformations were applied to each individual TRW series (a 150yr spline function, negative exponential functions, RCS (regional curve standardization) for the set of all data as well as RCS for the historical and recent datasets separately) (Fig. 2). Indices were calculated as residuals between the measured



ČLÁNEK III - Fig. 2: (A) The temporal distribution of the 1304 individual oak ring width samples: historical samples (grey) and recent samples (black), (B) the relationship between the average growth rate (AGR) in mm/year and the mean segment length (MSL) in years of each sample, (C) the oak TRW chronology, (D) the expressed population signal (EPS) and the inter-series correlation (Rbar) calculated over 30-year windows lagged by 15 years, and (E) four different TRWI-based chronologies detrended after power-transformation by 150 yr cubic smoothing splines (light grey), negative exponential functions (black), RCS for all the datasets and RCS for the historical and recent datasets, respectively.

TRW and the corresponding fitted values after power transformation. The expressed population signal (EPS; Wigley et al. 1984) and the inter-series correlation (Rbar) were calculated to assess the quality of each chronology (Fig. 2). The residual tree-ring chronology index (TRWI) was used to estimate the correlation between radial increments and climate variations (temperature, precipitation, and PDSI) in DendroClim2002 (Biondi and Waikul 2004) for the period from 1901 to 2013. We used a 150yr spline function with power transformation (Fritts et al. 1969) to preserve the variability in the inter-annual to multi-decadal growth (Büntgen et al. 2008). Pearson's correlation coefficients were calculated for the seasonal window from April of the previous year until October of the year of tree-ring formation (referred to here as “the

given year”), i.e., for a period of 19 months. The climate during this interval has the strongest influence on the radial increment of oak in Central Europe (Horáček et al. 2003; Rybníček et al. 2015). The seasonal windows with the greatest influence (March–July for precipitation, June–July for the PDSI and April–June for temperature) of the given year were also calculated. Monthly and seasonal means of gridded (0.5°×0.5°) meteorological measurements (Climate Research Unit Time Series, CRU TS3.10; via <http://climexp.knmi.nl>) from 21 grids across the 48–49°N and 17–22°E region, i.e., the region in which oak is naturally distributed in Slovakia, were averaged.

10.2.4 AGREEMENT AMONG SITE CHRONOLOGIES

The recent part of the new Slovakian oak TRW chronology was compared with available oak chronologies from the surrounding European countries by using PAST4 to assess similarity between chronologies from distant sites (Kaennel and Schweingruber 1995). We compared a total of nine chronologies from six countries (Tab. 1 and Fig. 3).

ČLÁNEK III - Tab. 1: Description of European chronologies for teleconnection.

	Region	Nr. of trees	Starting date	Ending date	Length (years)	RW (mm)	References
1	Bohemia	475	1865	2012	148	1.79	Dobrovolný et al. (2015)
2	Moravia	561	1750	2012	263	1.68	
3	Poland - West	58	1727	1986	260	1.85	Ważny (1990)
4	Poland - East	89	1690	1988	299	1.66	
5	Transcarpathia	171	1836	2008	173	1.86	Knycl J. (unpublished)
6	Vinnycja region	23	1793	2009	217	1.92	Ważny et al. (2014)
7	Hungary	46	1766	2004	239	2.12	Čufar et al. (2014b)
8	Weinviertel	124	1748	2011	264	2.02	
9	Slovenia	51	1745	2003	259	1.68	

Two oak TRW chronologies from the Czech Republic – Moravia/Silesia and Bohemia (Dobrovolný et al. 2015) – were used. The territory of Poland was represented by separate oak chronologies for the western and the eastern parts. The west Polish chronology was developed from the local chronologies of Zielona Gora, Wroclaw, and Poznan. The east Polish chronology comprises the local chronologies of Warszawa/Bielany, Kosobudy/Roztocze, Hajnowka, and Debina/Krakow. All of these local chronologies were obtained from the freely accessible database at the National Centers for Environmental Information (www.ncdc.noaa.gov) and used with the consent



ČLÁNEK III - Fig. 3: The coherency of the Slovakian oak chronology with European chronologies (using the T-value following Baillie and Pilcher (1973) and the Gleichläufigkeit (Eckstein and Bauch, 1969)) from 1865 to 1986.

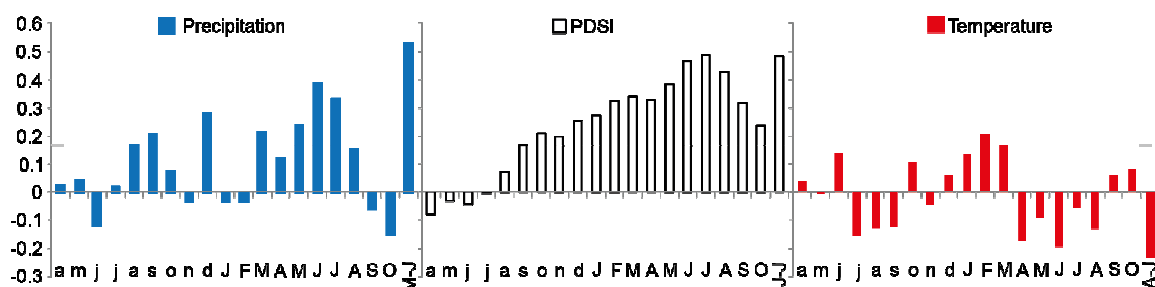
of the author (T. Wažny). Two chronologies from Ukraine were used; the first one was from the area of Transcarpathia (author: J. Kyncl – unpublished), and the other was formed from two local chronologies – Czerniatyn and Severinovka (Wažny et al. 2014). The chronology for the territory of Hungary was based on the local chronologies of Debrecen, Sopron, Kőszeg; local chronologies for Celje/Kozjansko, Novo Město, and Ljubljana were used to create the Slovenian chronology, and Austria was represented by the east Austrian chronology from the Weinviertel (Čufar et al. 2014b). All of the local chronologies that were used for the creation of master chronologies were provided for this study by their authors. To ensure the most accurate coherence possible, we chose the longest period common to all the oak chronologies used, which was from 1865 to 1986 (Tab. 1). The assessment criteria were the same as those used in the chapter on the tree-ring data (the T-test (TBP) and Gleichläufigkeit). A common period was chosen to avoid the distortion of the correlation coefficient expressed by the value of the T-test, which is dependent on the length of the compared interval (Grissino-Mayer 2001), among other factors.

10.3 RESULTS

The new oak TRW chronology spans the AD 967-2013 period. The historical samples have a lower average growth rate than the recent samples. The TRW chronology shows a rapid increase in TRW during the first half of the 19th century. Both of these ring width trends were caused by the higher proportion of juvenile wood in the recent dataset. The inter-series correlation (R_{bar}) and the expressed population signal (EPS) reveal robust signal strength (Fig. 2). The EPS reliably exceeds the threshold of 0.85 from 1585 to the present, which indicates that the theoretical population is well represented (Wigley et al. 1984). The individual detrended chronologies show different patterns, especially during the period from 967 to the second half of the 14th century.

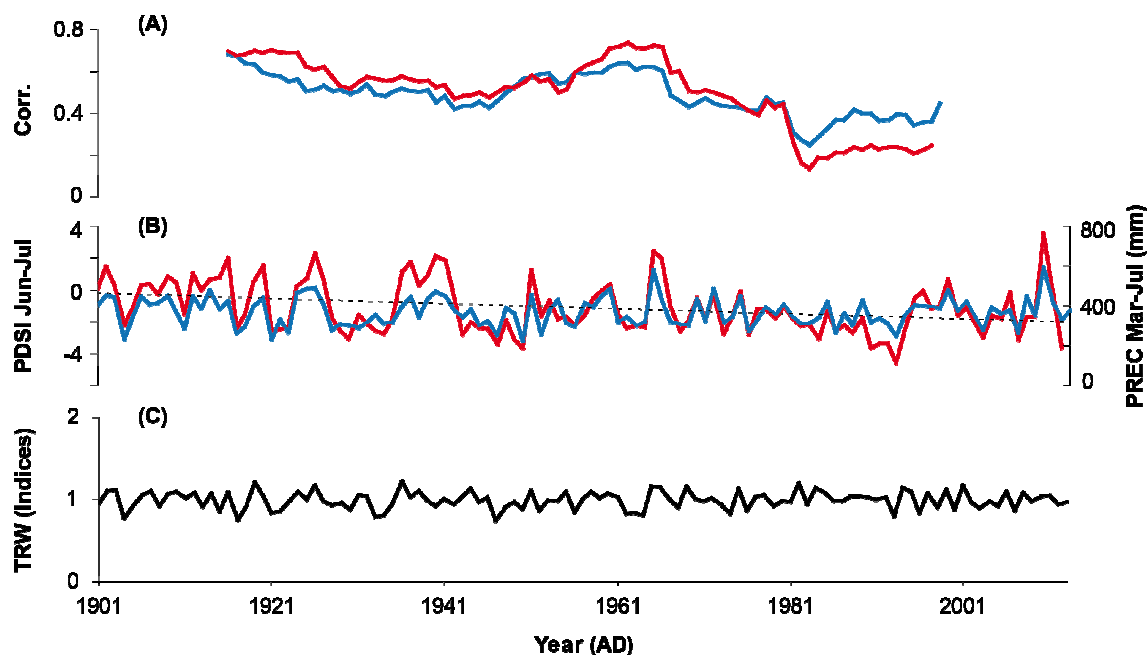
Correlations between the Slovakian TRW chronology and the chronologies of surrounding countries show that the resemblance decreased with increasing distance (Fig. 3). The Slovakian chronology reveals the best agreement with the adjacent chronologies, i.e., in the west with Moravia (Czech Republic) and the Weinviertel (Austria) and in the east with Transcarpathia (Ukraine). The values of the T-tests (TBP) are greater than 7, and the Gleichläufigkeit is approximately 70%. In contrast, the lowest resemblance is found for the relatively distant Slovenian chronology and the west Polish chronology.

The PDSI is found to be the main factor affecting oak growth. The correlations between tree ring width and the PDSI are statistically significant and positive between the previous October and October of the given year; they are highest in June, July, and the June-July period of the given year. The correlation is statistically significant and positive between the previous October and October of the given year with the highest values in June, July, and the June-July period of the given year. The correlation between TRW and precipitation is found to be positive in the period from March to August of the given year. The effect of precipitation is the most significant in the March-July period. The effect of temperature on the radial growth of oak trees in Slovakia is not as substantial as the effects of drought and precipitation were. The effect of temperature is statistically significant only in February (positive) and June (negative) (Fig. 4).



ČLÁNEK III - Fig. 4: The growth–climate response of the TRWI chronology for temperature, precipitation and the PDSI (CRU TS3.1) from 1901 to 2013 shown from the previous April (a) to October of the given year (o) and for various seasons (each month is represented by its first letter, e.g., M-J is March-July, J-J is June-July and A-J is April-June). The grey dashed lines indicate the statistical significance ($\alpha = 0.05$).

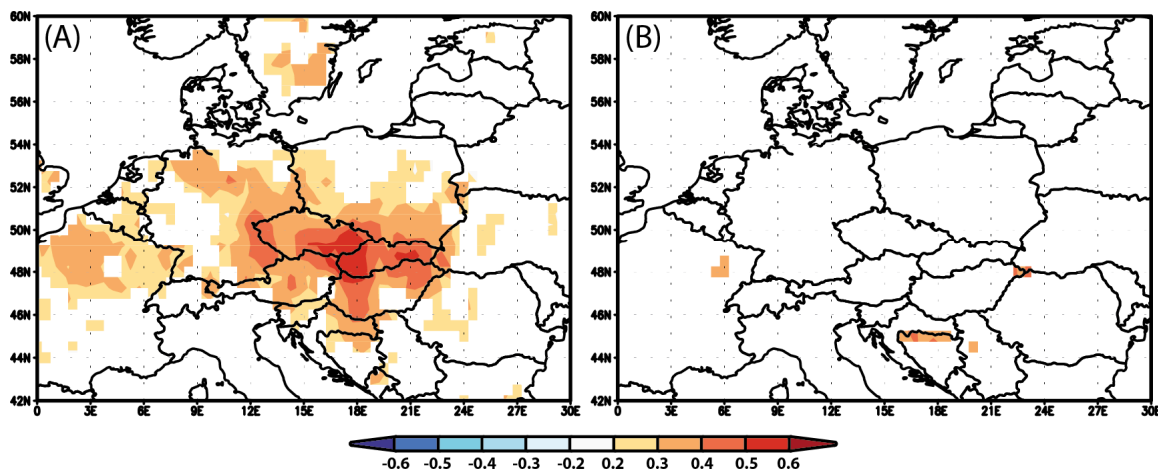
The correlation between TRW and the PDSI in June-July, i.e., the period when the highest positive statistically significant correlation is reached (Fig. 4), manifests relatively stable values until 1981. After that, the correlation coefficient decreased substantially (Fig. 5). The same trend is found for precipitation in the March-July period, i.e., the period when the highest positive statistically significant correlation is observed (Fig. 4).



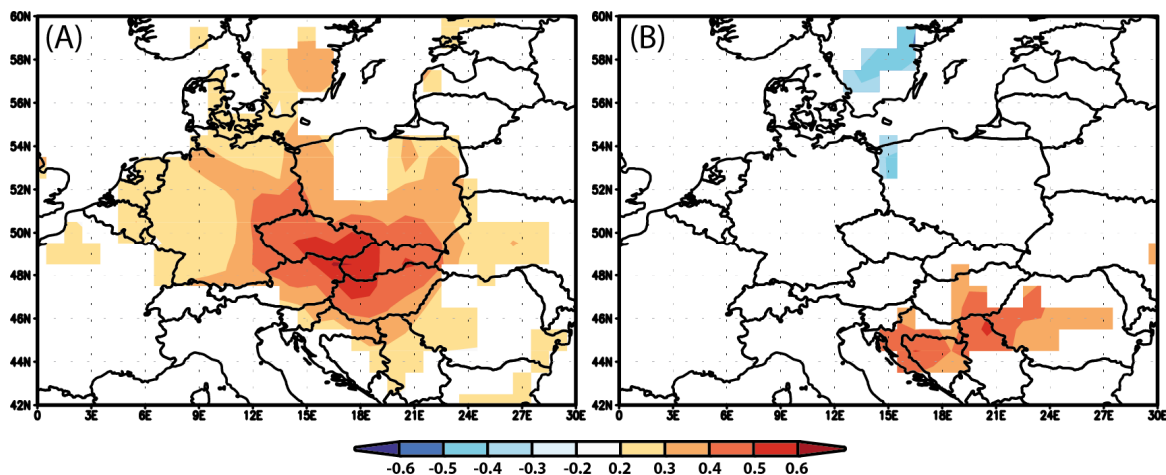
ČLÁNEK III - Fig. 5: (A) The 31 yr Pearson's correlation coefficient between TRWI and PDSI (June-July) (red) and precipitation (March-July) (blue), (B) the average PDSI from June to July (red), with the trend marked (dotted line) and the sum of precipitation from March-July (blue), and (C) TRWI.

The spatial correlations between tree-ring width and the PDSI in the June-July period are the highest in the territory in which oak was naturally distributed in Slovakia and Moravia (the eastern part of the Czech Republic) from 1901 to 1981. The correlations decrease towards higher elevations, e.g., in the Tatra Mts. in Slovakia and the

Českomoravská Upland (approximately in the middle of the Czech Republic) in Moravia (Fig. 6). The statistically significant correlations in Lower Austria also decrease towards higher elevations in the Alps. After 1981, the spatial correlations are nonsignificant in Central Europe (Fig. 6). The same correlation trend is very similar for precipitation in the March-July period, but from 1901 to 1981, the significant positive correlations are higher and over a broader area of Central Europe (Fig. 7).



ČLÁNEK III - Fig. 6: Spatial correlations between tree-ring width and the PDSI in June-July from CRU TS3.23 (Harris et al., 2013) for the following periods: (A) 1901–1981 and (B) 1982–2012.



ČLÁNEK III - Fig. 7: Spatial correlations between tree-ring width and precipitation in March-July from CRU TS3.23 (Harris et al. 2013) for the following periods: (A) 1901–1981 and (B) 1982–2012.

10.4 DISCUSSION

10.4.1 REGIONAL SYNCHRONY AMONG SITE CHRONOLOGIES

Similarities between oak growth patterns at distant locations can only be analysed using TRW chronologies based on recent material. The presence of historical material

in such chronologies is undesirable due to timber floating and trade in timber and wooden products, which used to be common (Bonde et al. 1997; Wazny et al. 2002; Haneca et al. 2005; Eckstein and Wrobel 2007).

Strong relationships have been observed among oak chronologies across Northern and Central Europe. It has already been shown that the similarity between TRW chronologies logically decreases as geographical distance increases (Pilcher et al. 1984; Ważny and Eckstein 1991; Haneca et al. 2009; Kolář et al. 2012). The main factors involved are climate and growth conditions (Fritts 1976; Schweingruber 1996). The high similarity of the Slovakian chronology with chronologies from the Czech Republic (1 – Bohemia and 2 – Moravia), the Austrian chronology (8 – Weinviertel), and the Ukrainian chronology (5 – Transcarpathia) is the result of the very homogeneous Central European climate. The observed lack of similarity between the Slovakian and Slovenian chronologies is probably the result of the different Slovenian climate, which is affected by the Alpine and Mediterranean climates (De Luis et al. 2014). The Slovakian and Polish chronologies are less similar than the Slovakian chronology is to the Czech, Austrian and Transcarpathian chronologies. Less similarity between Polish Kosobudy and Ukrainian oak chronologies was also found by Ważny et al. (2014). One possible explanation is that the Western and Eastern Carpathian Mountains, like the Alps in the case of Slovenia, strongly affect the movement of continental air masses (Bojariu and Giorgi 2005). This brings different temperatures and amounts of precipitation compared to the territories that are south of this mountain range. Additionally, air currents from the Baltic Sea can affect the climate of this area. A similar situation is found when the Slovakian chronology is compared with the Ukrainian chronology from the Vinnycja region (6), i.e., the area east of the Eastern Carpathians. These are relatively distant (approximately 500 km) from the “recent” site in Slovakia, and therefore, a decrease in correlation can be expected. In general, forest management and anthropogenic disturbances can significantly decrease the strength of a dendrochronological signal and, consequently, the value of sites for long-distance cross-dating (Ważny et al. 2014).

10.4.2 CLIMATE SENSITIVITY

The monthly average temperature and precipitation can explain 5–72% of the variation in the annual tree-ring widths of living oak trees (Haneca et al. 2009). The main limiting factor relating to the climate at the altitudes at which the pedunculate oak

and the sessile oak occur naturally in Slovakia is precipitation or drought (Šmelko and Scheer 2000; Petráš et al. 2007). The effect of the weather of the previous autumn and winter on the formation of carbohydrate storage has been evaluated repeatedly (Barbaroux and Bréda 2002; Lebourgeois et al. 2003; Cedro 2007; Doležal et al. 2010; Petráš and Mecko 2011; Michelot et al. 2012). Oak stores carbohydrates during the autumn and uses them for spring growth. Earlywood begins forming approximately three weeks before bud burst (Bergès et al. 2008). In the period before bud burst, a significant part (approximately 30%) of the stem increment has already been formed (Barbaroux and Bréda 2002). This ecophysiological model explains why earlywood growth in oak is generally less sensitive to exogenous factors, such as climatic factors, than latewood growth (Lebourgeois et al. 2003; Bergès et al. 2008; Michelot et al. 2012). Moreover, because the amount of non-structural carbohydrates in plant tissues is generally linked to the degree of frost tolerance, a higher degree of translocation may increase the resistance of oak trees to low temperatures (Parker 1967; Sakai and Larcher 1987; Thomas et al. 2004). Therefore, favourable autumn and winter weather conditions in the previous year have a strong positive effect on the formation of earlywood (Garcia-Gonzalez and Fonti 2006; Fonti et al. 2009). Generally, earlywood depends primarily on the precipitation and drought of the previous autumn and winter and the given spring, whereas latewood growth depends on those of late spring and summer (Friedrichs et al. 2009).

The strong positive effect of May-July precipitation on the radial growth of oak has also been found in a number of European dendroclimatological and xylogenetic studies conducted in France (Lebourgeois et al. 2003; Mérian et al. 2011; Michelot et al. 2012), Romania (Popa et al. 2013), Germany (Friedrichs et al. 2009), Slovakia (Petráš et al. 2007; Petráš and Mecko 2011), Poland (Cedro 2007; Bronisz et al. 2012), Hungary (Kern et al. 2009), Slovenia, Croatia and Serbia (Čufar et al. 2008a and 2014b), Estonia (Sohar et al. 2014), southern Sweden (Drobyshev et al. 2008) and the Czech Republic (Doležal et al. 2010; Rybníček et al. 2015). These positive responses also demonstrate the importance of the water supply before and at the beginning of the growing season (i.e., in March and April). In addition, the negative effect of the temperature in June (or July) has frequently been noted (Doležal et al. 2010; Mérian et al. 2011; Petráš and Mecko 2011; Michelot et al. 2012). However, this negative effect is not as strong as the positive effect of precipitation and the PDSI in the same period. Oak can sustain periods

of prolonged drought due to a complex system of stomatal (Dickson and Tomlinson 1996) and non-stomatal controls of carbon fixation (Epron and Dreyer 1996). The clear negative association between growth and water deficit, however, points to the reduced hydraulic conductance of shoots, and as a result, limits stomatal conductance and carbon assimilation during drought periods (Rust and Roloff 2002).

Thirty-one-year moving correlations between the TRWI and climate parameters (precipitation and the PDSI) demonstrate temporal instability in oak's climate sensitivity. The intensity of growth-climate responses varies over time, which is most likely due to climate change and threshold effects in tree physiology (Rozas 2005; Geßler et al. 2007; Friederichs 2009a).

One possible reason for the observed decrease is the change in the distribution of precipitation, or soil moisture content, during the growing season. For example, the precipitation decreases in the first half and increases in the second half of the growing season, as has been reported in the neighbouring Czech Republic and Central Europe over the last twenty years (Možný et al. 2009 and 2012; Bauer et al. 2010; Trnka et al. 2013 and 2015; Rybníček et al. 2016). Our study has not confirmed the above-described change in the trend of the precipitation distribution over the Slovakian growing season for the last thirty years. However, an increase in temperature, especially in July and August, and in drought throughout the year have been observed. Although the PDSI and precipitation data are related, their specific properties obviously lead to different effects on temperate forest growth. Because the strength and frequency of drought depends on the amount of precipitation, local temperature and the rate of soil water depletion, the PDSI is a better measure for growth conditions than precipitation alone (Friedrichs et al. 2009).

Another possible cause of the decrease in growth-climate correlations is the fungal tracheomycotic disease that infected Slovakian oak stands at the turn of the 1980s (Štefančík and Strmeň 2012). This disease of oak stands has been referred to as mass oak decline (Gaertig et al. 2002; Thomas et al. 2002). It reportedly causes a decrease in the radial increment, even in less strongly infected Slovakian oak stands (Račko et al. 1987).

Repeated defoliation, for example by lepidopteran or cockchafer larvae, which occurs over certain time intervals, can also reduce the growth of oak trees (Thomas et al. 2002; Kolář et al. 2013).

Generally, due to the climate change, oak trees become more sensitive to drought (Friederichs et al. 2009b; Rybníček et al. 2016). Therefore, oak stands are physiologically weakened, and their vitality and tolerance to various harmful factors can be reduced (Štefančík and Strmeň 2012). However, it is likely that the expected warmer and drier climate of the near future will not necessarily lead to reduced growth of oak as it is expected to do for spruce and beech (Bolte and Villanueva 2006; Hlásny et al. 2011; Rybníček et al. 2012, Kolář et al. 2015). Unlike spruce and beech, oak is probably able to acclimate to limited water availability by shifting its root mass down towards layers where water is often available for longer (Kuster et al. 2013).

10.5 CONCLUSION

The new millennium-long oak TRW chronology opens new possibilities for dendrochronological research in Slovakia, especially for dendroarchaeology, and for future palaeoecological applications. Due to the absence of such a chronology, a situation similar to the one in Slovenia and the Czech Republic a few years ago (Čufar et al. 2008a; Kolář et al. 2012), some samples from Slovakia could not be dated via dendrochronological methods, and less accurate radiocarbon dating had to be used. Alternatively, the samples were dated using chronologies from more distant territories, and therefore, the probability of successful dating was lower. This chronology will strengthen the network of European oak chronologies, which is not as dense in this part of Europe as it is in Western and Northern Europe (Haneca et al. 2009). Nevertheless, insufficient replication and low climate sensitivity continue to limit the palaeoclimatic potential of the current oak TRW chronology. Naturally, the chronology needs to be extended using archaeological material and subfossil stems. Additionally, less replicated parts of the chronology need to be improved.

10.6 ACKNOWLEDGEMENTS

The study was conducted thanks to funding from the Czech Republic Grant Agency through grant number 13-04291S; the Ministry of Education, Youth and Sports of the CR under the National Sustainability Programme I (NPU I), grant number LO1415; the “frameworks and possibilities of forest adaptation measures and strategies connected with Climate change” (no. EHP-CZ02-OV-1-019-2014); the Slovak Research and Development Agency under contract no. APVV-0598-10 and projects no. IGA 28/2014 and LDF_VP_2015004. Moreover, I would like to gratefully thank the following

colleagues from foreign laboratories for their cooperation and provision of local chronologies: M. Grabner, K. Čufar, T. Wazny and A. Morgós.

10.7 REFERENCES

- BAILLIE M.G.L., PILCHER J.R. (1973) A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33: 7–14
- BAILLIE M.G.L. (1995) A Slice Through Time. *B.T. Batsford Ltd, London*, 177 pp.
- BARBAROUX C., BRÉDA N. (2002) Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology* 22: 1201–1210
- BAUER Z., TRNKA M., BAUEROVÁ J., MOŽNÝ M., ŠTĚPÁNEK P., BARTOŠOVÁ L., ŽALUD Z. (2010) Changing climate and the phenological response of great tit and collared flycatcher populations in floodplain forest ecosystems in Central Europe. *International Journal of Biometeorology* 54: 99–111
- BERGÈS L., NEPVEU G., FRANC A. (2008) Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management* 255(3–4): 567–579
- BIONDI F., WAIKUL K. (2004) DendroClim2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree ring chronologies. *Comput Geosci* 30: 303–311
- BOJARIU R., GIORGI F. (2005) The North Atlantic Oscillation signal in a regional climate simulation for the European region. *Tellus* 57(4): 641–653
- BOLTE A., VILLANUEVA I. (2006) Interspecific competition impacts on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *European Journal of Forest Research* 125(1): 15–26
- BONDE N., TYERS I., WAŻNY T. (1997) Where does the timber come from? Dendrochronological evidence of timber trade in Northern Europe 14th to 17th century. In *Archaeological Science 1995*, edited by Sinclair, A., Slater, E., Gowlett, J., *Oxbow Books, Oxford*. pp. 201–204
- BOŠELA M. (2010) Climatic and soil characteristics of the altitudinal vegetation zones and edaphic-trophic units. *Lesnícky Časopis – Forestry Journal* 56(3): 215–234
- BRONISZ A., BIJAK S., BRONISZ K., ZASADA M. (2012) Climate influence on radial increment of oak (*Quercus* sp.) in central Poland. *Geochronometria* 39(4): 276–284
- BRUSCHI P., VENDRAMIN G.G., BUSSOTTI F., GROSSONI P. (2000) Morphological and molecular differentiation between *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus*

- pubescens* Willd. (Fagaceae) in Northern and Central Italy. *Annals of Botany* 85: 325–333
- BÜNTGEN U., FRANK D.C., WILSON R., CARRER M., URBINATI C., ESPER J. (2008) Testing for tree-ring divergence in the European Alps. *Global Change Biology* 14: 2443–2453
- BÜNTGEN U., TROUET V., FRANK D., LEUSCHNER H.H., FRIEDRICH D., LUTERBACHER J., ESPER J. (2010) Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 29: 1005–1016
- BÜNTGEN U., TEGEL W., NICOLUSSI K., MCCORMICK M., FRANK D., TROUET V., KAPLAN J., HERZIG F., HEUSSNER U., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331: 578–582
- BÜNTGEN U., TEGEL W., HEUSSNER K.U., HOFMANN J., KONTIC R., KYNCL T., COOK E.R. (2012) Effects of sample size in dendroclimatology. *Climate Research* 53: 263–269.
- BÜNTGEN U., KYNCL T., GINZLER C., JACKS D.S., ESPER J., TEGEL W., HEUSSNER K.U., KYNCL J. (2013) Filling the Eastern European gap in millennium-long temperature reconstructions. *Proceedings of the National Academy of Science* 110: 1773–1778.
- CEDRO A. (2007) Tree-ring chronologies of downy oak (*Quercus pubescens*), pedunculate oak (*Quercus robur*) and sessile oak (*Quercus petraea*) in the Bielinek Nature Reserve: Comparison of the climatic determinants of tree-ring width. *Geochronometria* 26(1): 39–45.
- COOPER R.J., MELVIN T.M., TYERS I., WILSON R.J.S., BRIFFA K.R. (2013) A tree-ring reconstruction of East Anglian (UK) hydroclimate variability over the last millennium. *Climate Dynamics* 40(3–4): 1019–1039
- ČUFAR K., DE LUIS M., ZUPANČIČ M., ECKSTEIN D. (2008a) A 548-year tree-ring chronology of oak (*Quercus* spp.) for southeast Slovenia and its significance as a dating tool and climate archive. *Tree-Ring Research* 64(1): 3–15
- ČUFAR K., DE LUIS M., ECKSTEIN D., KAJFEŽ-BOGATAJ L. (2008b) Reconstructing dry and wet summers in SE Slovenia from oak tree rings series. *International Journal of Biometeorology* 52(7): 607–615.
- ČUFAR K., ŠEFC B., DE LUIS M., MORGÓS A., GRABNER M., MERELA M., TRAJKOVIĆ J. (2014a) Tree-ring chronology of pedunculate oak (*Quercus robur*) and its potential

- for development of dendrochronological research in Croatia. *Drvna Industrija* 65(2): 129–137
- ČUFAR K., GRABNER M., MORGOS A., MARTINEZ DEL CASTILLO E., MERELA M., DE LUIS M. (2014b) Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees* 28(5): 1267–1277
- DE LUIS M., ČUFAR K., SAZ M.A., LONGARES L.A., CEGLAR A., KAJFEŽ-BOGATAJ L. (2014) Trends in seasonal precipitation and temperature in Slovenia during 1951–2007. *Regional Environmental Change* 14: 1801–1810.
- DICKSON R.E., TOMLINSON P.T. (1996) Oak growth, development and carbon metabolism in response to water stress. *Annales des Sciences Forestières* 53(2–3): 181–196
- DOBROVOLNÝ P., RYBNÍČEK M., KOLÁŘ T., BRÁZDIL R., TRNKA M., BÜNTGEN U. (2015) A tree-ring perspective on temporal changes in the frequency and intensity of hydroclimatic extremes in the territory of the Czech Republic since 761 AD. *Climate of the Past* 11: 1453–1466
- DOLEŽAL J., MAZŮREK P., KLIMEŠOVÁ J. (2010) Oak decline in southern Moravia: the association between climate change and early and late wood formation in oaks. *Preslia* 82(3): 289–306
- DROBYSHEV I., NIKLASSON M., EGGERTSSON O., LINDERSON H., SONESSON K. (2008) Influence of annual weather on growth of pedunculate oak in southern Sweden. *Annals of Forest Science* 65(5): 512p1–512p14
- ECKSTEIN D., BAUCH J. (1969) Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88: 230–250
- ECKSTEIN D., MATHIEU K., BAUCH J. (1972) Jahrringanalyse und Baugeschichtsforschung. Aufbau einer Jahrringchronologie für die Vier- und Marschlande bei Hamburg. *Abh. Verh. naturwiss. Ver. Hamburg* 16: 73–100
- ECKSTEIN D., WROBEL S. (2007) Dendrochronological proof of origin of historic timber-retrospect and perspectives. In: Haneca, K., Verheyden, A., Beekmann, H., Gärtner, H., Helle, G., Schleser, G. (Eds.), Vol. 5: Proceedings of the Symposium on Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. *Tervuren, Belgium. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Umwelt/Environment* 74, pp. 8–20

- EPRON D., DREYER E. (1996) Starch and soluble carbohydrates in leaves of water-stressed oak saplings. *Annals of Forest Science* 53: 263–268
- FONTI P., EILMANN B., GARCÍA-GONZÁLEZ I., VON ARX G. (2009) Expeditious building of ring-porous earlywood vessel chronologies without losing signal information. *Trees – Structure and Function* 23: 665–671
- FRIEDRICH M., REMMELE S., KROMER B., HOFMANN J., SPURK M., KAUSER K.F., ORCEL C., KUPPERS M. (2004) The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe; a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon* 46(3): 1111–1122
- FRIEDRICH D., BÜNTGEN U., ESPER J., FRANK D., NEUWIRTH B., LÖFFLER J. (2009) Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. *Tree Physiology* 29: 39–51
- FRITTS H.C., MOSIMANN J.E., BOTTORFF C.P. (1969) A Revised Computer Program for Standardizing Tree – Ring Series. *Tree Ring Bulletin* 29: 15–20
- FRITTS H.C. (1976) Tree rings and climate. *Academic Press, London*, 567 pp.
- GAERTIG T., SCHACK-KIRCHNER H., HILDEBRAND E.E., WILPERT K. (2002) The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. *Forest Ecology and Management* 159(1-2): 15–25
- GARCIA-GONZALEZ I., FONTI P. (2006) Selecting earlywood vessels to maximize their environmental signal. *Tree Physiology* 26: 1289–1296
- GEIHOFFER D., GRABNER M., GELHART J., WIMMER R., FUCHSBERGER H. (2005) New master chronologies from historical and archaeological timber in Eastern Austria. In: Sarlatto, M., Di Filippo, A., Piovesan, G., Romagnoli, M. (Eds.), *EuroDendro 2005. Proceedings of the EuroDendro 2005. Viterbo, Italy*, pp. 50–51
- GERBER S., CHADOEUF J., GUGERLI F., LASCOUX M., BUITEVELD J., COTTRELL J., DOUNAVI A., FINESCHI S., FORREST L.L., FOGELQVIST J., GOICOECHEA P.G., JENSEN J.S., SALVINI D., VENDRAMIN G.G., KREMER A. (2014) High rates of gene flow by pollen and seed in oak populations across Europe. *PLoS ONE* 9(1): e85130
- GEBLER A., KEITEL C., KREUZWIESER J., MATYSSEK R., SEILER W., RENNENBERG H. (2007) Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1–11

- GRISSINO-MAYER H.D., HOLMES R., FRITTS H.C. (1992) International tree-ring data bank program library. Version 1.1. *Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson*
- GISSINO-MAYER H. D. (2001) Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program Cofecha. *Tree-ring research, Tree-Ring Society* 57(2): 205–221
- HANECA K., WAŻNY T., VAN ACKER J., BEECKMAN H. (2005) Provenancing Baltic timber from art historical objects: Success and limitations. *Journal of Archaeological Science* 32: 261–271
- HANECA K., BOEREN I., VAN ACKER J., BEECKMAN H. (2006) Dendrochronology in suboptimal conditions: tree rings from medieval oak from Flanders (Belgium) as dating tools and archives of past forest management. *Vegetation History and Archaeobotany* 15(2): 137–144
- HANECA K., ČUFAR K., BEECKMAN H. (2009) Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36: 1–11
- HANECA K., DEBONNE V. (2012) Precise tree-ring dating of building activities despite the absence of bark: A case-study on medieval church roofs in Damme, Belgium. *Dendrochronologia* 30(1): 23–34
- HARRIS I., JONES P.D., OSBORN T.J., LISTER D.H. (2013) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. *International Journal of Climatology* 34(3): 623–642
- HLÁSNY T., BARCZA Z., FABRIKA M., BALÁZS B., CHURKINA G., PAJTÍK J., SEDMÁK R., TURČÁNI M. (2011) Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research* 47: 219–236
- HOLLSTEIN E. (1980) Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte. Trierer Grabungen und Forschungen. *Mainz am Rhein*, 274 pp.
- HOLMES R.L., ADAMS R.K., FRITTS H.C. (1986) Tree-Ring Chronologies of Western North America: California Eastern Oregon and Northern Great Basin with Procedures Used in the Chronology Development Work Including Users Manuals for Computer Programs COFECHA and ARSTAN. Chronology Series VI. *Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ, USA*, pp. 50–56

- HORÁČEK P., ŠLEZINGEROVÁ J., GANDELOVÁ L. (2003) Analysis of cambial activity and formation of wood in *Quercus robur* L. under conditions of a floodplain forest. *Journal of Forest Science* 49(9): 412–418
- HROŠ M., VAVRČÍK H. (2014) Comparison of earlywood vessel variables in the wood of *Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. growing at the same site. *Dendrochronologia* 32: 284–289
- JANSMA E. (1995) RememberRINGS: The Development and Application of Local and Regional Tree-Ring Chronologies of Oak for the Purposes of Archaeological and Historical Research in the Netherlands. *Dissertation, Amsterdam University*
- KAENNEL M., SCHWEINGRUBER F. (1995) Multilingual Glossary of Dendrochronology: Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. *Berne, Stuttgart, Vienna: Paul Haupt Publisher*. 467 pp.
- KERN Z., GRYNÆUS A., MORGÓS A., HORVÁTH E., SCHMIDT B. (2009) High and low stands of Balaton Lake (East Central Europe, Hungary): reconstructed end-summer lake levels from AD 1601 based on radial growth of oak trees. in: *Proceedings of the Eurodendro 2009. Developments, Advances, Challenges, Mallorca, Spain*, pp 104.
- KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M. (2012) Dendrochronological and radiocarbon dating of subfossil wood from the Morava river basin. *Geochronometria* 38(2): 155–161
- KOLÁŘ T., KYNCL T., RYBNÍČEK M. (2012) Oak chronology development in the Czech Republic and its teleconnection on a European scale. *Dendrochronologia* 30(3): 243–248
- KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M., TEGEL W. (2013) Dendrochronological evidence of cockchafer (*Melolontha* sp.) outbreaks in subfossil tree-trunks from Tovačov (CZ Moravia). *Dendrochronologia* 31(1): 29–33
- KOLÁŘ T., GIAGLI K., TRNKA M., BEDNÁŘOVÁ E., RYBNÍČEK M. (2015) A case study: Response of European Beech to climate variability in the tree-ring growth and leaf phenology. *Silva Fennica* 50(2): 1520
- KUSTER T.M., AREND M., GÜNTHARDT-GOERG M.S., SCHULIN R. (2013) Root growth of different oak provenances in two soils under drought stress and air warming conditions. *Plant Soil* 369: 61–71

- LEAL S., CAMPELO F., LUZ A.L., CARNEIRO M.F., SANTOS J.A. (2015) Potential of oak tree-ring chronologies from Southern Portugal for climate reconstructions. *Dendrochronologia* 35: 4–13
- LEBOURGEOIS F., COUSSEAU G., DUCOS Y. (2003) Étude d'une chênaie sessiliflore exceptionnelle: la futaie des Clos (Sarthe). *Revue forestière française* 4: 333–346
- MÉRIAN P., BONTEMPS J.D., BERGÈS L., LEBOURGEOIS F. (2011) Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecology* 212(11): 1855–1871
- MICHELOT A., BREDI N., DAMESIN C., DUFRENE E. (2012) Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 265: 161–171
- MOŽNÝ M., TOLASZ R., NEKOVÁŘ J., SPARKS T., TRNKA M., ŽALUD Z. (2009) The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 913–919
- MOŽNÝ M., BRÁZDIL R., DOBROVOLNÝ P., TRNKA M. (2012) Cereal harvest dates in Czech Republic between 1501 and 2008 as proxy for March-June temperature reconstruction. *Climatic Change* 110: 801–821
- PANSHIN J.A., DE ZEEUW C. (1980) Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada. *New York, McGraw-Hill*, 722 pp.
- PARKER J. (1962) Seasonal changes in cold resistance and free sugars of some hardwood tree barks. *Forest Science* 8: 255–262
- PETRÁŠ R., BREZINA L., MECKO J. (2007) Dynamics of radial increments of oak due to climatic factors effect. *Ekologia (Bratislava)* 26(3): 295–304
- PETRÁŠ R., MECKO J. (2011) Effect of climatic factors on the dynamics of radial increments of Norway spruce, European beech and Sessile oak. *Journal of Forest Science* 57(7): 293–302
- PILCHER J.R., BAILLIE M.G.L., SCHMIDT B., BECKER B. (1984) A 7272-year treering chronology for western Europe. *Nature* 312(5990): 150–152
- POPA I., LECA S., CRĂCIUNESCU A., SIDOR C., BADEA O. (2013) Dendroclimatic Response Variability of *Quercus* species in the Romanian Intensive Forest Monitoring Network. *Not Bot Horti Agrobo* 41(1): 326–332

- PUKIENÉ R., OŽALAS E. (2007) Medieval oak chronology from the Vilnius lower castle. *Dendrochronologia* 24(2–3): 137–143
- RAČKO J., ŠMELKO Š., SCHEER L., PÁNEK F. (1987) Využitie leteckej snímky pri výskume a inventarizácii porastov postihnutých hromadným hynutím duba. In: *Vedecké práce VÚLH vo Zvolene, 36, Bratislava: Príroda* 243–254
- ROZAS V. (2005) Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. *Annals of Forest Science* 62: 209–218
- RUST S., ROLOFF A. (2002) Reduced photosynthesis in old oak (*Quercus robur*): the impact of crown and hydraulic architecture. *Tree Physiology* 22: 597–601
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., KOLÁŘ T., ŽID T. (2010) Radial Growth and Health Condition of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) Stands in Relation to Climate (Silesian Beskids, Czech Republic). *Geochronometria* 36(1): 9–16
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., KOLÁŘ T., ŽID T. (2012) Growth responses of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) to the climate in the south-eastern part of the Českomoravská Upland (Czech Republic). *Geochronometria* 39(2): 149–157
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., ŽID T., KOLÁŘ T., TRNKA M., BÜNTGEN U. (2015) Exploring Growth Variability and Crown Vitality of Sessile Oak (*Quercus petraea*) in the Czech Republic. *Geochronometria* 42(1): 17–27
- RYBNÍČEK M., ČERMÁK P., PROKOP O., ŽID T., TRNKA M., KOLÁŘ T. (2016) Oak (*Quercus* spp.) response to climate differs more among sites than among species in central Czech Republic. *Dendrobiology* 75:55–65
- SAKAI A., LARCHER W. (1987) Frost Survival of Plants: Responses and Adaptation to Freezing Stress. Ecological Studies 62. *Springer-Verlag, Berlin*, 321 pp.
- SCHWEINGRUBER F.H. (1990) Anatomie europäischer Hölzer/Anatomy of European woods Ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum-, Strauch- und Zwergstrauchhölzer. *Bern: Verlag Paul Haupt*, 799 pp.
- SCHWEINGRUBER F.H. (1996) Tree Rings and Environment-Dendroecology. *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf/Bern, Stuttgart, Vienna*, 609 pp.
- SOHAR K., LÄÄNELAID A., ECKSTEIN D., HELAMA S., JAAGUS J. (2014) Dendroclimatic signals of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in Estonia. *European Journal of Forest Research* 133(3): 535–549

- STEINBRECHER R., CONTRAN N., GUGERLI F., SCHNITZLER J.P., ZIMMER I., MEDARD T., GÜNTHARDT-GOERG M.S. (2013) Inter- and intra-specific variability in isoprene production and photosynthesis of Central European oak species. *Plant Biology* 15(1): 148–156
- ŠMELKO Š., SCHEER L. (2000) Dendrochronological analysis of diameter growth and increment of Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in Danube floodplain forests. *Ekológia (Bratislava)* 19(2): 125–140
- ŠTEFANČÍK I., STRMEŇ S. (2012) Assessment of structure, growth and development of oak stand (*Quercus petraea* (Mattusch.) Liebl.) affected by mass decay in the past. *Lesnícky Časopis – Forestry Journal* 58(1): 10–21
- TEGEL W., VANMOERKERKE J., BÜNTGEN U. (2010) Updating historical tree-ring records for climate reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 29: 1957–1959
- THOMAS F.M., BLANK R., HARTMANN G. (2002) Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32: 277–307
- THOMAS F.M., MEYER G., POPP M. (2004) Effects of defoliation on the frost hardiness and the concentrations of soluble sugars and cyclitols in the bark tissue of pedunculate oak (*Quercus robur* L.). *Annals of Forest Science* 61: 455–463
- TRNKA M., KERSEBAUM K.C., EITZINGER J., HAYES M., HLAVINKA P., SVOBODA M., DUBROVSKÝ M., SEMERÁDOVÁ D., WARDLOW B., POKORNÝ E., MOŽNÝ M., WILHITE D., ŽALUD Z. (2013) Consequences of climate change for the soil climate in Central Europe and the central plains of the United States. *Climatic Change* 120: 405–418
- TRNKA M., BRÁZDIL R., BALEK J., SEMERÁDOVÁ D., HLAVINKA P., MOŽNÝ M., ŠTEPÁNEK P., DOBROVOLNÝ P., ZAHRADNÍČEK P., DUBROVSKÝ M., EITZINGER J., FUCHS B., SVOBODA M., HAYES M., ŽALUD Z. (2015) Drivers of soil drying in the Czech Republic between 1961 and 2012. *International Journal of Climatology* 35(9): 2664–2675
- VANDER MIJNSBRUGGE K., DE CLEENE L., BEECKMAN H. (2011) A combination of fruit and leaf morphology enables taxonomic classification of the complex *Q. robur* L. - *Q. x rosacea* Bechst. - *Q. petraea* (Matt.) Liebl. in autochthonous stands in Flanders. *Silvae Genetica* 60(3–4): 139–148
- WAŻNY T. (1990) Aufbau und Anwendung der Dendrochronologie für Eichenholz in Polen. Hamburg: Diss. Universität Hamburg, 213 pp.

- WAŻNY T., ECKSTEIN D. (1991) The dendrochronological signal of oak (*Quercus* spp.) in Poland. *Dendrochronologia* 9: 35–49
- WAŻNY T. (2002) Baltic timber in Western Europe – An exciting dendrochronological question. *Dendrochronologia* 20(3): 313–320
- WAŻNY T., LORENTZEN B.E., KÖSE N., AKKEMIK Ü., BOLTRYK Y., GÜNER T., KYNCL J., KYNCL T., NECHITA C., SAGAYDAK S., VASILEVA J.K. (2014) Bridging the gaps in tree-ring records – creating a high-resolution dendrochronological network for Southeastern Europe. *Radiocarbon* 56(4): 39–50
- WIGLEY T.M.L., BRIFFA K.R., JONES P.D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213
- WILSON R., MILES D., LOADER N.J., MELVIN T., CUNNINGHAM L., COOPER R., BRIFFA K. (2012) A millennial long March-July precipitation reconstruction for southern-central England. *Climate Dynamics* 40(3–4): 997–1017
- ZELÉNÁ SPRÁVA (2014) Správa o lesnom hospodárstve v Slovenskej republike za rok 2013. Bratislava, MPA RV SR, 84 pp.

**UPDATING THE CZECH MILLENNIA-LONG OAK
TREE-RING WIDTH CHRONOLOGY**

PROKOP, O., KOLÁŘ, T., KYNCL, T., RYBNÍČEK, M. (2016)

(TREE-RING RESEARCH, IN REVIEW)

UPDATING THE CZECH MILLENNIA-LONG OAK TREE-RING WIDTH

CHRONOLOGY

PROKOP O.¹, KOLÁŘ T.^{1,2}, KYNCL T.³, RYBNÍČEK M.^{1,2}

¹*Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University in Brno, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic*

²*Global Change Research Institute CAS, Bělidla 4a, 603 00 Brno, Czech Republic*

³*DendroLab Brno, Eliášova 37, 616 00 Brno, Czech Republic*

ABSTRACT

Over the last years, a millennia-long oak tree-ring width chronology consisting of 3194 samples from 387 locations was developed in the Czech Republic. Despite collection of such a huge dataset, the replication in the 19th century was very low and the oak natural distribution in the Czech Republic was insufficiently covered by recent samples. This study aimed to remove these weaknesses which still limited the paleoclimatic potential of this dataset and to determine the number of sapwood rings, which is crucial for dendrochronological dating. Therefore, new recent samples were randomly collected at numerous sawmills along the Czech-German border. The historical material was sampled by a Pressler borer usually from church belfry constructions traditionally made from oak. Standard dendro-methods were used for sample preparation, ring width measurements, crossdating and chronology development. In total, 252 recent and 90 historical tree-ring width series were incorporated into the chronology. The resulting TRW record shows robust signal strength and homogeneous coverage of the territory. We confirmed that the number of sapwood rings is constant over time. Therefore, we recommend considering an estimate of sapwood rings (5–24) for more precise dating of historical wood findings in the Czech Republic.

KEYWORDS: belfry construction, Czech Republic, replication, *Quercus*, sapwood ring

11.1 INTRODUCTION

Multi-centennial and multi-millennial oak tree-ring width chronologies have been constructed across Europe over the last two decades (e.g. Baillie 1995; Krapiec 2001; Tegel et al. 2010; Büntgen et al. 2011; Kolář et al. 2012; Čufar et al. 2014; Sohar et al. 2014). The main purposes of the long TRW chronologies have been demonstrated mainly in dendroarchaeology (Ważny et al. 2014), paleo-climatology and -ecology (Büntgen et al. 2013). However, quality and sample replication of the TRW chronologies is not always stable over the entire chronology time span (Haneca et al. 2009). Insufficient sample replication over time and diminished site control of the relict data affect expected outcomes (Büntgen et al. 2012). Such restrictions can cause complications when dating historical or archaeological artifacts (e.g. Kern et al. 2014) or reconstruction of climate variability (Prokop et al. 2016). Therefore, TRW chronologies are treated as dynamic entities that need to be constantly improved (Haneca et al. 2009).

The extensive historical record of settlement in the Czech Republic provides abundant archeological oak finds to support dendrochronological research. Oak TRW chronology was first established in 1995 (Poláček 2002) and has been gradually improved until present (Rybníček et al. 2010; Kolář et al. 2012; Dobrovolný et al. 2015). Although the chronology consisted of more than 3000 TRW series, it manifested two essential drawbacks. Very low replication in the 19th century and lack of recent samples from the entire territory of the Czech Republic were the main issues. Here, we present the latest update of the Czech TRW chronology, which has removed these issues. In addition, 924 TRW measurements of original and new recent samples and 529 TRW measurements of original historical samples were used to explore the number of sapwood rings, which is crucial for precise dendrochronological dating of oak historical samples without bark or outermost ring.

11.2 MATERIAL AND METHODS

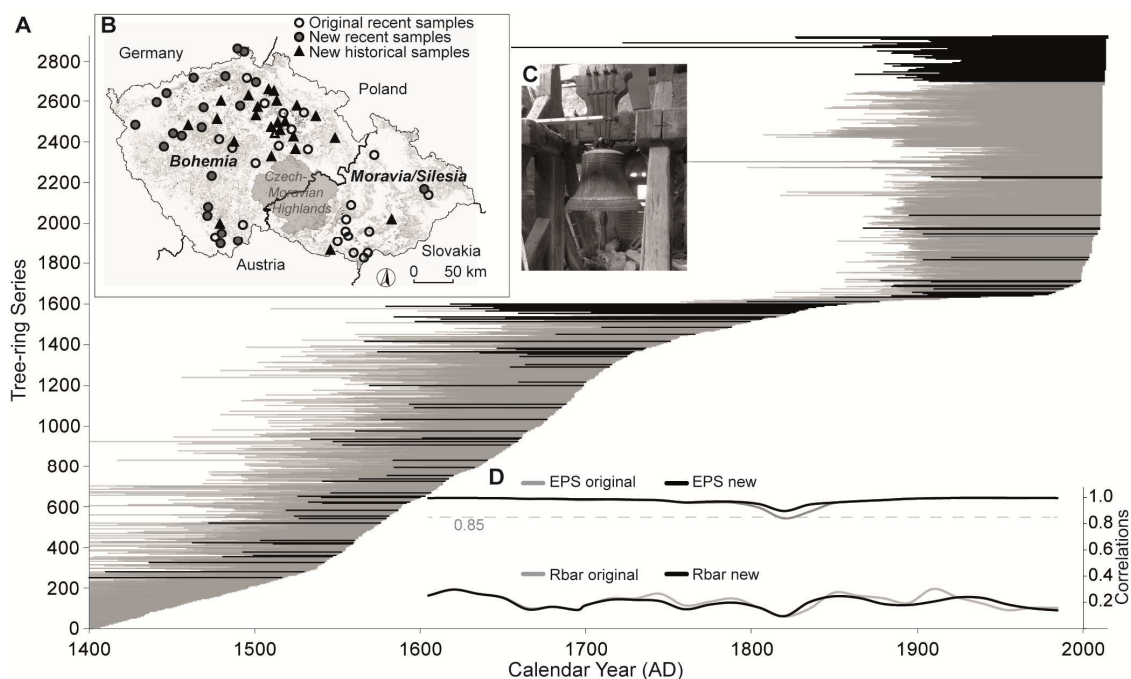
In the Czech Republic, oak is mainly represented by the pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and the sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Regarding oak distribution, the Czech Republic can be divided into two areas (the west area called Bohemia and the east area called Moravia and Silesia) by the Czech-Moravian Highlands, where oak grows only scarcely (Figure 1B). Oak distribution and its frequent use in Central Europe is evidenced by many historical constructions, e.g. church belfries

(Kern et al. 2014), water constructions (Tegel et al. 2012), wooden vessels (Filková et al. 2014, Klein et al. 2014 and 2016), archaeological or subfossil finds (e.g. Kolář and Rybníček 2011; Dejmal et al. 2014).

Recent oaks were randomly sampled by chainsaw at sawmills from selected regions to cover the entire territory of the Czech Republic. We selected mainly the western regions which were not represented in the old versions of the TRW chronology. Historical samples were taken using a Pressler borer mainly from church belfries which were selected based on documentary evidence. All samples were measured using the VIAS TimeTable measuring system devised by SCIAM. TRW series were measured (an accuracy of 0.01 mm) and synchronized using PAST4 (©SCIAM). Compiled recent and historical mean TRW series were dated according to the latest version of the Czech TRW chronology. The degree of similarity between the TRW series was assessed by *t*-tests (Baillie and Pilcher 1973; Hollstein 1980) and the parallelism coefficient (Gleichläufigkeit; Eckstein and Bauch 1969). Expressed Population Signal (EPS; Wigley et al. 1984) and inter-series correlation (R_{bar}) were calculated to assess the quality of the chronology. Both statistical metrics were computed over the 30-year windows lagged by 15 years. Samples from both the recent and the historical sample subsets, where outermost ring or bark were preserved, were used to count the number of sapwood rings. The border between heartwood and sapwood was detected visually by difference in colour.

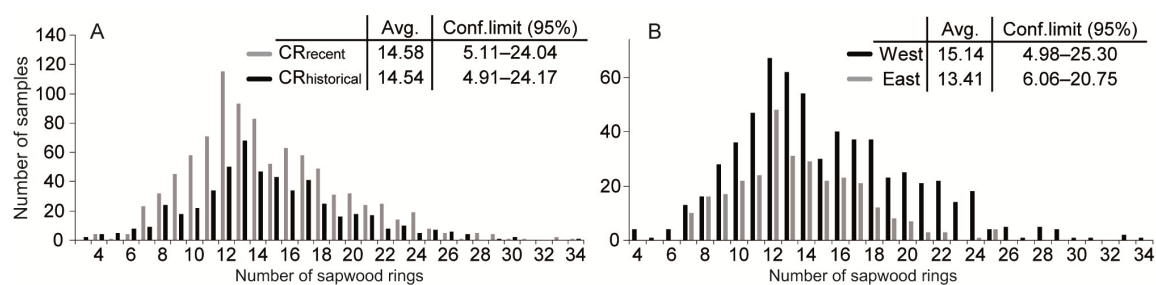
11.3 RESULTS

To update the existing oak chronology we have taken 647 samples, out of which 461 were from living trees and 186 were from historical structures. However, some of the obtained TRW series could not be reliably crossdated especially due to low number of measurable tree-ring widths and growth anomalies. These TRW series had to be excluded from the chronology building. Finally, we extended the original chronology using 252 series from living trees (21 sites) and 90 series from 24 historical structures (Figure 1A, B), primarily church belfries (Figure 1C). The newly built chronology consists of 3536 series, which cover the continuous period of 352–2014 AD. We have increased replication in the first half of the 19th century by almost 40 series. Due to this extension the EPS value in this period reached a value of 0.90 (Figure 1D). In addition, the chronology is replicated by at least 50 series from 1028 till present. The number of



ČLÁNEK IV - Fig. 1: (A) Temporal distribution (only from 1400 to the present) of TRW series from previously (grey) and recently (black) collected samples; (B) The geographical distribution of the study sites across the Czech Republic; (C) Illustration of the belfry construction; (D) Expressed Population Signal (EPS) and inter-series correlation (Rbar)

sapwood rings ranges from 4 to 34 with an average value of 14.6 for the Czech Republic (Figure 2A), while higher numbers of sapwood rings were calculated for the western regions (15.1) than for the eastern (13.4; Figure 2B). The number of sapwood rings in the historical samples varies between 3 and 34 with almost the same average value (14.5) as in the recent subset.



ČLÁNEK IV - Fig. 2: Number of sapwood rings of recent and historical samples for the Czech Republic (A) with average values and the 95% confidence limit. In addition, values for the recent samples were calculated separately for the east and the west (B)

11.4 DISCUSSION

Previous Previous versions of the Czech TRW chronology were replicated at the beginning of the 19th century by only 19 TRW series, mostly from the eastern part of the

country (Kolář et al. 2012; Dobrovolný et al. 2015). Lack of dated oak finds from this period motivated us to search for suitable oak constructions, mostly from the west, based on documentary evidence. Accessible church chronicles allowed us to select many oak constructions, mainly oak belfries. However, the subsequent dendrochronological dating shows that several historical records were imprecise and some samples were older than 19th century. These discrepancies were most likely caused by removal of the latest rings due to woodworking techniques or inaccuracies data in the historical records. Thus, our results significantly contributed to the clarification of the chronicle records in many cases. In spite of this fact, the new samples increased the chronology replication to at least 57 TRW series in the 19th century (Figure 1A).

Well replicated recent TRW chronology constructed from trees representing the whole territory are crucial to understand the growth variability in detail in the varied territory of the Czech Republic and to evaluate the number of sapwood rings. The random sampling strategy of recent samples was chosen so that the artificial signal-degradation was as low as it is for the historical subset (Büntgen et al. 2012). The increase in the number of sites has strengthened the common signal, which leads to increased likelihood of dendrochronological dating (Ważny et al. 2014). Adding a new dataset has significantly increased the replication and exceeded the generally accepted threshold of 0.85 EPS (Figure 1D; Wigley et al. 1984). When the EPS value drops below a predetermined level, the chronology starts to be dominated by the individual tree-level signal rather than a coherent stand-level signal (Speer 2010). The greatly increased EPS, which considers the inter-series correlation and the sample size information and estimates how well a finite number of samples, represents the theoretical population average (Esper et al. 2003). This shows robust common signal strength.

The number of sapwood rings in living trees needs to be explored to estimate the number of missing sapwood rings in the dating objects (Sohar et al. 2012). The confidence interval (95%) of expected values of sapwood rings for the western and eastern Czech Republic varies from 4.98 to 25.30 and 6.06 to 20.75, respectively (Figure 2B). Results are in compliance with the previous study, conducted only in the southeastern region, where 5–21 sapwood rings were determined (Rybníček et al. 2006). Our results confirmed the general trend of a decreasing number of sapwood rings in

Europe from west to east and their tighter range (Baillie et al. 1985). For example, values of the 95% confidence limit for British Isles were established as 9.16–58.15 (Hillam et al. 1987), for France 15.25–43.26 (Pilcher 1987), for Germany 8.22–37.95 (Hollstein 1980) and for the Baltic area and southern Finland 6.18–18.71 (Sohar et al. 2012). It is assumed that the number of sapwood rings has remained constant for the oak populations throughout the history (Sohar et al. 2012). To confirm this hypothesis we used historical and archaeological material mainly from the period from the 7th to the 19th century. With respect to the historical timber trade and timber floating (Ważny 2002), we did not distinguish the eastern and western regions of the country. The results show the same range in the recent and the historical subsets (Figure 2A). Therefore, we recommend to consider an estimate of 5–24 sapwood rings for dating historical objects in the Czech Republic.

11.5 ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported from the Czech Republic Grant Agency through the grant numbered 13-04291S, the Ministry of Education, Youth and Sports of CR within the National Sustainability Program I (NPU I), grant number LO1415, projects no. LDF_VP_2015004, NAKI DF13P01OVV005 and DG16P02M026.

11.6 REFERENCES

- BAILLIE M.G.L., PILCHER J.R. (1973) A simple crossdating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33: 7–14
- BAILLIE M. G. L., HILLAM J., BRIFFA K. R., BROWN D. M. (1985) Re-dating the English art-historical tree-ring chronologies. *Nature* 315: 317–319
- BAILLIE M.G.L. (1995) *A Slice Through Time: Dendrochronology and Precision Dating*. B.T. Batsford Ltd, London, 177 pp. ISBN 0-7134-7654-0
- BÜNTGEN U., TEGEL W., NICOLUSSI K., MCCORMICK M., FRANK D., TROUET V., KAPLAN J.O., HERZIG F., HEUSSNER K.U., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331: 578–582
- BÜNTGEN U., TEGEL W., HEUSSNER K.U., HOFMANN J., KONTIC R., KYNCL T., COOK E.R. (2012) Effects of sample size in dendroclimatology. *Climate Research* 53: 263–269

- BÜNTGEN U., KYNCL T., GINZLER CH., JACKS D.S., ESPER J., TEGEL W., HEUSSNER K.U., KYNCL J. (2013) Filling the Eastern European gap in millennium-long temperature reconstructions. *Proceedings of the National Academy of Science* 110: 1773–1778
- ČUFAR, K., GRABNER M., MORGOS A., MARTINEZ DEL CASTILLO E., MERELA M., DE LUIS M. (2014) Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees* 28(5): 1267–1277
- DEJMAL M., LISÁ L., NÝVLTOVÁ FIŠÁKOVÁ M., BAJER A., PETR L., KOČÁR P., RYBNÍČEK M., KOČÁROVÁ R., NEJMAN L., SŮVOVÁ Z., CULP R., VAVRČÍK H. (2014) Medieval Horse Stable; The Results of Multi Proxy Interdisciplinary Research. *PLoS One* 9(3): 1–12
- DOBROVOLNÝ P., RYBNÍČEK M., KOLÁŘ T., BRÁZDIL R., TRNKA M., BÜNTGEN U. (2015) A tree-ring perspective on temporal changes in the frequency and intensity of hydroclimatic extremes in the territory of the Czech Republic since 761 AD. *Climate of the Past* 11: 1453–1466
- ECKSTEIN D., BAUCH J. (1969) Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88: 230–250
- ESPER J., SHIYATOV S. G., MAZEPA V. S., WILSON R. J. S., GRAYBILL D. A., FUNKHOUSER G. (2003) Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Climate Dynamics* (2003) 21: 699–706
- FILKOVÁ V., KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M., GRYC V., VAVRČÍK H., JURČÍK J. (2014) Historical utilization of wood in southeastern Moravia (Czech Republic). *iForest* 8: 101–107
- HANECA K., ČUFAR K., BEECKMAN H. (2009) Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36: 1–11
- HILLAM J. (1987) Problems of dating and interpreting results from archaeological timbers. *BAR International Series* 333: 141–155
- HOLLSTEIN E. (1980) Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte. *Trierer Grabungen und Forschungen*. Mainz am Rhein, 274 pp.
- KERN Z., ÁRVAI M., GRYNAEUS A. (2014) Dendrochronological study of a wooden belfry from szokolya-királyrét, Hungary. *Archeometriai Műhely* 11(1): 71–76

- KLEIN A., NEMESTOTHY S., KADNAR J., GRABNER M. (2014) Dating furniture and coopered vessels without waney edge – Reconstructing historical wood-working in Austria with the help of dendrochronology. *Dendrochronologia* 32(1): 90–96
- KLEIN A., BOCKHORN O., MAYER K., GRABNER M. (2016) Central European wood species: characterization using old knowledge. *Journal of Wood Science* 62: 194–202
- KOLÁŘ T., RYBNÍČEK M. (2011) Dendochronological and radiocarbon dating of subfossil wood from the Morava River basin. *Geochronometria* 38(2): 155–161
- KOLÁŘ T., KYNCL T., RYBNÍČEK M. (2012) Oak chronology development in the Czech Republic and its teleconnection on a European scale. *Dendrochronologia* 30(3): 243–248
- KRAPIEC M. (2001) Holocene dendrochronological standards for subfossil oaks from the area of Southern Poland. *Studia Quaternaria* 18: 47–63
- PILCHER J.R. (1987) A 700 year dating chronology for northern France. Applications of tree-ring studies. Current research in dendrochronology and related subjects. *BAR International Series* 333: 127–139
- POLÁČEK L. (2002) Dendrochronologické fórum 2002 – Dendrochronologie v české archeologii dnes a zítra. *Archeologický ústav AV ČR Brno*, ISBN: 80-86023-43-5 (in Czech)
- PROKOP O., KOLÁŘ T., BÜNTGEN U., KYNCL J., BOŠELA M., BARTA P., CHOMA M., RYBNÍČEK M. (2016) On the paleoclimatic potential of a millennium-long oak ring width chronology from Slovakia. *Dendrochronologia* 40: 93–101
- RYBNÍČEK M., VAJRČÍK H., HUBENÝ R. (2006) Determination of the number of sapwood annual rings in oak in the region of southern Moravia. *Journal of forest science* 52(3): 141–146
- RYBNÍČEK M., KOŇAS P., KOLÁŘ T. (2010) The benefits of tree-ring curves detrending for dating archaeological wood. *Geochronometria* 35: 85–90
- SOHAR K., VITAS A., LÄÄNELAID A. (2012) Sapwood estimates of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in eastern Baltic. *Dendrochronologia* 30(1): 49–56
- SOHAR K., LÄÄNELAID A., ECKSTEIN D., HELAMA S., JAAGUS J. (2014) Dendroclimatic signals of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in Estonia. *European Journal of Forest Research* 133: 535–549

- SPEER J. H. (2010) Fundamentals of tree-ring research. *Tucson: University of Arizona Press*, 333 pp. ISBN 978-0-8165-2684-0
- TEGEL W., VANMOERKERKE J., BÜNTGEN U. (2010) Updating historical tree-ring records for climate reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 29: 1957–1959
- TEGEL W., ELBURG R., HAKELBERG D., STÄUBLE H., BÜNTGEN U. (2012) Early Neolithic Water Wells Reveal the World’s Oldest Wood Architecture. *Plos One* 7(12): e51374
- WAŻNY T. (2002) Baltic timber in Western Europe – an exciting dendrochronological question. *Dendrochronologia* 20(3): 313–320
- WAŻNY T., LORENTZEN B.E., KÖSE N., AKKEMIK Ü., BOLTRYK Y., GÜNER T., KYNCL J., KYNCL T., NECHITA C., SAGAYDAK S., VASILEVA J.K. (2014) Bridging the gaps in tree-ring records – creating a high-resolution dendrochronological network for Southeastern Europe. *Radiocarbon* 56(4): 39–50
- WIGLEY T. M. L., BRIFFA K.R., JONES P.D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Princip křížového datování a prodloužení chronologie do minulosti (převzato z <i>www.wsl.ch</i> a upraveno autorem práce).....	21
Obr. 2 - Výsledky analýzy významných negativních let pro slovenskou chronologii. Hodnoty 0-20% bez negativních let (bílá), negativní roky pro 20-40% stromů (světle šedá), výrazné negativní roky pro 40-60% stromů (černě); standardní chronologie (tmavě šedá).....	28
ČLÁNEK I - Fig. 1: Location of the study area and the sites	46
ČLÁNEK I - Fig. 2: Growth trends of the tree-ring width chronologies	47
ČLÁNEK I - Fig. 3: Synchronization of site TRW chronologies (T-test according to Baillie and Pilcher / T-test according to Hollstein / synchronization of tree-ring series in % (Gleichläufigkeit)).....	50
ČLÁNEK I - Fig. 4: Values of correlation coefficients of the site residual index tree-ring chronologies with T_{avg} = average monthly temperature, Precipitation = monthly precipitation, RSMC = relative saturation of soil profile by soil water from top to 130 cm of depth and S_{rad} = global radiation sums from previous April to September of the current year and the period July–September of the previous year (JUL-SEP) and the period March–May (Mar-May) and June–August (Jun-Aug) of the current year for 1961–2011. Values highlighted in black are statistically significant ($\alpha = 0.05$).....	51
ČLÁNEK I - Fig. 5: (A) The progress of monthly temperature, precipitation and relative soil moisture content (RSMC in WMO (World Meteorological Organization) normal period 1961–1990 (black line) and 1991–2011 (grey line). (B) Mean temperatures, mean RSMC and sum precipitation for selected periods were correlated with the site chronologies. Statistically significant correlation coefficients are highlighted ($\alpha = 0.05$). (C) Temporal trends of the analysed climatic parameters for the selected periods. (D) Temporal trends of the analysed climatic parameters for the whole vegetation period.	52
ČLÁNEK II - Fig. 1: Spatial distribution of 44 sampling sites and their distribution in terms of west/east, <i>Q. robur</i> / <i>Q. petraea</i> , dry/wet and high/low-altitude oak TRW	

<i>sub-chronologies over the territory of the Czech Republic; dashed line marks boundary between west and east chronologies.....</i>	69
ČLÁNEK II - Fig. 2: <i>Spatial correlations between (A) May–July Czech precipitation series (Brázdil et al. 2012) and CRU TS3.23 gridded precipitation (Harris et al. 2013) and (B) May–July Czech SPEI-1 (Brázdil et al. 2015) and gridded CSIC SPEI drought index (Vicente-Serrano et al. 2010) for the 1901–2000 period</i>	70
ČLÁNEK II - Fig. 3: <i>Running correlations (21-year window) and differences between dry/wet (A), low/high-altitude (B), young/old (C), <i>Q. robur</i>/<i>Q. petraea</i> (D), and east/west (E) oak TRW chronologies in the 1920–2013 period.....</i>	74
ČLÁNEK II - Fig. 4: <i>Correlations of individual TRW sub-chronologies (blue) and chronology from all data (red) with monthly precipitation totals for the common period 1920–2013 (A) and for the shorter 1920–1980 period (C). 31-year running correlations of TRW indices with May–July precipitation totals (B)</i>	75
ČLÁNEK III - Fig. 1: <i>(A) The study sites in Slovakia (circle – recent samples, square – historical samples), (B) Distribution of oak in Slovakia (light grey – current distribution sourced from Euforgen (2015), dark grey – current distribution obtained from Management Plans (source: National Forest Centre 2015))......</i>	90
ČLÁNEK III - Fig. 2: <i>(A) The temporal distribution of the 1304 individual oak ring width samples: historical samples (grey) and recent samples (black), (B) the relationship between the average growth rate (AGR) in mm/year and the mean segment length (MSL) in years of each sample, (C) the oak TRW chronology, (D) the expressed population signal (EPS) and the inter-series correlation (R_{bar}) calculated over 30-year windows lagged by 15 years, and (E) four different TRWI-based chronologies detrended after power-transformation by 150 yr cubic smoothing splines (light grey), negative exponential functions (black), RCS for all the datasets and RCS for the historical and recent datasets, respectively.....</i>	91
ČLÁNEK III - Fig. 3: <i>The coherency of the Slovakian oak chronology with European chronologies (using the T-value following Baillie and Pilcher (1973) and the Gleichläufigkeit (Eckstein and Bauch, 1969)) from 1865 to 1986.....</i>	93
ČLÁNEK III - Fig. 4: <i>The growth–climate response of the TRWI chronology for temperature, precipitation and the PDSI (CRU TS3.1) from 1901 to 2013 shown from the previous April (a) to October of the given year (O) and for various</i>	

<i>seasons (each month is represented by its first letter, e.g., M-J is March-July, J-J is June-July and A-J is April-June). The grey dashed lines indicate the statistical significance ($\alpha = 0.05$).</i>	95
ČLÁNEK III - Fig. 5: (A) The 31 yr Pearson's correlation coefficient between TRWI and PDSI (June-July) (red) and precipitation (March-July) (blue), (B) the average PDSI from June to July (red), with the trend marked (dotted line) and the sum of precipitation from March-July (blue), and (C) TRWI.....	95
ČLÁNEK III - Fig. 6: Spatial correlations between tree-ring width and the PDSI in June-July from CRU TS3.23 (Harris et al., 2013) for the following periods: (A) 1901–1981 and (B) 1982–2012.....	96
ČLÁNEK III - Fig. 7: Spatial correlations between tree-ring width and precipitation in March-July from CRU TS3.23 (Harris et al. 2013) for the following periods: (A) 1901–1981 and (B) 1982–2012.....	96
ČLÁNEK IV - Fig. 1: (A) Temporal distribution (only from 1400 to the present) of TRW series from previously (grey) and recently (black) collected samples; (B) The geographical distribution of the study sites across the Czech Republic; (C) Illustration of the belfry construction; (D) Expressed Population Signal (EPS) and inter-series correlation (R_{bar}).....	115
ČLÁNEK IV - Fig. 2: Number of sapwood rings of recent and historical samples for the Czech Republic (A) with average values and the 95% confidence limit. In addition, values for the recent samples were calculated separately for the east and the west (B).....	115

SEZNAM TABULEK

ČLÁNEK I - Tab. 1: <i>A detailed overview of the study sites. Edaphic category and Forest site complex are Czech ecosystem classification categories (Typological System of Forest Management Planning Institute) based on Viewegh et al. (2003).</i>	47
ČLÁNEK I - Tab. 2: <i>Statistical characteristics of the site chronologies (TRW – tree-ring width chronology, TRWi – tree-ring width index chronology, MSL – mean segment length, AGR – average growth rate (mm), SD – standard deviation, Rbar – mean inter-series correlation, EPS – Expressed Population Signal (for the period 1916–2011), AC1 – first autocorrelation, SNR – Signal-to-noise ratio).....</i>	48
ČLÁNEK II - Tab. 1: <i>Characteristics of raw TRW chronologies: MSL – mean segment length; AGR – average growth rate; SD – standard deviation; MS – mean sensitivity; AC1 – first-order autocorrelation; Rbar – mean inter-series correlation (calculated in COFECHA; Grissino-Mayer 2001); EPS – mean expressed population signal.....</i>	72
ČLÁNEK II - Tab. 2: <i>Coherence of raw TRW chronologies over a common period (1920–2013) expressed by TBP: T-value after Baillie and Pilcher (1973); THO: T-value after Hollstein (1980); GL: Gleichläufigkeit (“coefficient of agreement”) (Eckstein and Bauch 1969); DII: Date index 1 (Knibbe 2004); * $p = 0.1$; ** $p = 0.001$.....</i>	73
ČLÁNEK III - Tab. 1: <i>Description of European chronologies for teleconnection.....</i>	92