

# Změny a variabilita teploty vzduchu jarní a letní sezóny v Česku za posledních 300 let: porovnání přístrojových, dokumentárních a přírodních proxy dat

PETR KOLÁŘ

---

Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Geografický ústav, Brno (Masaryk University, Faculty of Sciences, Institute of Geography); Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, katedra vojenské geografie a meteorologie, Brno, Česko (University of Defence, Faculty of Military Technology, Department of Military Geography and Meteorology, Brno, Czechia); e-mail: petr.kolar2@unob.cz

**ABSTRACT** **Changes and variability of spring-summer air temperature in Czechia during the past 300 years: comparison of instrumental, documentary and natural proxy data** – Instrumental series, documentary and natural proxy air temperature reconstructions from the area of Czechia were employed to demonstrate spring/summer temporal variability and changes during the 1701–2010 period. Various statistical methods were applied to evaluate cold/warm periods, extreme seasons, oscillations and trends of individual series and also differences between them. Additional reconstructions from the Western and Central Europe were added to examine the role of geographical distance and type of climatological reconstruction. Instrumental series and documentary reconstructions agree well on the occurrence of cold/warm periods and extremes. There is a higher concentration of cold periods during the 18<sup>th</sup> and particularly 19<sup>th</sup> centuries. All of the series convincingly represent a positive temperature trend related to anthropogenic global warming. A tree-ring reconstruction contains a larger proportion of low-frequency signal. Despite spatial distance it has been recognized that an affinitive series such as tree-ring analyses from mountainous areas or reconstructions dealing with grape harvest-dates records share a vast extent of mutual variability.

**KEY WORDS** air temperature variability – instrumental measurements – documentary data – natural proxies – Czechia

---

KOLÁŘ, P. (2017): Změny a variabilita teploty vzduchu jarní a letní sezóny v Česku za posledních 300 let: porovnání přístrojových, dokumentárních a přírodních proxy dat. *Geografie*, 122, 2, 190–212.

Do redakce došlo v říjnu 2016, přijato do tisku v únoru 2017.

## 1. Úvod

Nejdiskutovanějším fenoménem minulé i současné variability klimatu a jeho změny je v posledních letech tzv. globální oteplování, které lze dokumentovat rostoucím lineárním trendem globální teploty s hodnotou  $0,85\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0,65$  až  $1,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) za období 1880–2012 v souladu s působícími faktory (Brohan a kol. 2006, Hartmann a kol. 2013). Jedním z důležitých závěrů hodnotících zpráv IPCC (Mezivládní panel pro změnu klimatu) je požadavek na využívání homogenních klimatologických řad, dostatečně dlouhých k pokrytí jak období s vlivem přirozených klimatických faktorů, tak i období s kombinovaným vlivem přirozených a antropogenních faktorů. Globální tendence se proměnlivým způsobem odrážejí v různých prostorových úrovních (regionální, lokální atp.) a také v rozličných použitých typech klimatologických dat (přístrojová, dokumentární, přírodní proxy).

První souvislá přístrojová měření byla zaznamenána v západní a jižní Evropě v polovině 17. století (např. Manley 1974; Camuffo a kol. 2010; Parker 2010; Camuffo, Bertolin 2011), v oblasti střední Evropy započala systematická měření v polovině 18. století (např. Auer a kol. 2007). Hlavním požadavkem na tento typ časových řad je ve smyslu Conrada, Pollaka (1950) jejich relativní homogenita, které nemusí být ani přes znatelné zlepšení metod homogenizace časových řad (pro přehled např. Peterson a kol. 1998; Aguilar a kol. 2003; Venema a kol. 2012) vždy dosaženo, zejména s ohledem na nízkofrekvenční signál v klimatických řadách. Přístrojová data hrají přesto klíčovou roli ve vytváření klimatických rekonstrukcí (v procesu kalibrace a verifikace) vycházejících z dokumentárních údajů nebo přírodních proxy dat.

Rozličná data dokumentární povahy mohou být využita k rekonstrukcím teploty vzduchu či srážkových úhrnů (Brázdil a kol. 2005, 2010). Přestože mají převážně kvalitativní podobu, lze je interpretovat jako řady teplotních či srážkových indexů, a to obvykle v podobě sedmistupňové ordinální škály v měsíčním kroku. Nevýhodou je vyšší pravděpodobnost potlačení nízkofrekvenčního signálu (Brázdil a kol. 2010). Další skupina dat vychází z dobové evidence přírodních procesů (např. kalendářní data zámru přístavů, řek a jezer, začátky specifických zemědělských prací apod.) a bývá využívána k teplotním rekonstrukcím pokrývajícím až stovky let (viz např. Meier a kol. 2007; Maurer a kol. 2009; Glaser, Riemann 2009; Dobrovolný a kol. 2010; Leijonhufvud a kol. 2010; Garnier a kol. 2011).

Přírodní proxy data se využívají pro klimatické rekonstrukce pokrývající několik staletí, či dokonce tisíciletí (Jones a kol. 2009). Ze skupiny dat s vysokým časovým rozlišením se v rámci střední Evropy nejčastěji pracuje s letokruhy dřevin exponovaných lokalit (blíže viz Battipaglia a kol. 2010; Büntgen a kol. 2010a, 2010b, 2011c), zatímco ostatní skupiny buď není možné v regionu využít (ledovcová jádra, mořské sedimenty), nebo nesplňují podmínky dostatečného časového rozlišení ve vztahu k uvedeným přístrojovým a dokumentárním datům. Obecně

platí, že přírodní archivy lépe vystihují nízkofrekvenční signál (Jones a kol. 2009). Pouze ojedinělé studie v zájmové oblasti využívají jiný typ přírodních proxy dat, jako jsou např. sedimentární vrstvy (de Jong, Kamenik, Grosjean 2013).

V Česku (historicky českých zemích) existují pouze omezené možnosti analýz dlouhodobých klimatických změn či fluktuací. Vybrané české přístrojové teplotní (10 stanic) a také srážkové (12 stanic) řady s počátky měření převážně ve druhé polovině 19. století homogenizovali a analyzovali Brázdil a kol. (2012a). Dobrovolný a kol. (2009) rekonstruovali z dokumentárních dat teplotní řadu Prahy až do roku 1718. České dokumentární indexy byly využity při rekonstrukci střeoevropských teplot již od roku 1501 (Dobrovolný a kol. 2010). Možný a kol. (2012) provedli rekonstrukci teplot března–června (III–VI) založenou na datování počátku žní ozimé pšenice od roku 1501. Datování sklizně hroznů umožnilo rekonstruovat teplotu vzduchu (IV–VIII) pro období 1499–2012 (Možný a kol. 2016). Z čistě přírodních proxy dat byly na území Česka provedeny teplotní rekonstrukce na základě analýz letokruhů dřevin. Lze uvést příklady rekonstruované teploty vzduchu (1) letního půlroku v oblasti Krkonoš od roku 1804 (Brázdil a kol. 1997) a (2) měsíců VI–VII za poslední 3 století (Tremel a kol. 2015).

Tato studie se zaměřuje na vývoj teploty vzduchu v Česku za poslední tři staletí a využívá při tom všechny typy dostupných klimatologických dat (přístrojová, dokumentární, přírodní) pro jarní a letní sezónu. Kapitola 2 přináší podrobnější informace o využitých časových řadách (včetně originálních zdrojů) a metodách jejich zpracování. V kapitole 3 jsou prezentovány výsledky analýz teplotní variability, časového rozložení chladných či teplých sezón a extrémů (podkapitola 3.1.). Následuje vyhodnocení periodicity časových řad a trendů (3.2.). Dále jsou analyzované řady z českého území porovnány s evropskými rekonstrukcemi (3.3.). Získané výsledky jsou v rámci kapitoly 4 diskutovány ve vztahu k poznatkům a závěrům vybraných studií. Kapitola 5 shrnuje nejdůležitější poznatky.

## 2. Data a metody

Dostupné časové řady teploty vzduchu z území Česka pokrývající časové období 1701–2010 nebo jeho významnější část představují základní datový soubor pro účely následných analýz. Jedná se o:

### 1. homogenní přístrojové řady teploty vzduchu,

*PKl* – stanice Prahy-Klementina pro všechna roční období let 1771–2010, která byla prodloužena na základě rekonstrukce z dokumentárních údajů (Dobrovolný a kol. 2009) až k roku 1718

*Brn* – města Brna pro všechna roční období let 1800–2010, která vznikla kompilací naměřených dat z různých stanic na území města Brna (Brázdil a kol. 2012b)

- Čes – areálu Česka pro všechna roční období od roku 1800 (Štěpánek 2004), která byla následně prodloužena až do roku 2010
- stE – území střední Evropy (Česko, Německo, Švýcarsko) pro všechna roční období let 1760–2007, která byla prodloužena na základě rekonstrukce z dokumentárních údajů (Dobrovolný a kol. 2010) až k roku 1500
2. Čes-op – rekonstruovanou řadu teploty vzduchu (III–VI) na základě kalendářního počátku žní ozimé pšenice (*Triticum aestivum*) v Česku (Možný a kol. 2012) za období 1501–2008
  3. Čes-vr – rekonstruovanou řadu teploty vzduchu (IV–VIII) na základě kalendářního počátku sklizně vinné révy (*Vitis vinifera*) v Česku (Možný a kol. 2016) za období 1499–2012
  4. Sud – rekonstruovanou řadu teploty vzduchu (VI–VII) na základě analýzy letokruhů smrku ztepilého (*Picea abies*) z horských poloh regionu Sudet (Krkonoše, Králický Sněžník, Hrubý Jeseník) za období 1690–2012 (Tremel a kol. 2015).

Za účelem porovnání výše uvedených časových řad v evropském měřítku bylo vybráno celkem 13 dalších teplotních rekonstrukcí z různých evropských lokalit:

- LCT01 – různé dokumentární zdroje v zemích Beneluxu (van Engelen, Buisman, Ijnsen 2001; Shabalova, van Engelen 2003), VI–VIII
- WP11 – počátek sklizně ozimého žita z pomezí Německa a Švýcarska (Wetter, Pfister 2011), III–VII
- MEI07 – datace sklizně vinné révy v severozápadním Švýcarsku (Meier a kol. 2007), IV–VIII
- MAU09 – datace sklizně vinné révy v okolí Vídně a Klosterneuburgu (Maurer a kol. 2009), V–VII
- CHU04 – datace sklizně vinné révy v Burgundsku (Chuine a kol. 2004), IV–VIII
- BUN13 – analýza letokruhů z horské oblasti Tater (Büntgen a kol. 2013), V–VI
- WTo4 – analýza letokruhů z Bavorského lesa a rakouské části Alp (Wilson, Topham 2004), VI–VII
- NED04 – analýza letokruhů z Tater a východních Alp (Niedzwiedz 2004), VI–VII
- BUN06 – analýza letokruhů z Alp (Büntgen a kol. 2006), VI–IX
- BUN11b – analýza letokruhů ze západní a střední Evropy (Büntgen a kol. 2011b), VI–VII
- LUT04 – kombinace více typů dokumentárních a přírodních proxy dat pro střední Evropu (Luterbacher a kol. 2004, 2007; Xoplaki a kol. 2005), I–XII
- GUI05 – kombinace více typů dokumentárních a přírodních proxy dat pro západní Evropu (Guiot a kol. 2005), IV–IX
- TRAI2 – kombinace přírodních proxy dat pro oblast Alp (Trachsel a kol. 2012), VI–VII.

K zabezpečení vzájemné porovnatelnosti byly časové řady převedeny z absolutních hodnot na řady odchylek od teplotního průměru normálového období 1961–1990.

Aplikací 20letého Gaussova filtru byl zvýrazněn nízkofrekvenční signál časových řad. Použitá funkce je:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

kde  $\sigma$  je směrodatná odchylka daného souboru a předpokládá se, že ten má průměr roven 0. Větší váha je přidělena hodnotám blízkým středu filtrovacího okna na úkor hodnot periferních. Čím vyšší jsou hodnoty  $\sigma$ , k tím většímu shlazení dochází.

Kvantifikaci míry vzájemné závislosti jednotlivých řad předcházelo testování jejich normality, k čemuž byl využit Lillieforsův test jakožto variace testu Kolmogorova-Smirnova (von Storch, Zwiers 1999). Testová statistika byla spočtena jako:

$$D_L = \max_x |\hat{F}_X(x) - F_N^*(x)|, \quad (2)$$

kde  $F_N^* \sim N(\hat{\mu}_X, \hat{\sigma}_X)$  je normální rozdělení, ve kterém jsou průměr a směrodatná odchylka nahrazeny průměrem vzorku a jeho směrodatnou odchylkou.  $D_L$  představuje vzdálenost mezi empirickou distribuční funkcí a normálním rozdělením přizpůsobeným datovému souboru. Po ověření normality časových řad byly spočteny Pearsonovy korelační koeficienty dvojic časových řad:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\sum x_i^2 - n\bar{x}^2)} \sqrt{(\sum y_i^2 - n\bar{y}^2)}}, \quad (3)$$

pro první soubor  $\{x_1, \dots, x_n\}$  s  $n$  hodnotami a pro druhý soubor  $\{y_1, \dots, y_n\}$  opět s  $n$  hodnotami. Statistická významnost korelačních koeficientů byla vyjádřena porovnáním kritických hodnot Studentova  $t$ -rozdělení pro hladinu významnosti 99 % ( $p = 0,01$ ) s vypočtenou testovou statistikou pro  $n - 2$  stupňů volnosti:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}. \quad (4)$$

K vymezení souborů nejchladnějších a nejteplejších let jednotlivých řad analyzovaného období byly stanoveny meze dolního ( $Q_{0,20}$ ) a svrchního kvintilu ( $Q_{0,80}$ ), aby byla zajištěna objektivita porovnávání rozličně dlouhých časových řad.

Přítomnost a intenzita periodických oscilací v časových řadách byla zjišťována aplikací metod Fourierovy (spektrální) analýzy se zaměřením na frekvenční doménu spektra. Využívá se zde dekompozice původní časové řady na sinové a kosinové funkce různých frekvencí (von Storch, Zwiers 1999). Síla konkrétní frekvence v časové řadě bývá vyjádřena těsností korelace mezi sinovými a kosinovými funkcemi a danou řadou. Vizualizovat ji lze např. pomocí periodogramu. Před vlastní Fourierovou dekompozicí bylo žádoucí primární data vhodným

způsobem transformovat, aby byl odstraněn problém tzv. „prosakování“ (z angl. *leakage*) frekvencí související s umělým zvýrazňováním sousedních frekvencí. Z možných transformačních metod byla dle Bloomfielda (2000) zvolena metoda zúžení pomocí kosinové shlazovací váhy (z angl. *split cosine belt*) a dle doporučení byla za nejvhodnější zvolena 15% proporce zúžených dat.

V další fázi bylo nutné zajistit pokud možno nejsnadnější identifikaci frekvencí s nejvyššími spektrálními hustotami, a proto byly hodnoty periodogramu dále transformovány. Pro každou frekvenci bylo využito tzv. Hammingovo shlazovací okno (šířka = 3), které pomocí vah (0,069; 0,86; 0,069) upravilo původní hodnoty spektrální hustoty. Před spuštěním spektrální analýzy byly časové řady detrendovány, aby nedošlo k ovlivnění hodnot spektrální hustoty spočívající ve vysokých hodnotách prvního kosinového koeficientu (frekvence = 0). Z podobného důvodu byl od časových řad odečten jejich průměr. Následně bylo přistoupeno k vlastní diskrétní Fourierově transformaci (Lüdecke, Hempelmann, Weiss 2013) s daty  $f_k$  v časové doméně,  $F_j$  ve frekvenční doméně a  $N$  jakožto rozsahem souboru:

$$F_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k W_N^{-kj}, \quad (5)$$

kde  $W_N = e^{\frac{2\pi i}{N}}$  a opačná transformace je

$$f_k = \sum_{j=0}^{N-1} F_j W_N^{kj}. \quad (6)$$

V závěrečném kroku spektrální analýzy bylo testováno, jestli je možné jednotlivé řady považovat za tzv. „bílý šum“, tedy zda jsou hodnoty časové řady na sobě nezávislé. Byl vytvořen histogram hodnot spektrogramu a Kolmogorovo-Smirnovovým testem bylo otestováno, jestli se jeho rozložení významně ( $p = 0,01$ ) liší od exponenciálního. Pokud ne, byla přijata nulová hypotéza, tedy danou řadu je možné považovat za bílý šum.

Pomocí jednoduché lineární regrese byly metodou nejmenších čtverců odhadovány hodnoty trendu padesátiletých úseků období 1701–2000:

$$y = b_0 + b_1 x. \quad (7)$$

Statistická významnost byla na hladině významnosti 95 % ( $p = 0,05$ ) testována T-testem pro koeficient  $b_1$  a v případě překročení kritické hodnoty byla hodnota trendu přepočítaná na desetiletý interval považována za statisticky významnou. Obdobným způsobem byly odhadovány hodnoty lineárních trendů 30letých klouzavých a kontinuálního spektra 5–50letých.

Veškeré analýzy byly provedeny s daty 2 ročních sezón – jarní a letní. Jarní byla vymezena klimatologicky nestandardním způsobem jako čtyřměsíční období III–VI. Důvodem byl charakter jediné české rekonstruované řady jarního období,

která pokrývá právě výše uvedené období a zbylé přístrojové řady lze přizpůsobit. Letní sezóna je pak definována standardně měsíci VI–VIII.

### 3. Výsledky

S ohledem na vysokou míru sdílené variability homogenních přístrojových řad (viz tab. 1, 2) byly z grafické prezentace výsledků některých analýz vyčleněny řady města Brna, areálu Česka a v ojedinělém případě i Prahy-Klementina. Zástupcem daného typu dat se v uvedených situacích stala areálová řada střední Evropy.

#### 3.1. Variabilita teploty vzduchu, extrémny

Jarní a letní sezóny vykazují obecně nižší míru meziroční proměnlivosti než např. sezóna zimní, což platí jak pro přístrojové, tak i rekonstruované řady. Výraznější teplotní amplitudy jsou v rámci jarní sezóny (obr. 1) patrné na počátku 19. století, a to zejména u přístrojových řad Prahy-Klementina a Brna. Snížená meziroční variabilita se u všech řad projevuje ve druhé polovině 19. století a částečně i okolo roku 1970. Z chodu klouzavých směrodatných odchylek (není součástí studie) vyplývá následující:

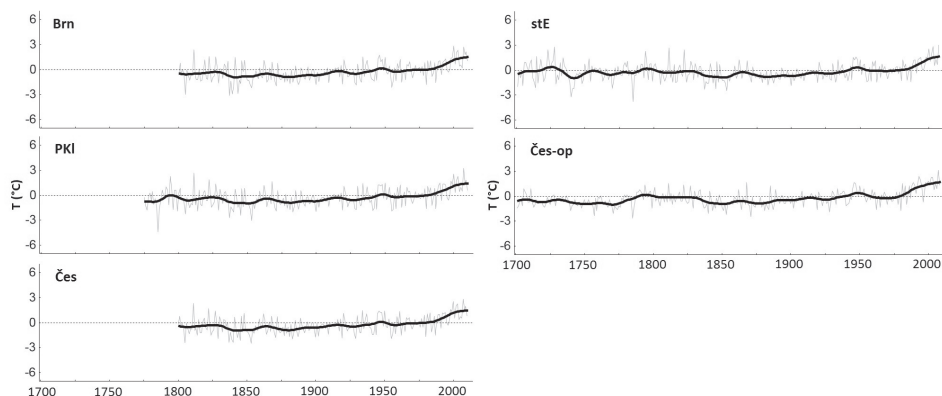
1. s výjimkou řady Čes-op je patrný dlouhodobý pokles meziroční variability
2. pro období 1. poloviny 18. století se výrazným způsobem rozchází variabilita řady *stE* (klouzavé směrodatné odchylky se pohybují v intervalu 1–1,4 °C) a Čes-op (0,4–0,6 °C)
3. zvýšená variabilita přístrojové řady Brna cca mezi lety 1830–1850 oproti ostatním řadám.

Vyšší meziroční variabilita teploty vzduchu počátku 19. století je zřejmá i z řad letní sezóny (obr. 2), za další období zvýšené variability lze označit počátek 18. století a 80. léta 20. století. Nejnižší variabilita se téměř u všech řad objevuje mezi lety 1740–1770, 1880–1900 a 1960–1975. Z analýzy klouzavých směrodatných odchylek (není součástí studie) stojí za zmínku:

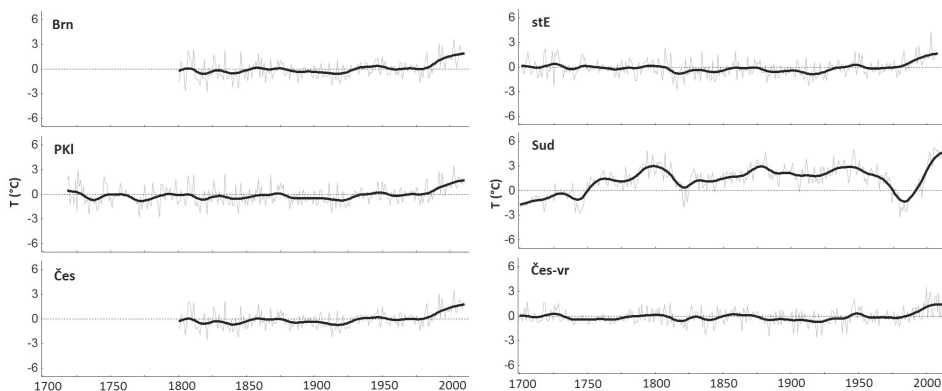
1. nesoulad mezi řadou *stE* a rekonstrukcí Sudet, kdy okolo roku 1750 dochází ke skokovému nárůstu variability sudetské řady, zatímco řada střední Evropy dosahuje celkového minima
2. výrazně nižší variabilita sudetské řady v letech 1830–1860 oproti řadám ostatním
3. nižší míra variability řady Čes-vr v průběhu 18. století vedoucí k celkovému nárůstu krátkodobé variability za období 1701–2010, ke kterému nedochází u žádné jiné letní teplotní řady.



Střednědobá variabilita, která se v daných časových řadách projevuje střídáním jednotlivých teplejších a chladnějších období (viz 30leté Gaussovy filtry – obr. 1, 2), není v případě přístrojových řad a rekonstrukcí dokumentární povahy tak výrazná. V rámci jarní sezóny lze shodu spatřit v teplejším přelomu 18. a 19. století, dále v chladnější polovině 19. století a celkovém oteplení přibližně po roce 1980. U letní sezóny je zřejmý posun chladnějších období do přibližně 20. let 20. století, zčásti i kvůli tomu se oteplení z konce 20. století jeví pro léto jako výraznější. Rekonstrukce Sud zvyrazňuje střednědobou variabilitu, a tudíž i jednotlivé chladné či teplé



**Obr. 1** – Variabilita teploty vzduchu jarní sezóny českých přístrojových a rekonstruovaných řad vyjádřená ve formě odchylek k normálovému období 1961–1990 (tenká šedá čára). Shlzeno 30letým Gaussovým filtrem (silná černá čára).



**Obr. 2** – Variabilita teploty vzduchu letní sezóny českých přístrojových a rekonstruovaných řad vyjádřená ve formě odchylek k normálovému období 1961–1990 (tenká šedá čára). Shlzeno 30letým Gaussovým filtrem (silná černá čára).



**Tab. 1** – Pearsonovy korelační koeficienty dvojic teplotních řad jarní sezóny pro nejdelší celkové společné období 1800–2007 (kurziva) a pro nejdelší společná období jednotlivých dvojic řad

	Brn	PKL	Čes	stE	Čes-op
Brn	x	0,94	0,97	0,92	0,84
PKL	0,94	x	0,98	0,96	0,87
Čes	0,97	0,98	x	0,95	0,87
stE	0,92	0,96	0,95	x	0,85
Čes-op	0,84	0,87	0,87	0,75	x

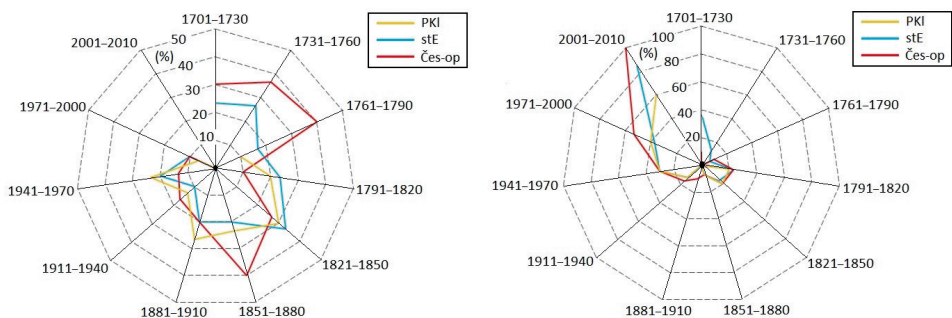
**Tab. 2** – Pearsonovy korelační koeficienty dvojic teplotních řad letní sezóny pro nejdelší celkové společné období 1800–2007 (kurziva) a pro nejdelší společná období jednotlivých dvojic řad

	Brn	PKL	Čes	stE	Sud	Čes-vr
Brn	x	0,93	0,97	0,89	0,33	0,62
PKL	0,93	x	0,97	0,95	0,31	0,65
Čes	0,97	0,97	x	0,93	0,31	0,64
stE	0,89	0,90	0,93	x	0,27	0,62
Sud	0,36	0,27	0,34	0,16	x	0,32
Čes-vr	0,62	0,60	0,64	0,61	0,25	x

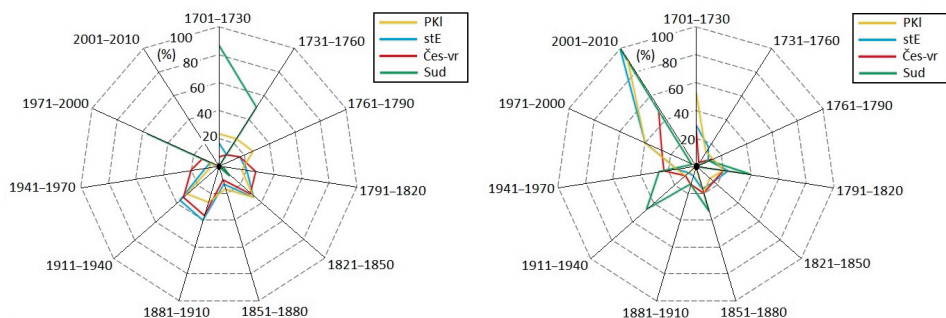
epizody. Oproti ostatním rekonstrukcím se v případě sudetské řady jeví počátek 18. století jako chladný a přelom 18. a 19. století jako velmi teplý. V porovnání s ostatními řadami působí jako anomálně chladný časový úsek mezi léty 1970 a 1990.

Všechny analyzované řady jarního období vykazují statisticky významné ( $p = 0,01$ ) závislosti (tab. 1). Nejvyšší hodnoty Pearsonových korelačních koeficientů jsou dosaženy v případech ovlivněných sdílením staničních dat v rámci areálových řad Česka (včetně Prahy-Klementina a Brna) a střední Evropy (včetně Prahy-Klementina). Snížené korelační koeficienty se objevují tehdy, jsou-li k dispozici řady pokrývající časový úsek již od roku 1701. Pro letní sezónu (tab. 2) pak platí, že přes trvání statisticky významných ( $p = 0,01$ ) závislostí jsou hodnoty  $r$  nižší. Nejslabší vztah vykazuje teplotní rekonstrukce *Sud* a areálová řada *stE*, kdy v případě nejdelšího možného společného období klesá hodnota  $r$  až na 0,16.

Nejchladnější jarní i letní sezóny (obr. 3, 4) jsou u většiny řad rozloženy poměrně rovnoměrně s maximální koncentrací chladných sezón ve třicetiletích 19. století, v případě letní sezóny i během období 1911–1940. Rekonstruovaná řada *Čes-op* koncentruje chladné sezóny již do 18. století. Zcela odlišně a asymetricky jsou rozloženy nejchladnější sezóny u řady *Sudet*, kdy téměř všechny tyto případy spadají do tří 30letých intervalů (1701–1730, 1731–1760 a 1971–2000). Nejchladnějším rokem jarního období je pro všechny řady rok 1785, na předních místech se u všech řad dále pohybuje rok 1853. U letní sezóny se nejchladnější roky jednotlivých řad rozcházejí.



**Obr. 3** – Relativní četnost výskytu 20 % nejchladnějších (vlevo) a 20 % nejteplejších (vpravo) jarních sezón období 1701–2010 v každém 30letém (10letém pro období 2001–2010) intervalu.

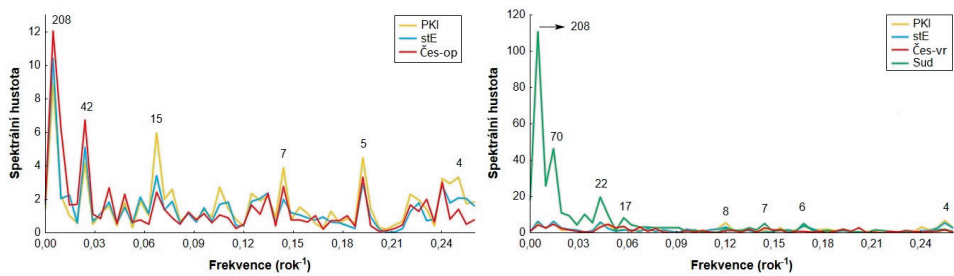


**Obr. 4** – Relativní četnost výskytu 20 % nejchladnějších (vlevo) a 20 % nejteplejších (vpravo) letních sezón období 1701–2010 v každém 30letém (10letém pro období 2001–2010) intervalu.

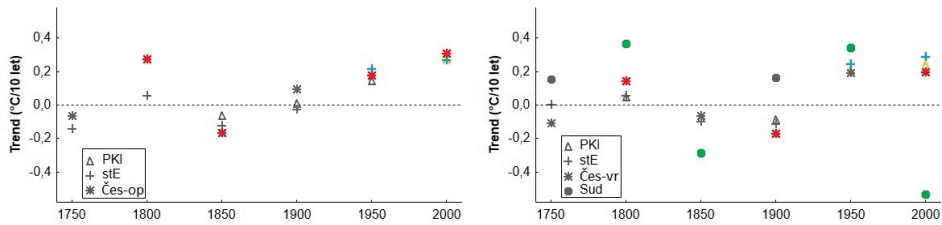
Nejteplejší sezóny jsou až na výjimky koncentrovány do intervalů 1971–2000 a 2001–2010. Za relativně teplý lze označit i úvodní interval 1701–1730, kdy se zvýšený počet teplých sezón projevuje u většiny řad. Odlišné výsledky opět poskytuje sudetská řada, v jejímž rámci se zvýšený počet teplých sezón opakuje v přibližně 60letém kroku. Nejteplejším rokem jarní sezóny je rok 2007, v popředí daných řad se objevují i roky 2003, 2000 či 1811. I na seznamu nejteplejších let letní sezóny se vyskytuje rok 2003, dále pak 1992 či 1994.

### 3.2. Spektra časových řad, trendy

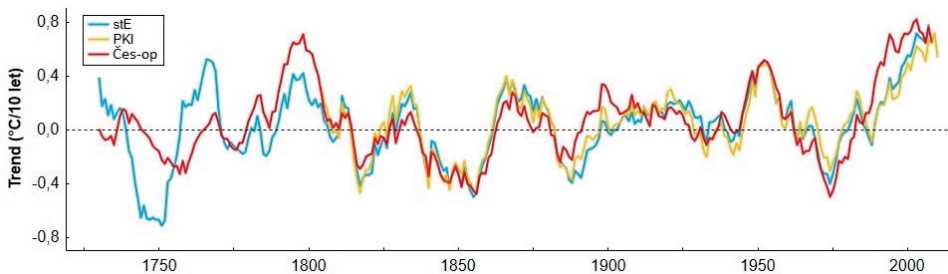
U jarní sezóny je patrná vysoká míra shody v konkrétních cyklech a jejich intenzitě (obr. 5), což platí nejen pro přístrojové řady PKI a areálu stE, ale i pro rekonstrukci Čes-op. Nejvýraznější cyklus (zde s vrcholem spektrální hustoty v periodě 208 let)



**Obr. 5** – Spektrální hustoty jednotlivých časových řad jarní (vlevo) a letní (vpravo) sezóny pro nejdelší celkové společné období 1800–2007. Nejvýraznější vrcholy spektrální hustoty jsou doplněny délkou příslušné periody.



**Obr. 6** – Padesátileté trendy pro jednotlivé teplotní řady jarní (vlevo) a letní (vpravo) sezóny období 1701–2000. Statisticky významné trendy ( $p = 0,05$ ) jsou barevně zvýrazněny.



**Obr. 7** – Klouzavé 30leté lineární trendy teplotních řad jarní sezóny za období 1701–2010. Hodnota odhadu trendu připadajícího na 30letý časový úsek je vždy vztažena ke koncovému roku (např. k roku 2010 je vynesena hodnota lineárního trendu období 1981–2010).

odpovídá vlastní délce řady a dokládá existenci teplejších období na počátku a na konci časového intervalu 1800–2007. Druhý cyklus společný všem řadám je s periodou okolo 42 let, a především v přístrojových řadách je detekován cyklus s periodou cca 15 let. Ze srovnání řad v rámci letní sezóny plyne zcela odlišný charakter časové řady Sudet, která dosahuje velmi vysokých hodnot spektrální

hustoty v nízkofrekvenčních pásmech (přibližně do hodnoty  $f = 0,015$ ), opět s vrcholem v blízkosti periody 208 let a podružným maximem přibližně v periodě 70 let. Stejný průběh je zaznamenán i při prodloužení časové řady k roku 1701. Zbývající řady si v detekovaných periodách a jejich intenzitě víceméně odpovídají, přičemž mezi nejvýraznějšími periodami se opět objevují výše uvedené 208leté a 70leté.

Ze společného období 1800–2007 lze za bílý šum na dané hladině významnosti ( $p = 0,01$ ) označit všechny časové řady s výjimkou letní řady *Sud* a jarní řady *Čes-op*. Pokud se ale vezme v úvahu maximální možná délka každé z teplotních řad, situace se mění a za bílý šum nelze považovat nejen 2 výše uvedené rekonstrukce, ale i jarní řadu *stE*.

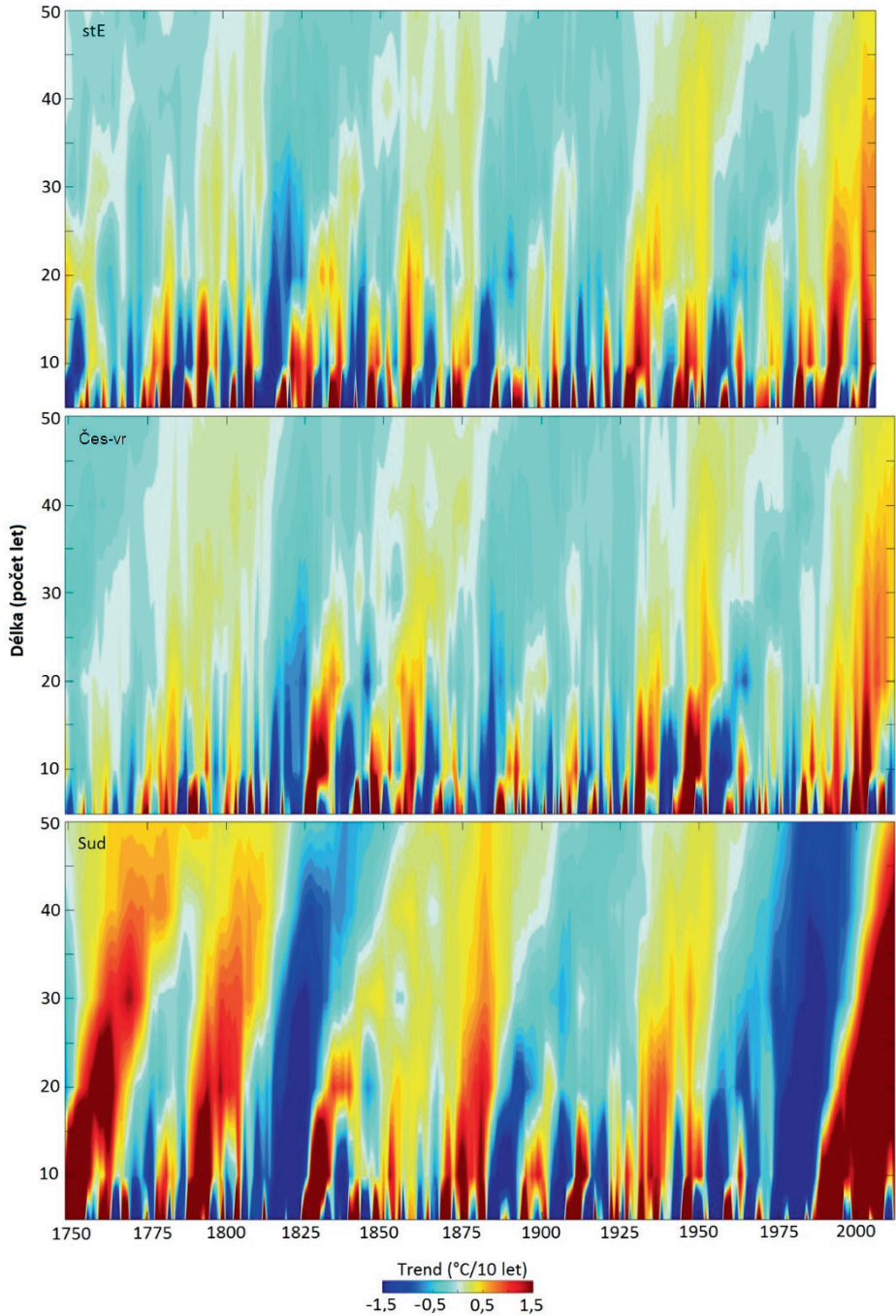
Hodnoty dlouhodobých trendů a jejich časové vymezení se mezi přístrojovými staničními i areálovými řadami (*Čes*, *stE*) příliš neliší (obr. 6). U rekonstruovaných řad je patrný vyšší počet statisticky významných trendů, ale zatímco v případě jarní sezóny se víceméně shodují pozitivní či negativní trendy v dílčích úsecích, letní sezóna vykazuje větší rozptýl hodnot trendu mezi jednotlivými řadami. Nejmarkantnější rozdíl lze vysledovat v padesátiletí 1950–2000, kdy rozdíl v hodnotě trendu mezi dvěma řadami činí až  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ let}$ , jelikož trend sudetské řady je výrazně záporný. Poslední padesátiletý úsek je zároveň jediným, kdy se statisticky významné (vesměs pozitivní) trendy objevují u všech řad pro obě analyzované sezóny. Záporné statisticky významné trendy se v celém období objevují pouze u rekonstruovaných řad.

Při detailnější analýze střednědobých trendů jarní sezóny (obr. 7) je možné uvést konkrétní časové úseky, kde se mezi sebou jednotlivé řady rozcházejí. Největší rozdíly jsou přítomné na počátku sledovaného období, přibližně do roku 1775, po němž se řady *stE* a rekonstrukce *Čes-op* v hodnotách trendů již tolik neodlišují. Ve druhé polovině 20. století dochází u rekonstruované řady k razantnějšímu nástupu pozitivního teplotního trendu ve srovnání s přístrojovými daty.

Letní teplotní řady prodělávají obdobné fluktuace hodnot lineárního trendu s intenzivnějšími změnami dlouhodobějších trendů především v rámci řady *Sud* (obr. 8), kde jsou výrazné pozitivní trendy vázány již na 18. století. Nízkofrekvenční signál této řady je v porovnání s ostatními robustnější. Rekonstrukce *Čes-vr* sdílí společné rysy s přístrojovými řadami. Jedná se především o dominanci vysokofrekvenčního signálu, shodu ve výskytu fází pozitivních/negativních trendů a celkový pozitivní trend pro široké časové pásmo druhé poloviny 20. a počátku 21. století.

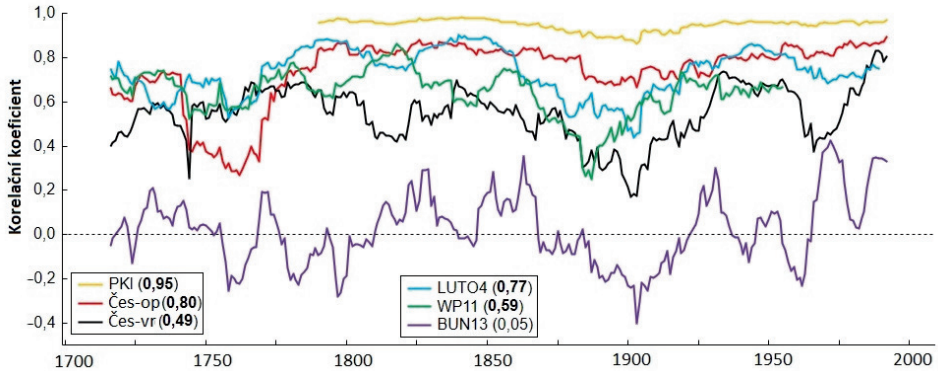
### 3.3. Porovnání s evropskými rekonstrukcemi

S výjimkou rekonstrukce *BUN13* je i u evropských teplotních rekonstrukcí jarní sezóny dosaženo statisticky významných ( $p = 0,05$ ) závislostí časových řad. Zvolením

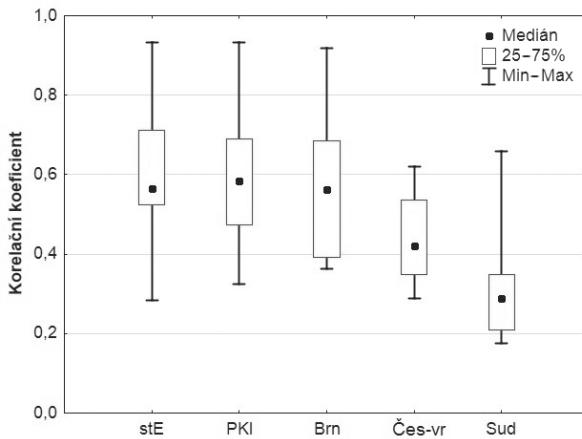


**Obr. 8** – Časový chod 5–50letých lineárních trendů pro vybrané teplotní řady letní sezóny za období 1750–2010.





**Obr. 9** – Klouzávé 31leté korelační koeficienty teplotní řady střední Evropy (jarní sezóna) s přístrojovou řadou Prahy-Klementina, s českými a s vybranými evropskými rekonstruovanými řadami jarní sezóny za období 1701–2010. Souhrnný korelační koeficient je uveden v legendě (tučně zvýrazněné jsou statisticky významné hodnoty,  $p = 0,05$ ).



**Obr. 10** – Variabilita Pearsonových korelačních koeficientů (letní sezóna) pro české přístrojové a rekonstruované řady a pro skupinu vybraných evropských rekonstrukcí (*LUTO4, LCT01, GUI05, MEI07, MAU09, CHU04, WT04, NED04, BUN06, BUN11b, TRA12*) za období 1701–2010.

areálové řady *stE* za základ korelační analýzy je možné doložit její územní reprezentativnost nejen pro území Česka, ale i pro pomezí Německa a Švýcarska, když i ze srovnání s časově plně nekompatibilní řadou *WPII* (III–VII) vyplývá téměř 35 % sdílené variability. Časový vývoj korelačních koeficientů (obr. 9) vystihuje ta období, kdy jsou vzájemné závislosti slabší. Jedná se zejména o začátek druhé poloviny 18. století, přelom 19. a 20. století a v menší míře i 60–70. léta 20. století. Areálové (*stE, LUTO4*) či přístrojové řady obecně vykazují vyšší hodnoty  $r$  než řady rekonstruované.

Z porovnání pěti českých a 11 evropských řad letní sezóny lze konstatovat, že pouze v rámci jedné dvojice rekonstruovaných řad (*BUN11b* × *LUTO4*) není dosaženo

statisticky významné ( $p = 0,05$ ) hodnoty  $r$  (0,14). U následujících dvou dvojic byl zaznamenán více než 80% podíl sdílené variability:  $stE \times PKl$  (86,8%),  $PKl \times Brn$  (84,3%). Jedná se výhradně o řady s dominantním či úplným zastoupením instrumentální složky. Tyto řady na druhou stranu vykazují větší rozptyl hodnot  $r$  (obr. 10), kdy nejnižší závislosti platí pro rekonstrukce založené na analýze letokruhů (*Sud*, *BUN06*, *BUN1b*).

Teplotní rekonstrukce *Čes-vr* se vyznačuje nízkým rozptylem hodnot  $r$  s tím, že nejvyšší hodnota (0,62) odpovídá řadě *MAU09*, tedy jedné z dalších rekonstrukcí založených na dataci sklizně révy vinné. Celkově nejnižších korelačních koeficientů z českých řad dosahuje řada *Sudet*, pro kterou ale opět platí, že nejvíce sdílené variability lze nalézt u řad stejného původu, tedy s výsledky analýz letokruhů (44% s *WT04*, 14% s *NED04*) vyšších poloh Bavorského lesa, rakouské části Alp (resp. Tater a východních Alp).

#### 4. Diskuze

Většina klimatologických studií, které díky rozvoji metod analýz dokumentárních údajů (Brázdil a kol. 2005) či dendroklimatologie (Jones a kol. 2009) přinášejí stále nové poznatky o vývoji klimatického systému či výskytu extrémů (Dobrovolný a kol. 2015), se zaměřuje na prezentaci zjištěných výsledků a jejich interpretaci. Objevují se ale i takové studie, které s využitím vhodného metodologického aparátu porovnávají jednotlivé typy nejčastěji teplotních řad mezi sebou (např. Frank, Esper 2005; Leijonhufvud a kol. 2010; Treml a kol. 2015 aj.).

Tato studie porovnává velmi různorodou skupinu dat obsahující jak přímá přístrojová měření, tak rekonstruované řady dokumentární povahy a rekonstrukci dendroklimatologickou. V posledním případě byla využita řada vytvořená tzv. metodou RCS (blíže viz Treml a kol. 2015), která je vhodná z hlediska zachování nízkofrekvenčního signálu. Výsledky prezentované v kapitole 3 indikují, že míra konzistence mezi řadami je velmi proměnlivá. Stojí za tím několik faktorů: (1) prostorový rozsah a reprezentativnost daných řad, (2) časové vymezení sezón (letní sezóna u řady *Sud* vymezena měsíci VI–VII), (3) citlivost vůči vysokofrekvenčnímu/nízkofrekvenčnímu signálu, (4) časová nestabilita teplotního signálu v případě rekonstruovaných řad a (5) externí vlivy.

Nejvýraznější rozdíly mezi řadami je možné vysledovat v průběhu první poloviny 18. století. Jedná se o období, kdy rekonstrukce *Čes-op* a *Čes-vr* pracují s omezeným počtem stanovišť ve srovnání s pozdějšími staletími (tento vliv je výraznější pro řadu *Čes-op*). Stejně tak řada *stE* je v tomto období vytvořena výhradně na základě dokumentárních údajů oproti období po roce 1760 (Dobrovolný a kol. 2010), navíc i instrumentální řada *PKl* je pro letní sezónu prodloužena o rekonstruovanou část k roku 1718 (Dobrovolný a kol. 2009). Ani samotné instrumentální



řady neodrážejí stacionární signál, např. řada *Brn* je kompilátem měření z různých míst města Brna, což se velmi pravděpodobně projevuje ve změnách variability v průběhu 19. století. U staničních přístrojových řad, ale i u areálových průměrů vycházejících především z městských stanic je nutné uvažovat i vliv městského tepelného ostrova, který byl pro řadu *PKL* sice detekován především v zimní sezóně (Brázdil, Budíková 1999), ale jeho míra v průběhu 18.–19. století není kvantifikována.

Přes výše uvedené skutečnosti lze mezi řadami nalézt i množství společných znaků, k nimž patří např. časové vymezení chladných/teplých období či konkrétních let. S výjimkou řady *Sud* se jedná o koincidenci chladného období cca z let 1815–1830 ovlivněného tzv. Daltonovým minimem sluneční aktivity v rámci pozdní fáze Malé doby ledové (Bradley, Jones 1993) a ochlazujícím efektem erupce vulkánu Tambora roku 1815 (Robock 2000). Téměř všechny časové řady dále ve druhé polovině 20. a na počátku 21. století vykazují statisticky významný pozitivní teplotní trend související s antropogenně podmíněnou změnou klimatu (Hartmann a kol. 2013). Shodují se i v konkrétních mimořádně teplých jarních a letních sezónách první dekády 21. století – 2003 (Schär, Jendritzky 2004) a 2007 (Rustishauser a kol. 2008). Jarní sezóna 1785 je shodně nejchladnější pro všechny analyzované řady. Podle Brázdila, Valáška, Mackové (2003) jde o výsledek zejména mimořádně chladného března, po jehož větší část proudil vlivem blokující tlakové výše nad britskými ostrovy nad evropský kontinent arktický vzduch ze severních směrů.

Teplotní rekonstrukce obecně odrážejí podmínky celého vegetačního období, ale mohou být ovlivněny i podmínkami minulými (Pfister 1999; Büntgen a kol. 2011a), jako např. předchozím výrazně teplotně nadprůměrným, eventuálně suchým létem. Zpracováváný datový archiv, složitost a možná opožděnost vegetační odezvy vůči konkrétním faktorům vede spolu se specifickým metodickým přístupem extrakce teplotního signálu k jedinečné kombinaci nízko- a vysoko-frekvenčního signálu v časových řadách. Dokladem jsou podíly vysvětlené variability dvojic časových řad (viz kapitola 3.3), kde výše uvedené vlivy převažují nad faktorem geografické vzdálenosti.

Z porovnání jednotlivých typů časových řad za období 1701–2010 vyplývá, že rekonstrukce založené na zpracování vegetační odezvy z dokumentárních zdrojů (*Čes-op*, *Čes-vr*) tvoří přechodné stádium mezi čistě dokumentárními (*stE*) a přírodními (*Sud*) archivy. Ty mohou být ovlivněny externími vlivy, mezi něž lze zařadit např. závislost na vlastnostech půdy či znečištění atmosféry ( $\text{SO}_2$ ), které se v řadě *Sud* projevuje ve druhé polovině 20. století (Tremml, Ponocná, Büntgen 2012; Rydval, Wilson 2012). V případě studií historického vývoje klimatu v rámci konkrétního území je proto dobré kombinovat všechna relevantní dostupná data k vytváření multi-proxy analýz (Luterbacher a kol. 2004, 2007; Xoplaki a kol. 2005; Guiot a kol. 2005, Trachsel a kol. 2012).

## 5. Závěr

Sedm různorodých teplotních řad z území Česka pokrývajících časové období 1701–2010 či jeho větší část bylo vzájemně porovnáno a statisticky otestováno za účelem vyhodnocení variability a změn teploty vzduchu jarní a letní sezóny. Bylo potvrzeno, že přístrojové řady a dokumentární rekonstrukce vykazují vyšší míru sdílené variability než při porovnání s jedinou rekonstrukcí založenou na analýze letokruhů.

Většina řad se shoduje v časovém rozložení chladnějších (1821–1850, 1881–1910, 1911–1940) a teplejších (1701–1730, 1971–2000, 2001–2010) jarních i letních epizod, rekonstruované řady (Čes-op a především Sud) se liší vyšším podílem nízkofrekvenční variability. Jarní sezóna 1785 je pro všechny řady nejchladnější v rámci celého období. Na druhou stranu nejteplejší sezóny jsou u většiny řad vázány na 21. století (2003, 2007), což je plně v souladu se statisticky významným pozitivním teplotním trendem, který zesílil ve druhé polovině 20. století. V teplotních řadách nebyly detekovány významné krátkodobé cykly, rekonstrukce se vyznačují vyšším zastoupením dlouhodobých cyklů.

Specifičnost dokumentárních i přírodních rekonstrukcí lze doložit na pozadí souboru vybraných evropských rekonstrukcí, kdy volba konkrétního datového archivu a metod extrakce teplotního signálu převažuje vliv prostorové vzdálenosti. S ohledem na proměnlivost časového vymezení sezón lze i u rekonstruovaných řad konstatovat, že jsou vhodným reprezentativním nástrojem sezónních změn a variability klimatu. Vždy je ale nutné brát v úvahu vliv možných externích faktorů či omezení plynoucích z metod zpracování dat.

## Literatura

- AGUILAR, E., AUER, I., BRUNET, M., PETERSON, T. C., WIERINGA, J. (2003): Guidelines on Climate Metadata and Homogenization. WCDMP-No. 53, WMO-TD No. 1186. World Meteorological Organisation, Geneva.
- AUER, I., BÖHM, R., JURKOVIC, A., LIPA, W., ORLIK, A., POTZMANN, R., SCHÖNER, W., UNGERSBÖCK, M., MATULLA, CH., BRIFFA, K., JONES, P., EFTHYMIADIS, D., BRUNETTI, M., NANNI, T., MAUGERI, M., MERCALLI, L., MESTRE, O., MOISSELIN, J.-M., BEGERT, M., MÜLLER-WESTERMEIER, G., KVĚTOŇ, V., BOCHNÍČEK, O., ŠTĀSTNÝ, P., LAPIN, M., SZALAI, S., SZENTIMREY, T., CEGNAR, T., DOLINAR, M., GAJIC-CAPKA, M., ZANINOVIC, K., MAJSTOROVIC, Z., NIEPLOVA, E. (2007): HISTALP–historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27, 1, 17–46.
- BATTIPAGLIA, G., FRANK, D., BÜNTGEN, U., DOBROVOLNÝ, P., BRÁZDIL, R., PFISTER, C., ESPER, J. (2010): Five centuries of Central European temperature extremes reconstructed from tree-ring density and documentary evidence. *Global and Planetary Change*, 72, 3, 182–191.

- BLOOMFIELD, P. (2000): *Fourier analysis of time series: An introduction*. Wiley, New York.
- BRADLEY, R. S., JONES, P. D. (1993): 'Little Ice Age' summer temperature variations: their nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene*, 3, 4, 367–376.
- BRÁZDIL, R., BĚLÍNOVÁ, M., DOBROVOLNÝ, P., MIKŠOVSKÝ, J., PIŠOFT, P., ŘEZNÍČKOVÁ, L., ŠTĚPÁNEK, P., VALÁŠEK, H., ZAHRADNÍČEK, P. (2012b): *Temperature and precipitation fluctuations in the Czech Lands during the instrumental period*. Masaryk University, Brno.
- BRÁZDIL, R., BUDÍKOVÁ, M. (1999): An urban bias in air temperature fluctuations at the Klementinum, Prague, The Czech Republic. *Atmospheric Environment*, 33, 24–25, 4211–4217.
- BRÁZDIL, R., DOBROVOLNÝ, P., LUTERBACHER, J., MOBERG, A., PFISTER, C., WHEELER, D., ZORITA, E. (2010): European climate of the past 500 years: new challenges for historical climatology. *Climatic Change*, 101, 1–2, 7–40.
- BRÁZDIL, R., DOBRÝ, J., KYNCL, J., ŠTĚPÁNKOVÁ, P. (1997): Rekonstrukce teploty vzduchu teplého půlroku v oblasti Krkonoš na základě letokruhů smrku v období 1804–1989. *Geografie*, 102, 1, 3–16.
- BRÁZDIL, R., PFISTER, C., WANNER, H., VON STORCH, H., LUTERBACHER, J. (2005): Historical climatology in Europe – the state of the art. *Climatic Change*, 70, 3, 363–430.
- BRÁZDIL, R., VALÁŠEK, H., MACKOVÁ, J. (2003): Climate in the Czech Lands during the 1780s in Light of the Daily Weather Records of Parson Karel Bernard Hein of Hodonice (South-western Moravia): Comparison of Documentary and Instrumental Data. *Climatic Change*, 60, 3, 297–327.
- BRÁZDIL, R., ZAHRADNÍČEK, P., PIŠOFT, P., ŠTĚPÁNEK, P., BĚLÍNOVÁ, M., DOBROVOLNÝ, P. (2012a): Temperature and precipitation fluctuations in the Czech Republic during the period of instrumental measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 1, 17–34.
- BROHAN, P., KENNEDY, J. J., HARIS, I., TETT, S. F. B., JONES, P. D. (2006): Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*, 111, D12106. DOI: 10.1029/2005JD006548
- BÜNTGEN, U., BRÁZDIL, R., DOBROVOLNÝ, P., TRNKA, M., KYNCL, T. (2011a): Five centuries of Southern Moravian drought variations revealed from living and historic tree rings. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 1–2, 167–180.
- BÜNTGEN, U., BRÁZDIL, R., FRANK, D., ESPER, J. (2010a): Three centuries of Slovakian drought dynamics. *Climate Dynamics*, 35, 2, 315–329.
- BÜNTGEN, U., BRÁZDIL, R., HEUSSNER, K. U., HOFMANN, J., KONTIC, R., KYNCL, T., PFISTER, C., CHROMÁ, K., TEGEL, W. (2011c): Combined dendro-documentary evidence of Central European hydroclimatic springtime extremes over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 30, 27–28, 3947–3959.
- BÜNTGEN, U., FRANK, D. C., NIEVERGELT, D., ESPER, J. (2006): Summer temperature variations in the European Alps, A.D. 755–2004. *Journal of Climate*, 19, 21, 5605–5623.
- 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 Sciences*, 110, 5, 1773–1778. DOI: 10.1073/pnas.1211485110
- 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. (2011b): 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 331, 6017, 578–583.

- BÜNTGEN, U., TROUET, V., FRANK, D., LEUSCHNER, H. H., FRIEDRICH, D., LUTERBACHER, J., ESPER, J. (2010b): Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 29, 7–8, 1005–1016.
- CAMUFFO, D., BERTOLIN, C. (2011): The earliest temperature observations in the world: the Medici Network (1654–1670). *Climatic Change* 111, 2, 335–363.
- CAMUFFO, D., BERTOLIN, C., BARRIENDOS, M., DOMINGUEZ-CASTRO, F., COCHEO, C., ENZI, S., SGHEDONI, M., DELLA VALLE, A., GARNIER, E., ALCOFORADO, M. J., XOPLAKI, E., LUTERBACHER, J., DIODATO, N., MAUGERI, M., NUNES, M. F., RODRIGUEZ, R. (2010): 500-year temperature reconstruction in the Mediterranean Basin by means of documentary data and instrumental observations. *Climatic Change*, 101, 1–2, 169–199.
- CONRAD, V., POLLAK, L. W. (1950): *Methods in Climatology*. Harvard University Press, Cambridge.
- DE JONG, R., KAMENIK, C., GROSJEAN, M. (2013): Cold-season temperatures in the European Alps during the past millennium: variability, seasonality and recent trends. *Quaternary Science Reviews*, 82, 1–12.
- DOBROVOLNÝ, P., BRÁZDIL, R., VALÁŠEK, H., KOTYZA, O., MACKOVÁ, J., HALÍČKOVÁ, M. (2009): A standard paleoclimatological approach to temperature reconstruction in historical climatology: an example from the Czech Republic, AD 1718–2007. *International Journal of Climatology*, 29, 10, 1478–1492.
- DOBROVOLNÝ, P., MOBERG, A., BRÁZDIL, R., PFISTER, C., GLASER, R., WILSON, R., VAN ENGELEN, A., LIMANÓWKA, D., KISS, A., HALÍČKOVÁ, M., MACKOVÁ, J., RIEMANN, D., LUTERBACHER, J., BÖHM, R. (2010): Monthly and seasonal temperature reconstructions for Central Europe derived from documentary evidence and instrumental records since AD 1500. *Climatic Change*, 101, 1–2, 69–107.
- 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, 10, 1453–1466.
- FRANK, D., ESPER, J. (2005): Temperature reconstructions and comparisons with instrumental data from a tree-ring network for the European Alps. *International Journal of Climatology*, 25, 11, 1437–1454.
- GARNIER, E., DAUX, V., YIOU, P., GARCÍA DE CORÁZAR-ATAURI, I. (2011): Grapevine harvest dates in Besançon (France) between 1525 and 1847: Social outcomes or climatic evidence? *Climatic Change*, 104, 3–4, 703–727.
- GLASER, R., RIEMANN, D. (2009): A thousand-year record of climate variations for Germany and Central Europe based on documentary data. *Journal of Quaternary Science*, 24, 5, 437–449.
- GUIOT, J., NICAULT, A., RATHEGEBER, C., EDOUARD, J. L., GUIBAL, F., PICHARD, G., TILL, C. (2005): Last millennium summer temperature variations in Western Europe based on proxy data. *The Holocene*, 15, 4, 489–500.
- HARTMANN, D. L., KLEIN TANK, A. M. G., RUSTICUCCI, M., ALEXANDER, L. V., BRÖNNIMANN, S., CHARABI, Y., DENTENER, F. J., DLUGOKENCKY, E. J., EASTERLING, D. R., KAPLAN, A., SODEN, B. J., THORNE, P. W., WILD, M., ZHAI, P. M. (2013): Observations: Atmosphere and Surface. In: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (eds.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 159–254. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.008

- CHUINE, I., YIOU, P., VIOVY, N., SEGUIN, B., DAUX, V., LE ROY LADURIE, E. (2004): Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 432, 7015, 289–290.
- JONES, P. D., BRIFFA, K. R., OSBORN, T. J., LOUGH, J. M., VAN OMMEN, T. D., VINTHER, B. M., LUTERBACHER, J., WAHL, E. R., ZWIERS, F. W., MANN, M. E., SCHMIDT, G. A., AMMANN, C. M., BUCKLEY, B. M., COBB, K. M., ESPER, J., GOOSSE, H., GRAHAM, N., JANSEN, E., KIEFER, T., KULL, C., KÜTTEL, M., MOSLEY-THOMPSON, E., OVERPECK, J. T., RIEDWYL, N., SCHULZ, M., TUDHOPE, A. W., VILLALBA, R., WANNER, H., WOLFF, E., XOPLAKI, E. (2009): High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. *Holocene*, 19, 1, 3–49.
- LEIJONHUFVUD, L., WILSON, R., MOBERG, A., SÖDERBERG, J., RETSÖ, D., SÖDERLIND, U. (2010): Five centuries of Stockholm winter/spring temperatures reconstructed from documentary evidence and instrumental observations. *Climatic Change*, 101, 1–2, 109–141.
- LÜDECKE, H.-J., HEMPELMANN, A., WEISS, C. O. (2013): Multi-periodic climate dynamics: spectral analysis of long-term instrumental and proxy temperature records. *Climate of the Past*, 9, 1, 447–452.
- LUTERBACHER, J., DIETRICH, D., XOPLAKI, E., GROSJEAN, M., WANNER, H. (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science*, 303, 5663, 1499–1503. DOI: 10.1126/science.1093877
- LUTERBACHER, J., LINIGER, M. A., MENZEL, A., ESTRELLA, N., DELLA-MARTA, P. M., PFISTER, C., RUTISHAUSER, T., XOPLAKI, E. (2007): The exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics and its phenological impacts. *Geophysical Research Letters*, 34, L12704. DOI: 10.1029/2007GL029951
- MANLEY, G. (1974): Central England temperatures: monthly means 1659 to 1973. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 100, 425, 389–405.
- MAURER, C., KOCH, E., HAMMERL, M. C., HAMMERL, T., POKORNY, E. (2009): BACCHUS temperature reconstruction for the period 16<sup>th</sup> to 18<sup>th</sup> centuries from Viennese and Klosterneuburg grape harvest dates. *Journal of Geophysical Research*, 114, D22106. DOI: 10.1029/2009JD011730
- MEIER, N., RUTISHAUSER, T., PFISTER, C., WANNER, H., LUTERBACHER, J. (2007): Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. *Geophysical Research Letters* 34, L20705. DOI: 10.1029/2007GL031381
- MOŽNÝ, M., BRÁZDIL, R., DOBROVOLNÝ, P., TRNKA, M. (2012): Cereal harvest dates in the Czech Republic between 1501 and 2008 as a proxy for March–June temperature reconstruction. *Climatic Change*, 110, 3, 801–821.
- MOŽNÝ, M., BRÁZDIL, R., DOBROVOLNÝ, P., TRNKA, M. (2016): April–August temperatures in the Czech Lands, 1499–2012, reconstructed from grape harvest dates. *Climate of the Past*, 12, 1421–1434, DOI: 10.5194/cp-2016-19
- NIEDŹWIEDŹ, T. (2004): Rekonstrukcja warunków termicznych lata w Tatrach od 1550 roku. In: Kotarba, A., ed.: *Rola małej epoki lodowej w przekształcaniu środowiska przyrodniczego Tatr*. *Prace Geograficzne*, 197, 57–88.
- PARKER, D. E. (2010): Uncertainties in early Central England temperatures. *International Journal of Climatology*, 30, 8, 1105–1113.
- PETERSON, T. C., EASTERLING, D. R., KARL, T. R., GROISMAN, P., NICHOLLS, N., PLUMMER, N., TOROK, S., AUER, I., BOEHM, R., GULLETT, D., VINCENT, L., HEINO, R., TUOMENVIRTA, H., MESTRE, O., SZENTIMREY, T., SALINGER, J., FØRLAND, E. J., HANSEN-BAUER, I., ALEXANDERSSON, H., JONES, P., PARKER, D. (1998): Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review. *International Journal of Climatology*, 18, 13, 1493–1517.

- PFISTER, C. (1999): *Wetternachhersage, 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995)*. Verlag paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- ROBOCK, A. (2000): Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38, 2, 191–219.
- RUSTISHAUSER, T., LUTERBACHER, J., DEFILA, C., FRANK, D., WANNER, H. (2008): Swiss spring plant phenology 2007: Extremes, a multi-century perspective, and changes in temperature sensitivity. *Geophysical Research Letters*, 35, L05703. DOI: 10.1029/2007GL032545
- RYDVAL, M., WILSON, R. (2012): The impact of industrial SO<sub>2</sub> pollution on North Bohemia conifers. *Water, Air & Soil Pollution*, 223, 9, 5727–5744. DOI: 10.1007/s11270-012-1310-6
- SHABALOVA, M. V., VAN ENGELEN, A. F. V. (2003): Evaluation of a reconstruction of winter and summer temperatures in the Low Countries, AD 764–1998. *Climatic Change*, 58, 1–2, 219–242.
- SCHÄR, CH., JENDRITZKY, G. (2004): Climate change: Hot news from summer 2003. *Nature*, 432, 7017, 559–560.
- ŠTĚPÁNEK, P. (2004): Homogenizace teploty vzduchu na území České republiky v období přístrojových pozorování. *Práce a studie 32*. Český hydrometeorologický ústav, Praha.
- TRACHSEL, M., KAMENIK, C., GROSJEAN, M., MCCARROLL, A., MÖBERG, A., BRÁZDIL, R., BÜNTGEN, U., DOBROVOLNÝ, P., ESPER, J., FRANK, D. C., FRIEDRICH, M., GLASER, R., LAROCQUE-TOBLER, I., NICOLUSSI, K., RIEMANN, D. (2012): Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps, AD 1053–1996. *Quaternary Science Reviews*, 46, 66–79.
- TREML, V., PONOČNÁ, T., BÜNTGEN, U. (2012): Growth trends and temperature responses of treeline Norway spruce in the Czech-Polish Sudetes Mountains. *Climate Research*, 55, 2, 91–103.
- TREML, V., PONOČNÁ, T., KING, G. M., BÜNTGEN, U. (2015): A new tree-ring-based summer temperature reconstruction over the last three centuries for east-central Europe. *International Journal of Climatology*, 35, 10, 3160–3171.
- VAN ENGELEN, A. F. V., BUISMAN, J., IJNSEN, F. (2001): A millennium of weather, winds and water in the Low Countries. In: Jones, P. D., Ogilvie, A. E. J., Davies, T. D., Briffa, K. R. (eds.): *History and Climate: Memories of the Future?* Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York — Boston — Dordrecht — London — Moscow, 101–124.
- VENEMA, V., MESTRE, O., AGUILAR, E., AUER, I., GUIJARRO, J. A., DOMONKOS, P., VERTACNIK, G., ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., VIARRE, J., MÜLLER-WESTERMEIER, G., SZENTIMREY, T., LAKATOS, M., WILLIAMS, C. N., MENNE, M., LINDAU, R., RASOL, D., RUSTEMEIER, E., KOLOKYTHAS, K., MARINOVA, T., ANDRESEN, L., ACQUAOTTA, F., FRATIANNI, S., CHEVAL, S., KLANCAR, M., BRUNETTI, M., GRUBER, C., PROHOM DURAN, M., LIKSO, T., ESTEBAN, P., BRANDSMA, T. (2012): Benchmarking monthly homogenization algorithms. *Climate of the Past*, 8, 1, 89–115.
- VON STORCH, H., ZWIERS, F. W. (1999): *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press, Cambridge.
- WETTER, O., PFISTER, C. (2011): Spring-summer temperatures reconstructed for northern Switzerland and southwestern Germany from winter rye harvest dates, 1454–1970. *Climate of the Past*, 7, 4, 1307–1326.
- WILSON, R., TOPHAM, J. (2004): Violins and climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 77, 1, 9–24.
- XOPLAKI, E., LUTERBACHER, J., PAETH, H., DIETRICH, D., STEINER, N., GROSJEAN, M., WANNER, H. (2005): European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millenium. *Geophysical Research Letters*, 32, L15713. DOI: 10.1029/2005GL023424



## SUMMARY

### Changes and variability of spring-summer air temperature in Czechia during the past 300 years: comparison of instrumental, documentary and natural proxy data

Long-term homogenized instrumental, documentary and natural proxy temperature series serve as an important tool for specifying the past climate variability and changes. A large proportion of studies have dealt with the standard approach of temperature signal extraction, but only a minority of them has compared different data. This study focuses on an evolution of spring and summer air temperatures in Czechia during the 1701–2010 period. Direct instrumental data and also proxies were utilized in order to include both modes of high- and low-frequency variability.

The group of instrumental datasets consists of two stations (Prague-Klementinum, Brno) and two areal (Czechia, Central Europe) series from different sources (Dobrovolný et al. 2009; Brázdil et al. 2012b; Štěpánek 2004; Dobrovolný et al. 2010). Reconstructions were created from winter wheat harvest (Možný et al. 2012) and grape harvest (Možný et al. 2016) dates or from Norway spruce tree-rings from the Czech Sudetes Mountains (Tremml et al. 2015). Various statistical methods were applied to assess temperature variability, to detect cold/warm time periods and also extreme seasons. From the long-term perspective, spectral densities in the frequency domain and trend estimates were calculated. Moreover, the Czech series were compared with a heterogeneous set of 16 European reconstructions based not only on documentary, grain or grape harvest dates, but also on various tree-ring datasets from the Alps and the Tatra Mountains.

The temporal distribution of cold and warm spring and summer periods follows the same pattern within most of the series with the exception of the tree-ring reconstruction. The spring season of 1785 was the coldest one in all the series. In general, colder seasons were distributed quite evenly with a peak in the 18<sup>th</sup> century (spring season) or in the first half of the 19<sup>th</sup> century (summer season). On the other hand, warmest seasons predominantly occurred at the end of the 1710–2010 period, which is in agreement with positive temperature trends associated with the global warming phenomenon. The highest Pearson's correlation coefficients were calculated for those pairs of the series where station datasets were shared with areal series of Czechia and Central Europe. The tree-ring reconstruction from the Sudetes Mountains shares the lowest proportion of explained variation of other series.

No significant short-term cycles were ascertained. Nevertheless, long-term cycles predominate in reconstructed series. Only two out of the 12 series (both spring and summer) were denoted as white noise when the longest joint period of 1800–2007 was processed. The reconstructions contain a higher number of statistically significant ( $p = 0.05$ ) 50-year trends than the instrumental station and areal series. The period of 1951–2000 is the only one when significant trends are obvious in all the series and for both the seasons.

The group of European reconstructions confirms that instrumental or areal series are more consistent than spatially limited natural reconstructions such as those derived from tree-rings. External factors and methodological limitations should be borne in mind at every task. Natural archives incorporate a specific climate-vegetation response and are prone to external factors such as air pollution (Tremml, Ponocná, Büntgen 2012; Rydval, Wilson 2012). Conversely, documentary datasets are liable to subjectivity of the human factor which causes suppression of the low-frequency variability. One of the solutions is proceeding to multi-proxy analyses combining different types of climatological data. However, reconstructed series are still an important tool to assess past climate fluctuations and changes.



- Fig. 1 Spring season temperature variability of Czech instrumental and reconstructed series expressed as anomalies with respect to the 1961–1990 reference period (thin grey line). Smoothed by 30-year Gaussian filter (thick black line).
- Fig. 2 Summer season temperature variability of Czech instrumental and reconstructed series expressed as anomalies with respect to the 1961–1990 reference period (thin grey line). Smoothed by 30-year Gaussian filter (thick black line).
- Fig. 3 Relative frequency of the 20% coldest (left) and 20% warmest (right) spring seasons of the 1701–2010 period within each individual 30-year (10-year for the 2001–2010 period) interval.
- Fig. 4 Relative frequency of the 20% coldest (left) and 20% warmest (right) summer seasons of the 1701–2010 period within each individual 30-year (10-year for the 2001–2010 period) interval.
- Fig. 5 Spectral densities of individual spring (left) and summer (right) time series for the longest shared period of 1800–2007. The most pronounced spectral density peaks are indicated by their period length.
- Fig. 6 50-year trends of individual spring (left) and summer (right) temperature series of the 1701–2000 period. Statistically significant trends ( $p = 0.05$ ) are expressed in colour.
- Fig. 7 Moving 30-year linear trends of spring temperature series of the 1701–2010 period. Value of corresponding trend estimated for the 30-year window is always calculated in terminal year (e.g. in 2010 for the 1981–2010 period).
- Fig. 8 Time evolution of 5–50-year linear trends for selected summer temperature series of the 1750–2010 period.
- Fig. 9 Moving 31-year correlation coefficients of the Central European temperature series (spring season) with instrumental series of Prague-Klementinum, with Czech and selected European reconstructed spring series of the 1701–2010 period. The overall correlation coefficient is part of the legend item (statistically significant values at  $p = 0.01$  are highlighted in bold).
- Fig. 10 Variability of Pearson's correlation coefficients (summer season) for Czech instrumental and reconstructed series and for the group of selected European reconstructions (LUTO4, LCTO1, GUIO5, MEIO7, MAUO9, CHUO4, WTO4, NEDO4, BUNO6, BUN11b, TRA12) of the 1701–2010 period.

## PODĚKOVÁNÍ

Za cenné rady, poznatky a připomínky v průběhu zpracování studie patří velký dík R. Brázdilovi, za poskytnutí databáze evropských rekonstrukcí a teplotní rekonstrukce pro střední Evropu P. Dobrovolnému (oba Geografický ústav Masarykovy univerzity). Za poskytnutí dat teplotních rekonstrukcí na základě datací žní ozimé pšenice, resp. sklizní révy vinné je na místě poděkovat M. Možnému (Český hydrometeorologický ústav), V. Tremlovi (katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy) pak za poskytnutí údajů teplotní rekonstrukce regionu Sudet. L. Kolářové (Městec Králové) aj. J. Perečkové (Praha) děkuji za jazykovou korekturu textu této studie.