

# KLIMATICKÉ FAKTORY LIMITUJÍCÍ RŮST SMRKU NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY V OBDOBÍ 1968-2013

## CLIMATIC FACTORS LIMITING SPRUCE GROWTH IN THE CZECH REPUBLIC IN THE PERIOD 1968-2013

MONIKA VEJPUSKOVÁ ✉

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Strnady 136, 252 02 Jíloviště, Czech Republic

✉ e-mail: [vejpustkova@vulhm.cz](mailto:vejpustkova@vulhm.cz)

### ABSTRACT

The main objective of the study was to evaluate long-term growth response of spruce to climatic factors using the set of 3,062 tree-ring series collected in 2013–2019 from the entire territory of the Czech Republic. Multivariate analysis of dendrochronological data and available environmental parameters allowed the identification of climatic factors with negative impact on spruce growth. The dominant climatic factor negatively influencing the spruce growth in the Czech Republic in this period was the lack of precipitation during the summer. The negative impact of summer drought was the most pronounced in locations up to 650 m a. s. l. However, the effect of drought was evident in some cases even at altitudes above 1000 m a.s.l. Growth of spruce in lower and middle altitudes in western and central Bohemia was also limited by the lack of precipitation in winter, while in eastern Bohemia and Moravia the growth was negatively affected by drought in the autumn of the previous year. The different growth response of lowland spruce ecotype shows how specific ecotype and site conditions can locally change the climate-growth relationship.

For more information see Summary at the end of the article.

**Klíčová slova:** klima; letokruhová analýza; *Picea abies*; radiální růst; sucho

**Key words:** climate; tree-ring analysis; *Picea abies*; radial growth; drought

### ÚVOD

I přes úbytek v posledních letech má smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) Karst.) v České republice stále vysoké zastoupení – 43 % (KUČERA, ADOLT 2019), přitom přirozené zastoupení smrku se uvádí okolo 11 % (MZE 2006). Smrk se zde původně přirozeně vyskytoval převážně v horských polohách v 6.–8. lesním vegetačním stupni (LVS), v nižších polohách byl zastoupen pouze v menší míře na podmáčených, lužních a rašelinných stanovištích a v inverzních polohách (PLÍVA 2000). V současnosti se však velká část smrkových porostů nachází mimo své ekologické optimum, v nadmořské výšce 400–700 m n. m. (3.–5. LVS). Pěstování na nevhodných stanovištích, klesající biologická rozmanitost a použití nevhodných proveniencí způsobily, že smrkové porosty jsou náchylnější k napadení houbovými chorobami a hmyzími škůdci i k disturbancím abiotického charakteru (KLIMO et al. 2000).

První známky chřadnutí smrku v důsledku sucha byly pozorovány na konci 90. let v nižších a středních polohách v oblasti severní Moravy (ŠRÁMEK et al. 2008). Rozsáhlé hynutí smrkových porostů pak v této oblasti započalo po silném suchu v roce 2003 (CIENCIALA et al. 2017). Po dalším extrémním suchu v roce 2015 se rozšířilo na většinu území České republiky (ZAHRADNÍK 2019). Aktivity biotických činitelů (podkorního hmyzu a houbových patogenů) hraje rozhodující roli v rostoucí mortalitě porostů (LUBOJACKÝ et al. 2020). Za příčinu hynutí smrku jsou považována opakovaná období sucha (HLÁSNÝ et al. 2014).

Předkládaná studie si klade za cíl odpovědět na otázku, které klimatické faktory limitovaly růst smrku na území ČR v období 1968–2013 a jak se měnila růstová odezva smrku na tyto faktory v závislosti na stanovištních podmínkách. Vzhledem k předpokládanému negativnímu působení sucha byla pozornost věnována zejména citlivosti přírůstků na nedostatek srážek.

## MATERIÁL A METODIKA

Pro vyhodnocení byly využity letokruhové chronologie smrku získané dendrochronologickým pracovištěm Výzkumného ústavu lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM) v letech 2013–2019 (VEJPUŠTKOVÁ et al. 2017, 2018; VEJPUŠTKOVÁ, ČIHÁK 2019). Celkem se jedná o 61 lokalit a v jejich rámci o 86 odběrových míst. Do vyhodnocení nebyla zahrnuta tři odběrová místa z Krušných hor (Výsluní, Skelný vrch a Loučná), kde kvůli nízkému věku porostů chronologie nepokrývaly zvolené období 1968–2013. Celkem bylo pro studii využito 83 letokruhových chronologií smrku z 83 odběrových míst reprezentujících širokou škálu stanovištních podmínek (obr. 1; tab. 1). Stanovištní podmínky odběrového místa jsou pro účely této studie charakterizovány nadmořskou výškou, příslušností k přírodní lesní oblasti (PLO) (ÚHŮL 2002) a lesním typem (PLÍVA 1987; VIEWEGH et al. 2003). Růstová reakce smrku na klimatické faktory byla hodnocena za období 1968–2013, pro které byla dostupná dendrochronologická data z odebíraných míst.

Vývrty byly odebrány přírůstovým nebo zezem ve výčetní výšce z 10 až 30 stromů na jedno odběrové místo, po 2 vývrtech z každého stromu. Celkem bylo odebráno 3062 vývrvtů z 1531 stromů. Šířky letokruhů byly měřeny na měřicím stole TimeTable 2 s přesností na 0,01 mm.

Naměřené letokruhové série byly vizuálně křížově datovány v programu PAST 4 (KNIBBE 2004). Tímto způsobem byly odhaleny případné nepravidelnosti v tvorbě letokruhů (chybějící či falešné letokruhy). Data byla statisticky verifikována v programu Cofecha (HOLMES 1983).

Letokruhové série byly standardizovány metodou dvojité detrendace, kdy byl věkový trend aproximován nejprve negativní exponenciální funkcí a následně spline funkcí (WARREN 1980). Délka spline funkce odpovídala průměrné délce letokruhových chronologií na dané lokalitě. Cílem použité metody detrendace bylo zvýraznit meziroční variabilitu a odstranit dlouhodobé trendy v letokruhových sériích.

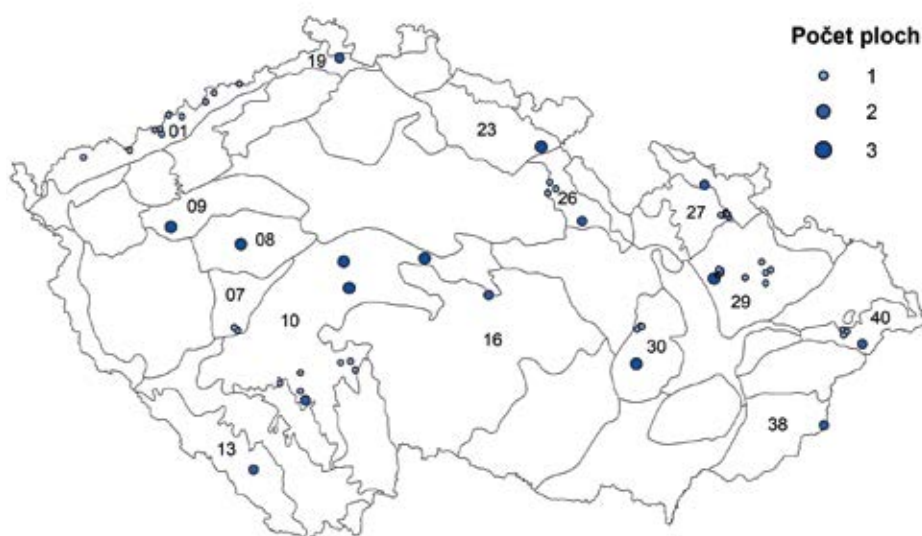
Letokruhové indexy byly počítány jako poměr naměřené šířky letokruhu a aproximované hodnoty. Zbývající autokorelace v řadách leto-

kruhových indexů byla odstraněna autoregresivním modelem v softwaru Arstan (COOK, KRUSIC 2005). Takto byly získány tzv. residuální letokruhové chronologie. Pro každé odběrové místo pak byla vypočtena průměrná residuální chronologie, která byla korelována s průměrnými měsíčními teplotami a měsíčními úhrny srážek za období 1968–2013 ve zvolené sekvenci 16 měsíců (od května roku předcházejícího tvorbě daného letokruhu po srpen roku, kdy se daný letokruh vytvořil) a dále se sezónním teplotním průměrem, resp. sumou srážek za letní období. Celkem tedy do vyhodnocení vstupovalo 17 proměnných charakterizujících teploty a 17 proměnných charakterizujících srážky. Klimatická data byla přebrána z databáze ČHMÚ. Pro každou lokalitu byla vyhledána blízká reprezentativní klimatická stanice s nepřerušovanou řadou měření v letech 1968–2013 (viz přehled meteorostanic v tabulce 1), Poloha stanic v teplotním a srážkovém gradientu je zřejmá z obr. 2.

Pro vícerozměrné analýzy byly využity vytvořené matice korelačních koeficientů  $83 \times 17$  (tj. 83 průměrných letokruhových chronologií  $\times$  17 klimatických proměnných) pro teploty a stejně pro srážkové úhrny. Podobnost v reakci přírůstu smrku na klimatické faktory byla analyzována metodami hierarchické shlukové analýzy (Wardova metoda, euklidovské vzdálenosti). Na stejná data byla navíc aplikována metoda hlavních komponent (PCA) k objasnění struktury a vazeb v korelačních maticích. Významné hlavní komponenty byly vybrány v souladu s Kaiserovým pravidlem, tj. vlastní číslo  $> 1$  (KAISER 1992). Jednalo se zpravidla o první dvě hlavní komponenty, které popisují největší podíl variability vztahu přírůstu ke klimatickým faktorům. Výpočty byly provedeny v programu Statistica v. 13.5 (TIBCO Software Inc. 2018).

## VÝSLEDKY

Krabicové grafy (obr. 3) ukazují, jaká je variabilita vztahu přírůstu smrku k teplotám a srážkovým úhrnům v jednotlivých měsících, respektive pro letní období na území České republiky. Z obr. 3a je patrné, že významný negativní vliv na velikost přírůstu mají teploty v září předchozího roku a dále v letním období daného roku.



**Obr. 1.**

Lokalizace odběrových míst v přírodních lesních oblastech ČR. Přírodní lesní oblasti s odběrem vývrvtů jsou označeny číselným kódem oblasti

**Fig. 1.**

Location of sample sites in natural forest areas in the Czech Republic. Natural forest areas with sample sites are marked with the numerical area code

Tab. 1.

Charakteristika odběrových míst a přehled meteostanic, jejichž data byla využita pro vyhodnocení vztahu klima-přírůst na dané lokalitě  
 Characteristics of sample sites and an overview of meteorological stations, the data of which were used to evaluate the climate-growth relationship at a given locality

| Oblast/<br>Region            | PLO*<br>NFA* | Lokalita/<br>Locality | Odběrové místo/<br>Sample site | Kód místa**/<br>Site code** | Nadm. výška/<br>Altitude | Věk/Age | Lesní typ/<br>Ecosite*** | Meteostanice/<br>Meteorological station |
|------------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------|--------------------------|---|
| Krušné hory                  | 01           | Cínovec               | CIN                            | 8-01                        | 820                      | 55      | 7K3                      | Nová Ves<br>v Horách<br>(NOV)           |
|                              |              | Fláje                 | FLJ                            | 7-01                        | 750                      | 55      | 7K4                      |   |
|                              |              | Klíny                 | KLN                            | 8-01                        | 800                      | 55      | 7K3                      |   |
|                              |              | Kálek                 | KAL                            | 8-01                        | 815                      | 55      | 7K3                      |   |
|                              |              | Načetín               | NAC                            | 7-01                        | 795                      | 55      | 7K3                      |   |
|                              |              | Výsluní               | VYS                            | 8-01                        | 810                      | 45      | 6K4                      |   |
|                              |              | Skelný vrch           | SKV                            | 8-01                        | 875                      | 45      | 7K3                      |   |
|                              |              | Loučná                | LOC                            | 9-01                        | 990                      | 45      | 7K1                      |   |
|                              |              | Přebuz                | PRB                            | 8-01                        | 885                      | 55      | 7M3                      |   |
|                              |              | Kryštofovy Hamry      | KRH                            | 9-01                        | 900                      | 55      | 7K3                      |   |
| Šumava                       | 13           | Volary                | VOSM                           | 10-13                       | 1025                     | 115     | 6K1                      | Lenora<br>(LEN)                         |
|                              |              |                       | VOSMX                          | 10-13                       | 1020                     | 106     | 6K1                      |   |
| Lužické hory                 | 19           | Chřibská              | CHRSM                          | 5-19                        | 500                      | 105     | 5K1                      | Varnsdorf<br>(VAR)                      |
|                              |              |                       | CHRSMX                         | 5-19                        | 500                      | 90      | 5K1                      |   |
| Brdská<br>vrchovina          | 07           | Rožmitál              | RO1SM                          | 5-07                        | 590                      | 116     | 5O1                      | Nepomuk<br>(NEP)                        |
|                              |              |                       | RO2SM                          | 7-07                        | 775                      | 195     | 6S1                      |   |
|                              |              |                       | RO3SM                          | 7-07                        | 705                      | 113     | 5K1                      |   |
| Rakovnická<br>pahorkatina    | 09           | Rabštejn              | RACH                           | 4-09                        | 415                      | 192     | 3D7, 2Y1                 | Kralovice<br>(KRL)                      |
|                              |              |                       | RAS1                           | 4-09                        | 430                      | 122     | 2Y1                      |   |
|                              |              |                       | RAS2                           | 5-09                        | 515                      | 113     | 3K3, 3S1                 |   |
| Křivoklátsko                 | 08           | Úpořský potok         | KRCH                           | 3-08                        | 300                      | 150     | 3J3, 3A3                 | Zbiroh<br>(ZBR)                         |
|                              |              |                       | KRS1                           | 3-08                        | 360                      | 84      | 3B3                      |   |
|                              |              |                       | KRS2                           | 4-08                        | 420                      | 86      | 4O1                      |   |
| Benešovská<br>pahorkatina    | 10           | Těptín                | TPCH                           | 3-10                        | 350                      | 198     | 3U1                      | Ondřejov<br>(OND)                       |
|                              |              |                       | TPS1                           | 3-10                        | 350                      | 61      | 3F1                      |   |
|                              |              |                       | TPS2                           | 4-10                        | 410                      | 81      | 3F1                      |   |
|                              |              |                       | KOŽLÍ                          | 3-10                        | 310                      | 142     | 3S2, 3L1                 |   |
|                              |              |                       | KOS1                           | 3-10                        | 310                      | 118     | 3D8, 3L1                 |   |
| Hornosázavská<br>pahorkatina | 10           | Švadlenka             | SVCH                           | 3-10                        | 365                      | 204     | 3D8,3U1                  | Ondřejov<br>(OND)                       |
|                              |              |                       | SVS1                           | 3-10                        | 375                      | 84      | 3S1                      |   |
|                              |              |                       | SVS2                           | 4-10                        | 420                      | 107     | 3H1,3S2                  |   |
| Táborská<br>pahorkatina      | 10           | Tábor                 | TB1SM                          | 4-10                        | 441                      | 98      | 4H1                      | Tábor<br>(TAB)                          |
|                              |              |                       | TB2SM                          | 4-10                        | 460                      | 135     | 3S2                      |   |
|                              |              |                       | TB3SM                          | 4-10                        | 410                      | 127     | 4A1                      |   |
| Písecké hory                 | 10           | Všeteč                | VSSM                           | 5-10                        | 550                      | 64      | 4S1                      | Vráž u Písku<br>(VRŽ)                   |
|                              |              |                       | VSSMX                          | 5-10                        | 550                      | 78      | 4S1                      |   |
|                              |              |                       | PI1SM                          | 4-10                        | 479                      | 101     | 3K5                      |   |
|                              |              |                       | PI2SM                          | 4-10                        | 410                      | 74      | 3S1                      |   |
|                              |              |                       | PI3SM                          | 5-10                        | 525                      | 81      | 4B1                      |   |
| Železné hory                 | 16           | Libice                | LBSM                           | 4-16                        | 480                      | 62      | 3S1                      | Havlíčkův<br>Brod (HAV)                 |
|                              |              |                       | LBSMX                          | 4-16                        | 480                      | 110     | 3S1                      |   |

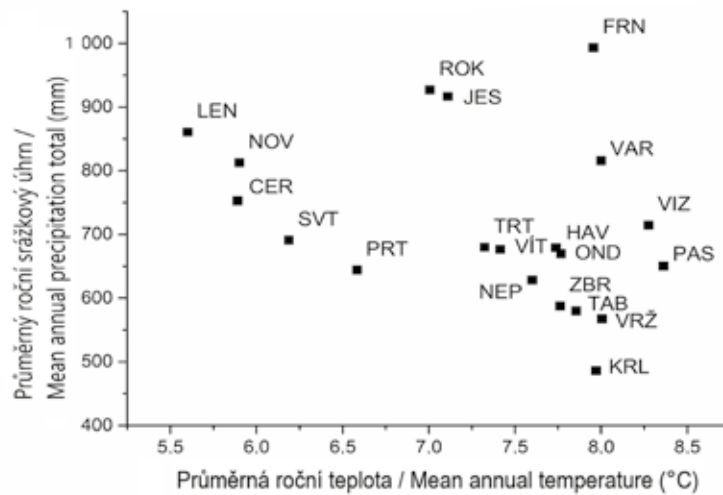
\*PLO přírodní lesní oblast/NFA natural forest area (ÚHÚL 2002); \*\*Kód odběrového místa se skládá z kódu pro nadmořskou výšku (2: 200-299, 3: 300-399, 4: 400-499 m n. m. atd.) a číselného označení PLO/Site code consists of altitude code (2: 200-299, 3: 300-399, 4: 400-499 m a. s. l., etc.) and the numbering of the NFA; \*\*\*Lesní typ/Ecosite (VIEWEGH et al. 2003)

**Tab. 1. Pokračování/Continuation**

Charakteristika odběrových míst a přehled meteostanic, jejichž data byla využita pro vyhodnocení vztahu klima-přírůst na dané lokalitě  
 Characteristics of sample sites and an overview of meteorological stations, the data of which were used to evaluate the climate-growth relationship at a given locality

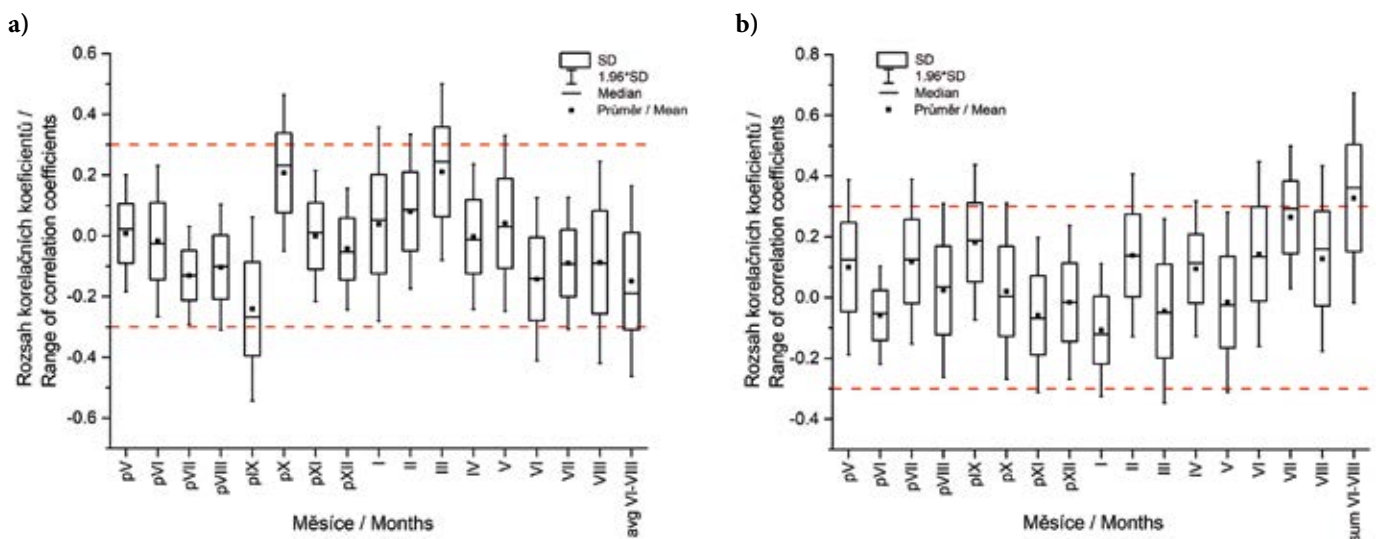
| Oblast/<br>Region         | PLO*<br>NFA* | Lokalita/<br>Locality | Odběrové místo/<br>Sample site | Kód místa**/<br>Site code** | Nadm. výška/<br>Altitude | Věk/Age | Lesní typ/<br>Ecosite*** | Meteostanice/<br>Meteorological station     |     |
|---------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------|--------------------------|---|-----|
| Podkrkonoší               | 23           | Ratibořice            | RTCH                           | 2-23                        | 295                      | 194     | 3D6                      | Trutnov-<br>Úpice (TRT)                     |     |
|                           |              |                       | RTS1                           | 3-23                        | 310                      | 86      | 3D6                      |   |     |
|                           |              |                       | RTS2                           | 3-23                        | 355                      | 85      | 2B3                      |   |     |
| Předhoří<br>Orlických hor | 26           | Potštejn              | POCH                           | 3-26                        | 320                      | 160     | 4B3                      | Rokytnice<br>v Orlických<br>horách<br>(ROK) |     |
|                           |              |                       | POS1                           | 3-26                        | 370                      | 81      | 4B3                      |   |     |
|                           |              |                       | OPočno                         | 3-26                        | 350                      | 66      | 3I1                      |   |     |
|                           |              |                       | OP2SM                          | 3-26                        | 350                      | 87      | 3K6                      |   |     |
|                           |              |                       | OP3SM                          | 2-26                        | 260                      | 133     | 1M3                      |   |     |
| Drahanská<br>vrchovina    | 30           | Horní<br>Štěpánov     | PR1SM                          | 6-30                        | 600                      | 96      | 5K1                      | Protivanov<br>(PRT)                         |     |
|                           |              |                       | PR2SM                          | 5-30                        | 560                      | 92      | 5B3                      |   |     |
|                           |              |                       | PR3SM                          | 5-30                        | 540                      | 93      | 5K2                      |   |     |
|                           |              |                       | Pustý Žleb                     | 3-30                        | 395                      | 185     | 3J6                      |   |     |
|                           |              |                       | PZS1                           | 4-30                        | 435                      | 76      | 3H1                      |   |     |
|                           |              |                       | PZS2                           | 4-30                        | 430                      | 147     | 3J6                      |   |     |
|                           |              |                       | PZS3                           | 4-30                        | 480                      | 74      | 3H2                      |   |     |
| Nízký Jeseník             | 29           | Sítka                 | STCH                           | 3-29                        | 380                      | 155     | 2L2                      | Paseka<br>(PAS)                             |     |
|                           |              |                       | STS1                           | 3-29                        | 390                      | 86      | 3A1                      |   |     |
|                           |              |                       | STS2                           | 5-29                        | 560                      | 83      | 4S1                      |   |     |
|                           |              | Huzová                | SM_S3                          | 6-29                        | 640                      | 90      | 5S1                      | Červená<br>(CER)                            |     |
|                           |              |                       | SM_O3                          | 6-29                        | 635                      | 91      | 5O1                      |   |     |
|                           |              |                       | SM_O2                          | 6-29                        | 636                      | 96      | 5O1                      |   |     |
|                           |              |                       | SM_S2                          | 6-29                        | 640                      | 137     | 5S1                      |   |     |
|                           |              |                       | SM_O1                          | 6-29                        | 633                      | 88      | 5O1                      |   |     |
|                           |              | SM_S1                 | 6-29                           | 683                         | 93                       | 5S1     |                          |   |     |
|                           |              | Lhotka                | LHT                            | 3-29                        | 388                      | 62      | 4H3                      | Vítkov<br>(VÍT)                             |     |
|                           |              | Čermná                | CER                            | 4-29                        | 420                      | 125     | 4B1                      |   |     |
|                           |              | Svatoňovice           | SVT                            | 4-29                        | 454                      | 112     | 4S1                      |   |     |
|                           |              | Lublice               | LUB                            | 5-29                        | 527                      | 116     | 4H3                      |   |     |
|                           |              | Červená hora          | CEH                            | 6-29                        | 699                      | 80      | 5S1                      | Červená (CER)                               |     |
| Hrubý Jeseník             | 27           | Široká Niva S         | SNS                            | 4-27                        | 499                      | 76      | 4B1                      | Světlá<br>(SVT)                             |     |
|                           |              |                       | Široká Niva V                  | SNV                         | 5-27                     | 501     | 89                       |   | 4V9 |
|                           |              |                       | Kozí hrádek                    | KOH                         | 5-27                     | 592     | 91                       |   | 5B1 |
|                           |              |                       | Koleno                         | KOL                         | 6-27                     | 619     | 79                       |   | 5O1 |
|                           |              |                       | Pustá Rudná                    | PUS                         | 7-27                     | 773     | 96                       |   | 6S1 |
|                           |              |                       | Kopincova mokřina              | KOP                         | 7-27                     | 797     | 87                       |   | 6O1 |
|                           |              |                       | Rejvíz                         | RESM                        | 7-27                     | 775     | 94                       |   | 6S1 |
|                           |              |                       | RESMX                          | 7-27                        | 780                      | 86      | 6S1                      |   |     |
| Beskydy                   | 40           | Trojanovice           | TRJ                            | 5-40                        | 578                      | 115     | 4S1                      | Frenštát<br>p. Radhoštěm<br>(FRN)           |     |
|                           |              |                       | U letadla                      | LET                         | 7-40                     | 761     | 87                       |   | 5F1 |
|                           |              |                       | Lanovka                        | LAN                         | 8-40                     | 806     | 86                       |   | 5F1 |
|                           |              |                       | Klepačka                       | KLSM                        | 8-40                     | 895     | 95                       |   | 5S1 |
|                           |              |                       | KLSMX                          | 8-40                        | 850                      | 90      | 5S1                      |   |     |
| Bílé Karpaty              | 38           | Sidonie               | SISM                           | 5-38                        | 555                      | 74      | 4B4                      | Vizovice<br>(VIZ)                           |     |
|                           |              |                       | SISMX                          | 5-38                        | 550                      | 95      | 4B4                      |   |     |

\*PLO přírodní lesní oblast/NFA natural forest area (ÚHÚL 2002); \*\*Kód odběrového místa se skládá z kódu pro nadmořskou výšku (2: 200-299, 3: 300-399, 4: 400-499 m n. m. atd.) a číselného označení PLO/Site code consists of altitude code (2: 200-299, 3: 300-399, 4: 400-499 m a. s. l., etc.) and the numbering of the NFA; \*\*\*Lesní typ/Ecosite (VIEWEGH et al. 2003)



**Obr. 2.**  
Poloha meteostanic v teplotním a srážkovém gradientu v období 1968–2013

**Fig. 2.**  
Location of weather stations in temperature and precipitation gradient in the period 1968–2013



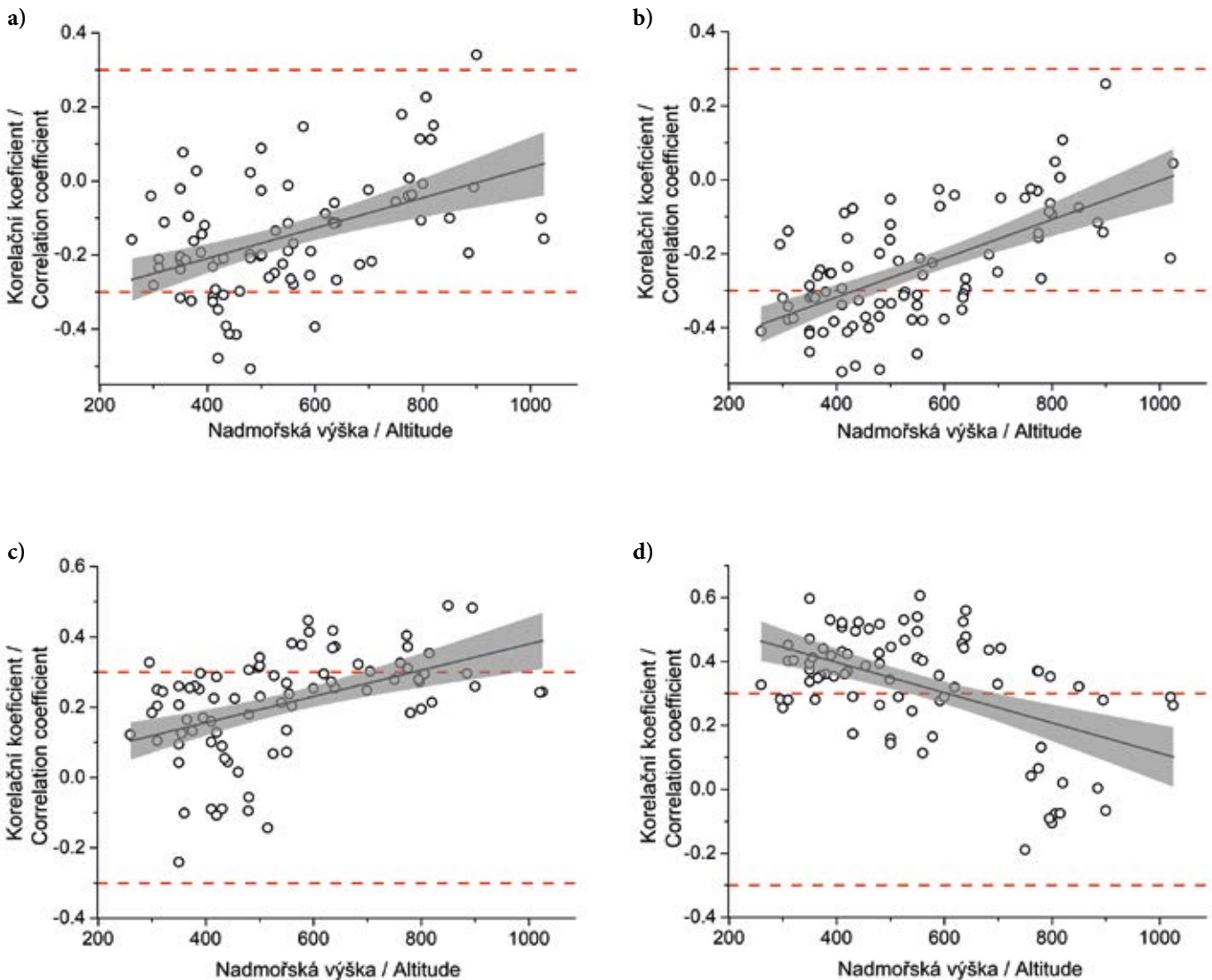
**Obr. 3.**  
Variabilita vztahu přírůstků k a) průměrným teplotám vzduchu a b) srážkovým úhrnům v zadané sekvenci měsíců od května předchozího roku (měsíce označené příznakem „p“) do srpna aktuálního roku včetně úhrnné hodnoty za letní období (červen až srpen). Červenými liniemi je vyznačena kritická hodnota Pearsonova korelačního koeficientu na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$

**Fig. 3.**  
Variability of the growth relationship to monthly a) mean air temperatures and b) precipitation totals from May of the previous year (months marked with the “p” flag) to August of the actual year, including the total value for the summer period (June to August). The red lines indicate the critical value of the Pearson correlation coefficient at the significance level  $\alpha = 0.05$

Zatímco signifikantní negativní vliv letních teplot daného roku se projevuje pouze na 14 odběrových místech v polohách do 650 m n. m. (obr. 4a), statisticky významný negativní vliv teplot v září předchozího roku byl zjištěn na 40 místech, které se nacházejí ve výškovém pásmu od 200 do 650 m n. m. Vztah přírůstu k zářijovým teplotám vykazuje těsnější závislost na nadmořské výšce (obr. 4b). Ve vyšších nadmořských výškách je vliv obou těchto teplot nevýznamný. Pozitivní efekt teplot na růst smrku byl zjištěn pro teploty v říjnu předchozího roku a pro březnové teploty v daném roce. Pozitivní vliv říjnových teplot je signifikantní na 26 plochách napříč výškovým gradientem (trend v korelačních koeficientech v závislosti na nadmořské výšce nebyl vý-

znamný, proto není zobrazen). Naproti tomu kladný vliv březnových teplot s nadmořskou výškou stoupá a signifikantní vztah je typický pro výše položená místa nad 600 m n. m. (obr. 4c).

Srážkové úhrny mají na přírůst smrku převážně pozitivní vliv. Růst významně ovlivňují především srážky v letních měsících daného roku a dále srážky v září předchozího roku (obr. 3b). Signifikantní vliv srážek se projevuje hlavně v nižších a středních polohách do 650 m n. m. (obr. 4d). Nicméně se ukazuje, že i na některých horských plochách jsou srážky limitující např. na lokalitě Volary (PLO 13 – Šumava), Klepačka (PLO 40 – Beskydy) či Kopicova mokřina (PLO 27 – Hrubý Jeseník). Nejméně limitován srážkovými úhrny se zatím jeví přírůst smrku v Krušných horách.



**Obr. 4.**

Korelační koeficienty mezi přírůsty a a) průměrnými letními teplotami v daném roce, b) průměrnou teplotou v září předchozího roku, c) průměrnou teplotou v březnu daného roku a d) letními srážkovými úhrny v daném roce vynesené proti nadmořské výšce. Červenými liniemi je vyznačena kritická hodnota Pearsonova korelačního koeficientu na hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . Černou linií je vyznačen lineární trend, šedá plocha označuje konfidenční interval 95 %

**Fig. 4.**

Correlation coefficients between growth and a) mean summer temperature for the current year, b) mean temperature in September of the previous year, c) mean temperature in March of the given year and d) summer precipitation totals for the given year plotted against altitude. Red lines indicate the critical value of the Pearson correlation coefficient at the significance level  $\alpha = 0.05$ . The black line indicates a linear trend, the grey area is a 95% confidence interval



Podobnost mezi odběrovými místy v reakci přírůstu smrku na klimatické faktory ukazují dendrogramy hierarchické shlukové analýzy (obr. 5). Shluková analýza na základě vztahu přírůstu k teplotám vylíšila tři základní klastry odběrových míst (obr. 5a). V prvním klastru jsou sdruženy nejnižší položené plochy nacházející se ve výškovém pásmu 200–500 m n. m. bez ohledu na příslušnost k přírodní lesní oblasti a bez ohledu na charakter stanoviště. Ve druhém klastru jsou horské plochy včetně ploch ze středních vyšších poloh z oblasti Lužických (PLO 19) a Železných hor (PLO 16 – Českomoravská vrchovina). K tomuto klastru byly přidruženy i dvě nízko položené plochy, a to plocha RTCH 2-23 a TPCCH 3-10. Jedná se o specifické porosty tzv. chlumního ekotypu smrku rostoucího ve vlhčích a chladnějších údolních polohách. V případě plochy RTCH se jedná o staré smrky v údolí Úpy u Ratibořic, TPCCH jsou takzvané Těptínské smrky v údolí Kamenického potoka u Týnce nad Sázavou. U obou porostů je růstová reakce na teploty podobná horským polohám – vztah k letním teplotám není významný, naopak se zde projevuje pozitivní efekt únorových a březnových teplot. Třetí klaster zahrnuje především plochy ze středních poloh (400–700 m n. m.), k nimž je přidruženo několik porostů chlumního ekotypu smrku (odběrová místa RACH 4-09, KOCH 3-10 a SVCH 3-10). V pravé části třetího klastru se nachází skupina zbývajících horských ploch, které se oddělily od druhého klastru.

Zcela jiný obrázek poskytuje dendrogram shlukové analýzy založený na matici korelačních koeficientů mezi přírůsty a srážkovými úhrny (obr. 5b). V prvním a přidruženém druhém klastru se jasně oddělily plochy z oblasti západních, jižních a středních Čech od ploch z východních Čech a Moravy, které tvoří třetí klaster. Vzor vztahu mezi přírůsty a srážkami má tedy více regionální charakter.

Prostorový vzor vztahu mezi klimatickými faktory a přírůstem smrku na odběrových místech ilustrují biploty analýzy hlavních komponent (PCA) v obr. 6. Vektory zobrazují korelace přírůstu s vybraným klimatickým faktorem, body reprezentují 83 odběrových míst označených kódy s informací o nadmořské výšce a příslušnosti k PLO. Pokud se body odběrových míst nacházejí ve směru určitého klimatického vektoru, pak přírůsty na těchto odběrových místech vykazují podobný charakter vztahu k tomuto faktoru.

Na základě vztahu přírůstu k teplotám byla odběrová místa rozdělena do třech skupin (obr. 6a). Pro rozdělení ploch do skupin je určující poloha odběrového místa ve výškovém gradientu, skupiny však nejsou ostře odděleny. Skupina v 1. kvadrantu ve směru první komponenty (PC1) je tvořena plochami z nižších poloh (200–600 m n. m.) z různých PLO. Přírůst na těchto odběrových místech se vyznačuje negativním vztahem k letním teplotám daného roku a teplotám v září předchozího roku. V opačném 3. kvadrantu ve směru druhé hlavní komponenty (PC2) leží plochy z vyšších poloh (500–800 m n. m.), na nichž přírůst smrku vykazuje pozitivní vztah k zimním teplotám (leden – březen). Ve 2. a 3. kvadrantu v kladném směru PC1 jsou soustředěna odběrová místa převážně z vyšších poloh (nad 700 m n. m.), kde je vztah přírůstu k letním teplotám spíše pozitivní, hodnoty korelací však nedosahují signifikantních hodnot.

Do třech skupin rozdělila PCA odběrová místa i podle charakteru vztahu přírůstu ke srážkovým úhrnům (obr. 6b). První shluk tvoří odběrová místa v nižších polohách v západní a střední části ČR (PLO 07 – Brdy, 08 – Křivoklátsko, 09 – Rakovnická pahorkatina a 10 – Středočeská pahorkatina), která se seskupila v 1. a 2. kvadrantu v kladném směru druhé komponenty (PC2). PC2 v tomto směru zatěžuje především vztah přírůstu ke srážkovým úhrnům v letních měsících a dále v zimních měsících leden – březen daného roku. V obou případech přírůstu se srážkovými úhrny koreluje pozitivně. Druhý shluk ploch z Moravy a východních Čech (PLO 26 – Předhoří Orlických hor, 27 – Hrubý Jeseník, 29 – Nízký Jeseník, 30 – Dražanská vrchovina a 38 – Bílé Karpaty) leží ve 3. kvadrantu v kladném směru

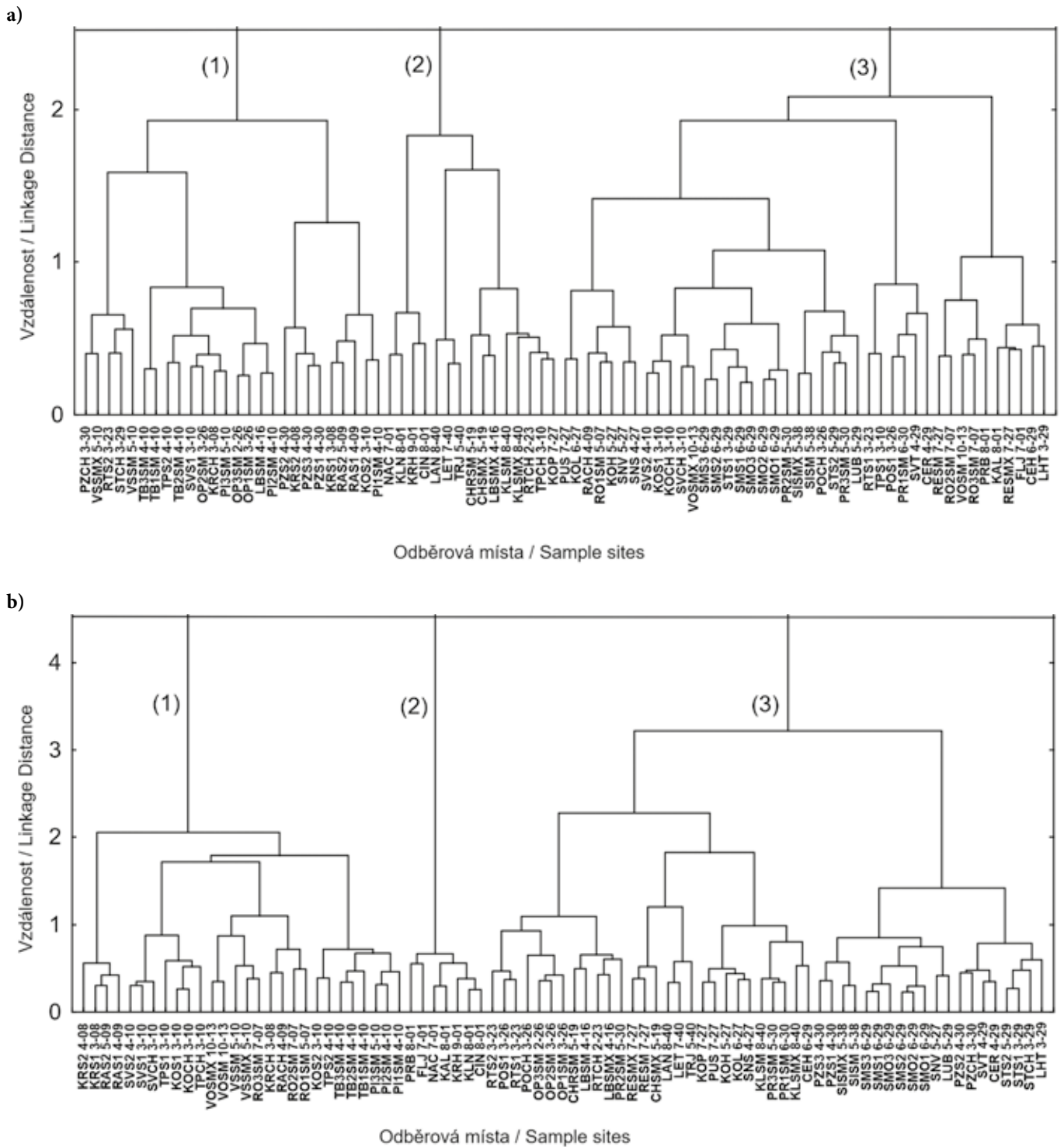
první komponenty (PC1). S touto komponentou koreluje především vztah přírůstu k letním srážkám v daném roce a dále vztah ke srážkám na konci léta a na podzim předchozího roku. Třetí shluk ploch, který se výrazně oddělil od předchozích dvou shluků, se nachází ve 4. kvadrantu a tvoří jej plochy z PLO 01 Krušné hory, pro které je dominantní pozitivní vztah přírůstu ke srážkám v říjnu předchozího roku. Krušnohorské plochy se odlišují od ostatních i negativním vztahem přírůstu k letním srážkovým úhrnům.

## DISKUSE

Odběrová místa s dostupnými dendrochronologickými daty pokrývají altitudinální i longitudinální gradient ČR. Velká část smrkových porostů se v republice nachází mimo oblast svého přirozeného výskytu, tedy mimo horské oblasti. V posledních letech dochází v nižších polohách k intenzivnímu chřadnutí smrkových porostů, proto sem v období 2013–2019 byla zacílena i většina dendrochronologických studií zpracovaných na pracovišti VÚLHM. To se projevilo vyšším zastoupením dat z nižších poloh v prezentovaném empirickém materiálu. Co se týče kvality stanovišť, charakterizované edafickými kategoriemi, v rámci ČR existují regionální rozdíly ve výskytu smrku na stanovištích kyselých a živných řady. Zatímco v Čechách se smrkové porosty vyskytují převážně na kyselých a svěžích stanovištích, na Moravě jsou více zastoupena stanoviště živná. Speciální skupinu odběrových míst tvoří porosty chlumního ekotypu smrku na vodou či humusem obohacených stanovištích edafické kategorie D, J, L a U.

Smrkové porosty v Krušných horách byly v době odběru ve stádiu nastávajících kmenovin (věk okolo 55 let), byly tedy mladší než ostatní odebrané porosty. Věk stromů může významně ovlivňovat reakci stromů na klimatické faktory, kdy vyšší citlivost v růstové odezvě byla prokázána u starých stromů (PRIMICIA et al. 2015). V případě této studie smrk z Krušných hor i přes nižší věk vykazuje podobnou růstovou reakci na klima jako dospělé porosty z oblasti Beskyd. V obou horských oblastech může ve vztahu klima – přírůst hrát roli vysoké imisní znečištění od 70. do 90. let 20. století, které mohlo modifikovat reakci na klima (RYDVAL, WILSON 2012; KOLÁŘ et al. 2015).

Dominantním klimatickým faktorem ovlivňujícím pozitivně růst smrku v ČR jsou letní srážkové úhrny, a to nejen v nižších a středních polohách, ale v některých oblastech i na horách v nadmořské výšce nad 1000 m n. m. O efektu letních přísušků i v horských polohách svědčí také charakter vztahu přírůstu k letním teplotám, který je zde spíše negativní. Pouze v Krušných horách na nejvyšše položené ploše Kryštofovy hamry (900 m n. m.) byl prokázán významný pozitivní vztah růstu k letním teplotám. Dendroekologické studie dokládají pro horské oblasti významný pozitivní vztah přírůstu smrku k letním teplotám (BÜNTGEN et al. 2007; TREML et al. 2012; SIDOR et al. 2015) pocházejí především ze subalpínského a alpského pásma v blízkosti horní hranice lesa. Zkoumané horské smrkové porosty se nacházejí mimo toto pásmo v nadmořské výšce 800–900 m n. m. Ani nejvyšše položené lokality na Šumavě nedosahují horní hranice lesa (ČEJKOVÁ, KOLÁŘ 2009). To může být důvodem, proč se u zkoumaných horských smrkových porostů neprojevil významný pozitivní efekt letní teploty. Jiným důvodem může být setrvalý vzestup letních teplot v posledních 50 letech, a to i v horských polohách (ZAHRAJNÍČEK et al. 2021) a vyšší frekvence výskytu suchých period (TRNKA et al. 2016). V důsledku těchto změn dochází i v polohách nad 800 m n. m. k posunu v růstové reakci smrku na letní teploty od signifikantně pozitivní k neutrální (KOLÁŘ et al. 2017). Podobně BOŠEA et al. (2014) zjistili v posledních dvou dekadách pokles korelace s letními teplotami u smrku ve vyšších polohách. Zároveň však ukázali, že charakter odezvy stromů může výrazně změnit míra defoliace korun.



**Obr. 5.**

Dendrogram hierarchické shlukové analýzy (Wardova metoda, euklidovské vzdálenosti) pro matici korelačních koeficientů popisujících vztah přírůstků k a) teplotám a b) srážkovým úhrnům na 83 odběrových místech označených zkratkou a kódem odběrového místa (viz tab. 1). Kód odběrového místa se skládá z kódu pro nadmořskou výšku 2: 200-299, 3: 300-399, 4: 400-499 m n. m. atd. (první část kódu odběrového místa) a číselného označení přírodní lesní oblasti 01: Krušné hory, 07: Brdy, atd. (druhá část kódu odběrového místa)

**Fig. 5.**

Dendrogram of hierarchical cluster analysis (Ward's method, Euclidean distances) for a matrix of correlation coefficients describing the relationship of growth to a) temperatures and b) precipitation totals at 83 sample sites marked with abbreviation and site code (see Table 1). Site code consists of altitude code 2: 200-299, 3: 300-399, 4: 400-499 m a. s. l. etc. (the first part of the site code) and the numbering of the natural forest area 01: Krušné hory, 07: Brdy etc. (the second part of the site code)





Letní srážky jsou důležité pro růst smrku v nižších a středních polohách na celém území ČR. Naproti tomu pozitivní efekt zimních srážkových úhrnů je patrný pouze v západních a středních Čechách. Na severní Moravě a ve východních Čechách stimulují růst smrku spíše srážky na konci léta a na podzim předchozího roku. To je zřejmě důsledkem přibývající kontinentality klimatu od západu na východ republiky.

Zatímco letní teploty a srážky přímo ovlivňují fotosyntetickou aktivitu stromů, a tím i přírůst v daném vegetačním období, vliv teplot a srážek v září předchozího roku na přírůst v roce následujícím je nepřímý. Vysoké teploty a nízké srážky v tomto období omezují fotosyntézu, a tím limitují tvorbu a ukládání rezervních látek, což negativně ovlivňuje růstový výkon stromu v následujícím roce (PALLARDY 2008). Podobný efekt má pravděpodobně i studený říjen.

V posledních letech stoupá význam zimních srážek, respektive výšky sněhové pokrývky a zimních teplot. V důsledku klimatické změny dochází k poklesu výšky sněhové pokrývky, v nižších a středních polohách nejsou v posledních letech výjimkou zimy zcela beze sněhu. Při teplotách pod bodem mrazu pak v důsledku chybějící nebo nedostatečné izolace sněhovou pokrývkou častěji zamrzá půda, respektive zvyšuje se četnost cyklů zamrznutí a roztátí půdy (KREYLING et al. 2020). To poškozuje jemné kořeny stromů a zvyšuje mortalitu půdních mikroorganismů, čímž se mění cykly uhlíku a živin (GROFFMAN et al. 2001; YANAI et al. 2011; REINMANN, TEMPLER 2016). Poškozené kořeny a nižší dostupnost živin může vést ke snížení růstu stromů během vegetačního období (CAMPBELL et al. 2014; GENTILESCA et al. 2018; WEIGEL et al. 2018).

Pozitivní vliv březnových teplot ve vyšších polohách (nad 600 m n. m.) lze interpretovat tak, že při vyšších teplotách dochází k rychlejšímu odtávání sněhu a následně k prohrívání půdy, což stimuluje aktivitu kořenového systému, a tedy i příjem vody a živin v jarním období (CLARKE et al. 2015; REPO et al. 2021).

Odlišná růstová reakce porostů chlumního ekotypu smrku ukazuje, jak specifické podmínky stanoviště mohou lokálně měnit vztah přírůstu ke klimatickým faktorům. Vztah k teplotám se u těchto porostů podobá horským, respektive vyšším středním polohám. Tento vzor vztahu přírůstu k teplotám byl zjištěn u populací, které byly vytipovány jako pravděpodobně autochtonní na základě morfologických znaků, jako jsou úzká válcovitá koruna, slabší převislé větve a svazčitý typ větvení (SAMEK 1964). Jednalo se o jednotlivé staré smrky vtoušené do listnatých porostů podél vodotečí. Je zajímavé, že u monokulturních smrkových porostů rostoucích ve stejných stanovištních podmínkách, ale nevykazující znaky chlumního ekotypu, se podobnost s horskými smrkovými porosty neprokázala.

## ZÁVĚR

V rámci studie bylo provedeno vyhodnocení vztahu klima – přírůst pro smrk na území České republiky v období 1968–2013. V polohách do 650 m n. m. se kumuloval negativní vliv vysokých teplot a srážkového deficitu na přírůst smrku, a to bez ohledu na stanoviště napříč celou ČR. Výjimkou byly chladné a vlhké údolní polohy s přirozeně se vyskytujícím chlumním ekotypem smrku. Negativní vliv nedostatku srážek se projevil rovněž ve vyšších středních polohách do 700 m n. m. a na některých horských lokalitách. V západních a středních Čechách navíc významně ovlivňovaly přírůst i srážky v zimních měsících, naproti tomu ve východních Čechách a na Moravě jsou významným faktorem srážky na přelomu léta a podzimu předchozího roku. Příznivé podmínky pro růst smrku byly v analyzovaném období v Krušných horách, kde přírůst zatím nevykazoval sensitivitu k nedostatku srážek a vysokým teplotám v letních měsících.

## Poděkování:

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu QK1820091 a částečně byl financován z poskytnuté institucionální podpory MZE ČR MZE-RO0118. Letokruhová data byla převzata z projektů řešených útvarů Ekologie lesa VÚLHM v letech 2013–2019.

## LITERATURA

- BOŠEL'Á 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. DOI:10.1016/j.foreco.2014.03.055
- BÜNTGEN U., FRANK D.C., KACZKA R.J., VERSTEGE A., ZWIJACZ-KOZICA T., ESPER J. 2007. Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology*, 27: 689–702. DOI: 10.1093/treephys/27.5.689
- CAMPBELL J.L., SOCCI A.M., TEMPLER P.H. 2014. Increased nitrogen leaching following soil freezing is due to decreased root uptake in a northern hardwood forest. *Global Change Biology*, 20: 2663–2673. DOI: 10.1111/gcb.12532
- CIENCIALA E., TUMAJER J., ZATLOUKAL V., BERANOVÁ J., HOLÁ Š., HŮNOVÁ I., RUS R. 2017. Recent spruce decline with biotic pathogen infestation as a result of interacting climate, deposition and soil variables. *European Journal of Forest Research*, 136: 307–317. DOI: 10.1007/s10342-017-1032-9
- CLARKE S.J., LAMONT K.J., PAN H.Y., BARRY L.A., HALL A., ROGIERS S.Y. 2015. Spring root-zone temperature regulates root growth, nutrient uptake and shoot growth dynamics in grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21 (3): 479–489. DOI: 10.1111/ajgw.12160
- COOK E.R., KRUSIC P.J. 2005. ARSTAN v. 41d: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics. *Tree-Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, New York, USA*: 14 s.
- ČEJKOVÁ A., KOLÁŘ T. 2009. Extreme radial growth reaction of Norway spruce along an altitudinal gradient in the Šumava Mountains. *Geochronometria*, 33: 41–47.
- GENTILESCA T., RITA A., BRUNETTI M., GIAMMARCHI F., LEONARDI S., MAGNANI F., BORGHETTI M. 2018. Nitrogen deposition outweighs climatic variability in driving annual growth rate of canopy beech trees: Evidence from long-term growth reconstruction across a geographic gradient. *Global Change Biology*, 24: 2898–2912. DOI: 10.1111/gcb.14142
- GROFFMAN P.M., DRISCOLL C.T., FAHEY T.J., HARDY J.P., FITZHUGH R.D., TIERNEY G.L. 2001. Colder soils in a warmer world: A snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. *Biogeochemistry*, 56: 135–150. DOI: 10.1023/A:1013039830323
- HLÁSNÝ T., MÁTYÁS C., SEIDL R., KULLA L., MORGANIČOVÁ K., TROMBIK J. 2014. Climate change increases the drought risk in Central European forests: what are the options for adaptation? *Central European Forestry Journal*, 60: 5–18.
- HOLMES R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 39: 77–82.

- KAISER H.F. 1992. On Cliff's formula, the Kaiser-Guttman rule, and the number of factors. *Perceptual and Motor Skills*, 74: 595–598. DOI: 10.2466/pms.1992.74.2.595
- KLIMO E., HAGER H., KULHAVÝ J. (eds.) 2000. Spruce monocultures in Central Europe – problems and prospects. Joensuu, Finland, European Forest Institute: 208 s. EFI proceedings No. 33.
- KNIBBE B. 2004. PAST 4 – Personal Analysis System for Tree Ring Research, Version 4. Instruction Manual. Vienna, Austria, SCIEEM/Bernhard Knibbe: 140 s.
- KOLÁŘ T., ČERMÁK P., OULEHLE F., TRNKA M., ŠTĚPÁNEK P., CUDLÍN P., HRUŠKA J., BÜNTGEN U., RYBNÍČEK M. 2015. Pollution control enhanced spruce growth in the “Black Triangle” near the Czech-Polish border. *Science of the Total Environment*, 538: 703–711. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.105
- KOLÁŘ T., ČERMÁK P., TRNKA M., ŽID T., RYBNÍČEK M. 2017. Temporal changes in the climate sensitivity of Norway spruce and European beech along an elevation gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239: 24–33. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.02.028
- KREYLING J., SCHUMANN R., WEIGEL R. 2020. Soils from cold and snowy temperate deciduous forests release more nitrogen and phosphorus after soil freeze-thaw cycles than soils from warmer, snow-poor conditions. *Biogeosciences*, 17: 4103–4117. DOI: 10.5194/bg-2020-134
- KUČERA M., ADOLT R. (eds.) 2019. Národní inventarizace lesů v České republice – výsledky druhého cyklu 2011–2015. Brandýs nad Labem, Ústav pro hospodářskou úpravu lesů: 439 s.
- LUBOJACKÝ J., LORENC F., LIŠKA J., KNÍŽEK M. 2020. Hlavní problémy v ochraně lesa v Česku v roce 2019 a prognóza na rok 2020. In: Lorenc F., Liška J. (eds.): Škodliví činitelé v lesích Česka 2019/2020 – Krize zdravotního stavu borovice lesní. Sborník referátů z celostátního semináře s mezinárodní účastí. 22. 10. 2020. Strnady, VÚLHM: 16–21. Zpravodaj ochrany lesa.
- MZe. 2006. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2005. Praha, Ministerstvo zemědělství: 136 s.
- PALLARDY S.G. 2008. *Physiology of woody plants*. Amsterdam, Elsevier: 454 s.
- PLÍVA K. 1987. Typologický klasifikační systém ÚHÚL. Brandýs nad Labem, ÚHÚL: 52 s.
- PLÍVA K. 2000. Trvale udržitelné obhospodařování lesů podle souborů lesních typů. Brandýs nad Labem, ÚHÚL.
- PRIMICIA I., CAMARERO J.J., JANDA P., ČADA V., MORRISSEY R.C., TROTSIUK V., BAČE R., TEODOSIU M., SVOBODA M. 2015. Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate. *Forest Ecology and Management*, 354: 77–86. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.06.034
- REINMANN A.B., TEMPLER P.H. 2016. Reduced winter snowpack and greater soil frost reduce live root biomass and stimulate radial growth and stem respiration of red maple (*Acer rubrum*) trees in a mixed-hardwood forest. *Ecosystems*, 19: 129–141. DOI: 10.1007/s10021-015-9923-4
- REPO T., DOMISCH T., KILPELÄINEN J., MÄKINEN H. 2021. Soil frost affects stem diameter growth of Norway spruce with delay. *Trees*, 35 (3): 761–767. DOI: 10.1007/s00468-020-02074-8
- RYDVAL M., WILSON R. 2012. The impact of industrial SO<sub>2</sub> pollution on North Bohemia conifers. *Water, Air & Soil Pollution*, 223: 5727–5744. DOI: 10.1007/s11270-012-1310-6
- SAMEK V. 1964. Metodika výzkumu morfoloické proměnlivosti smrku z hlediska fyto geografického. *Zprávy lesnického výzkumu*, 10 (2–3): 18–25.
- SIDOR C.G., POPA I., VLAD R., CHERUBINI P. 2015. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania). *Trees*, 29: 985–997. DOI: 10.1007/s00468-015-1178-3
- ŠRÁMEK V., VEJPUSTKOVÁ M., NOVOTNÝ R., HELLEBRANDOVÁ K. 2008. Yellowing of Norway spruce stands in the Silesian Beskids – damage extent and dynamics. *Journal of Forest Science*, 54: 55–63.
- TIBCO Software Inc. 2018. TIBCO Statistica (data analysis software system), verze 13.5 <https://docs.tibco.com/products/tibco-statistica-13-5-0>
- TREML V., PONOCNÁ T., BÜNTGEN U. 2012. Growth trends and temperature responses of treeline Norway spruce in the Czech-Polish Sudetes Mountains. *Climate Research*, 55: 91–103. DOI: 10.3354/cr01122
- TRNKA M., BALEK J., ZAHRADNÍČEK P., EITZINGER J., FORMAYER H., TURŇA M., NEJEDLÍK P., SEMERÁDOVÁ D., HLAVINKA R., BRÁZDIL R. 2016. Drought trends over part of Central Europe between 1961 and 2014. *Climate Research*, 70: 143–160. DOI: 10.3354/cr01420
- ÚHÚL. 2002. Oblastní plány rozvoje lesů: přírodní lesní oblasti České republiky. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 104 s.
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T., SAMUSEVICH A., ZEIDLER A., NOVOTNÝ R., ŠRÁMEK V. 2017. Interactive effect of extreme climatic event and pollution load on growth and wood anatomy of spruce. *Trees*, 31(2): 575–586. DOI: 10.1007/s00468-016-1491-5
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T., ŠRÁMEK V. 2018. Tloušťkový přírůstek smrku (*Picea abies* (L.) Karst.) a buku (*Fagus sylvatica* L.) ve stejnorodých a smíšených porostech. *Zprávy lesnického výzkumu*, 63 (4): 237–245.
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T. 2019. Climate response of Douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in Central Europe. *Forests*. 2019; 10 (2):97. DOI: 10.3390/f10020097
- VIEWEGH J., KUSBACH A., MIKESKA M. 2003. Czech forest ecosystem classification. *Journal of Forest Science*, 49 (2): 85–93.
- WARREN W.G. 1980. On removing the growth trend from dendrochronological data. *Tree-Ring Bulletin*, 40: 35–44.
- WEIGEL R., MUFFLER L., KLISZ M., KREYLING J., VAN DER MAATEN-THEUNISSEN M., WILMKING M., VAN DER MAATEN E. 2018. Winter matters: Sensitivity to winter climate and cold events increases towards the cold distribution margin of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Biogeography*, 45: 2779–2790. DOI: 10.1111/jbi.13444
- YANAI Y., TOYOTA K., OKAZAKI M. 2011. Effects of successive soil freeze-thaw cycles on soil microbial biomass and organic matter decomposition potential of soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50: 821–829. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408542
- ZAHRADNÍČEK P., BRÁZDIL R., ŠTĚPÁNEK P., TRNKA M. 2021. Reflections of global warming in trends of temperature characteristics in the Czech Republic, 1961–2019. *International Journal of Climatology*, 41 (2): 1211–1229. DOI: 10.1002/joc.6791
- ZAHRADNÍK P. 2019. Kůrovcové kalamity v ČR – historie, současnost, možnosti řešení. In: Knížek, M. (ed.): Škodliví činitelé v lesích Česka 2018/2019 – Historie a současnost kůrovcových kalamit ve střední Evropě. Sborník referátů z celostátního semináře. Průhonice 16. 4. 2019. Strnady, VÚLHM: 60–64. Zpravodaj ochrany lesa.

**CLIMATIC FACTORS LIMITING SPRUCE GROWTH IN THE CZECH REPUBLIC IN THE PERIOD 1968-2013****SUMMARY**

The recent extensive decline of spruce stands in the Czech Republic began after an extreme drought in 2003 in the area of Northern Moravia (CIENCIALA et al. 2017). Following another extreme drought in 2015, it spreads to most of the Czech Republic (ZAHRADNÍK 2019). The activation of harmful biotic agents (fungal pathogens and bark and wood boring insect) plays a decisive role in the growing mortality of the stands (LUBOJACKÝ et al. 2020). The primary cause of spruce decline is repeated periods of drought (HLÁSNÝ et al. 2014).

The main objective of the study was to evaluate long-term growth response of spruce to climatic factors in the period of 1968–2013 using a set of 3,062 tree-ring series collected from 61 localities covering the entire territory of the Czech Republic (Fig. 1) and representing a wide range of site conditions (Table 1). Multivariate analysis of dendrochronological data and available climatic parameters allowed the identification of climatic factors limiting spruce growth in different site conditions in an examined period.

The spruce growth in the Czech Republic was significantly affected by temperatures in September and October of the previous year, as well as by temperatures in March and in the summer months of the current year (Fig. 3a). While the negative effect of summer temperatures was manifested at 14 sample plots at the lower and middle altitude up to 650 m a. s. l. (Fig. 4a), the negative effect of temperatures in September of the previous year was found on 40 plots located in the same altitude band (Fig. 4b). In contrast, the affirmative influence of March temperatures was typical for plots above 600 m a. s. l. (Fig. 4c). The positive effect of October temperatures was significant on 26 sample sites across the altitudinal gradient. In the case of precipitation, the influence of summer precipitation totals completely dominated (Fig. 3b). The lack of summer precipitation significantly limited the growth of spruce not only in the lower and middle altitude, but also in some mountain areas (Fig. 4d).

Cluster analysis distinguished three basic clusters of plots, for which it identified a similar pattern of the temperature – growth relationship (Fig. 5a). The first cluster combines the plots located in the altitude belt of 200–500 m a. s. l., regardless of the affiliation to the natural forest area and regardless of the site quality. In the second cluster, plots in the mountains are grouped. In addition, there are also two low-altitude plots representing the so-called lowland ecotype of spruce growing in wetter and colder valley locations. The different growth response of lowland spruce shows how specific ecotype and site conditions can locally change the climate-growth relationship. In these stands the relationship to temperatures was similar to mountain spruce stands. The third cluster mainly includes plots from middle and higher altitude (400–700 m a. s. l.). A completely different picture is provided by a dendrogram of cluster analysis based on a matrix of correlation coefficients between growth and precipitation totals (Fig. 5b). In the first and associated second cluster, the plots from the western, southern and central Bohemia were clearly separated from the plots from eastern Bohemia and Moravia, which form the third cluster. The pattern of the precipitation-growth relationship is regional in nature.

The spatial pattern of the climate-growth relationship is illustrated by the PCA biplots (Fig. 6). The vectors show correlations with climatic variables, points represent 83 sample sites indicated by codes (see Table 1). Based on the growth-temperature relationship, sample sites were divided into three groups (Fig. 6a). The group in the 1st quadrant in the direction of the first component (PC1) is formed by sites from lower elevation (200–600 m a. s. l.) from different natural forest areas. Here, the growth is characterized by a negative relationship to the summer temperatures of the given year and to the temperatures in September of the previous year. In the opposite 3rd quadrant in the direction of the second main component (PC2) lie sample sites from higher elevation (500–800 m a. s. l.), where the growth of spruce shows a positive relationship to winter temperatures (January – March). In the 2nd and 3rd quadrants in the positive direction of PC1, sample sites mainly from elevation above 700 m a. s. l. are concentrated, where the relationship between growth and summer temperatures is positive, but the correlation coefficients do not reach significant values.

According to the nature of the growth-precipitation relationship, the PCA divided the sample sites into three groups (Fig. 6b). The first cluster consists of sample sites in lower elevation in the western and central part of the Czech Republic, which grouped in the 1st and 2nd quadrants in the positive direction of the second component (PC2). In these sites the spruce growth is related mainly to precipitation in the summer months and further in the winter months of January – March of the given year. In both cases, the correlation is positive. The second cluster of sites from Moravia and Eastern Bohemia lies in the 3rd quadrant in the positive direction of the first component (PC1). The significant growth response to summer precipitation in a given year and to precipitation at the end of summer and autumn of the previous year is common for these sites. The third cluster of sample sites, which is clearly separated from the previous two clusters, is located in the 4th quadrant and consists of sample sites from national forest area Krušné hory (Ore Mountains), for which the positive relationship of growth to precipitation in October of the previous year is dominant. The spruce growth in the Krušné hory sites also differs by the negative relationship to summer precipitations.

*Zasláno/Received: 13. 08. 2021*

*Přijato do tisku/Accepted: 22. 11. 2021*