

Acta Facultatis Ecologiae

Journal of Faculty of Ecology and Environmental Sciences
Technical University in Zvolen

Volume 48
2025

Editorial Board

Editor-in-Chief
Marián Schwarz

Vice-Editor-in-Chief
Dagmar Samešová

Executive Editor
Andrea Diviaková – Ecological Section
Andrea Zacharová – Environmental Section

Technical Editors
Anna Ďuricová, Miroslav Vanek

Members

Magdaléna Bálintová, Barbara Bialecka, Ján Gáper, František Hnilička, László Miklós,
Volodymyr Nykyforov, Branislav Olah, Peter Ondrišík,
Andrej Oriňák, František Petrovič, Magdaléna Pichlerová, Artur Radecki-Pawlik, Tamás Rétfalvi,
Dagmar Samešová, Branko Slobodník, Slavomír Stašiov,
Jaroslava Vrábliková, Michal Wieszik

List of Reviewers Acta Facultatis Ecologiae 48

Lenka Hájková, Martina Mordáčová, Paulína Nalevanková, Jana Škvareninová

Vydala (Published by): Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 2117/24, 960 01 Zvolen
Rozsah (Pages) 81 strán
Tlač (Printed by): Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene
Vydanie I. – november 2025
Periodikum s periodicitou dvakrát ročne
EV 6304/25/PT

© Technická univerzita vo Zvolene

ISSN 1336-300X

Všetky práva vyhradené. Žiadna časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľa.

OBSAH

PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÁCE / ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

MREKAJ, I., SNOPOKOVÁ, Z. & ŠKVARENINOVÁ, J.

Trendy otepľovania a fenologická reakcia buka lesného (*Fagus sylvatica* L.) v lesných ekosystémoch chránených území

Warming trends and phenological response of European beech (*Fagus sylvatica* L.)

in forest ecosystems of protected areas 7

OLLEROVÁ, H., ZACHAROVÁ, A. & KOVÁČOVÁ, S.

Distribúcia ortuti v častiach rastlinnej nadzemnej biomasy buka lesného (*Fagus sylvatica* L.)

Distribution of mercury in the parts of the above-ground plant biomass of beech (*Fagus sylvatica* L.) ... 16

LUKASOVÁ, V., VARŠOVÁ, S., KREMPASKÝ, J., ŠKVARENINA, J., BILČÍK, D. & NEJEDLÍK, P.

Narušenie generatívnych fenologických fáz u borovice limbovej (*Pinus cembra*)

vplyvom neskorých mrazov

Disruption of generative phenological phases in Swiss stone pine (*Pinus cembra*) due to late frosts 22

BABNIČOVÁ, V., MALOVCOVÁ, L., OSTRIHOŇ, M., JANČO, M., NALEVANKOVÁ, P., VIDO, J., ZVERKO, J.,

LEŠTIANSKA, A., BALKOVÁ, L., VYSKOT, I. & ŠKVARENINA, J.

Posúdenie požiarneho nebezpečenstva v smrekových lesoch TANAPu v dôsledku zmien

mikroklimatických podmienok po kalamitách

Assessment of fire risk in Tatra National Park spruce forests due to changes in microclimatic

conditions following natural disasters. 29

SAWADOGO, A., NEJEDLIK, P. & TALL, A.

Assessing the accuracy of interpolation methods in Earth observation-based actual

evapotranspiration estimation 39

VARŠOVÁ, S., LUKASOVÁ, V. & ONDERKA, M.

Klimatická hranica rozšírenia stromovej vegetácie v alpínskom ekotóne Skalnatej doliny vo Vysokých Tatrách

Climatic limits of tree growth in the alpine treeline ecotone of Skalnatá dolina, High Tatra Mts 45

KORENÁ HILLAYOVÁ M., KORENÝ Ľ., VIDO J. & ŠKVARENINA J.

Vývoj a validácia bioklimatologického modelu na predikciu vnútornej klímy včelieho úľa

Development and validation of a bioclimatological model for predicting the internal climate of a beehive 54

ŠKVARENINOVÁ, J. & MREKAJ, I.

Vplyv zmeny klímy na kvitnutie brezy previsnutej (*Betula pendula* L.) na území Slovenska

The impact of climate change on the flowering of silver birch (*Betula pendula* L.) in Slovakia..... 59

LEŠTIANSKA, A., STŘELCOVÁ K., FLEISCHER JR., P. & FLEISCHER SR., P.

Dynamika zmien obvodu kmeňov smrekovca opadávého v závislosti od veku a klimatických faktorov

Dynamics of Stem Circumference Changes in European Larch Depending on Tree Age and Climatic Factors ... 65

OLLEROVÁ, H., ZACHAROVÁ, A., ŠKVARENINA, J., VANEK, M. & ŠKVARENINOVÁ, J.

Brusnica čučoriedková (*Vaccinium myrtillus* L.) ako indikátor zaťaženia horských oblastí Slovenska ortuťou

Blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.) as bioindicator of mercury pollution in Slovak mountainous regions 75

Pôvodné vedecké práce
Original scientific articles

TRENDY OTEPLEOVANIA A FENOLOGICKÁ REAKCIA BUKA LESNÉHO (*FAGUS SYLVATICA* L.) V LESNÝCH EKOSYSTÉMOCH CHRÁNENÝCH ÚZEMÍ

Ivan MREKAJ¹ - Zora SNOPKOVÁ² - Jana ŠKVARENINOVÁ¹

¹Katedra aplikovanej ekológie, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, email: xmrekaj@is.tuzvo.sk, email: skvareninová@tuzvo.sk

²Slovenský hydrometeorologický ústav, Zelená 5, 975 90 Banská Bystrica, email: Zora.Snopkova@shmu.sk

ABSTRACT

Mrekaj, I., Snopková, Z., Škvareninová, J.: Warming trends and phenological response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in forest ecosystems of protected areas

Climate change has a significant impact on the phenological responses of forest tree species. Phenological phases are a suitable bioindicator to detect long-term changes in these processes. We evaluated the effect of air temperature change and precipitation on the phenological phases of first leaves (BBCH 11), general leaf yellowing (BBCH 94) of forest beech. We used trend analyses and phenological height gradients to express statistical significance.

Results in two 30-year periods, 1961-1990 and 1991-2020, showed that the spring phase responds to changes in meteorological elements (air temperature, precipitation) with an earlier onset in the latter period by 5 days with trend 9 days and a shortening by 12 days. The onset of the autumn phenophase is the same in both periods, a statistically significant trend occurred 8 days later in the second period. In the rugged territory of Slovakia, the phenological height gradient is decreasing, which reflects the sensitivity of beech to changes in environmental conditions. The phenological study also shows significant meteorological and phenological changes in some months as a consequence of global warming. The results can be used to monitor beech adaptation and resilience to altered climatic conditions, to predict range changes and also to model phenological responses in the future.

Key words: climate change, European beech (*Fagus sylvatica* L.), meteorological trends, phenological trends, phenological altitude gradients

ÚVOD

Od konca 80. rokov 20. storočia vplyvom globálnej zmeny klímy dochádza k častým poveternostným extrémnym javom počasia, čím sa zvyšujú aj regionálne extrémy (HEIM 2015). V 21. storočí rýchlo rastie ich intenzita a dynamika. Posúdenie ich výskytu a zmien je založené na dostupnosti dlhých časových radov dát (RUMMUKAINEN 2012). Fenológia je jednou z vedných disciplín, ktorá využíva takéto dáta na zachytenie prirodzene sa opakujúcich životných prejavov rastlín v meniacich sa podmienkach prostredia (INOUE 2022), ako aj predpokladané zmeny posunu areálov druhov do nových oblastí (LANGVALL–LÖFVENIUS 2021).

Dlhodobé fenologické záznamy na úrovni druhu umožňujú poznať jeho biologické reakcie na klimatickú zmenu v oblastiach mierneho pásma s meniacimi sa ročnými obdobiami. Sú predpokladom pre zisťovanie trendov vývoja fenologických fáz a hľadanie ich vzťahu ku klimatickej zmene (ŠKVARENINOVÁ–MREKAJ 2022). Majú potenciál ukázať negatívne účinky klimatických zmien, môžu prispieť k objasneniu zmien ich pôvodných areálov aj k prognóze ďalšieho rozšírenia a vitality pôvodných druhov (CAPPELL–BOERSMA 2021). Globálne a lokálne zmeny klímy môžu spôsobiť zmenu v drevinovom zložení a raste pôvodných lesných ekosystémov. Takéto zmeny boli za posledné storočie zaznamenané napríklad aj na buku lesnom v západoeurópskom miernom pásme, ktorý sa nachádza blízko svojho klimatického optima (AERTSEN et al. 2014).

Zvyšujúca sa teplota vzduchu ovplyvňuje skorý nástup jarných fáz za predpokladu dostatočnej pôdnej vlhkosti po zimnom období (RICHARDSON et al., 2018). Nástup jesenných fenofáz je v porovnaní s jarnými viac ovplyvnený teplotou a výskytom sucha (BIGLER–VITASSE 2021). Každoročné fenologické zmeny predstavujú stratégiu prispôbenia druhov na výkyvy počasia a zvládnutie širokého spektra podmienok prostredia v dlhom časovom období (CAPDEVIELLE et al. 2015). Prebiehajúca zmena klímy vytvára priaznivé podmienky pre neskorší nástup

žltnutia listov a predlžovanie vegetačného obdobia (KOLÁŘOVÁ et al. 20214), pričom dôležitú úlohu zohráva poloha lokality a nadmorská výška (LUKASOVÁ et al. 2020, MEIER et al. 2021).

Pri hodnotení vplyvov klimatickej zmeny sa dreviny často považujú za homogénne skupiny s podobnými reakciami na zmeny prostredia. To, ako sú dreviny ovplyvnené zmenami teploty a zrážok, ich vnútorná adaptačná schopnosť v konečnom dôsledku určí potenciál pre trvalú ekologickú stabilitu (FITCHETT et al. 2015). Keďže vplyvom geografických podmienok sú populácie stromov prispôbené miestnym podmienkam, bude sa v rámci druhu líšiť aj reakcia na zmenu klímy (HENTTONEN et al. 2014). Tieto rozdiely možno využiť v stratégiách adaptácie na zmeny podmienok prostredia, ale aj na identifikáciu pôvodov vhodných pre nové klimatické podmienky.

Cieľom práce je analýza zmien fenologických prejavov buka lesného v podmienkach meniacej sa klímy vplyvom vybraných meteorologických prvkov v dvoch 30 ročných časových obdobiach medzi rokmi 1961 až 2020. Hľadáme odpovede na otázky súvisiace so zmenou klímy:

- 1) aká je dlhodobá fenologická reakcia buka lesného na zmenu meteorologických prvkov
- 2) ako sa mení fenologický výškový gradient.

MATERIÁL A METÓDY

Hodnotené lokality sa nachádzajú v 16 veľkoplošných chránených územiach Slovenska (Tab. 1). V prvom období prebiehali pozorovania na 34 lokalitách, v druhom období sa pozorovania rozšírili o 42 lokalít, kde sa daný druh vyskytoval prirodzene. Z tohto počtu 76 lokalít evidovaných v druhom období sa v chránených územiach nachádza len 43 lokalít. Celé územie patrí do prechodného atlanticko-kontinentálneho stredo európskeho podnebného pásma. Vzhľadom k tomu, že časť tohto územia zaberá karpatský masív, klíma je ovplyvňovaná aj orografickými podmienkami (výšková členitosť a reliéf územia). Podľa tvaru reliéfu sa tu vytvára viac typov mikroklimy (nížinná, kotlinová, horská) (TARÁBEK 1982). Výšková členitosť územia na ktorom sme analyzovali fenologické prejavy buka lesného zahŕňa interval 133-1265 m.n.m. Tento autochtónny druh sme si vybrali pre jeho vysoké prirodzené rozšírenie a zastúpenie na území Slovenska.

Fenologické aj meteorologické údaje poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMU). Spracované sú dva 30 ročné časové obdobia rokov 1961-1990 a 1991-2020 ako ekvivalent ku klimatickým normám stanoveným Svetovou meteorologickou organizáciou (WMO) (World Meteorological Organization, 2017). Fenologické fázy boli pozorované pomocou metodiky Braslavská–Kamenský (1996), ktorá zodpovedá číselným kódom medzinárodnej stupnice BBCH (MEIER 1997). Táto stupnica sa používa v sieti fenologických staníc Európy. Každá fenologická fáza bola pozorovaná na skupine 10 jedincov v dospelom veku (viac ako 50 rokov) na každej lokalite. Získané dátumy nástupu sme nahradili poradovým číslom dňa v roku (DOY) z dôvodu ďalšieho spracovania dát.

Tab. 1 Počet lokalít vo veľkoplošných chránených územiach Slovenska

Tab. 1 Number of sites in large protected areas in Slovakia

Chránené územie	Počet lokalít
CHKO Malé Karpaty	5
CHKO Biele Karpaty	3
CHKO Ponitrie	2
CHKO Strážovské vrchy	3
CHKO Kysuce	1
CHKO Horná Orava	3
CHKO Cerová vrchovina	1
CHKO Štiavnické vrchy	3
CHKO Poľana	3
NAPANT	8
NP Muránska planina	2
NP Slovenský raj	2
TANAP	2
CHKO Vihorlat	1
CHKO Východné Karpaty	2
NP Poloniny	2

Do analýzy boli zahrnuté len lokality, ktorých rad pozorovaní prevyšoval 70% úplných pozorovaní pre všetky vybrané fenologické fázy. Dôvodom takéhoto zníženia boli chýbajúce dáta pri zmene metodiky a prechode na medzinárodnú stupnicu. Ak na lokalite bolo aspoň 70% pozorovaní pokladáme výpočet priemeru nástupu fenologických fáz za reprezentatívny pre dané časové obdobie a nazývame ho fenologický normál.

Fenologické fázy sú definované nasledovne:

- prvé listy (BBCH 11) - listy sú svetlozelenej farby, nemajú normálnu veľkosť a vyskytujú sa aspoň na polovici jedincov pozorovanej skupiny,
- všeobecné žltnutie listov (BBCH 94) - prirodzene zmenené farby listov, ktoré sa objavili na viac ako polovici jedincov pozorovanej skupiny.

Meteorologické stanice boli vybrané k najbližšej fenologickej stanici. Porovnávané boli jedno, dvoj a troj mesačné priemery teplôt vzduchu, sumy atmosférických zrážok pred nástupom fenologickej fázy. Vzťah medzi fenologickými fázami a meteorologickými prvkami sme hľadali pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu. Hranicu pre hladinu štatistickej významnosti p sme stanovili na 0,05. Na vyjadrenie zmien podmienok prostredia vo vertikálnom profile sme použili fenologický výškový gradient, ktorý predstavuje rozdiel v nástupe fenologickej fázy medzi lokalitami s najvyššou a najnižšou nadmorskou výškou v prepočte na 100 výškových metrov.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Teplota vzduchu a atmosférické zrážky

Priemerná ročná teplota vzduchu (Tab. 2) na vybraných meteorologických staniciach dosiahla v prvom období hodnotu 7,7 °C. bez štatistickej významnosti. V druhom období vzrástla o 1,1 °C a potvrdil sa ročný štatisticky významný trend, ktorý odráža významné trendy rastu teploty vzduchu v apríli, júni a septembri.

Tab. 2 Priemerná teplota vzduchu a trendy vývoja v 2 obdobiach (*štatisticky významné)

Tab. 2 Average air temperature and trends in 2 periods (*statistically significant)

Mesiac	1961-1990		1991-2020		Rozdiel medzi obdobiami (°C)
	Priemerná teplota (°C)	Lineárny trend (°C)	Priemerná teplota (°C)	Lineárny trend (°C)	
Január	-3.6	2.0	-2.1	0.1	1.5
Február	-1.4	0.7	-0.5	2.4	0.9
Marec	2.7	1.6	3.5	1.9	0.8
Apríl	8.1	-1.0	9.3	2.6*	1.2
Máj	13.1	1.1	14.0	0.3	0.9
Jún	16.0	-1.1	17.6	2.4*	1.6
Júl	17.5	0.5	19.2	1.3	1.7
August	16.9	0.3	18.8	1.6	1.9
September	13.2	-0.3	13.7	1.9*	0.5
Rok	7.7	0.3	8.8	1.8*	1.1

Medzi obdobiami nastalo najväčšie zvýšenie teploty v letných mesiacoch (júl-september) a v zimnom mesiaci (január). Všetky trendy rastu teplôt vzduchu v prvom období (okrem poklesu aprílovej teploty) neboli štatisticky významné. V druhom období sa štatisticky významný trend potvrdil vo viacerých mesiacoch s najvyšším nárastom teploty v apríli.

Priemerný ročný úhrn zrážok (Tab. 3) v prvom období dosahoval 706,4 mm, v druhom období nevýznamne vzrástol o 32,3 mm. Najväčší nárast zrážok medzi obdobiami bol pozorovaný v mesiaci júl, najväčší pokles nastal v júni. Trendové analýzy ročných zrážkových úhrnov v druhom období potvrdili nárast zrážok o 68 mm, ale štatistická významnosť sa nepreukázala. Štatisticky významný trend poklesu zrážok sa potvrdil iba v mesiaci apríl v druhom období. Ostatné mesačné trendy zmeny zrážok neboli štatisticky významné.

Tab. 3 Zrážkové úhrny a trendy v jednotlivých obdobiach (*štatisticky významné)
Tab. 3 Precipitation totals and trends in individual periods (*statistically significant)

Mesiac	1961-1990		1991-2020		Rozdiel medzi obdobiami (mm)
	Zrážkové úhrny (mm)	Lineárny trend (mm)	Zrážkové úhrny (mm)	Lineárny trend (mm)	
Január	41.5	10.6	42.6	21.4	1.1
Február	39.4	-8.2	41.9	18.3	2.5
Marec	38.9	3.0	42.9	0.4	4.0
Apríl	51.1	8.4	48.0	-29.5*	-3.1
Máj	75.9	16.8	78.6	26.3	2.6
Jún	90.7	-7.0	85.1	-0.4	-5.6
Júl	78.1	-22.2	97.7	8.0	19.5
August	75.3	-3.5	74.1	9.3	-1.2
September	55.0	18.5	65.2	6.4	10.2
Rok	706.4	-24.1	738.7	67.5	32.3

Prvé listy (BBCH 11)

Fenofáza nastupovala v prvom období priemerne 29. apríla a trvala 30 dní. V druhom období priemerný nástup fázy nastal o 5 dní skôr a trvanie fázy sa skrátilo o 12 dní (Tab. 4). Tento posun bol aj štatisticky významný. Podrobný vývoj fenofázy v jednotlivých rokoch dvoch období znázorňuje obrázok 1. V prvom období sa trend fázy oneskoroval o 10 dní, v druhom období nastal posun do skoršieho obdobia o 9 dní. Štatisticky významný trend potvrdil otepľovanie v druhom období o 1,8 °C (Tab. 1), čo sa prejavilo aj významným trendom skoršieho nástupu začiatku zalistenia o 9,3 dňa (Obr. 1).

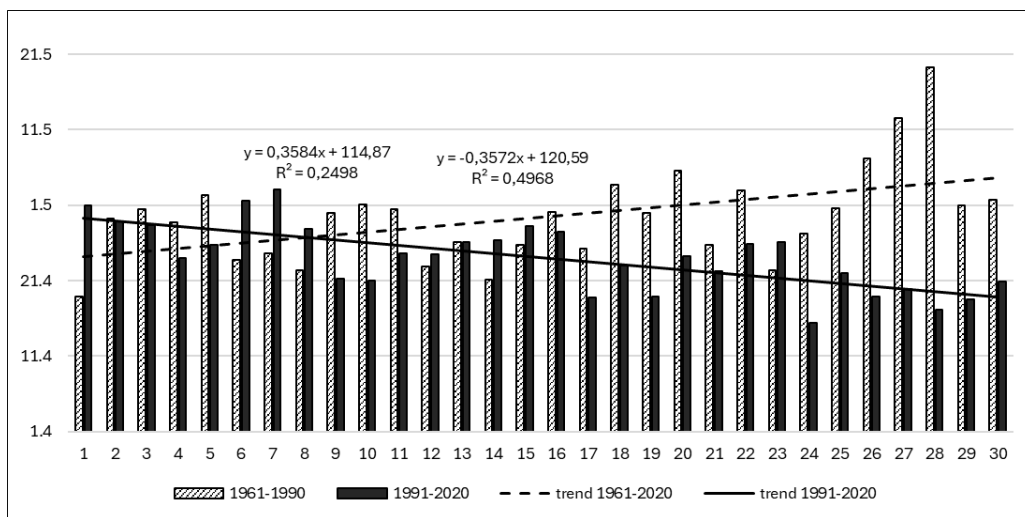
Reakciu buka na zmenu klímy sme zisťovali aj pomocou fenologických výškových gradientov fenofázy (Tab. 4). Kým v prvom období sme zaznamenali posun fázy o 4,2 dňa/100 m výšky, v druhom období sa gradient výrazne skrátil o 2 dni/100 m. Táto hodnota ukazuje citlivú reakciu buka na zmeny podmienok prostredia aj vo vertikálnom profile ako dôsledok otepľovania.

Tab. 4 Prehľad vývoja fenologickej fázy BBCH 11 v 2 obdobiach (*štatisticky významné)
Tab. 4 Overview of the development of the phenological phase of BBCH 11 in 2 periods (*statistically significant)

Priemerný dátum nástupu	1961-1990			1991-2020		
	Výškový gradient	Trend	Dĺžka fázy	Priemerný dátum nástupu	Výškový gradient	Trend
29/04	4.2	10.4	30	24/04	2.0	-9.3*

Ak porovnáme celé 60 ročné obdobie, tak fenologický trend začiatku zalistenia buka závisí od vývoja obidvoch meteorologických prvkov. Vzťah medzi nástupom fenologickej fázy a meteorologickými prvkami uvádzajú korelačné koeficienty v tabuľke 5. Záporná korelácia znamená, že čím je teplota vzduchu vyššia tým skorej

fenologická fáza nastane. V obidvoch obdobiach bol štatisticky významný vzťah medzi nástupom fenologickej fázy a marcovou teplotou vzduchu. Najvýznamnejšiu koreláciu sme zaznamenali s dvoj mesačným priemerom teploty vzduchu pred jej nástupom. Veľmi silná korelácia začiatku zalistenia s dvojmesačnou teplotou vzduchu v druhom období potvrdila výraznú zmenu klímy. Vzťah medzi nástupom fenologickej fázy a úhrnom zrážok bol slabý a štatisticky málo významný v obidvoch obdobiach. To dokazuje dostatok zrážok a pôdnej vlhkosti po zimnom období. Z uvedených údajov môžeme konštatovať, že teplota vzduchu je hlavným faktorom tvorby prvých listov buka.



Obr. 1 Priebeh a trend fenologickej fázy BBCH 11 v 2 obdobiach

Fig. 1 The course and trend of the phenological phase BBCH 11 in 2 periods

Tab. 5 Korelačné koeficienty a štatistická významnosť pre teplotu vzduchu, zrážky a fázu BBCH 11 (bold - štatisticky významné, * najsilnejšia korelácia)

Tab. 5 Correlation coefficients and statistical significance for air temperature, precipitation and BBCH phase 11 (bold - statistically significant, * strongest correlation)

Obdobie	Február	Marec	Apríl	Ø Feb.-Apr.	Ø Mar.-Apr.
teplota					
1961-1990	-0.251	-0.502	-0.315	-0.496	-0.588*
1991-2020	-0.498	-0.569	-0.686	-0.825	-0.903*
zrážky					
1961-1990	-0.023	-0.229	-0.013	0.084	0.133
1991-2020	-0.204	-0.259	0.239	-0.129	-0.006

Všeobecné žltnutie listov (BBCH 94)

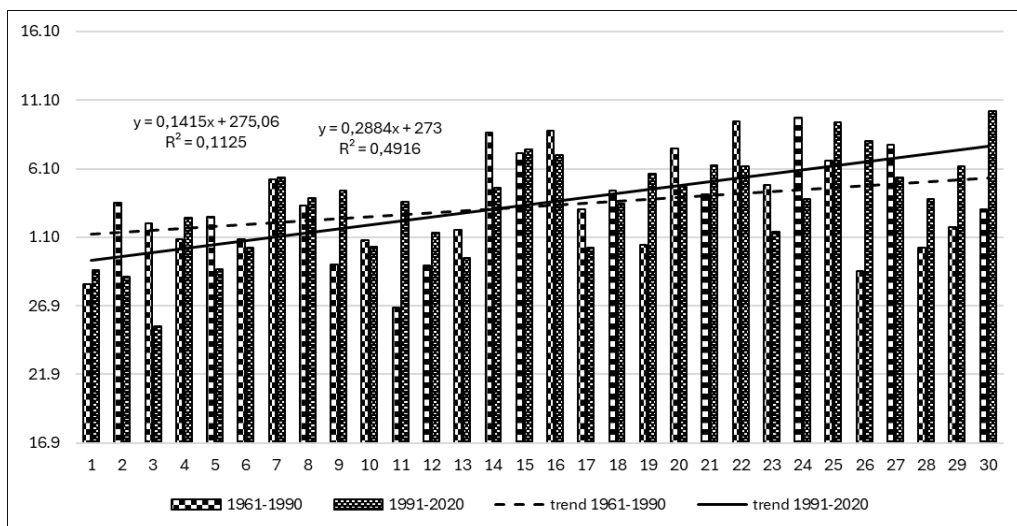
Priemerný nástup všeobecného žltnutia listov bol v obidvoch obdobiach 3. októbra a fáza trvala takmer rovnako 14-16 dní (Tab. 6). Trendové analýzy (Obr. 2) ukázali v obidvoch obdobiach oneskorenie fázy. V prvom období bol posun fázy o 4 dni, v druhom období o 8 dní aj so štatistickou významnosťou. Fenologický výškový gradient ostal

v obidvoch obdobiach rovnaký a predstavoval posun fázy takmer o 4 dni/100 m výšky. Z uvedených výsledkov môžeme konštatovať, že zmena klímy počas 60 rokov výrazne neovplyvnila nástup a dĺžku trvania fázy. Vzhľadom na výskyt vyšších priemerných teplôt vzduchu a ich vyrovnanejší priebeh v druhom období sa trend fázy posunul o 4 dni neskôr a stal sa štatisticky významným.

Tab. 6 Prehľad vývoja fenologickej fázy BBCH 94 v 2 obdobiach (*štatisticky významné)

Tab. 6 Overview of the development of the phenological phase of BBCH 94 in 2 periods (*statistically significant)

1961-1990				1991-2020			
priemerný dátum nástupu	výškový gradient	trend	dĺžka fázy	priemerný dátum nástupu	výškový gradient	trend	dĺžka fázy
03/10	3.9	4.1	14	03/10	3.7	8.4*	16



Obr. 2 Priebeh a trend fenologickej fázy BBCH 94 v 2 obdobiach

Fig. 2 The course and trend of the phenological phase BBCH 94 in 2 periods

Vplyv teploty vzduchu a zrážok na nástup žltnutia listov uvádzajú korelačné koeficienty v tabuľke 7. V prvom období nízke hodnoty koeficientov ukázali slabý vplyv teploty na nástup fázy. V druhom období vplyv teploty vzduchu zosilnel. Najsilnejší a štatisticky významný vzťah sa potvrdil s rastúcou septembrovou teplotou vzduchu, ktorú uvádza tabuľka 2.

Najsilnejší a štatisticky významný vzťah medzi nástupom fenologickej fázy a septembrovým úhrnom zrážok sa preukázal v prvom období. Kladná korelácia potvrdzuje vzťah menšieho množstva zrážok na skorší nástup fenologickej fázy. V druhom období vplyv zrážok zoslabol a nebol štatisticky významný. Zmena vzťahu medzi úhrnom zrážok a žltnutím listov môže súvisieť aj s nerovnomerným rozložením zrážok počas obdobia pred nástupom fázy, ako aj s výskytom čoraz častejších vln extrémnych teplôt. Tieto meteorologické prvky môžu rôzne ovplyvniť stanovištné podmienky lokalít a tým aj priebeh fázy vzhľadom na rozdielne typy mikroklimy na orograficky členitom území Slovenska.

Tab. 7 Korelačné koeficienty a štatistická významnosť pre teplotu vzduchu, zrážky a fázu BBCH 94 (bold - štatisticky významné, * najsilnejšia korelácia)

Tab. 7 Correlation coefficients and statistical significance for air temperature, precipitation and BBCH 94 phase (bold - statistically significant, * strongest correlation)

Obdobie	August	September	Ø Aug-Sept.
teplota			
1961-1990	-0.103	0.306	0.173
1991-2020	0.078	0.573*	0.469
zrážky			
1961-1990	-0.177	0.538*	0.301
1991-2020	0.155	-0.110	0.036

Ukazovateľom prebiehajúcej zmeny klímy na hodnotenom území sú trendy vývoja teploty vzduchu. Naše výsledky ukázali oteplenie v jarných mesiacoch (Február-Apríl) v oboch obdobiach, pričom v druhom období sa trendy výrazne zvýšili. Najväčšie a štatisticky významné zvýšenie teploty o 2,6 °C nastalo v apríli. Trendy zvyšovania teploty vzduchu o 1°C boli v týchto mesiacoch pozorované v celej Európe už koncom minulého storočia (1969-1998) (CHMIELEWSKI-RÖTZER 2001). Stúpajúci teplotný trend bol prezentovaný aj na sympóziu WMO (Heim, 2015).

Fenológia listov je v prirodzených lesných ekosystémoch dôležitým ukazovateľom zmeny klímy. Účinky zmeny klímy na sezónnu fenologickú aktivitu drevín v jarnom období sú zdokumentované vo viacerých prácach (KOLAŘOVÁ et al. 2014, MENZEL et al. 2020), ktoré potvrdzujú silnú koreláciu s jarnou teplotou vzduchu. Takéto poznatky korešponujú aj s našimi výsledkami, kde korelačný koeficient v druhom období dosiahol štatisticky významnú hodnotu 0.9. Posun fázy prvé listy do skoršieho obdobia bol za posledných 30 rokov priemerne o 9 dní. Zhodné výsledky potvrdzuje aj práca Schiebera et al. (2009). V porovnaní s podobnými 30 ročnými údajmi z medzinárodných fenologických záhrad (MENZEL-FABIAN 1999), kde boli jarné fázy v priemere o 6 dní skôr, sa tento posun mierne zväčšil. Podľa Menzel et al. (2020) silný vplyv na skorý nástup jarných fáz má stúpajúce zimné a jarné otepľovanie, čo potvrdzujú aj naše výsledky vývoja teploty vzduchu už v zimných mesiacoch druhého obdobia. Buk je v Európe významným lesným druhom so širokým areálom, preto je dôležité poznať jeho reakciu na zmenu klímy aj na rozličných extrémnych stanovištiach. Zistili sme silnú koreláciu s dvojmesačnou teplotou v druhom období s trendovým posunom o 3 dni/10 rokov. Vybrané scenáre klimatických zmien udávajú pre buk skorší posun fázy o 2 dni/10 rokov (PRISLAN et al. 2019).

Jesenná fenológia je dôležitou súčasťou sledovania reakcií drevín na prebiehajúcu zmenu klímy. Časové trendy žltnutia listov zaznamenali v oboch obdobiach oneskorený nástup fázy. V druhom období sa štatisticky významný trend oneskorenia o 8 dní prejavil v stredne silnej korelácii so septembrovou teplotou. Takúto koreláciu uvádza pre buk aj práca Prislana et al. (2019). Kladnú koreláciu fázy všeobecné žltnutie listov zaznamenali v centrálnej Európe v podobnom období 1983-2016 Wu et al. (2021). Uvádzajú, že, významný trend otepľovania spôsobil len mierne oneskorenie žltnutia listov. Ďalšiu stredne silnú koreláciu sme zistili medzi žltnutím listov a septembrovými zrážkami len v prvom období, v druhom období bola nevýznamná. Silné zrážky a tepelný stres spôsobujú skoršie žltnutie listov. Sucho spojené s otepľovaním vedie k obmedzeniu vody a môže stimulovať skoršie žltnutie listov (WU et al. 2022).

Vhodným bioindikátorom zmeny klímy je aj fenologický výškový gradient. Pri jarnej fáze buka sme zaznamenali v druhom období skrátenie gradientu o 2 dni/100 m, čo je najväčšia zmena v porovnaní s prvým obdobím. Gradient posunu fázy dosiahol 2dni/100 m. Podobné hodnoty gradientu zaznamenali v poslednom období aj vo fenologickej sieti buka v Slovinsku (ČUFAR et al. 2012), kde posun predstavuje 2,6 dňa/100 m. Schieber et al. (2013) uvádzajú pre jarné fenofázy buka vo vnútorných Západných Karpatoch vyšší gradient (3dni/100 m), čo pravdepodobne súvisí s kratším časovým obdobím výskumu. Výškový gradient žltnutia listov bol v polohách nad 500 m 3–4 dni/100 m výšky (BIALOBOK et al. 1990), čo je v zhode s našimi výsledkami z oboch období.

ZÁVER

Práca analyzuje výsledky fenologických prejavov buka lesného (*Fagus sylvatica* L.) v podmienkach meniacej sa klímy v dvoch 30 ročných časových obdobiach 1961-1990 a 1991-2020. Prebiehajúca zmena klímy sa viac prejavila v druhom období 1991-2020 výraznejšími zmenami meteorologických prvkov, čo štatisticky významne ovplyvnilo posuny fenologických fáz.

Výsledky priniesli nasledovné poznatky:

- vývoj teploty vzduchu zaznamenal v druhom období štatisticky významné zmeny ročných trendov v apríli, júni a septembri, štatistická významnosť zrážok sa potvrdila v apríli,
- významná korelácia nástupu fázy prvé listy (BBCH 11) bola s priemernou dvojmesačnou teplotou vzduchu (marec-apríl) v oboch obdobiach, najtesnejšia (0,9) sa preukázala v druhom období. Trendové analýzy fázy potvrdili v druhom období štatisticky významný skorší nástup fázy priemerne o 9 dní a jej skrátenie medzi obdobiami o 12 dní. Vplyv zrážok na jarnú fázu sa nepreukázal,
- trendové analýzy žltnutia listov (BBCH 94) potvrdili v druhom období štatisticky významné oneskorenie o 8 dní. Zvyšovanie teploty vzduchu v jeseň (september) sa prejavilo v druhom období neskorším žltnutím listov, vplyv zrážok sa nepreukázal,
- fenologický výškový gradient, ktorý odráža citlivosť drevín na zmeny prostredia vo výškovom profile sa pri fáze prvé listy skrátil o 2 dni/100 m výšky,

Obidve fenologické fázy poskytujú cenné údaje, ktoré je možné použiť na posúdenie adaptácie buka v regionálnych klimatických podmienkach, ale aj na sledovanie zmien v prirodzenom areáli druhu.

PodĎakovanie: Autori ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR za podporu projektu: VEGA 1/0057/22.

Funding: This research was supported by the Science Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic: VEGA No 1/0057/22.

LITERATÚRA

AERTSEN, W., JANSSEN, E., KINT, V., BONTEMPS, J. D., VAN ORSHOVEN, J., MUYS, B. 2014. Long-term growth changes of common beech (*Fagus sylvatica* L.) are less pronounced on highly productive sites. *Forest Ecology and Management*, 312, 252–259.

BIALOBOK, S., BORATYNSKA, K., BORATYNSKI, A., CHALUPKA, W., DZWONKO, Z., FOBER, H., GIERTYCH, M., GRZYWACZ, A., HEJNOWICZ, A., OLEKSYN, A., PUKACKI, P., RUDAWSKA, M., SURMINSKI, J., SUSZKA, B., SZMIDT, A., SRODON, A., WOJTERSKI, T. 1990. Buk zwyczajny *Fagus sylvatica* L. Polska akademia nauk, Warszawa-Poznań, 654 p. ISBN 83-01-07700-X

BIGLER, C., VITASSE, Y. 2021. Premature leaf discoloration of European deciduous trees is caused by drought and heat in late spring and cold spells in early fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108492.

BRASLAVSKÁ, O. KAMENSKÝ, L. 1996. *Phenological Observation of Forest Plants. Methodological Prescription of SHMÚ*. Bratislava: SHMÚ Publishing, 22 p.

CAPPELLO, C. D., BOERSMA, P. D. 2021. Consequences of phenological shifts and a compressed breeding period in Magellanic penguins. *Ecology*, 102, e03443.

CAPDEVIELLE-VARGAS, R., ESTRELLA, N., MENZEL, A. 2015. Multiple-year assessment of phenological plasticity within a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in southern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211, 13–22.

ČUFAR, K., LUIS, M., SAZ, M.A., ČREPINŠEK, Z., BOGATAJ, L.K. 2012. Temporal shifts in leaf phenology of beech (*Fagus sylvatica*) depend on elevation. *Trees* 26, 1091–1100.

FITCHETT, J. M., GRAB, S. W., THOMPSON, D. I. 2015. Plant phenology and climate change: Progress in methodological approaches and application. *Progress in Physical Geography*, 39(4), 460-482.

HEIM JR, R. 2015. An overview of weather and climate extremes—Products and trends. *Weather and Climate Extremes*, 10, 1–9.

HENTTONEN, H. M., MÄKINEN, H., HEISKANEN, J., PELTONIEMI, M., LAURÉN, A., HORDO, M. 2014. Response of radial increment variation of Scots pine to temperature, precipitation and soil water content along a latitudinal gradient across Finland and Estonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 294-308.

CHMIELEWSKI, F. M., RÖTZER, T. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(2), 101–112.

INOUE, D. W. 2022. Climate change and phenology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 13(3), e764.

KOLÁŘOVÁ, E., NEKOVÁŘ, J., ADAMÍK, P. 2014. Long-term temporal changes in central European tree phenology (1946–2010) confirm the recent extension of growing seasons. *International Journal of Biometeorology*, 58, 1739–1748.

- LANGVALL, O., OTTOSSON LÖFVENIUS, M. 2021. Long-term standardized forest phenology in Sweden: a climate change indicator. *International Journal of Biometeorology*, 65, 381–391.
- LUKASOVÁ, V., VIDO, J., ŠKVARENINOVÁ, J., BIČÁROVÁ, S., HLAVATÁ, H., BORSÁNYI, P., ŠKVARENINA, J. 2020. Autumn phenological response of European Beech to summer drought and heat. *Water*, 12(9), 2610.
- MEIER, U. 1997. Growth stages of plants – Entwicklungsstadien von Pflanzen– Estadios de las plantas – Development des Plantes. Blackwell Wissenschaftsverlag. BBCH-Monography. Berlin und Wien, 622 p.
- MEIER, M., VITASSE, Y., BUGMANN, H., BIGLER, C. 2021. Phenological shifts induced by climate change amplify drought for broad-leaved trees at low elevations in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108485.
- MENZEL, A., FABIAN, P. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721), 659–659.
- MENZEL, A., YUAN, Y., MATIU, M., SPARKS, T., SCHEIFINGER, H., GEHRIG, R., & ESTRELLA, N. 2020. Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*, 26(4), 2599–2612.
- PRISLAN, P., GRİČAR, J., ČUFAR, K., DE LUIS, M., MERELA, M., ROSSI, S. 2019. Growing season and radial growth predicted for *Fagus sylvatica* under climate change. *Climatic Change*, 153, 181–197.
- RICHARDSON, A. D., HUFKENS, K., MILLIMAN, T., AUBRECHT, D. M., FURZE, M. E., SEYEDNASROLLAH, B., HANSON, P. J. 2018. Ecosystem warming extends vegetation activity but heightens vulnerability to cold temperatures. *Nature*, 560(7718), 368–371.
- RUMMUKAINEN, M. 2012. Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(2), 115–129.
- SCHIEBER, B., JANÍK, R., SNOPOKOVÁ, Z. 2009. Phenology of four broad-leaved forest trees in a submountain beech forest. *Journal of Forest Science*, 55(1), 15–22.
- ŠKVARENINOVÁ, J., MREKAJ, I. 2022. Impact of climate change on Norway Spruce Flowering in the Southern Part of the Western Carpathians. *Front. Ecol. Evol.* 10, 865471.
- TARÁBEK, K. 1982. Climatic-geographical types (In Slovak). In Mazúr, E. a Jakál, J. (eds.) *Atlas of the Slovak Socialist Republic*. Bratislava: Slovak Academy of Sciences, Slovak Office of Geodesy and Cartography, pp. 64.
- World Meteorological Organization [WMO] (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. WMO-No. 1203, ISBN 978-92-63-11203-3. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 18.
- WU, Z., CHEN, S., DE BOECK, H. J., STENSETH, N. C., TANG, J., VITASSE, Y., WANG, S., ZOHNER, C., FU, Y. H. 2021. Atmospheric brightening counteracts warming-induced delays in autumn phenology of temperate trees in Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 30(12), 2477–2487.
- WU, C., PENG, J., CIAIS, P., PEÑUELAS, J., WANG, H., BEGUERÍA, S., BLACK, A., JASSAL, R., ZHANG, X., YUAN, V., LIANG, E., WANG, X., HUA, H., LIU, R., JU, W., FU, Y., GE, Q. 2022. Increased drought effects on the phenology of autumn leaf senescence. *Nature Climate Change*, 12(10), 943–949.

DISTRIBÚCIA ORTUTI V ČASTIACH RASTLINNEJ NADZEMNEJ BIOMASY BUKA LESNÉHO (*FAGUS SYLVATICA* L.)

Hana OLLEROVÁ¹ - Andrea ZACHAROVÁ¹ - Simona KOVÁČOVÁ¹

¹Katedra environmentálneho inžinierstva, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, email: ollerova@tuzvo.sk, andrea.zacharova@tuzvo.sk

ABSTRACT

Ollerová, H., Zacharová, A., Kováčová, S.: Distribution of mercury in the parts of the above-ground plant biomass of beech (*Fagus sylvatica* L.)

The study is focused on the distribution and accumulation of mercury in the above-ground organs of European beech (*Fagus sylvatica* L.). The samples represent an extensive collection of assimilation organs in the phenophase of leaf unfolding BBCH 19, , bark, twigs, wood, and, to a lesser extent, buds, cupules, and beechnuts (in ripeness of fruit BBCH 87) from sites in central Slovakia (Malachov, Banská Bystrica – Kremnička, Badín). The collected samples were analyzed using the single-purpose atomic spectrophotometer AMA 254. The highest average mercury value was measured in the leaves, at 0.0618 mg·kg⁻¹. The concentration decreased in the following order: bark, twigs, wood, cupules, buds, beechnuts. Leaves and bark are the most exposed to atmospheric mercury, whereas wood is much less affected. The very low values in buds, cupules, and beechnuts indicate minimal transfer of mercury into reproductive structures. The highest mercury levels were recorded at the Malachov site, where cinnabar mining had taken place in the past.

Key words: mercury, beech, *Fagus sylvatica*, distribution, above-ground biomass

ÚVOD

Výskum príjmu, distribúcie a akumulácie ortuti v rastlinných orgánoch (listy, púčiky, kôra, drevo, koreň) je dôležitý z hľadiska ekologického, environmentálneho, zdravotného, hygienického i bezpečnostného. Človek využíva časti rastlín nielen ako potravinovú komoditu, ale aj ako biomasu na vykurovanie a ďalšie spracovanie v rôznych odvetviach priemyslu.

Rastliny prijímajú ortuť prevažne z atmosféry (90%). Medzi najvýznamnejšie vstupy Hg do rastlín patrí vstup atmosférickej plynnej ortuti Hg⁰ cez prieduchy asimilačných orgánov počas respirácie a akumulácia Hg²⁺ na povrchu asimilačných orgánov z mokrej a suchej depozície. Dominantnou formou v atmosfére je elementárna ortuť, ktorá v nej zotrúva 1 – 2 roky. Počas takéhoto dlhého obdobia sa prenáša na obrovské vzdialenosti od zdroja (LINDBERG et al., 2002; LODENIUS et al., 2003). V menšej miere rastliny prijímajú ortuť z pôdy vo forme rozpustenej iónovej Hg cez koreňovú sústavu. Korene sú istou bariérou a väčšinou z nich nedochádza k distribúcii do nadzemnej biomasy.

Zatiaľ je menej známe, ako sa ortuť distribuuje do kôry, dreva alebo púčikov. Kôra môže zachytávať a zadržiavať atmosférickú Hg prostredníctvom povrchovej sorpcie. Štúdia z Talianska o borovici čiernej (*Pinus nigra*) hovorí, že kôra stromov na povrchu najskôr absorbuje plynú Hg⁰ alebo zachytenú na časticách a až potom sa Hg viaže na molekuly obsahujúce síru. Nízke koncentrácie v dreve možno vysvetliť tým, že drevo je menej ovplyvnené atmosférickou ortuťou ako listy a kôra (RIMONDI et al., 2020).

Príjem, distribúciu a akumuláciu ortuti v rastlinnom organizme ovplyvňuje viacero faktorov druh rastliny, vek, tvar listov, umiestnenie v korune, rozmiestnenie prieduchov na listoch, hrúbka kutikuly, hrúbka kôry a dreva a ďalej pôdne vlastnosti – pH, organická hmota, redoxné podmienky, ktoré ovplyvňujú biodostupnosť Hg a následne jeho príjem rastlinou. Rovnako sezónnosť či lokalizácia (blízkosť dopravných komunikácií, priemyselné zóny) sa ukazujú ako významné pre variabilitu obsahu Hg v rastlinách (GWOREK et al., 2020).

Vzhľadom na to, že dreviny a ich nadzemné časti (kôra, drevo) často prežívajú desiatky či stovky rokov, môžu slúžiť ako záznamové matrice pre sledovanie dlhodobej akumulácie ortuti v prostredí. Z literatúry je známe, že obsah ortuti v častiach drevín je rozdielny a stúpa v nasledovnom poradí: drevo < koreň < konáre < kôra < listy (DZIOK, et al., 2020, YANG et al., 2018).

METODIKA

Vzorky z rôznych nadzemných častí buka lesného (*Fagus sylvatica* L.) boli odobraté z troch lokalít – Malachov, Banská Bystrica, časť Kremnička a Badín. Malachov je lokalita ovplyvnená ťažbou rumelky, v Kremničke sa nachádza krematórium a Badín je lokalita kontrolná, nezaťažená antropogénnou činnosťou. Odber vzoriek podľa jednotlivých častí nadzemnej biomasy buka lesného je uvedený v tabuľke 1.

Tab. 1 Odobraté vzorky nadzemnej biomasy *Fagus sylvatica* L.

Tab. 1 Samples of above-ground biomass of *Fagus sylvatica* L.

Lokalita	Časť nadzemnej biomasy	Počet vzoriek
Banská Bystrica – Kremnička	listy	22
	konáriky	22
	púčiky	10
	drevo – 5, 10, 15, 20 ročné	14, 14, 14, 8
	čiašky	4
Malachov	bukvice	3
	listy	15
	kôra	6
Badín	drevo	1
	listy	16
	kôra	1
	drevo	1

Odber vzoriek asimilačných orgánov sa uskutočnil podľa STN 48 1001 Odber vzoriek asimilačných orgánov na zisťovanie zdravotného stavu lesa, upravený podľa našej potreby. Na každom odberovom mieste sme odobrali vzorky z 3 - 5 jedincov zo strednej časti koruny v danej vzdialenosti, aby sme dosiahli priemerné vzorky. Listy boli oddelené od konárikov.

Listy sa odoberali vo fáze plného zalistenia (BBCH 19), kedy mali úplne vyvinutú listovú čepeľ. Bukvice vo fáze plnej zrelosti (BBCH 87) boli vtedy, keď spontánne vypadávali z čiašky. Na presné určenie stupňa fenofázy bola použitá medzinárodná stupnica BBCH kódov používaná pri fenologických pozorovaniach.

Vrchná vrstva kôry (cca 5 cm²) bola odobratá pomocou noža. Drevo bolo odobraté prostredníctvom Presslerovho nebožieca z jedincov s priemerom 45 – 50 cm, z hĺbky kmeňa cca 15 cm, vo výške približne 100 cm nad zemou. Analyzoval sa každý piaty prírastok dreva vo vývrte. Vzorky bukvice predstavujú plody vypadnuté na zemský povrch, zbierali sa na konci vegetačného obdobia vo fáze plnej zrelosti. Vzorky boli vysušené pri laboratórnej teplote a zhomogenizované.

Analýza vzoriek sa uskutočnila na jednoúčelovom atómovom spektrofotometri AMA 254, ktorým sa stanovuje celkový obsah ortuti v pevných a kvapalných vzorkách bez chemickej úpravy. Metóda je založená na využití techniky generovaných pár kovovej ortuti s následným zachytením a obohatením na zlatom amalgamátore. Meranie každej vzorky bolo 3 krát opakované. Navážaná hmotnosť vzorky sa pohybovala od 40 do 60 mg. Samotná analýza v AME je rozdelená na tri časti. V prípade rastlinných vzoriek sa používa 45 s sušenie, 150 s termický rozklad, 45 s ustálenie teplotných pomerov. Kontrola správnosti výsledkov sa uskutočňuje na začiatku každého merania meraním certifikačných referenčných materiálov a meraním nulovej hodnoty deionizovanej vody (ALTEC, 2000).

Výsledky sme spracovali v programe Statistica. Pomocou analýzy variancie a Duncanovho testu sme hodnotili rozdiely v koncentráciách ortuti v jednotlivých častiach nadzemnej biomasy buka lesného.

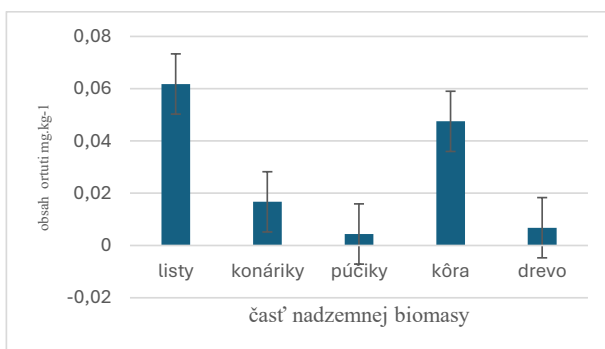
VÝSLEDKY A DISKUSIA

Asimilačné orgány buka predstavovali najpočetnejšiu skupinu analyzovaných vzoriek, hodnoty ortuti sa v nich pohybovali v rozmedzí od 0,0108 do 0,2564 mg.kg⁻¹. Priemerná hodnota zo sledovaných lokalít bola 0,0618 mg.kg⁻¹. K prekročeniu limitnej hodnoty 0,12 mg.kg⁻¹ podľa MAŇKOVSKÉJ (1996) došlo u troch vzoriek na lokalite Malachov, známej ťažbou rumelky v minulosti. Druhý najvyšší počet vzoriek zahŕňal drevo, pri ktorom boli vzorky rozdelené po piatich rokoch. Koncentrácie ortuti sa však medzi jednotlivými ročníkmi líšili len minimálne. Priemerná koncentrácia ortuti vo všetkých vzorkách dreva bola 0,0068 mg.kg⁻¹ (tab. 2). Hodnota ortuti v dreve je takmer 10x nižšia ako v listoch. Po listoch sme najvyššiu koncentráciu namerali v kôre buka – 0,0475 mg.kg⁻¹. V jednom prípade bola prekročená hodnota 0,12 mg.kg⁻¹, tak isto na lokalite Malachov. Listy a kôra stromov je najviac vystavená vplyvu atmosférickej ortuti. Hodnota ortuti ďalej klesala v poradí konáriky, drevo, púčiky (obr. 1). Veľmi nízky počet vzoriek predstavovali čiašky z buka a plody (bukvice). Priemerná hodnota ortuti v čiaškach dosahovala hodnotu 0,0052 a v bukviaciach 0,0032 mg.kg⁻¹.

Tab. 2 Základné štatistické údaje o celkovom obsahu ortuti (mg.kg⁻¹ sušiny) v častiach nadzemnej biomasy buka lesného

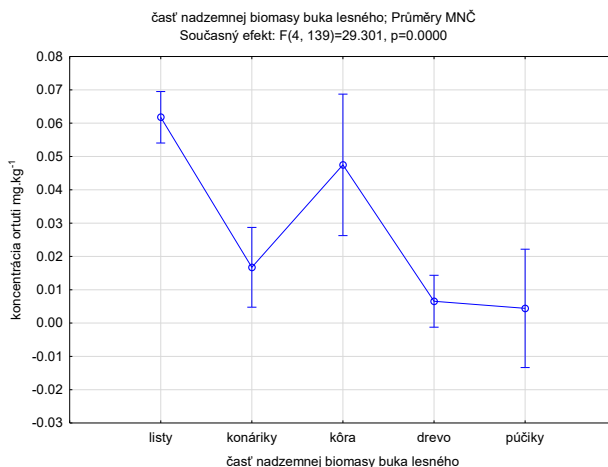
Tab 2 Basic statistic data on mercury concentration (mg.kg⁻¹ d.w.) in above-ground beech biomass

štatistika	listy	konáriky	púčiky	čiašky	bukvice	kôra	drevo-5 ročné	drevo-10 ročné	drevo-15 ročné	drevo-20 ročné
priemer	0.0618	0.0167	0.0044	0.0052	0.0032	0.0475	0.0065	0.0056	0.0063	0.0087
medián	0.0497	0.0134	0.0044	0.0052	0.0029	0.0220	0.0054	0.0048	0.0057	0.0053
min	0.0108	0.0082	0.0026	0.0033	0.0027	0.0156	0.0027	0.0028	0.0028	0.0042
max	0.2564	0.0377	0.0072	0.0071	0.0041	0.1367	0.0137	0.0101	0.0145	0.0279
smer.odch.	0.0424	0.0080	0.0013	0.0014	0.0006	0.0456	0.0037	0.0020	0.0029	0.0075



Obr. 1 Koncentrácia ortuti (mg.kg⁻¹) v nadzemnej biomase buka lesného

Fig. 1 Mercury concentration (mg.kg⁻¹) in above-ground beech biomass



Obr. 2 Koncentrácia ortuti v závislosti od častí nadzemnej biomasy buka lesného
Fig. 2 Mercury concentration in single parts of beech above-ground biomass

Na základe jednofaktorovej analýzy variancie možno povedať, že vplyv jednotlivých častí nadzemnej biomasy na výšku koncentrácií ortuti je štatisticky významný na 95 % hladine významnosti. Ako vyplýva z obrázka 2, štatisticky významné rozdiely medzi priemermi koncentrácií sú medzi listami a konáríkmi, drevom a púčikmi. Štatisticky významný rozdiel sme nezistili medzi listami a kôrou, ani medzi konáríkmi a drevom a konáríkmi a púčikmi, kde sa intervaly spoľahlivosti prekrývajú. Obsah v listoch a v kôre je výrazne vyšší ako v ostatných častiach nadzemnej biomasy a rozdiely medzi nimi sú štatisticky významné.

Koncentráciou ortuti v rôznych drevinách sa zaoberali viacerí autori. DZIOK et al. (2020) sledovali listnaté aj ihličnaté dreviny v hornatých oblastiach južného Poľska, ktoré sa využívajú hlavne na vykurovanie (buk, hrab, breza, javor horský, smrek, borovica, jaseň). V dreve hrabu zistili koncentráciu ortuti 2,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, v dreve buka 2,9 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, v konároch hrabu 1,2 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, buka 3,6 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, v kôre hrabu 10,6, buka 8,0 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ a v listoch hrabu 43 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ a buka 45 $\mu\text{g.kg}^{-1}$. Výsledky z nášho výskumu vykazujú mierne vyššie hodnoty, okrem dreva. YANG, et al. (2018) zistili obsah ortuti v dreve buka v intervale od 0,001 do 0,002 mg.kg^{-1} , v kôre od 0,004 do 0,006 mg.kg^{-1} a v listoch od 0,015 do 0,025 mg.kg^{-1} .

Podľa viacerých vyššie spomenutých autorov sa listy vyznačujú najvyššou koncentráciou ortuti v porovnaní s ostatnými nadzemnými časťami, čo súvisí s ich vysokou schopnosťou zachytávať ortuť z atmosféry. Listy majú vyššiu expozíciu voči atmosférickej ortuti ako drevo alebo kôra. Preto sú považované za ukazovateľ koncentrácie ortuti v atmosfére (YANG et al., 2018).

Celková koncentrácia Hg v listoch najviac koreluje s počtom prieduchov na liste, čo podporuje hypotézu, že prieduchy prijímajú atmosférickú Hg (pravdepodobne Hg^0). Najvyššia miera prijímania sa zhoduje s obdobím vysokej fotosyntetickej aktivity (LAACOURI et al., 2013).

Koncentrácia ortuti v dreve je nízka, hoci je drevo najväčšou zložkou lesnej biomasy, preto celkový obsah Hg v dreve na jednotku plochy môže byť významný. Môže predstavovať väčšiu zásobu než listie (OBRIST et al., 2012, LAACOURI et al., 2013). RIMONDI et al. (2020) uvádzajú, že kôra sa čoraz častejšie využíva ako bioindikátor znečisťujúcich látok v ovzduší (vrátane toxických kovov), pretože je vynikajúcim adsorbentom. Navyše je ľahko dostupná a pomerne jednoduchá je aj identifikácia druhu. V kôre borovice čiernej uvádzajú obsah ortuti od 0,1 do 28,8 mg.kg^{-1} a poukazujú, že kôry zaznamenávajú plynné koncentrácie ortuti vo vzduchu i vetrom prenášané Hg častice. Nepotvrdili, že by zrážky významne ovplyvňovali stratu Hg z kôry. Najvyššie hodnoty ortuti v kôre boli zaznamenané do 1,5 cm hrúbky od povrchu, v hrubších vzorkách bola koncentrácia ortuti nižšia.

Ihličnany majú vyššiu mieru sorpcie Hg z povrchu kôry ako druhy listnaté. Môže to súvisieť s vyššou rýchlosťou transportu ortuti z koreňov alebo listov, ale aj so skutočnosťou, že vždyzelené druhy budú akumulovať vyšší obsah Hg ako opadavé druhy (YANG et al., 2018).

Rozdiely v koncentráciách ortuti medzi rôznymi drevinami závisia od rôznych geografických oblastí a od variability v atmosférickej depozícii Hg a rozdielného množstva zrážok, ktoré korelujú s depozíciou Hg (BLACKWELL et DRISCOLL, 2015, YANG et al., 2018).

Lesné porasty sú dôležitými receptormi ukladania atmosférickej ortuti hlavne kvôli veľkej ploche listia. Dreviny však opätovne vyžarujú Hg späť do atmosféry prostredníctvom transpirácie. Stromy teda sprostredkujú obojsmerný transport Hg medzi atmosférou i pôdou (YANG, et al., 2018, LUO, et al., 2016).

Asimilačné orgány ako veľký rezervoár ortuti väčšina autorov preto považuje za najdôležitejší vstup ortuti do lesnej pôdy v podobe opadu z drevín (REA et al., 2002; SCHWESIG & MATZNER, 2001; ST. LOUIS et al., 2001; ZHOU et al., 2020). Niektorí autori uvádzajú, že depozíciu Hg do pôdy okrem opadu znásobujú podkorunové zrážky. Korunová vrstva lesného porastu poskytuje totiž obrovskú zachytňujúcu plochu pre všetky formy ortuti nachádzajúce sa v atmosfére. Prostredníctvom suchej depozície dochádza nepretržite k usadzovaniu plynov a častíc na povrchu asimilačných orgánov, ktoré sú následne zmývané zrážkami do pôdy (MAČEJNÁ et al., 2021).

ZÁVER

Výsledky nášho výskumu potvrdili, že distribúcia ortuti v nadzemnej biomase buka lesného (*Fagus sylvatica* L.) je výrazne diferencovaná medzi jednotlivými rastlinnými orgánmi. Najvyššie koncentrácie ortuti sme zaznamenali v listoch a kôre, čo odráža ich priamu a kontinuálnu expozíciu atmosférickej ortuti. Listy jednoznačne predstavujú najcitlivejší indikátor znečistenia, čo korešponduje s ich funkciou asimilačných orgánov a veľkou plochou povrchu. Kôra, ktorá taktiež prichádza do úzkeho kontaktu s atmosférou, vykazovala druhé najvyššie hodnoty Hg a v jednom prípade prekročila limitnú hodnotu. Naopak, drevo vykazovalo nízke koncentrácie ortuti bez významných rozdielov medzi sledovanými ročníkmi, čo potvrdzuje jeho nižšiu expozíciu atmosférickému spádu. Veľmi nízke hodnoty v púčikoch, čiaškach a bukviaciach poukazujú na minimálny prenos ortuti do reprodukčných štruktúr. Štatistická analýza potvrdila významný vplyv typu rastlinného orgánu na množstvo akumulovanej ortuti. Najvyššie hodnoty ortuti boli opakovane identifikované na lokalite Malachov, čo súvisí s historickou ťažbou rumelky. Výsledky zároveň potvrdili význam buka ako vhodného bioindikátora dlhodobého znečistenia prostredia ortuťou. Celkovo naše zistenia poukazujú na potrebu pokračovať v monitoringu ortuti v lesných ekosystémoch, najmä v oblastiach so zvýšenou antropogénnou záťažou.

PodĎakovanie Autori ďakujú agentúre VEGA za finančnú podporu pri riešení projektu č. 1/0057/22, v rámci ktorého vznikol prezentovaný príspevok.

LITERATÚRA

ALTEC, 2000. *Návod k obsluhu AMA 254*. ALTEC s r. o., Praha, 97 s.

Blackwell, B.D., Driscoll, C.T., 2015. Using foliar and forest floor mercury concentrations to assess spatial patterns of mercury deposition. *Environmental Pollution* 202: 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.036> PMID: 25818092

DZIOK, T., KOŁODZIEJSKA, E.K. et KOŁODZIEJSKA, E.L., 2020 Mercury content in woody biomass and its removal in the torrefaction process. In *Biomass and Bioenergy* 143, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105832>

GWOREK, B., DMUCHOWSKI, W., BACZWSKA-DABROWSKA, A.H., 2020. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe* 128, roč. 32, č. doi: [10.1186/s12302-020-00401-x](https://doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x).

LAACOURI, A., NATER, E.A., KOLKA, R.K., 2013. Distribution and uptake dynamics of mercury in leaves of common deciduous tree species in Minnesota, U.S.A. *Environ. Sci. Technol.* 47 pp. 10462-10470. <https://doi.org/10.1021/es401357z>

LINDBERG, S.E., MEYERS, T.P., TAYLOR JR., G.E., TURNER, R.R., SCHROEDER, W.H., 2002: Atmosphere-surface exchange of mercury in a forest-results of modeling and gradient approaches. *Journal of Geophysical Research* 97: 2519-2528. <https://doi.org/10.1029/91JD02831>

LODENIUS, M., TULISALO, E., SOLTANPOUR-GARGARI, A., 2003. Exchange of mercury between atmosphere and vegetation under contaminated conditions. *Science of Total Environment* 304:169-174.

LUO, Y., DUAN, L., DRISCOLL, C.T., XU, G., SHAO, M., TAYLOR, M., 2016. Foliage/atmosphere exchange of mercury in a subtropical coniferous forest in south China. *Journal of Biogeosciences* 121: 20062016.

MAČEJNÁ, L., ZACHAROVÁ, A., OLLEROVÁ, H., ŠKVARENINOVÁ, J., ŠKVARENINA, J., 2021. Hydrobiochemical balance of total mercury in a forest catchment area at former cinnabar mining locality. *Journal of hydrology and hydromechanics* 69 (2), 209-219. ISSN 0042-790X. <https://doi.org/10.2478/johh-2021-0005>

MAŇKOVSKÁ, B., 1996. *Geochemický atlas Slovenska. Lesná biomasa*. Bratislava: Geochemická služba Slovenskej republiky, 87 s.

OBRIST, D., JOHNSON, D.W., EDMONDS, R.L., 2012. Effects of vegetation type on mercury concentrations and pools in two adjacent coniferous and deciduous forests. *J. Plant.Nutr. Soil Sci.* 175, 68-77. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000415>

REA, A.W., LINDBERG, S.E., SCHERBATSKOY, T., KEELER, G.J., 2002. Mercury accumulation in foliage over time in two northern mixed-hardwood forests. *Water, Air and Soil Pollution* 133, 49–67.

RIMONDI, V., COSTAGLIOLA, P., BENESPERI, R., BENVENUTI, M., BEUTEL, M.W., BUCCIANI, A., CHIARANTINI, L., LATTANZI, P., MEDAS, D., PARRINI, P., 2020. Black pine (*Pinus nigra*) barks: A critical evaluation of some sampling and analysis parameters for mercury biomonitoring purposes. *Ecological Indicators* 112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106110>

SCHWESIG, D. & MATZNER, E., 2001. Dynamics of mercury and methylmercury in forest floor and runoff of a forested watershed in Central Europe. *Biogeochemistry* 53, 181–200.

ST. LOUIS, V.L., RUDD, J.W.M., KELLY, C.A., HALL, B.D., ROLFUS, K.R., SCOTT, K.J., LINDBERG, S.E., DONG, W., 2001. Importance of the forest canopy to fluxes of methyl mercury and total mercury to boreal ecosystems. *Environmental Science and Technology* 35, 3089–3098. [https://doi: 10.1021/es001924p](https://doi.org/10.1021/es001924p)

STN 48 1001 Odber vzoriek asimilačných orgánov na zisťovanie zdravotného stavu lesa

YANG, Y., YANAI, R.D., DRISCOLL, C.T., MONTESDEOCA, M., SMITH, K.T., 2018. Concentrations and content of mercury in bark, wood, and leaves in hardwoods and conifers in four forested sites in the northeastern USA. *PLoS One* 13 (4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196293>

ZHOU, J., DU, B., SHANG, L., WANG, Z., CUI, H., FAN, X., ZHOU, J., 2020. Mercury fluxes, budgets, and pools in forest ecosystems of China. A review. *Environmental Science and Technology* 50, 14, 1411–1450. [https://doi:10.1080/10643389.2019.1661176](https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1661176)

NARUŠENIE GENERATÍVNYCH FENOLOGICKÝCH FÁZ U BOROVICE LIMBOVEJ (*PINUS CEMBRA*) VPLYVOM NESKORÝCH MRAZOV

Veronika LUKASOVÁ¹ – Svetlana VARŠOVÁ¹ – Ján KREMPASKÝ^{1,2} – Jaroslav ŠKVARENINA^{1,3} –
Dušan BILČÍK¹ – Pavol NEJEDLÍK¹

¹Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, Dúbravská cesta 9, Bratislava 840 05, geofluka@savba.sk

²Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen

³Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen

ABSTRACT

Lukasová, V., Varšová, S., Krempaský, J., Škvarenina, J., Bilčík, D., Nejedlík, P.: Disruption of generative phenological phases in Swiss stone pine (*Pinus cembra*) due to late frosts

In 2024, an exceptionally warm winter and spring occurred across Europe. Swiss stone pine (*Pinus cembra*) growing in the High Tatra foothills (Slovakia) responded to this anomalous warmth with an unusually early onset of phenological phases. However, this development was interrupted by an 11-day-long late frost event in mid to late April, which critically impacted the reproductive success of the species. Phenological observations conducted on mature individuals revealed that male flowers were degenerated and failed to release pollen, and no cones developed during the 2024 growing season. The air temperatures responsible for the damage dropped as low as -3.6°C . These findings highlight the vulnerability of alpine tree species growing in mid-elevations to phenological shifts under climate warming, which may increasingly expose sensitive growth stages to damaging frosts.

Key words: false spring, frost damage, phenology, flowering, climate change

ÚVOD

Prebiehajúca zmena klímy zvyšuje frekvenciu, intenzitu a trvanie extrémov počasia (IPCC 2023). Významným prejavom počasia spojeným s negatívnymi dopadmi na vegetáciu, sú neskoré mrazy (ŠKVARENINOVÁ et al. 2022). Stromy mierneho pásma si evolučne vyvinuli rôzne fyziologické mechanizmy či morfológické štruktúry, aby dokázali odolať extrémnym mrazom počas zimy. Patrí sem napríklad dormancia, mrazuvzdornosť, „supercooling“, tolerancia extracelulárneho ľadu, tvorba kryoprotektantov či štrukturálne adaptácie, ako je kompaktný rast alebo prezimovanie vo forme podzemných orgánov, ako aj geneticky podmienená vnútorná periodičita (SAKAI, LARCHER 1987, QUAMME 1995, LARCHER 2005, KÖRNER 2016). To, kedy rastliny ukončia vegetačný kľud a prejdú do vegetačného obdobia, ovplyvňujú tri hlavné faktory: (1) chladné zimné obdobie (2) dĺžka fotoperiód (3) aktuálne poveternostné podmienky. Ak sú splnené požiadavky na chlad a signál fotoperiód umožní ukončiť dormanciu, tak pri vhodných poveternostných podmienkach, predovšetkým zvyšujúcej sa teplote, sú rastliny pripravené začať vegetačné obdobie (KÖRNER 2006). Výskyt mrazov v čase po ukončení vegetačného kľudu však predstavuje pre rastliny veľké riziko, spôsobené tvorbou ľadových kryštálov v rastlinných pletivách vplyvom záporných teplôt (PARDEE et al. 2017, ŠKVARENINOVÁ et al. 2021, 2022). Obdobie rozpuku púčikov je pre rastliny obzvlášť kritické, pretože rozhoduje o jej vývoji a reprodukčnom úspechu (ZOHNER et al. 2018).

Obdobie koncom zimy alebo skoro na jar, dostatočne teplé a dlhé na to, aby rastliny prešli do vegetačného obdobia, ktoré je následne prerušené silným mrazom, sa označuje aj ako „falošná jar“ (MARTINUZZI et al. 2019, ZAHRADNÍČEK et al. 2024). Poškodenie vegetatívnych a generatívnych orgánov vegetácie v dôsledku silných mrazov v období citlivých rastových fáz môže výrazným spôsobom ovplyvniť jej rast, konkurenčnú schopnosť a distribučné limity (REICHSTEIN et al. 2013, KÖRNER et al. 2016, KOLLAS et al. 2014, AUGSPURGER 2013). Falošnou jarou môžu byť postihnuté nielen ovocné stromy či poľnohospodárske plodiny, ale aj lesné dreviny, nevynímajúc druhy prispôbené životu v extrémnych podmienkach najvyšších pohorí. Borovica limbová je druhom, ktorý sa v

Európe prirodzene vyskytuje v Alpách (1500–2500 m n.m.) a Karpatoch (1300–1700 m n.m.), predovšetkým v oblasti hornej hranice lesa a subalpínskeho pásma (ZOLLER 1991, TÓTH et al. 2019). Na Slovensku rastie vo Vysokých Tatrách, pričom jej súčasné rozšírenie bolo do veľkej miery ovplyvnené ľudskou činnosťou (CASALEGNO et al. 2010, WOJNICKA-PÓLTORAK et al. 2015). Púčiky borovice limbovej sú spočiatku chránené tvrdými, živcou pokrytými šupinami, ktoré im umožňujú tolerovať teploty pod bodom mrazu. Živicová vrstva utesňuje púčik a funguje ako prirodzená izolácia brániaca vniknutiu vody, ľadu a mikroorganizmov. Odolnosť voči mrazu však klesá s postupujúcou jarou a minimum dosahuje počas rozpuku a kvitnutia, kedy sú otvárajúce sa púčiky priamo vystavené mrazu (SNYDER, MELO-ABREU 2005, LENZ et al. 2013, CARADONNA, BAIN 2016, VITRA et al. 2017, SZALAY et al. 2019).

V roku 2024 bola v Európe, ale aj globálne výnimočne teplá zima a jar (<https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024#fb60f04b-09ca-44c9-9fdc-5bdcf2532313>), ktorej dôsledkom bolo, že vegetačné obdobie borovice limbovej v oblasti Vysokých Tatier začalo netypicky skoro, čím sa zvýšilo riziko poškodenia mrazom v prípade neskoršieho silného ochladenia. Cieľom našej štúdie bolo zhodnotiť teplotné podmienky, na ktoré borovica limbová zareagovala nástupom jarných fenofáz, intenzitu neskorých mrazov a rozsah poškodenia jej reprodukčných orgánov.

MATERIÁL A METÓDY

Fenologické pozorovania

Fenologická plocha sa nachádza na okraji obce Stará Lesná (49°09'07" N, 20°17'16"E) v nadmorskej výške 800 m n. m. Fenologické fázy boli sledované na desiatich dospelých jedincoch Borovice limbovej v priemere 3 krát do týždňa pomocou ďalekohľadu a hodnoty boli spracované pre danú lokalitu. Presné načasovanie nástupu fenofázy bolo interpolované na základe vývojového štádia pozorovaného v deň monitorovania. Pozorovaným fenofázam boli priradené kódy podľa medzinárodne používanej stupnice BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie, MEIER 2001), ktorá opisuje hlavné (makroštádiá) a sekundárne rastové štádiá pomocou dvojmiestneho desatinného kódového systému. Základným princípom tejto stupnice je, že podobným vývojovým štádiám u rôznych rastlinných druhov je priradený rovnaký kód BBCH. Na borovici limbe sme sledovali vegetatívne aj generatívne fenofázy, ktoré sú popísané v tabuľke 1. Primárne sme sa v tejto štúdii zamerali na rok 2024, avšak pre zdôraznenie skorého začiatku fenofáz v tomto roku sme porovnali pozorované termíny s rokmi 2022 a 2023. Skratka DOY označuje poradové číslo dňa v roku (z anglického Day of Year), kedy fenofáza začala.

Tab. 1 Fenologické fázy pozorované na borovici limbovej (*Pinus cembra* L.) podľa BBCH stupnice.

Tab. 1 Phenological phases observed in Swiss stone pine (*Pinus cembra* L.) according to the BBCH scale.

BBCH Kód	Charakteristika fenologickej fázy
07	Začiatok rozpuku vegetatívnych púčikov
10	Špičky ihlič 10 mm nad púčikovými šupinami
19	Prvé ihlice úplne vyvinuté
31	Začiatok rastu výhonkov
51	Viditeľné kvetné puky - butonizácia
61	Začiatok kvitnutia
67	Koniec kvitnutia – väčšina kvetov opadnutá alebo suchá

Meteorologické údaje

Vo vzdialenosti 100 m od fenologickej pozorovacej plochy sa nachádza automatická meteorologická stanica vybavená meracími prístrojmi od firmy Physicus. Na stanici sú merané základné meteorologické prvky ako teplota vzduchu a pôdy, vlhkosť vzduchu, atmosférické zrážky a tlak, smer a rýchlosť vetra a rôzne druhy žiarenia (globálne, odrazené, dlhovlnné atď.). V tejto štúdii sme sa zamerali predovšetkým na teplotu vzduchu. Teplotu vzduchu využijeme jednak na stanovenie sumy efektívnych teplôt (GDD z anglického Growing Degree Days) a jednak na určenie intenzity neskorých mrazov. Sumy efektívnych teplôt sme vypočítali pomocou rovnice:

$$GDD = \sum \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_{\text{base}}$$

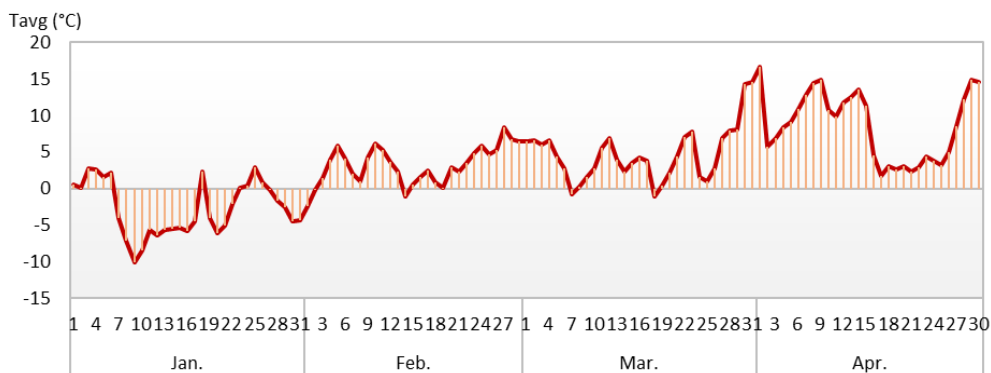
kde $T_{\max}$ a $T_{\min}$ sú denné minimálne a maximálne teploty a T_{base} je základná teplota. Ako základnú teplotu sme zvolili hranicu 5 °C. Ak boli priemerné denné teploty $((T_{\max} + T_{\min})/2)$ nižšie ako hraničná teplota T_{base} , GDD nadobudla hodnotu 0 °C pre daný deň. Taktiež sme vypočítali sumu dní aktívneho rastu (AGD z anglického Active Growing Days), kedy sme uvažovali len s dňami s pozitívnou hodnotou GDD. Akumulovanú hodnotu GDD sme počítali za obdobie posledných 28 dní.

Dlhodobé údaje o teplote vzduchu za obdobie 1981-2010 boli použité z najbližšej meteorologickej stanice Tatranská Lomnica (49°09'46" N a 20°17'16" E, 825 m n.m.), ktorú spravuje Slovenský hydrometeorologický ústav. Na identifikáciu neskorých silných mrazov sme použili údaje o minimálnej teplote vzduchu ($T_{\min}$) vo výške 2 metre nad zemou. Za silný mraz, boli považované $T_{\min}$ nižšie ako -2,2 °C (Marino et al. 2011).

VÝSLEDKY A DISKUSIA

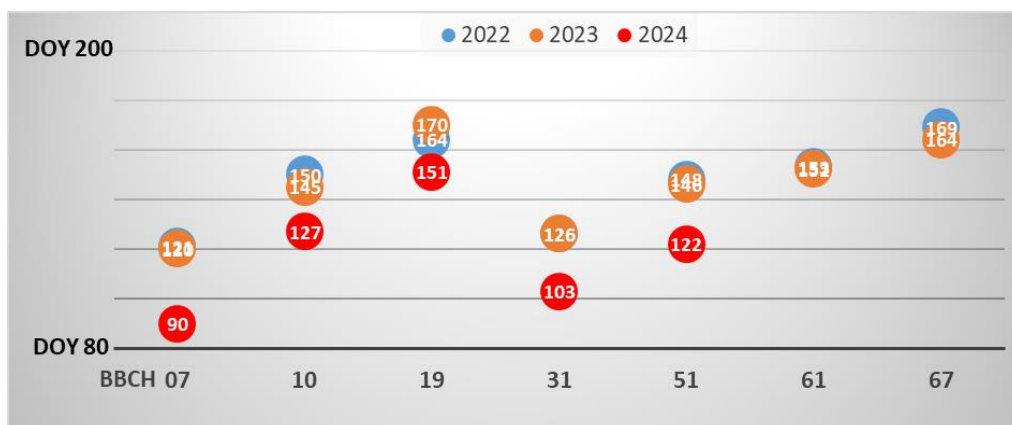
Zima 2024 bola v podtatranskej oblasti mimoriadne teplá. Okrem januára, ktorého priemerná teplota vzduchu mala zápornú hodnotu -2,7 °C, čo je v porovnaní s dlhodobým priemerom 1981-2021 (SHMU, 2016) o 1,5 °C viac, boli nasledujúce mesiace v kladných hodnotách. Vo februári dosiahla T_{avg} 3,2 °C, v marci 4,5 °C a v apríli 8,5 °C. Dlhodobý priemer pre február je -3,4 °C, pre marec 0,2 °C a pre apríl 5,7 °C (SHMU, 2016), čiže v roku 2024 došlo k prekročeniu týchto hodnôt o 6,6 °C vo februári, o 4,7 °C v marci a 2,8 °C v apríli. Podľa údajov Európskeho centra pre strednodobé predpovede počasia bol rok 2024 najteplejším rokom v Európe za posledných 85 rokov. Čo sa týka jednotlivých sezón, tak teplota v zime (december-február) bola 2. najvyššia a teplota jari (marec-máj) bola najvyššia. Extrémne teplotné anomálie začali už v júni 2023 a trvali celý rok 2024 (<https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024#fb60f04b-09ca-44c9-9fdc-5bdcf2532313>).

Priemerné teploty jednotlivých dní obdobia od januára do apríla (JFMA) 2024 sú zobrazené na obrázku 1, na ktorom je viditeľný nástup výrazného oteplenia koncom marca 2024 (od DOY 87). Toto mimoriadne teplé počasie bolo spôsobené rozsiahlym systémom vysokého tlaku vzduchu nad južnou Európou, ktorý uľahčil advekciu extrémne teplého vzduchu pozdĺž jej okraja. Počas tohto obdobia neboli pozorované minimálne teploty pod bodom mrazu a priemerné denné teploty stúpali až k 16 °C, pričom denné maximá počas viacerých dní presahovali hranicu 20 °C.



Obr. 1 Priebeh priemernej teploty vzduchu (T_{avg}) počas mesiacov JFMA v extrémne teplom roku 2024.
Fig. 1 Course of average air temperature (T_{avg}) during the months of JFMA in the extremely warm year 2024.

Takéto výrazné oteplenie malo za následok skorý nástup prvých jarných fenologických fáz – najskôr rozpuk vegetatívnych púčikov (BBCH07, DOY 90) a následne aj predlžovania výhonkov (BBCH31, DOY 103). Oproti predchádzajúcim rokům 2022 a 2023 došlo k posunu začiatku týchto dvoch fenofáz o viac ako 20 dní (Obr. 2). Na začatie fenofázy BBCH07 potrebovala borovica limbová sumu efektívnych teplôt GDD 29,0 °C v rámci 11 AGD. Táto hodnota je rovnaká ako priemer GDD určený pre túto fenofázu u borovice limbovej v ekotóne alpskej stromovej vegetácie vo Vysokých Tatrách, a to GDD 29,0 °C v rámci 9 AGD (LUKASOVÁ et al., v recenznom konaní).



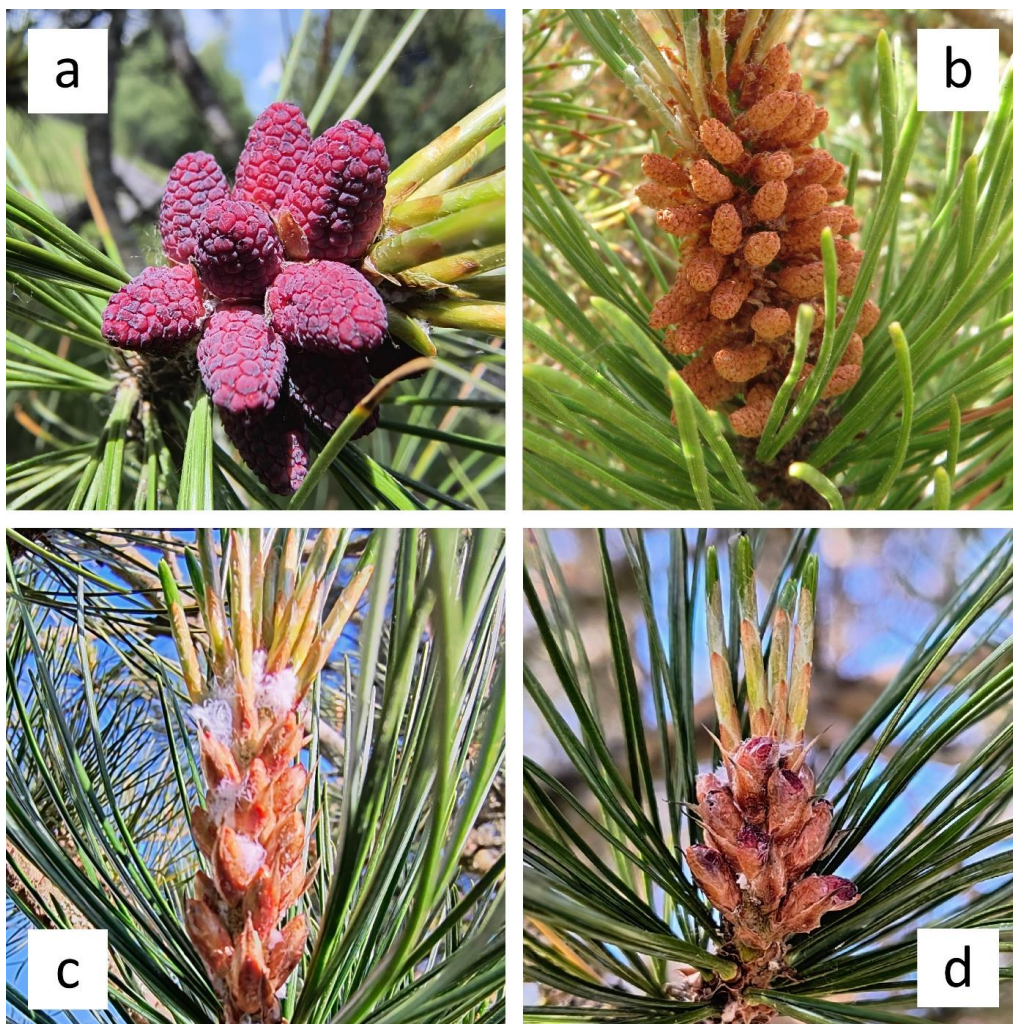
Obr. 2 Porovnanie nástupu fenologických fáz označených kódmi BBCH v rokoch 2022, 2023 a 2024.
Fig. 2 Comparison of the onset of phenological phases marked with BBCH codes in 2022, 2023 and 2024.

Prebiehajúci fenologický vývoj bol v roku 2024 prerušený výraznou zmenou počasia, ktorá nastala od 16. apríla

(https://www.wetterzentrale.de/reanalysis.php?map=1&model=era&var=2&jaar=2024&maand=4&dag=16&h=0&nmaps=24#google_vignette). Spôsobil ju presun mohutnej tlakovej výše zo Stredomoria nad východný Atlantik a pobrežie západnej Európy, čo umožnilo presun tlakovej níže z Islandu ponad južnú Škandináviu smerom nad severovýchodnú až východnú Európu. Po jej zadnej strane začal na Slovensko prenikať veľmi chladný arktický vzduch, ktorý priniesol mimoriadne 11-dňové ochladenie. Priemerná denná teplota počas tohto obdobia bola 3,3 °C a minimálna -1,6 °C. Záporné minimálne teploty sa vyskytli počas 10 z 11 dní, pričom v dvoch dňoch bol zaznamenaný silný mráz pod -2,2 °C, konkrétne 17. apríla -3,6 °C a 26. apríla -2,6 °C. Návrat mrazu a sneženia po predchádzajúcom veľmi teplom období zastihol limbu počas prebiehajúcej fenofázy predlžovania výhonkov. Po skončení falošnej jari fenologický vývoj pokračoval s určitým oneskorením, hoci stále prebiehal o niečo skôr ako v predchádzajúcich rokoch (Obr. 2). Hoci poškodenie nebolo viditeľné bezprostredne po skončení mrazov, následkom vymrznutia výhonkov bol narušený reprodukčný cyklus, nakoľko generatívne fenologické fázy neprebehli správne. V období butonizácie, ktorá začala v roku 2024 v DOY 130 boli pozorované degenerované samčie kvety, ktoré zostali v púčikových šupinách a neprášili peľ. Degenerované samčie kvety následne vyschli a postupne opadávali. Samičie kvety - budúce šišky, boli na tejto lokalite tiež postihnuté mrazom, nakoľko po falošnej jari 2024 nebola identifikovaná jediná šiška v korunách sledovaných desiatich jedincov. Na dosiahnutie fenofázy BBCH51 potrebovala borovica limbová sumu efektívnych teplôt GDD 172,7 °C v rámci 35 AGD. Suma GDD pre butonizáciu je podobná ako priemer GDD určený pre borovicu limbovú v ekotóne alpinskej stromovej vegetácie vo Vysokých Tatrách, a to GDD 174,4 °C v rámci 42 AGD (LUKASOVÁ et al., v recenznom konaní).

Neuner (2014) uvádza, že nové výhonky u borovice limbovej sú vysoko náchylné na poškodenie mrazom, pričom počiatočné poškodenie mrazom možno pozorovať po vystavení teplote -4,8 °C. Minimálne teploty na fenologickej ploche v Starej Lesnej nedosiahli počas fenologického vývoja takúto hodnotu, napriek tomu reprodukčný cyklus bol narušený už pri teplotných minimách dosahujúcich -3,6 °C. Predčasné ukončenie dormancie a následná neschopnosť reaklimatizácie borovice limbovej na extrémne teploty, a tým spôsobená znížená úroveň mrazuvzdornosti môžu byť obzvlášť kritické pri predpokladaných klimatických zmenách (NEUNER 2014).

V rovnakom období ako v Starej Lesnej boli poškodené limby aj v oblasti Skalnatej doliny vo Vysokých Tatrách v nadmorskej výške 1650 m n.m. Tieto sa vďaka oneskorenému fenologickému vývoju vplyvom vyššej nadmorskej výšky čiastočne vyhlili celkovému poškodeniu reprodukčných orgánov napriek tomu, že mrazy v tejto oblasti boli výrazne silnejšie a dosahovali až -8,3 °C. Poškodené boli iba samčie orgány, ktoré boli podobne degenerované a neschopné opelenia. Napriek tomu niekoľko šišíek sa v roku 2024 vytvorilo (LUKASOVÁ et al., v recenznom konaní), avšak či došlo k ich opeleniu prostredníctvom vzdialených jedincov borovice limbovej zostáva nateraz neisté. Ak neopelené samičie kvety v prvej vegetačnej sezóne neopadnú, typickými príznakmi nízkeho alebo neúspešného opelenia sú deformované tvary, spomalený rast alebo strata šišíek, ktoré sú zvyčajne viditeľné po dokončení vývoja šišíek na konci druhej vegetačnej sezóny (OPPITZ 1971).



Obr. 3 Samčie kvety na borovici limbovej v čase nástupu BBCH51 (a) BBCH61 (b) v rokoch, kedy nebolo evidované poškodenie neskorými mrazmi a v roku 2024 (c, d), kedy sa vplyvom mrazov v dôsledku falošnej jari vytvorili degenerované kvety neschopné prášiť peľ

Fig. 3 Male flowers on Swiss stone pine at the time of BBCH51 (a) and BBCH61 (b) in the years when damage by late frosts was not recorded and in 2024 (c, d), when frosts caused the formation of degenerated flowers unable to pollinate due to false spring.

ZÁVER

V našej štúdii sme sa analyzovali dopad falošnej jari na vegetatívne a generatívne orgány borovice limbovej v súvislosti s priebehom fenologických fáz. Zistili sme, že hoci je tento druh borovice prispôsobený rastu v extrémnych vysokohorských podmienkach, narušenie vegetačných cyklov silným mrazom v období citlivých rastových fáz spôsobilo poškodenie generatívnych orgánov, čím bol v roku 2024 narušený jej reprodukčný cyklus. Je možné predpokladať, že vplyvom otepľovania klímy sa bude nástup fenologických fáz u tohto druhu posúvať do skorších termínov rýchlejšie ako výskyt neskorých mrazov, čo môže výrazným spôsobom ovplyvniť jeho rast, konkurenčnú schopnosť a distribučné limity.

Pod'akovanie

Prezentovaný príspevok vznikol vďaka finančnej podpore projektu VEGA 2/0048/25 a VEGA 2/0115/25

LITERATÚRA

- AUGSPURGER, C. K. 2013. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. In *Ecology* 94, s. 41 – 50. doi: 10.1890/12-0200.1
- CARADONNA, P. J., BAIN, J. A. 2016. Frost sensitivity of leaves and flowers of subalpine plants is related to tissue type and phenology. In *Journal of Ecology* 104(1), s. 55 – 64. doi: 10.1111/1365-2745.12482
- CASALEGNO, S., et al. 2010. Vulnerability of *Pinus cembra* L. in the Alps and the Carpathian mountains under present and future climates. In *Forest Ecology and Management* 259, s. 750 – 761.
- IPCC 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 s. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- KOLLAS, C., et al. 2014. Spring frost and growing season length co-control the cold range limits of broad-leaved trees. In *Journal of Biogeography* 41(4), s. 773 – 783. doi: 10.1111/jbi.12238
- KÖRNER, C. 2006. Significance of temperature in plant life. In: MORISON, J. I. L., MORECROFT, M.D. (eds) *Plant growth and climate change*. Oxford: Blackwell, s. 48–69. doi: 10.1002/9780470988695.ch3
- KÖRNER, C., et al., 2016. Where, why and how? Explaining the low-temperature range limits of temperate tree species. In *Journal of Ecology* 104, s. 1076 – 1088. doi: 10.1111/1365-2745.12574
- LARCHER, W. 2005. Climatic constraints drive the evolution of low temperature resistance in woody plants. In *Journal of Agricultural Meteorology* 61, s. 189 – 202. doi: 10.2480/agrmet.61.189
- LENZ, A., et al. 2013. European deciduous trees exhibit similar safety margins against damage by spring freeze events along elevational gradients. In *New Phytologist* 200, s. 1166 – 1175. doi: 10.1111/nph.12452
- LUKASOVÁ, V., et al. (v recenznom konaní). False spring disrupted the life cycles of *Pinus cembra* and *Vaccinium myrtillus* at the alpine treeline ecotone in the High Tatras (Western Carpathians). In *Regional Environmental Change*.
- MARINO, G. P., et al. 2011. Reconstruction of false spring occurrences over the southeastern United States, 1901–2007: an increasing risk of spring freeze damage? In *Environmental Research Letters* 6, s. 024015. doi: 10.1088/1748-9326/6/2/024015
- MARTINUZZI, S., et al. 2019. Future changes in fire weather, spring droughts, and false springs across U.S. National Forests and Grasslands. In *Ecological Applications* 29(5), s. e01904. doi: 10.1002/eap.1904
- MEIER, U. 2001. Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants. BBCH Monograph, 2nd ed. Quedlinburg, Germany: Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, 204 s.
- NEUNER, G. 2014. Frost resistance in alpine woody plants. In *Frontiers in Plant Science* 5, s. 117002. doi: 10.3389/fpls.2014.00654
- OPPITZ, H. 1971. Pokusný semenný sad borovice limby (*Pinus cembra* L.) v Javorine v rokoch 1964–1967. In *Zborník prác o Tatranskom národnom parku* 13, s. 183 – 242
- PARDEE, G. L., et al. 2017. Direct and indirect effects of episodic frost on plant growth and reproduction in subalpine wildflowers. *Global Change Biology* 24(2), s. 848 – 857. doi: 10.1111/gcb.13865
- QUAMME, H. A. 1995. Deep supercooling in buds of woody plants. In LEE, R. E., et al. (eds) *Biological Ice Nucleation and Its Application*. St. Paul: APS Press, s. 183 – 200.
- REICHSTEIN, M., et al. 2013. Climate extremes and the carbon cycle. In *Nature*, 500(7462), s. 287 – 295. <https://doi.org/10.1038/nature12350>
- SAKAI, A., LARCHER, W. 1987. Frost survival of plants: responses and adaptation to freezing stress. Berlin: Springer, 321 s. ISBN: 978-3-642-71747-5
- SHMU 2016. Klimatologické normály na Slovensku za obdobie 1981 – 2010. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 217 s.
- SNYDER, R. L., MELO-ABREU, J. P. 2005. Frost Protection: fundamentals, practice and economics. *FAO Environment and Natural Resources Service Series* 1, 241 s.
- SZALAY, L., et al. 2019. Frost hardness of apple (*Malus X domestica*) flowers in different phenological phases. In *Scientia Horticulturae* 253, 309 – 315. doi: 10.1016/j.scienta.2019.04.055
- ŠKVARENINOVÁ, J., et al. 2021. Occurrence of spring frosts and their influence on flowering of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in Slovakia. In *Zprávy lesnického výzkumu* 66(3), s. 155 – 163
- ŠKVARENINOVÁ, J., et al. 2022. The effect of climate change on spring frosts and flowering of *Crataegus laevigata* – The indicator of the validity of the weather lore about “The Ice Saints”. In *Ecological Indicators* 145, s. 109688. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109688

- TÓTH, et al. 2019. Geographic isolation and climatic variability contribute to genetic differentiation in fragmented populations of the long-lived subalpine conifer *Pinus cembra* L. in the western Alps. In *BMC Evolutionary Biology* 19, s. 190. doi: 10.1186/s12862-019-1510-4.
- VITRA, A., et al. 2017. Frost hardening and dehardening potential in temperate trees from winter to budburst. In *New Phytologist* 216(1), s. 113 – 123. doi: 10.1111/nph.14698
- WOJNICKA-PÓLTORAK, A., et al. 2015. Genetic Resources of *Pinus cembra* L. Marginal Populations from the Tatra Mountains: Implications for Conservation. In *Biochemical Genetics* 53, s. 49–61 (2015). doi: 10.1007/s10528-015-9670-4
- ZAHRADNÍČEK, P., et al. 2024. Past and present risk of spring frosts for fruit trees in the Czech Republic. In *Theoretical and Applied Climatology* 155, s. 965 – 984. doi: 10.1007/s00704-023-04671-2
- ZOHNER, C. M., et al. 2018. Global warming reduces leaf-out and flowering synchrony among individuals. In *eLife* 7, s. e40214. doi: 10.7554/eLife.40214
- ZOLLER, H. 1991. *Pinus*. In CONERT, H.J., et al. (eds) *Gustav Hegi-Illustrierte Flora von Mitteleuropa*. Berlin: Blackwell, s. 77–83.

POSÚDENIE POŽIARNEHO NEBEZPEČENSTVA V SMREKOVÝCH LESOCH TANAPU V DÔSLEDKU ZMIEN MIKROKLIMATICKÝCH PODMIENOK PO KALAMITÁCH

Veronika BABNIČOVÁ^{1*} – Lenka MALOVCOVÁ¹ – Milan OSTRIHOŇ¹ – Martin JANČO² –
Paulina NALEVANKOVÁ¹ – Jaroslav VIDO¹ – Jozef ZVERKO¹ – Adriana LEŠTIANSKA¹
Lenka BALKOVÁ^{1,5} – Ilja VYSKOT⁴ – Jaroslav ŠKVARENINA^{1,3,*}

¹Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta TU vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen; *email: skvarenina@tuzvo.sk; xbabnicova@is.tuzvo.sk

²Výskumná základňa pre horskú hydrológiu Liptovský Mikuláš, Ústav hydrológie SAV, v. v. i. Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

³Ústav vied o Zemi SAV, v.v.i., Dúbravská cesta 9, P.O. BOX 106 840 05 Bratislava

⁴Ústav environmentalistiky a prírodných zdrojů, Fakulta regionálního rozvoje a mezinárodních studií, Mendelova univerzita v Brně, tř. Generála Píky 7, 61300 Brno

⁵Fakulta ekológie a environmetalistiky TU vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen

ABSTRACT

Babničová, V., Malovcová, L., Ostrihoň, M., Jančo, M., Nalevanková, P., Vido, J., Zverko, J., Leštianska, A., Balková, L., Vyskot, I., Škvarenina, J.: Assessment of fire risk in Tatra National Park spruce forests due to changes in microclimatic conditions following natural disasters

This paper focuses on the assessment of microclimatic factors influencing fire danger in mountain spruce forests in the Western Tatras. A comparison of two types of forest stands - living and dying - confirmed that changes in vegetation cover significantly influence microclimatic conditions and thus the fire risk. A higher fire risk was recorded in the area with dying vegetation, where the combination of high temperatures, low air humidity, intense global radiation and high evapotranspiration significantly increased the probability of fire. In contrast, significantly more stable and least dangerous conditions were provided by living forest vegetation, which maintained a shady microclimate with higher humidity and lower temperatures in the ground layer. From microclimatic measurements, we calculated the Angström weather index for the entire fire season (May to October) and determined the fire danger classes (FDC) for these two study plots. In the living spruce forest, almost 45% of the fire season days reached a very low FDC of 1, and the highest FDC of 5 was not reached at all. Only slightly more than 30% of days had an FDC of 3 or higher, and approximately 10% of days had a fire danger class of 4 and 5. In contrast, in the dying stand, after the needles fell, the light and temperature conditions increased, and the air humidity decreased. We concluded that the most risky 5 FDC was reached on 11% of the fire season days. Overall, during the monitored period, 42% of days had an FDC of 3 or higher, and almost 16% of days had a fire danger class of 4 and 5. The results showed that the most risky period for the studied areas in 2024 was July and August, when the occurrence of days with fire danger class 3 and higher was most frequent. The fire index confirmed that the process of spruce stand dieback creates microclimatic conditions that increase the potential for fires.

Key words: wildfire, fire danger, meteorological factors, fire weather indices, mountain spruce forests, forest dieback

ÚVOD

Oheň je prírodný činiteľ, ktorý formoval evolúciu suchozemskej bioty a ovplyvňoval globálne biogeochemické cykly už od vzniku suchozemských ekosystémov (Adámek *et al.* 2015). Významný posun v jeho fungovaní nastal približne pred jedným miliónom rokov, keď sa prvýkrát objavuje doložené využívanie ohňa predkami človeka. Homo sapiens je jediný druh, ktorý dokáže oheň vedome a systematicky využívať, a touto schopnosťou zásadne zasahuje do fungovania prírodného prostredia. V priebehu evolučného vývoja sa tak človek stal dominantným iniciátorom požiarov v krajine. Vegetácia sa v dôsledku dlhodobého vystavenia pôsobeniu ohňa adaptovala, čo viedlo k vzniku druhov a celých ekosystémov s určitou mierou pyrofýlnosti – teda prispôbenosti na existenciu v prostredí s periodickým výskytom požiarov (Bobek *et al.* 2018).

Lesné požiare sú v určitej miere prirodzenou súčasťou mnohých ekosystémov a ich vplyv sa líši v závislosti od intenzity, frekvencie, typu lesa a zásahu človeka. Z ekologického hľadiska môžu požiare zohrávať dôležitú úlohu pri udržiavaní rovnováhy v niektorých prírodných biotopoch – podporujú obnovu rastlinných spoločenstiev, uvoľňujú živiny do pôdy a redukovávajú nahromadený horľavý materiál, čím znižujú riziko budúcich katastrofických požiarov (tzv. prescribed burning theory). Mnohé rastliny v „ohňových ekosystémoch“ si dokonca vyvinuli špecifické adaptácie na tento typ disturbance (Fernandes *et al.* 2004; Goldammer a Furyaev 2013; Moretti *et al.* 2004). Na druhej strane, nadmerné a nekontrolované požiare spôsobené hlavne ľudskou činnosťou môžu viesť k obrovským ekonomickým a kultúrnym škodám, rozpadom lesných ekosystémov, strate biodiverzity, erózii pôdy, znečisteniu ovzdušia, rastu CO₂ v ovzduší a zdravotným rizikám pre obyvateľstvo (Chandler *et al.* 1983; Holecý a Hanewinkel 2006; Korená Hillaiová *et al.* 2023; Koristeková *et al.* 2020; Tuček a Majlingová 2007; a i.). Z tohto dôvodu je potrebné vnímať lesné požiare ako dynamický jav s komplexnými, často protichodnými dôsledkami pre životné prostredie a spoločnosť (Paunas a Keeley 2009). Požiare lesov v Slovenskej republike a v širšom regióne strednej Európy sa v posledných desaťročiach stali častejšími a v niektorých oblastiach aj intenzívnejšími. Napriek tomu, že rozsah požiarov je v porovnaní s krajinami južnej Európy (napr. Grécko, Taliansko, Španielsko) stále relatívne nízky, dochádza k nárastu rizikových období, počtu požiarov a ich potenciálnej ničivosti (European Environment Agency 2020, Kolektív PHaZZ 2023). Uvedené materiály za hlavné príčiny lesných požiarov považujú poveternostné a antropogénne faktory. K prvým patria hlavne zvyšujúce sa teploty vzduchu, klesajúca vlhkosť vzduchu a rastúci výpar, pokles úhrnu zrážok, zmeny snehových pomerov, jarné a letné sucha, búrky a elektrické výboje, zmeny vodnej bilancie krajiny (Škvarenina *et al.* 2009, Vido *et al.* 2015, 2024 a i.). Ľudské faktory predstavujú hlavne nedbalosť a neopatrné zakladanie ohňov v prírode, ako aj podpaláctvo. Dôležitým faktorom je aj nedostatočné manažovanie rizikových plôch, napr. zarastanie opustených pasienkov a lúk, ktoré zvyšuje akumuláciu horľavého materiálu (Kolektív PHaZZ 2023; Škvarenina *et al.* 2024).

Požiarne štatistiky od roku 2000 poukazujú na nárast počtu požiarov prírodného prostredia na severe Slovenska. Príčinou sú časté víchrice a následná gradácia podkôrneho hmyzu, podmienené teplým a suchým počasím, ktoré spôsobujú nárast kalamitného materiálu v horských lesoch, čo predstavuje zvýšené riziko vzniku a šírenia požiarov (Konópka *et al.* 2021, Korená Hillaiová *et al.* 2024). Práca Ostrihoň *et al.* (2024) na príklade bukových porastov ukázala, že monitorovanie a pochopenie mikroklimatických podmienok lesov je kľúčové pre prevenciu lesných požiarov, pretože tieto lokálne atmosférické podmienky priamo ovplyvňujú horľavosť paliva, potenciál vznietenia a šírenie ohňa. Autori tejto štúdie zistili, že obsah vlhkosti lesného paliva (listy, ihličie, konáre, mŕtve drevo atď.) je hlavným faktorom ovplyvňujúcim riziko požiaru. Mikroklima, ktorá sa môže výrazne líšiť aj v rámci malej oblasti, určuje, ako rýchlo palivo vysychá. Vyššie teploty prízemnej vrstvy znižujú vlhkosť paliva. Miesta s priamym slnečným žiarením alebo menším tienением korunami stromov majú vyššie teploty a rýchlejšie vysychanie. Podobne aj nízka relatívna vlhkosť vedie k rýchlejšiemu vysychaniu palív. Husté vnútro lesných porastov má tendenciu mať vyššiu vlhkosť vďaka zatieneniu a evapotranspirácii vegetácie, zatiaľ čo okraje lesov alebo narušené oblasti (napr. po ťažbe dreva) môžu byť výrazne suchšie.

Cieľom predkladanej publikácie bolo vyhodnotenie miery požiarneho nebezpečenstva v horských smrekových porastoch Západných Tatier. Hodnotenie vychádzalo z mikroklimatických údajov získaných prostredníctvom terénneho výskumu na experimentálnych plochách. Tieto plochy reprezentovali dva diametrálne rôzne štádiá vitality smrekového porastu – živý a odumierajúci porast. Sekundárnym cieľom bola analýza mikroklimatických charakteristík týchto dvoch lesných porastov a zhodnotenie ich vplyvu na podmienky pre vznik a šírenie požiaru.

MATERIÁL A METÓDY

Výskumné merania prebiehali v lokalite Červenec (v blízkosti horskej chaty „Pod Náružím“). Táto krasová planina sa nachádza v západnej časti Tatranského národného parku (TANAP). Geomorfologický podcelok Západné Tatry sa delí na 6 geomorfologických častí, pričom experimentálna plocha spadá do geomorfologickej časti Sivý vrch. Výskumná plocha je južne orientovaný svah so sklonom cca 60 %, situovaný pod hornou hranicou lesa, v nadmorskej výške približne 1420 m n. m. Z hľadiska lesnickej typológie predmetná plocha spadá do 7. smrekového vegetačného stupňa a do skupín lesných typov *Sorbetto Piceetum* (60 %) a *Acereto-Piceetum* (40 %). Podľa Stanovej a Valachoviča (2002) lesné spoločenstvá patria ku karpatským subalpínskym smrekovým lesom (*Picea*) a kyslomilným smrekovým lesom (*Vaccinio-Piceetea*). Predmetné výskumné plochy tvorí prestarnutý smrekový porast s vekom viac ako 120 rokov a redším zakmenením na úrovni 0,6. Smrekový porast pozostáva zo stromov s priemernou hrúbkou kmeňa 40 cm a priemernou výškou viac ako 26 m (Oreňák *et al.* 2013). Drevinové zloženie experimentálnej oblasti je tvorené hlavne smrekom (*Picea abies*), sčasti aj jarabinou vtáčou (*Sorbus aucuparia*). Pôsobením prírodných škodlivých činiteľov ako napr. lykožrút smrekový (*Ips typographus*) došlo k prvému výraznejšiemu odumieraniu už v letnom období roku 2012. K ďalším výrazným prejavom odumierania v ešte väčšej miere v porovnaní s rokom 2012 došlo v roku 2017 a následne v rokoch 2022–2023. Staršie, resp. skôr odumreté stromy, resp. celé časti porastov v stojacom aj ležiacom stave, sú nahusto pokryté a prerastené lišajníkom pakonárikom otrubovým (*Pseudovernia furfuracea*) (Babničová 2025).

Praktický výskum bol vykonaný v rámci požiarnej sezóny roku 2024 (mesiace máj až október). Pre účely tejto publikácie sme vyhodnotili dve kontrastné výskumné plochy (obr. 1):

- živý lesný porast (Living forest), pozostávajúci výlučne so živých smrekov,
- porast v procese odumierania (Dead forest), tvorený 80 % odumretými a stojacimi stromami.

Na oboch výskumných plochách sú umiestnené mikrometeorologické stanice vybavené snímačmi Minikin THi a RTHi (fi. EMS Brno), určené na meranie teploty ($^{\circ}\text{C}$), relatívnej vlhkosti vzduchu (%) a globálneho slnečného žiarenia ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$).

Z nameraných mikrometeorologických údajov bola metódou podľa Penmana (1948) vypočítaná hodnota potenciálnej evapotranspirácie (PET) v $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Následne sa vypočítal Angströmov požiarový index (AI). Z absolútnej hodnoty AI sa stanovil stupeň nebezpečenstva požiaru pre konkrétnu výskumnú plochu. Podľa práce Škvarenina *et al.* (2004) boli absolútne hodnoty indexov zatriedené do príslušných 5 stupňov požiarneho nebezpečenstva nasledovne: 1 - veľmi nízke; 2 – nízke; 3 – stredné; 4 – vysoké; 5 - veľmi vysoké nebezpečenstvo lesného požiaru.



Obr. 1: Mikrometeorologické stanice, živý lesný porast (vľavo) a porast v procese odumierania (vpravo) (snímka: J. Škvarenina)

Fig. 1: Micrometeorological stations, living forest (left) and dead forest (right) (photo: J. Škvarenina)

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Analýza mikroklimy porastov experimentálnych plôch

Podľa meraní na daných lokalitách boli zozbierané údaje spracované v tabuľkách 1 a 2. Údaje uvedené v riadku „season“ tvoria údaje pre hodnotené obdobie máj až október 2024 (1.5.2024–23.10.2024), pričom pri globálnej radiácii a potenciálnej evapotranspirácii (PET) ide o denné sumy hodnôt, ktoré boli následne spracované ako mesačné resp. sezónne hodnoty. Minimálna teplota vzduchu, maximálna teplota vzduchu, minimálna relatívna vlhkosť vzduchu a maximálna relatívna vlhkosť vzduchu boli vypočítané ako priemerné hodnoty pre jednotlivé mesiace resp. celé sledované obdobie.

Živý lesný porast

Hodnoty sledovaných mikrometeorologických prvkov zo stanice v živom lese podáva tabuľka 1. Globálna radiácia (GR), označujúca množstvo slnečnej energie, ktoré dopadá na jednotku plochy, dosiahla na ploche živého lesného porastu sezónnu sumárnu hodnotu $133,3 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Z jednotlivých mesiacov bola globálna radiácia najvyššia v mesiaci júl. Zo zistených údajov vyplýva, že hodnoty GR ovplyvňujú maximálne teploty vzduchu (T_{max}). Priemerná minimálna teplota vzduchu za celé sledované obdobie bola $7,5^{\circ}\text{C}$, pričom najnižšia priemerná teplota (T

min) spomedzi všetkých posudzovaných mesiacov bola v mesiaci október, a to 2,4 °C. Pre T max bola zistená najvyššia hodnota v mesiaci júl (21,2 °C), len o niečo nižšia bola v mesiaci august (20,8 °C). Za celú sledovanú požiarnu sezónu dosiahla priemerná maximálna teplota hodnotu 17,0 °C. Priemerná minimálna relatívna vlhkosť vzduchu (RV min) dosahovala najnižšie hodnoty počas mája. Pomerne nízke hodnoty RV min vykazovali aj mesiace júl a august. Priemerná hodnota za celé obdobie predstavovala 67,7 %. Priemerná maximálna relatívna vlhkosť vzduchu (RV max) bola najvyššia v mesiacoch jún, júl a august, čo súviselo so zrážkovými epizódami. Za celé sledované obdobie dosiahla priemer 99,0 %. Potenciálna evapotranspirácia (PET) dosiahla sumárnu maximálnu hodnotu v mesiaci júl, a to 28,8 mm. V období máj až október je sezónna sumárna hodnota PET na danej experimentálnej ploche 133,9 mm.

Tab. 1 Meteorologické hodnoty pre živý lesný porast v mesiacoch máj až október 2024 (GR – globálne žiarenie, T min – minimálna teplota vzduchu, T max – maximálna teplota vzduchu, RH min – minimálna relatívna vlhkosť vzduchu, RH max – maximálna relatívna vlhkosť vzduchu, PET – potenciálna evapotranspirácia)

Tab. 1 Meteorological values for the living forest stand from May to October 2024 (GR – global radiation, T min – minimum air temperature, T max – maximum air temperature, RH min – minimum relative air humidity, RH max – maximum relative air humidity, PET – potential evapotranspiration)

Mesiac/Month	GR (kWh.m ⁻²)	T min (°C)	T max(°C)	RH min (%)	RH max (%)	PET (mm)
May	26,8	4,9	15,0	60,2	97,3	28,5
June	29,4	8,3	18,5	70,9	100,0	24,8
July	30,9	10,4	21,2	64,7	100,0	28,8
August	25,1	10,7	20,8	66,9	100,0	25,1
September	13,521	6,8	14,5	72,6	99,9	15,9
October	7,6	2,4	9,9	72,5	96,3	10,7
season	133,3	7,5	17,0	67,7	99,0	133,9

Porast v procese odumierania

Hodnoty sledovaných mikrometeorologických prvkov zo stanice v odumierajúcom lese sú uvedené v tabuľke 2. Celková hodnota globálneho žiarenia (GR) dosiahla sumu 255,7 kWh.m⁻², pričom najvyššie hodnoty boli zaznamenané v júli (56,1 kWh.m⁻²). Minimálna teplota vzduchu (T min) počas sledovaného obdobia predstavovala 7,4 °C, pričom najchladnejším mesiacom bol október s minimom 2,2 °C. Maximálna teplota vzduchu (T max) dosiahla za požiarnu sezónu priemer 17,9 °C. Najvyššia hodnota bola nameraná v auguste (22,5 °C), tesne nasledovaná júlom (21,3 °C). Priemerná minimálna relatívna vlhkosť vzduchu (RV min) za sezónu dosiahla 60,3 %, pričom najnižšia hodnota bola zaznamenaná v máji (53,8 %). Maximálna relatívna vlhkosť vzduchu (RV max) požiarnej sezóny bola v priemere 97,6 %, pričom v mesiacoch jún až august dosahovala hodnotu až 99,9 %. Najvyššia mesačná hodnota potenciálnej evapotranspirácie (PET) bola zaznamenaná v júli (54,6 mm), zatiaľ čo celková hodnota PET za požiarnu sezónu (máj–október) predstavovala 253,9 mm.

Tab. 2 Meteorologické hodnoty pre odumierajúci lesný porast v mesiacoch máj až október 2024 (označenie stĺpcov ako v Tab. 1)

Tab. 2 Meteorological values for the dead forest stand from May to October 2024 (column labels as in Table 1)

Mesiac/Month	GR (kWh.m ⁻²)	T min (°C)	T max(°C)	RH min (%)	RH max (%)	PET (mm)
May	49,9	4,8	16,5	53,8	95,6	47,9
June	49,6	8,3	17,9	68,4	99,9	42,6
July	56,1	10,3	21,3	58,1	99,7	54,6
August	49,6	10,6	22,5	56,5	99,6	51,5
September	30,9	6,8	16,5	61,8	96,9	35,7
October	19,7	2,2	11,2	64,3	92,8	21,5
season	255,7	7,4	17,9	60,3	97,6	253,9

Porovnanie mikroklimatických údajov experimentálnych plôch

Živý lesný porast predstavuje vyváženéjšie klimatické prostredie spomedzi oboch skúmaných plôch. Vyššia stabilita teplôt, vyššia priemerná relatívna vlhkosť, najnižšie hodnoty globálnej radiácie a potenciálnej evapotranspirácie (PET) svedčia o schopnosti vegetácie efektívne regulovať mikroklimatické podmienky a tlmieť

extrémne vplyvy vonkajšieho prostredia (Tab. 3). Porast v procese odumierania vykazuje mierne vyššie hodnoty globálnej radiácie (nárast o 122,4 kWh.m⁻²) a maximálnych teplôt (nárast o 1,3 °C) v porovnaní so živým lesným porastom. Tento porast je vystavený vyššej insolácii, čo spôsobuje rýchlejšie vysychanie vegetácie a pôdy. Názorne to dokumentujú hodnoty PET, pričom v odumierajúcom poraste je potenciálna evapotranspirácia vyššia o 120 mm. Z aspektu požiarneho rizika nižšia relatívna vlhkosť (o 6,5 %) vedie k rýchlejšiemu vysychaniu jemného paliva, t.j. odumretých asimilačných orgánov, vetvičiek a organických zvyškov. Husté vnútro živého lesa si udržiava vyššiu vlhkosť vďaka neporušenej korunovej vrstve materského porastu. Mikroklima porastu v procese odumierania (kde 80 % stromov tvoria úplne odumreté jedince smreka) predstavuje prechodné štádium mikroklimatického režimu medzi zdravým plne zapojeným porastom a podmienkami voľnej (otvorenej) plochy, kde postupná strata vegetačného krytu znižuje schopnosť porastu regulovať mikroklimatické extrémny.

Tab. 3 Sezónne hodnoty meteorologických prvkov pre odumierajúci lesný porast v roku 2024 (označenie ako v Tab. 1)
Tab. 3 Seasonal meteorological values for dead forest stand in 2024 (labels as in Table 1)

	živý lesný porast /Living forest	Odumierajúci porast/Dead forest
GR (kWh.m ⁻²)	133,3	255,7
T min (°C)	2,4	2,2
T max(°C)	21,2	22,5
RH min (%)	60,2	53,8
RH max (%)	100,0	99,9
PET (mm)	133,9	253,9

Požiarň index a stupne požiarneho nebezpečenstva

V tejto práci sme použili osvedčený, dvojparametrový model požiarneho indexu podľa Angströma (AI). Tabuľky 4 a 5 zobrazujú počet dní v jednotlivých mesiacoch od mája do októbra. Obrázky 2 a 3 zobrazujú relatívnu početnosť dní [%] v príslušnom stupni požiarneho nebezpečenstva. Vo všetkých prípadoch rozdelených podľa stupňa požiarneho nebezpečenstva (SPN) 1 až 5 v sledovanom období na ploche so živým lesným porastom ako aj na ploche s odumierajúcim porastom. Zároveň uvádza súčet dní so stredným a vyšším stupňom požiarneho nebezpečenstva (SPN ≥3) a súčet dní s vysokým a veľmi vysokým stupňom požiarneho nebezpečenstva (SPN = 4 a 5).

Tab. 4 Počet dní podľa stupňa požiarneho nebezpečenstva (SPN) na ploche živý lesný porast v mesiacoch máj až október 2024 (SPN: 1 - veľmi nízke; 2 – nízke; 3 – stredné; 4 – vysoké; 5 - veľmi vysoké nebezpečenstvo lesného požiaru)

Tab. 4 Number of days by fire danger class (FDC) in areas of living forest stand from May to October 2024 (FDC: 1 - fire occurrence unlikely; 2. - fire conditions unfavourable; 3. - fireconditions favourable; 4 - fire conditions more favourable; 5. - fire occurrence very likely)

	SPN/FDC						
mesiac/Month	1.	2.	3.	4.	5.	3≥	4+5
May	11	11	9	0	0	9	0
June	16	1	9	4	0	13	4
July	10	11	5	5	0	10	5
August	9	12	6	4	0	10	4
September	16	6	8	0	0	8	0
October	17	0	1	5	0	6	5

Tab. 5 Počet dní podľa stupňa požiarneho nebezpečenstva (SPN) pre odumierajúci lesný porast v mesiacoch máj až október 2024 (SPN ako v tab. 4)

Tat. 5 Number of days by fire danger class (FDC) in areas dead forest stand from May to October 2024 (FDC as in Table 4)

	SPN/FDC						
mesiac	1.	2.	3.	4.	5.	3≥	4+5
May	6	11	11	2	1	14	3
June	13	9	8	0	0	8	0
July	7	8	12	1	3	16	4
August	8	8	6	1	8	15	9
September	15	2	6	4	3	13	7
October	16	0	2	1	4	7	5

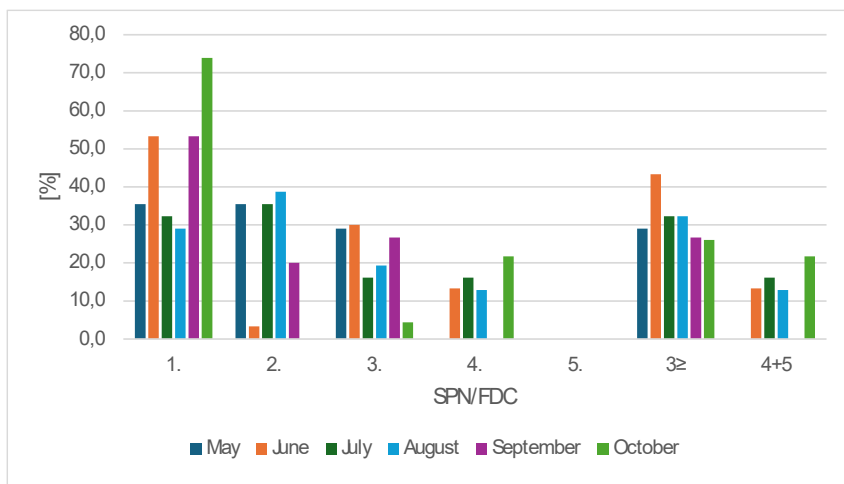
Na experimentálnej lokalite živý les v mesiaci máj dominovali veľmi nízke a nízke stupne požiarneho nebezpečenstva, pričom podiel dní so stredným a vyšším stupňom rizika ($SPN \geq 3$) dosiahol 29 %. V tomto mesiaci nebol v živom lese zaznamenaný žiadny deň s vysokým alebo veľmi vysokým požiarnym nebezpečenstvom. V júni sa situácia zhoršila – viac ako 43 % dní (13 dní) patrilo do kategórie stredného a vyššieho nebezpečenstva, pričom 13,3 % dní bolo hodnotených ako vysoké požiarne nebezpečenstvo ($SPN 4$). V júli sa rozloženie požiarneho nebezpečenstva vyrovnalo. 32,3 % dní patrilo do kategórie stredného a vyššieho nebezpečenstva, pričom vysoké nebezpečenstvo ($SPN 4$) bolo prítomné v 16,1 % dní. Tento mesiac tak predstavoval jedno z období so zvýšeným rizikom vzniku požiarov. Podobný trend pokračoval v auguste, keď stredné a vyššie požiarne nebezpečenstvo bolo zaznamenané v 32,3 % dní a vysoké nebezpečenstvo v 12,9 % dní. V septembri sa požiarne nebezpečenstvo opäť zmiernilo – až 53,3 % dní vykazovalo veľmi nízke požiarne nebezpečenstvo, pričom len 26,7 % dní bolo hodnotených ako stredné nebezpečenstvo. Vysoké ani veľmi vysoké nebezpečenstvo požiaru (4 a 5) sa v tomto mesiaci nevyskytlo. Október bol špecifickým mesiacom s najvyšším podielom dní s veľmi nízkym nebezpečenstvom požiaru (73,9 %), no zároveň obsahoval významný podiel dní s vysokým nebezpečenstvom (21,7 %). To naznačuje, že aj pri prevažne priaznivých podmienkach mohlo dôjsť ku krátkodobým obdobiam zvýšeného nebezpečenstva vzniku požiarov. Možno konštatovať, že najrizikovejšie mesiace z hľadiska požiarneho nebezpečenstva v živom lesnom poraste boli jún, júl a august, zatiaľ čo máj a september patrili medzi najmenej rizikové mesiace.

V máji bolo na ploche odumierajúceho lesného porastu viac ako 45 % dní so stredným a vyšším nebezpečenstvom požiaru ($SPN \geq 3$), pričom takmer 10 % dní vykazovalo vysoké alebo veľmi vysoké $SPN (4+5)$. V júni bolo 43,3 % dní s veľmi nízkym požiarnym nebezpečenstvom a len 26,7 % dní so stredným požiarnym nebezpečenstvom. Požiarne nebezpečenstvo bolo celkovo veľmi nízke, bez výskytu vysokých stupňov ($SPN 4+5 = 0$ %). V júli sa požiarne nebezpečenstvo zvýšilo – až 51,6 % (16 dní) patrilo k strednému alebo vyššiemu nebezpečenstvu vzniku požiaru, pričom vysoké a veľmi vysoké nebezpečenstvo bolo prítomné v 12,9 % dní. August vykazoval ešte vyššie riziko – 48,4 % dní patrilo do kategórie $SPN \geq 3$ a 29 % dní dosiahlo vysoké až veľmi vysoké nebezpečenstvo. Táto hodnota predstavuje najvyššiu hodnotu zo všetkých mesiacov. V septembri bolo 43,3 % dní so stredným alebo vyšším požiarnym nebezpečenstvom a 23,3 % dní s vysokým až veľmi vysokým požiarnym nebezpečenstvom, čo potvrdzuje pretrvávajúce nebezpečenstvo aj na konci leta. Október bol charakteristický najvyšším podielom dní s veľmi nízkym požiarnym nebezpečenstvom (69,6 %), avšak aj tu bolo zaznamenaných 21,7 % dní s vysokým alebo veľmi vysokým SPN , čo je pomerne výrazný podiel na konci sezóny.

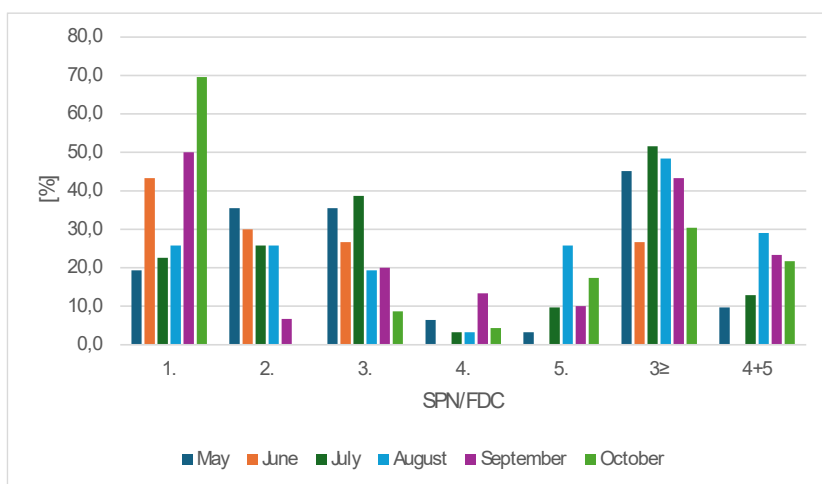
Celkové hodnotenie a porovnanie pre obidve experimentálne plochy za celú požiarnu sezónu roku 2024 znázorňuje obrázok 4. Hustý korunový zápoj živého smrekového porastu vytvára tienistú, chladnú a vlhkú porastovú mikroklimu, ktorá výrazne znižuje riziko vzniku požiarov. Sumárne skoro 45 % dní požiarnej sezóny dosahuje veľmi nízku hodnotu $SPN (1)$ a najvyššia hodnota $SPN(5)$ nebola dosiahnutá vôbec. 31,8% dní spadalo do kategórie $SPN \geq 3$ a 10,2 % dní bolo so stupňom požiarneho nebezpečenstva 4 a 5. Naopak, porast v procese odumierania stratil svoj asimilačný aparát, a preto sú jeho mikroklimatické podmienky odlišné, podstatne svetlomilnejšie, teplejšie a suchšie. Po opadnutí ihličia sa na lesnú pôdu dostáva viac slnečného žiarenia, ktoré ju mierne otepľuje. To vedie k dynamickejšiemu teplotnému a vlhkosťnému rozpätiu ako v prípade zdravého smrekového lesa. Zistili sme, že najrizikovejší $SPN (5)$ sa dosiahol u cca 11 % dní požiarnej sezóny. Celkovo za sledované obdobie 41,8 % dní malo $SPN \geq 3$ a 15,9 % dní bolo so stupňom požiarneho nebezpečenstva 4 a 5.

V podmienkach Slovenskej republiky sa nebezpečenstvu vzniku lesných požiarov ako následku vetrových a lykožrútových kalamít venovalo viacero autorov, napr. Oswald et al. (2005) alebo Hlaváč et al. (2007). Príčiny vzniku lesných požiarov na Slovensku rozoberali napr. Longauerová et al. (2014). Tieto práce sa však nevenovali aspektom vplyvu počasia, resp. porastovej mikroklimy. Pre praktické predchádzanie rizika vzniku požiarov pri obhospodarovanií lesov sú dôležité aj poznatky o palivovom potenciáli. Geopriestorovým modelovaním paliva v lesných porastoch sa zaoberali napr. Majlingová a Vida (2008); Sedliak a Majlingová (2014), Využívali pri tom

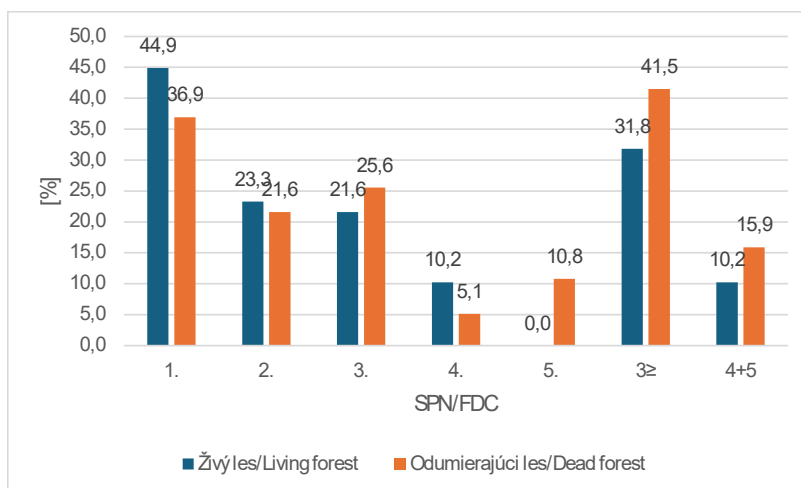
modely podľa typologických jednotiek (skupín lesných typov) a potenciálne palivo predstavovala prirodzená prízemná živá vegetácia (lišajníky, machy, tráv, byliny). Ako však konštatuje Šebeň (2022) výhodou týchto modelov je, že sa aplikovali pre každú jednotku priestorového rozdelenia lesa. Nevýhodou je, že nejde o skutočné meranú, ale len o potenciálnu vegetáciu. Ďalšou nevýhodou je, že tieto typologické jednotky nedokážu zohľadniť rôznorodé mikroklimatické podmienky. Autor tiež konštatuje, že zatiaľ nám nie sú známe práce, ktoré by na Slovensku analyzovali palivový potenciál pre lesné požiare z najčastejšie sa vyskytujúceho paliva v lesoch – suchej drevnej hmoty (Šebeň 2022). Jeho štúdia poskytuje reálne informácie o množstve a štruktúre mŕtveho dreva vhodného ako palivo s využitím údajov z druhej Národnej inventarizácie lesov SR. Kľúčovú úlohu pri vzniku lesného požiaru zohráva jemné palivo, jeho druh, kvantita, ale hlavne vlhkosť stav (Tamai a Goto 2003; Kane 2022; Ostrihoň et al. 2024). Práve detailnejšia detekcia rizikových miest z hľadiska požiarnej mikroklimy a využívanie vhodných požiarnych poveternostných indexov umožní do budúcnosti skvalitniť protipožiarnu prevenciu v kalamitných lesoch Slovenska.



Obr. 2 Relatívna početnosť dní podľa SPN na ploche živý lesný porast po jednotlivých mesiacoch roku 2024
Fig. 2 Relative frequency of days according to FDC in areas of living forest cover by month in 2024



Obr. 3 Relatívna početnosť dní podľa SPN pre odumierajúci lesný porast po jednotlivých mesiacoch roku 2024
Fig. 3 Relative frequency of days according to FDC in areas of dead forest cover by month in 2024



Obr. 4 Porovnanie histogramov relatívnych početností dní podľa SPN počas požiarnej sezóny 2024 v živom lese a v odumierajúcom lese

Fig. 4 Comparison of histograms of relative day frequencies according to FDC during the 2024 fire season in living forest and dead forest

ZÁVER

Predložená práca sa venuje hodnoteniu mikroklimatických faktorov ovplyvňujúcich požiarne nebezpečenstvo v horských smrečinách Západných Tatier. Porovnaním dvoch typov plôch - živého lesného porastu a lesného porastu v štádiu odumierania, sa potvrdilo, že zmeny vo vegetačnom kryte významne ovplyvňujú mikroklimatické podmienky a tým a riziko vzniku požiarov. Vyššie požiarne nebezpečenstvo bolo zaznamenané na ploche s odumierajúcim porastom, kde kombinácia vysokých teplôt, nízkej vlhkosti vzduchu, intenzívnej globálnej radiácie a vysokej evapotranspirácie výrazne zvyšovala pravdepodobnosť vzniku požiaru. Naopak, výrazne stabilnejšie a najmenej nebezpečné podmienky poskytoval živý lesný porast, ktorý si udržal tienistú mikroklimu s vyššou vzdušnou vlhkosťou a nižšími teplotami v prízemnej vrstve. Z mikroklimatických meraní sme pre celú požiarnu sezónu (máj až október) vypočítali poveternostný index podľa Angströma a stanovili stupne požiarneho nebezpečenstva (SPN) pre tieto dve skúmané plochy. V živom smrekovom lese takmer 45 % dní požiarnej sezóny dosahuje SPN veľmi nízky (1) a najvyšší 5-ty, veľmi vysoký SPN sa nedosiahol vôbec. Len mierne nad 30 % dní malo SPN $\geq$ 3 a cca 10 % dní bolo so stupňom požiarneho nebezpečenstva 4 a 5. Naopak, v poraste v procese odumierania, sa po opadnutí ihličia zvýšili svetelné a teplotné pomery a poklesla vlhkosť vzduchu. Zistili sme, že najnebezpečnejší 5-ty SPN sa dosiahol pri 11% dní požiarnej sezóny. Celkovo bolo za sledované obdobie 42 % dní malo SPN $\geq$ 3 a takmer 16 % dní bolo so stupňom požiarneho nebezpečenstva 4 a 5.

Výsledky preukázali, že najrizikovejším obdobím pre skúmané plochy v roku 2024 boli mesiace júl a august, kedy bol výskyt dní so stupňom požiarneho nebezpečenstva 3 a vyšším najčastejší. Požiarne index potvrdil, že proces odumierania smrekových porastov vytvára mikroklimatické podmienky, ktoré výrazne zvyšujú potenciál vzniku lesných požiarov.

PodĎakovanie

Autori ďakujú za podporu projektom Agentúry na podporu výskumu a vývoja (APVV): projekty APVV-18-0347, APVV-19-0340, APVV-21-0224 a VV-MPV-24-0208. Taktiež ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) za podporu projektov: VEGA 2/0115/25, 2/0019/23 a 1/0443/23.

LITERATÚRA

Adámek, M., Bobek, P., Hadincová, V., Wild, J., & Kopecký, M., (2015). Forest fires within a temperate landscape: a decadal and millennial perspective from a sandstone region in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 336, 81-90.

Babničová, V., (2025). *Mikroklimatické aspekty požiarneho nebezpečenstva v horských smrečinách Západných Tatier*. Lesnícka fakulta TU vo Zvolene, Diplomová práca, ev. č.: LF-16271-22079, 71 s.

Bobek, P., Svobodová, H. S., Werchan, B., Švarcová, M. G., & Kuneš, P., (2018). Human-induced changes in fire regime and subsequent alteration of the sandstone landscape of Northern Bohemia (Czech Republic). *The Holocene*, 28(3), 427-443.

European Environment Agency (2020). *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2019*. <https://www.eea.europa.eu>

Fernandes, P., & Botelho, H., (2004). Analysis of the prescribed burning practice in the pine forest of northwestern Portugal. *Journal of environmental management*, 70(1), 15-26.

Goldammer, J. G., & Furyaev, V., (Eds.). (2013). *Fire in ecosystems of boreal Eurasia* (Vol. 48). Springer Science & Business Media.

Hlaváč, P., Chromek, I., Majlingová, A., (2007). Stanovenie rizika vzniku lesného požiaru vzhľadom na požiarne zaťaženie lesných porastov. In: Kunca, A. (ed.): *Aktuálne problémy v ochrane lesa 2007*, Zborník referátov z medzinárodného seminára, ktorý sa konal 12. apríla 2007 vo Zvolene, Zvolen, Národné lesnícke centrum, s. 89–95.

Holec, J., & Hanewinkel, M., (2006). A forest management risk insurance model and its application to coniferous stands in southwest Germany. *Forest Policy and Economics*, 8(2), 161-174.

Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D., (1983). *Fire in forestry*. Volume 1. Wiley, New York.

Kane, J.M., (2021). Stand conditions alter seasonal microclimate and dead fuel moisture in a Northwestern California oak woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308, 108602.

Kolektív PHaZZ (2023). *Ochrana lesov pred požiarimi*. Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky – Prezídium Hasičského a záchranného zboru. Bratislava. 2023. 15 s.

Konôpka, J., Šebeň, V., Konôpka, B., (2021). Vetrová kalamita na Slovensku – 19. 11. 2004. *Lesnícke štúdie* 70/2021. Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen, 175 s.

Korená Hillayová, M., Holécý, J., Koristeková, K., Bakšová, M., Ostrihoň, M., & Škvarenina, J. (2023). Ongoing climatic change increases the risk of wildfires. Case study: Carpathian spruce forests. *Journal of environmental management*, 337, 117620.

Korená Hillayová, M., Holécý, J., Korený, L., & Škvarenina, J. (2024). Reducing the negative impact of wildfire disasters through multi-scenario risk analysis of land investment. *Progress in Disaster Science*, 23, 100359

Koristeková, K., Vido, J., Vida, T., Vyskot, I., Mikloš, M., Mindáš, J., & Škvarenina, J. (2020). Evaluating the amount of potential greenhouse gas emissions from forest fires in the area of the Slovak Paradise National Park. *Biologia*, 75, 885-898.

Longauerová, V., Maľová, M., Nikolov, Ch., (2014). Lesné požiare a ich príčiny na Slovensku v rokoch 2009 – 2013. In: Kunca, A. (ed.): *Aktuálne problémy v ochrane lesa 2014*, Zborník referátov z 23. medzinárodnej konferencie konanej 23. – 24. 4. 2014 Nový Smokovec, Zvolen, Národné lesnícke centrum, s. 131–134.

Moretti, M., Obrist, M. K., & Duelli, P. (2004). Arthropod biodiversity after forest fires: winners and losers in the winter fire regime of the southern Alps. *Ecography*, 27(2), 173-186.

Oreňák, M., Vido, J., Hribík, M., Bartík, M., Jakuš, R., & Škvarenina, J., (2013). Intercepčný proces smrekového porastu vo fáze rozpadu v Západných Tatrách. *Zprávy lesníckeho výzkumu*, 58(4), 360-369.

Ostrihoň, M., Hillayová, M. K., Koristeková, K., Leštianska, A., Jančo, M., Vida, T., Vido, J., & Škvarenina, J. (2024). Influence of meteorological factors on the moisture content of fine forest fuels: responses of fire danger class to different microclimates on the example of European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(2), 223-237.

Osvald, A., Hlaváč, P., Chromek, I., (2005). Riziko požiarov, ako možný následok vetrových kalamít. In: Kunca, A. (ed.): *Aktuálne problémy v ochrane lesa 2005*, Zborník referátov z medzinárodného seminára konaného 28. – 29. 4. 2005 v Banskej Štiavnici, Zvolen, Lesnícky výskumný ústav Zvolen, s. 82–89.

Penman, H.L., (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil, and grass*. Proc. R. Soc. 1948, A193, 120–146.

Stanová, V., Valachovič, M., 2002. *Catalog of Slovak biotops*. DAPHNE – Institute of Applied Ecology, Bratislava, 225 p.

Šebeň, V., (2022). Odumreté drevo v lesoch Slovenska podľa výsledkov NIML – analýza paliva a požiarneho rizika. *Aktuálne problémy v ochrane lesa 2022*, roč. 3, no. 2, s. 102–110.

Škvarenina, J., Mindáš, J., Holécý, J., & Tuček, J., (2004). An analysis of the meteorological conditions during the two largest forest fire events in the Slovak Paradise National Park. *Meteorological Journal*, 7, 167–171

Škvarenina, J., Tomlain, J., Hrvol, J., Škvareninová, J., & Nejedlík, P., (2009). Progress in dryness and wetness parameters in altitudinal vegetation stages of West Carpathians: Time-series analysis 1951–2007. *Idojarás*, 113(1-2), 47-54.

Škvarenia J., Ostrihoň, M., Malovcová, L., Korená Hillaiová, M., Jančo, M., Borsányi, P., Korený, L., & Vyskot, I., (2024). Wildfire incidence and fire climatology of the Western Tatras Mts. *Acta Facultatis Forestalis*, 66 (1), 87-104

Tamai, K., Goto, Y., (2003). Fuel moisture estimation model for a deciduous secondary forest in Japan - A comparison of parameters under the different canopy. In: Proc. *5th Symposium on Fire and Forest Meteorology* and the *2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress*, Orlando.

Tuček, J., & Majlingová, A., (2007). *Lesné požiare v Národnom parku Slovenský Raj: Aplikácie geoinformatiky*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 173 s. ISBN 978-80-228-1802-5.

Vido, J., Tadesse, T., Šustek, Z., Kandrik, R., Hanzelová, M., Škvarenina, J., Škvareninová, J., & Hayes, M., (2015). Drought occurrence in central european mountainous region (Tatra National Park, Slovakia) within the period 1961–2010. *Advances in Meteorology*, 2015(1), 248728.

Vido, J., Borsányi, P., Nalevanková, P., Hanzelová, M., Kučera, J., & Škvarenina, J., (2024). Thunderstorm climatology of Slovakia between 1984–2023. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(9), 8651-8679.

ASSESSING THE ACCURACY OF INTERPOLATION METHODS IN EARTH OBSERVATION-BASED ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION

Alidou SAWADOGO¹ - Pavol NEJEDLIK¹ - Andrej TALL²

¹Earth Science Institute of Slovak Academy of Science v.v.i., Dúbravská cesta 9, Bratislava 840 05, Slovakia

²Institute Hydrology of Slovak Academy of Science v.v.i., Dúbravská cesta 9, Bratislava 840 05, Slovakia

ABSTRACT

Sawadogo, A., Nejedlyk, P., Tall, A.: Assessing the accuracy of interpolation methods in Earth observation based actual evapotranspiration estimation

Accurate estimation of actual evapotranspiration (ETa) is critical for sustainable water resource management, particularly in the context of changing climate patterns. The objective of this study was to estimate ETa using the PySEBAL model, evaluate the accuracy of linear and fixed interpolation methods for daily ETa estimation, and assess the correlation between estimated ETa and meteorological variables. The results showed that the linear interpolation method slightly outperformed the fixed method with R^2 , RMSE, and NSE values of 0.83, 1.00 mm, and 0.68, respectively, whereas the fixed method scored 0.80, 1.07 mm, and 0.64. Correlation analysis showed strong positive correlations between ETa and meteorological variables such as solar radiation, air and soil temperatures. Our findings indicate that combining the PySEBAL model and the linear interpolation method enables accurate daily ETa estimation.

Keywords: PySEBAL, crop coefficient, lysimeter, weather variables

INTRODUCTION

Estimating ETa is critical for many purposes such as water accounting, irrigation scheduling, drought monitoring among others (Perez et al., 2024; Rostami et al., 2024). Traditionally, ETa is quantified using lysimeters or empirical models based on meteorological data (Allen et al., 1998; Howell, 2005). However, the application of both approaches over large-scale areas is limited, as lysimeters are costly to implement and standard empirical models require more meteorological data (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948), which are sometimes unreliable or not readily accessible. Moreover, the values obtained from these approaches may fail to represent the spatial variability of ETa across heterogeneous landscapes (Bastiaanssen & Bandara, 2001). On the other hand, remote sensing (RS)-based methods such as Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration (METRIC), or Two Source Energy Balance Model (TSEB) are currently used approaches to estimate spatially distributed ETa at an adequate resolution (Bastiaanssen et al. 1998; Allen et al. 2007; Norman et al. 1995 and Kustas and Norman 1999). The main advantages of RS-based methods is their cost-effectiveness, less time consuming, and their ability to cover various spatial scales.

Most studies using satellite remote sensing estimate ETa only on the dates of satellite overpasses (Shamloo et al., 2021; Sun et al., 2011). However, monthly or seasonal ETa map spanning the entire given growing season is often useful for effective water resource management. Given the 16-day temporal resolution of satellite imagery such as Landsat and cloud cover scenes, it is necessary to develop an approach to estimate daily ETa on days without usable imagery. The most common used approach to address these limitations involves constructing a crop coefficient (K_c) curve for each pixel, similar to the method proposed by FAO-56 (Trezza et al., 2018). Although many studies rely on simple linear interpolation to construct K_c curves (Djaman et al., 2018; Sawadogo et al., 2020a; Stan et al., 2014), few have explored alternative interpolation methods that could incorporate crop-specific and local environment characteristics. This is relevant because K_c vary throughout the growing season in response to changes in crop development, climatic conditions, management practices, and other factors (Allen et al., 1998; Jiang and Liu, 2022; Valiantzas, 2013). Katerji and Rana (2014) argued that K_c values often show irregular fluctuations on cloudy days, making it difficult for linear interpolation to capture these variations.

This study aimed to assess the accuracy of the PySEBAL model, linear and fixed interpolation methods, for estimating FAO-56 standard grass reference crop ETa under East Slovakian Lowland (ESL) conditions. In addition, the study assessed the correlation between weather variables and the estimated ETa to quantify the strength of their relationship. The results of this study will help ascertain the use of the PySEBAL model, linear and fixed interpolation methods for ETa estimation under ESL conditions.

MATERIALS AND METHODS

Study area and period

This study was conducted at a lysimeter station located in Petrovce nad Laborcom, on the East Slovakian Lowland (ESL) (48°47.5400' N, 21°53.1750' E), at an elevation of 117 meters above sea level. The lysimeter has a surface area of 1 m² and is covered with grass, which is maintained at a height of approximately 12 cm. ESL is situated in the transitional zone between the oceanic and continental climate with an average annual air temperature of 10°C; average annual precipitation of 600-700 mm, average annual relative air moisture is 77% (Kandra et al., 2023; Nejedlík and Šiška, 2013). The study period spanned from March 24, 2021, to October 26, 2021, covering a total of 217 days.

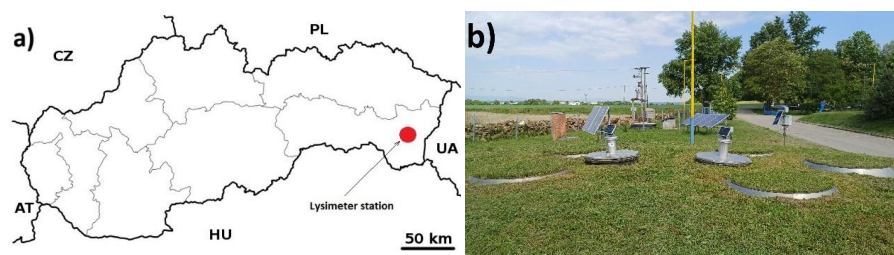


Fig.1. Location of the lysimeters within the country a) and detailed placement of the lysimeters b)

Data

Lysimeter ETa data

This study used secondary ETa data derived from lysimeter measurements, which were recorded by data loggers and transmitted wirelessly to a central server. The lysimeter station is powered by solar panels that charge a battery system, ensuring continuous operation. In this analysis, daily ETa values representing the total 24 hour period were used, based on data collected at an hourly time step. The lysimeter station is also equipped with a meteorological station that records key meteorological variables, including air temperature (°C), relative humidity (%), wind speed (m/s), wind direction (0-360°), global solar radiation (W/m²), and precipitation (mm.).

PySEBAL-derived ETa

The Python module for the Surface Energy Balance Algorithm for Land model (PySEBAL) (<https://pypi.org/project/SEBAL/>) (Bastiaanssen et al., 1998) was used in this study. The PySEBAL model calculates the surface energy balance for the day that the satellite image was acquired, based on the inputs derived from the satellite images, along with weather and digital elevation model (DEM) data (Bastiaanssen et al., 1998; Sawadogo et al., 2020b). A total of 25 multi-temporal satellite images from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS and DEM data, retrieved from the website <https://earthexplorer.usgs.gov/>, were used within PySEBAL to estimate ETa. Weather data including air temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation were sourced from the lysimeter meteorological station. The outputs of PySEBAL include the ETa and crop coefficients (Kc), at the daily time scale (i.e., day of satellite image acquisition). Kc were estimated as the ratios between ETa and reference evapotranspiration (ET0), with the latter being calculated using the FAO-56 Penman-Monteith equation (Allen, 2016; Allen et al., 1998). To estimate ETa on days without satellite imagery due to Landsat's 16 day temporal resolution and/or cloud cover, daily Kc values need to be determined. For this purpose, linear and fixed interpolation methods were applied to the Kc values obtained from successive satellite images. The daily interpolated Kc values derived from these interpolation methods are multiplied by daily ET0 to estimate daily ETa.

Interpolation methods

Linear interpolation

This method assumes a linear relationship between the known Kc values (satellite overpass dates), allowing for the calculation of unknown Kc values (no satellite image or cloudy days). The linear interpolation formula for estimating the unknown Kc at a specific day (t) between two known Kc values at dates t_1 and t_2 is given by:

$$Kc_t = Kc_1 + \frac{(t - t_1)(Kc_2 - Kc_1)}{(t_2 - t_1)}$$

Where:

Kc_t is the interpolated crop coefficient at day t ; Kc_1 is the known crop coefficient at the date t_1 ; Kc_2 is the known crop coefficient at the date t_2 and t is the day of interpolation, where $t_1 < t < t_2$.

Fixed interpolation

This method assigns the Kc value from the nearest available satellite overpass date to days with missing or cloudy imagery. For any day (t) between two known crop coefficient values at dates t_1 and t_2 , the interpolated Kc value for that day is calculated using the following equation:

$$Kc_t = \begin{cases} Kc_1, & \text{if } t - t_1 < t_2 - t \\ Kc_2, & \text{if } t - t_1 \geq t_2 - t \end{cases}$$

Where:

Kc_t is the interpolated crop coefficient at day t ; Kc_1 is the known crop coefficient at the date t_1 ; Kc_2 is the known crop coefficient at the date t_2 and t is the day of interpolation, where $t_1 < t < t_2$.

Statistical analysis

To evaluate the performance of the PySEBAL and interpolation methods used in estimating ETa, three statistical indicators were applied: the coefficient of determination (R^2), the Nash–Sutcliffe efficiency index (NSE) (Krause et al., 2005), and the root mean square error (RMSE). In addition, a correlation analysis was conducted to assess the relationships between weather variables and various ET metrics, including lysimeter-measured ETa, linear-interpolated ETa and fixed-interpolated ETa.

RESULTS AND DISCUSSION

Comparison of ETa estimates from lysimeter and PySEBAL

ETa comparison on satellite overpass dates

Fig. 2 shows the comparison between ETa estimated by the PySEBAL model and lysimeter measurements on satellite overpass dates. Overall, a good agreement was observed between the daily ETa estimates from PySEBAL and the lysimeter, with RMSE value of 0.93 mm, R^2 value of 0.87 and NSE value of 0.70. These results are consistent with findings from previous studies (Bala et al., 2016; Cheng et al., 2021; Rahimzadegan and Janani, 2019; Sawadogo et al., 2020), further confirming that PySEBAL provides reliable estimates of daily ETa.

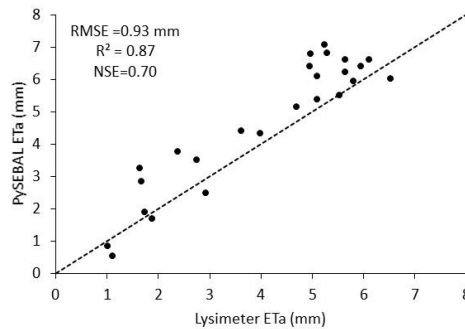


Fig.2. Scatterplot of PySEBAL-derived versus lysimeter ETa

ETa comparison on interpolated dates

The results in Fig. 3 shows the comparison between linearly interpolated ETa values (Fig. 3A) and fixed interpolated ETa values (Fig. 3B) against lysimeter measurements. The linear and fixed interpolation methods achieved R^2 values of 0.83 and 0.80, RMSE values of 1.00 mm and 1.07 mm, and NSE values of 0.68 and 0.64, respectively. These results indicate that both interpolation methods provide accurate and reliable estimates of ETa, with the linear method showing a slight improvement over the fixed method. Under the standard assumptions of the FAO-56 Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998), where K_c is assumed to remain constant, it could be expected that the fixed method outperformed because it aligns with the assumption. However, in practice, K_c values are variable in relation to the climatic variables and other biotic stress factors which are difficult to control (Allen et al., 1998; Katerji and Rana, 2014; Valiantzas, 2013). Moreover, it is well established that advection effects constitute non-negligible sources of errors while applying remote sensing approaches for ETa estimation (Singh et al., 2008). Therefore, the climate variables and biotic stress factors, as well as the advection effect, could explain the slightly better performance of the linear interpolation method over the fixed method since linear interpolation accounts for gradual temporal changes in K_c .

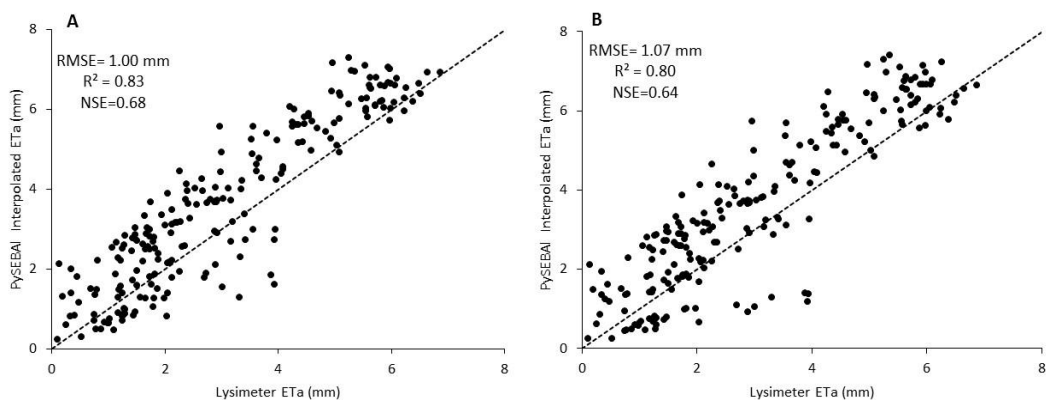


Fig.3. Scatterplot of PySEBAL-derived versus lysimeter actual evapotranspiration: comparisons between interpolated ETa values from linear (A) and fixed (B) methods. Dashed lines on the sub-figures represent the 1:1 lines.

Correlation between weather variables and ETa metrics

Among the weather variables, solar radiation shows the strongest and positive correlation with all ETa metrics, with correlation coefficients ranging from 0.893 to 0.908. Moreover, air and soil temperatures also show strong positive correlations with ETa metrics, with correlation coefficients ranging from 0.634 to 0.781. These results align with previous findings, showing that high radiation and temperature increase ETa by providing more energy (Allen et al., 1998; Li et al., 2017). Relative humidity show a moderate negative correlation with all ETa metrics (ranging from -0.615 to -0.628). This negative correlation is expected, as higher humidity levels reduce the vapor pressure deficit, thus limiting the rate of evapotranspiration as shown in other studies (Allen et al., 1998; Jiang and Liu, 2022). With regard to wind speed, an unexpected weak positive correlation with ETa metrics was observed, although wind is generally known to increase ETa by removing the saturated air and bringing drier air above the canopy. Similar weak correlation between ETa and wind speed have also been reported in previous studies (Abarikwu, 2019; Kabenge et al., 2013; Nooni et al., 2023; Wang et al., 2019). This weak correlation can be explained by the presence of a windbreak surrounding the lysimeter station, as well as the station's relatively close proximity (~45 m) to the Laborec River. The river contributes to local water vapor through evaporation, increasing the moisture content of the wind and ultimately weakening the correlation between wind speed and ETa similar to the findings of Kabenge et al. (2013). Overall, the results show that solar radiation, air temperature, and soil temperature are the main weather variables strongly correlated with ETa in the ESL region. Such findings highlight the vulnerability of the agricultural sector to the adverse impacts of the ongoing climate change, as reported by Nejedlík and Šiška (2013).

Table.1. Pearson correlation coefficients between weather and ETa metrics

Weather variables	ETa metrics		
	Lysimeter	Linear interpolation	Fixed interpolation
Solar radiation	0.907	0.908	0.893
Relative humidity	-0.616	-0.628	-0.615
Air temperature	0.781	0.688	0.682
Soil temperature	0.758	0.642	0.634
Wind Speed	0.176	0.217	0.212

CONCLUSION

We evaluated the performance of the PySEBAL model, linear and fixed interpolation methods, for estimating ETa in ESL, as well as the influence of meteorological variables on ETa. Compared to lysimeter measurements, the linear interpolation method showed slightly better performance than the fixed method and could be recommended, along with the PySEBAL model for ETa estimation. However, further comparisons of these and other interpolation methods across different crop types and environmental conditions would help to improve the accuracy of ETa estimation. The results of the correlation analysis showed that solar radiation, air and soil temperatures are strongly positively correlated with ETa. These findings highlight the vulnerability of the ESL agroecosystem to climatic variability, particularly to increases in temperature associated with ongoing climate change. To better understand the negative impact of climate variability on the ESL agroecosystem, future studies could conduct a sensitivity analysis to quantify the relative impact of each climatic variable on ETa.

Acknowledgement: this study was supported by the projects VEGA no. 2/0115/25 and VEGA no. 2/0025/24.

REFERENCES

- ABARIKWU, O.I., 2019. Relationship between Reference Evapotranspiration and some Climatic Parameters for Umudike, Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 21, 28-33.
- ALLEN, R.G., 2016. REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE Standardized equations. Reference manual. University of Idaho, Kimberly, ID, USA.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- BASTIAANSEN, W.G.M., MENENTI, M., FEDDES, R.A., HOLTSLAG, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213, 198-212.
- DIAMAN, K., O'NEILL, M., OWEN, C.K., SMEAL, D., KOUHAHE, K., WEST, M., ALLEN, S., LOMBARD, K., IRMAK, S., 2018. Crop Evapotranspiration, Irrigation Water Requirement and Water Productivity of Maize from Meteorological Data under Semiarid Climate. *Water* 10, 405.
- HOWELL, T.A., 2005. LYSIMETRY, in: Hillel, D. (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, Oxford, pp. 379-386.
- JIANG, Y., LIU, Z., 2022. Simulation of Actual Evapotranspiration and Evaluation of Three Complementary Relationships in Three Parallel River Basins. *Water Resources Management* 36, 5107-5126.
- KABENGE, I., IRMAK, S., MEYER, G., GILLEY, J., KNEZEVIC, S., ARKEBAUER, T.J., WOODWARD, D., MORAVEK, M., 2013. Evapotranspiration and surface energy balance of a common reed-dominated riparian system in the Platte River Basin, Central Nebraska. *Transactions of the ASABE* 56, 135-153.
- KANDRA, B., TALL, A., GOMBOŠ, M., PAVELKOVÁ, D., 2023. Quantification of Evapotranspiration by Calculations and Measurements Using a Lysimeter. *Water* 15, 373.
- KATERJI, N., RANA, G., 2014. FAO-56 methodology for determining water requirement of irrigated crops: critical examination of the concepts, alternative proposals and validation in Mediterranean region. *Theoretical and Applied Climatology* 116, 515 - 536.
- KRAUSE, P., BOYLE, D.P., BÄSE, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5, 89-97.

- LI, B., CHEN, F., LIU, X., 2017. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to sunshine duration in the Upper Mekong River Basin. *Hydrological Sciences Journal* 62, 830-842.
- NEJEDLÍK, P., ŠÍŠKA, B., 2013. Climate change impacts and the adaptation options in agriculture in Slovakia. *Environmental changes and adaptation strategies*.
- NOONI, I.K., OGOU, F.K., LU, J., NAKOTY, F.M., CHAIBOU, A.A.S., HABTEMICHEAL, B.A., SARPONG, L., JIN, Z., 2023. Temporal and Spatial Variations of Potential and Actual Evapotranspiration and the Driving Mechanism over Equatorial Africa Using Satellite and Reanalysis-Based Observation. *Remote Sensing* 15, 3201.
- PENMAN, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 193, 120-145.
- PEREZ, M., LOMBARDI, D., BARDINO, G., VITALE, M., 2024. Drought assessment through actual evapotranspiration in Mediterranean vegetation dynamics. *Ecological Indicators* 166, 112359.
- ROSTAMI, S., DELAVAR, M., VAHID, S.K., MIRZAEI, M., 2024. Toolkit for assessing water accounting in data-scarce river basins using global databases. *Environmental Modelling & Software* 180, 106140.
- SAWADOGO, A., GUNDOGDU, K.S., TRAORÉ, F., KOUADIO, L., HESSELS, T., 2020a. Estimating in-season actual evapotranspiration over a large-scale irrigation scheme in resource-limited conditions. . *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences* 73, 1473.
- SAWADOGO, A., HESSELS, T., GÜNDOĞDU, K.S., DEMIR, A.O., MUSTAFA, Ü., ZWART, S.J., 2020b. comparative analysis of the pysebal model and lysimeter for estimating actual evapotranspiration of soybean crop in adana, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences* 5, 60-65.
- SHAMLOO, N., TAGHI SATTARI, M., APAYDIN, H., VALIZADEH KAMRAN, K., PRASAD, R., 2021. Evapotranspiration estimation using SEBAL algorithm integrated with remote sensing and experimental methods. *International Journal of Digital Earth* 14, 1638-1658.
- SINGH, R.K., IRMAK, A., IRMAK, S., MARTIN, D.L., 2008. Application of SEBAL Model for Mapping Evapotranspiration and Estimating Surface Energy Fluxes in South-Central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce* 134, 273-285.
- STAN, F.I., NECULAU, G., ZAHARIA, L., IOANA-TOROIMAC, G., 2014. Evapotranspiration variability of different plant types at romanian experimental evapometric measurement stations*. *Climatologie* 11, 85-90.
- SUN, Z., WEI, B., SU, W., SHEN, W., WANG, C., YOU, D., LIU, Z., 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling* 54, 1086-1092.
- THORNTHWAIT, C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- TREZZA, R., ALLEN, R.G., KILIC, A., RATCLIFFE, I., TASUMI, M., 2018. Influence of Landsat revisit frequency on time-integration of evapotranspiration for agricultural water management, in: Bucur, D. (Ed.), *Advanced Evapotranspiration Methods and Applications*. IntechOpen, London, United Kingdom.
- VALIANTZAS, J.D., 2013. Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. *Journal of Hydrology* 505, 13-23.
- WANG, Y., ZHANG, K., TANG, C., CAO, Q., TIAN, Y., ZHU, Y., CAO, W., LIU, X., 2019. Estimation of Rice Growth Parameters Based on Linear Mixed-Effect Model Using Multispectral Images from Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles. *Remote Sensing* 11, 1371.

KLIMATICKÁ HRANICA ROZŠÍRENIA STROMOVEJ VEGETÁCIE V ALPÍNSKOM EKOTÓNE SKALNATEJ DOLINY VO VYSOKÝCH TATRÁCH

Svetlana VARŠOVÁ¹ – Veronika LUKASOVÁ¹ – Milan ONDERKA²

¹Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, Dúbravská cesta 9, Bratislava 840 05, geosvet@savba.sk

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, Bratislava, SK-833 151

ABSTRACT

Varšová, S., Lukasová, V., Onderka, M.: Climatic limits of tree growth in the alpine treeline ecotone of Skalnatá dolina, High Tatra Mts

Alpine treeline ecotones are sensitive indicators of climate change, shaped by both large-scale climate patterns and local factors. In the alpine treeline ecotone of Skalnatá dolina (High Tatra Mts, Slovakia), we analyzed long-term climate data (1951–2024) from the Skalnaté Pleso and Lomnický štít observatories, spanning elevations from 1778 to 2635 m. Significant warming trends were identified for air temperature related to key thermal criteria for alpine treelines, with rates comparable to other mountain areas. However, the estimated treeline shift of approximately 400 m since 1951, at a rate of 5–6 m/year, clearly exceeds rates reported from other high-altitude regions. Preliminary field observations confirm the upward expansion of dwarf pine (*Pinus mugo* Turra), the dominant treeline species, into the alpine zone at elevations above 2000 m. Further research will focus on detailed field mapping of dwarf pine to better understand its altitudinal expansion.

Key words: alpine treeline, cold limit, air temperature, growing season, climate, trends

ÚVOD

Alpínske ekotónové pásmo predstavuje hraničnú oblasť biosféry, kde organizmy dosahujú svoje fyziologické limity prežívania v dôsledku nízkych teplôt. Hornú hranicu rozšírenia stromovej vegetácie v tomto ekotóne určujú predovšetkým klimatické faktory, najmä teplota vzduchu a dĺžka vegetačného obdobia, ktoré spoločne definujú podmienky pre rast a reprodukciu drevín (KÖRNER, 2012). Chladné prostredie spomaľuje fotosyntetický príjem CO₂ a znižuje aktivitu kambia a apikálnych meristémov (LEHNER & LÜTZ, 2003; FENG et al. 2022). Existuje široký konsenzus, že rast rastlinných tkanív pri teplotách blízky 0 °C je zastavený a minimálna rastová aktivita prebieha až pri teplotách okolo +5 °C (KÖRNER, 2012). Vo vysokohorskom prostredí sa priaznivé teplotné podmienky pre rast stromovej vegetácie vyskytujú predovšetkým počas letného obdobia. Kľúčovým klimatickým ukazovateľom je preto priemerná júlová teplota, ktorej limitná hodnota sa pohybuje približne okolo 10 °C, pričom táto hranica nie je univerzálne platná pre všetky klimatické oblasti (KÖRNER & PAULSEN, 2004). Novšie štúdie (KÖRNER, 2020; KÖRNER, 2021) uvádzajú globálne referenčné kritérium a to priemernú teplotu vzduchu približne 6 °C počas vegetačného obdobia s dĺžkou trvania najmenej tri mesiace.

Klimatická hranica predstavuje prirodzenú hornú hranicu rozšírenia drevín v závislosti od regionálnych a mikroklimatických podmienok. V súčasnosti je považovaná za citlivý indikátor klimatickej zmeny, lebo priamo reaguje na dlhodobé zmeny teplotného režimu vysokohorských oblastí (KÖRNER, 2012; HARSCH et al. 2009). V dôsledku globálneho otepľovania dochádza k jej postupnému posunu do vyšších nadmorských výšok (GEHRIG-FASEL et al. 2007; HARSCH et al. 2009; FEELEY et al. 2011; ELLIOT et al., 2011; MIHAILĂ et al. 2021; GAIRE et al. 2023). Dynamiku posunu hranice rastu stromov v alpínskom pásme okrem klimatických podmienok ovplyvňujú aj ďalšie faktory, ako je napr. využívanie krajiny, výskyt disturbancií a biotické interakcie (KULAKOWSKI et al. 2016). Hlbšie pochopenie týchto dynamických procesov si vyžaduje interdisciplinárny prístup, ktorý prepája poznatky z rastlinnej ekológie, dendroekológie, ekofyziológie, pedológie a ďalších príbuzných odborov. Na ich skúmanie sa využíva široké spektrum metód, od terénnych experimentov až po techniky diaľkového prieskumu Zeme (BADER et al. 2021). Monitorovanie bioklimatologických ukazovateľov v alpínskom ekotóne je kľúčové pre pochopenie vzťahov medzi klímou, ekosystémami a ľudskou činnosťou v horských

oblastiach. Sledovanie dynamiky rastu, fenológie, rozšírenia a zdravotného stavu rastlín poskytuje cenné údaje o vplyvoch klimatickej zmeny na horské ekosystémy. Naplnenie tohto cieľa si vyžaduje dlhodobý a komplexný výskum, príkladom môže byť 50-ročný experiment na lokalite Stillberg vo švajčiarskych Alpách (LECHLER et al. 2024).

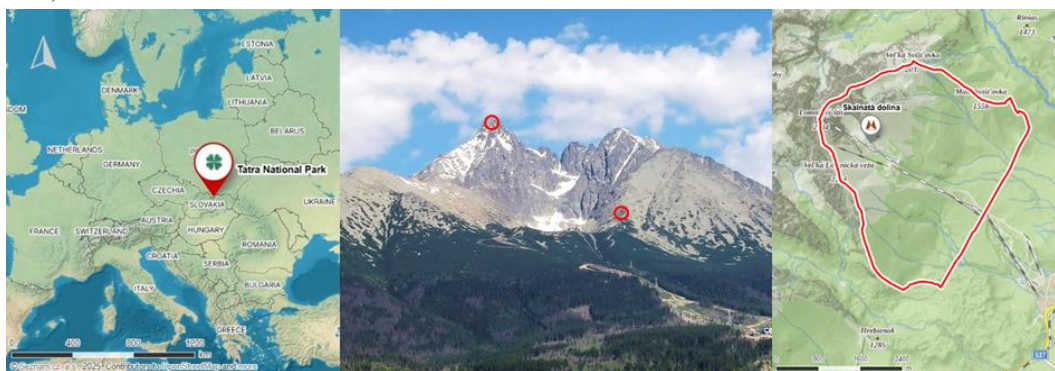
Dôležitým bioindikátorom zmien v alpskom ekotóne Karpát je borovica horská (*Pinus mugo* Turra), ktorá je citlivá na teplotu vzduchu, snehovú pokrývku, zrážkové pomery a ďalšie klimatické faktory. Štúdie z tatranského regiónu (ŠVAJDA et al. 2011, SOLÁR & JANIGA, 2013, LUKASOVÁ et al. 2021, PISCOVÁ et al., 2023) ukazujú, že v dôsledku otepľovania dochádza k zvyšovaniu jej vitality a k rozširovaniu do vyšších polôh, čo môže ovplyvniť štruktúru a biodiverzitu alpských ekosystémov. Podľa doterajších poznatkov, horná hranica súvislého porastu borovice horskej v Tatrách dosahuje nadmorskú výšku približne 1800–1900 m n.m. (KRIPPEL, 1986; KAŠPAR & TREML, 2016; KACZKA et al. 2015, ŽATKOVÁ et al. 2023). O dynamike klimatických limitov rastu borovice horskej vo vyšších nadmorských výškach je k dispozícii len obmedzené množstvo údajov. Cieľom tejto práce je prispieť k rozšíreniu týchto poznatkov prostredníctvom vyhodnotenia trendov otepľovania a analýzy zmien klimatickej hranice rastu stromovej vegetácie v alpskom ekotóne Skalnatej doliny vo Vysokých Tatrách v období 1951–2024.

MATERIÁL A METÓDY

Výskumná lokalita

Výskum klimatickej hranice bol zameraný na alpský ekotón Skalnatej doliny vo Vysokých Tatrách. Skalnatá dolina je národnou prírodnou rezerváciou o rozlohe 1 069,05 ha (Obr. 1). V období posledného zaľadenia bola formovaná ľadovcom s hrúbkou približne 75 m. Dolina je orientovaná na juhovýchod, na jej západnej strane sa nachádza Lomnický hrebeň s výškami nad 2000 m n.m. Na hlavnom hrebeni dominuje Lomnický štít (2635 m n.m.), kde je situované najvyššie položené meteorologické observatórium na Slovensku. Na východnej časti hrebeňa sa nachádzajú ďalšie vrcholy, ako Kežmarský štít (2558 m n.m.), Huncovský štít (2359 m n.m.) a Veľká Svišťovka (2037 m n.m.). Pod Huncovským štítom, na ľavostranných bočných morénach, je situované observatórium Skalnaté Pleso (BEZÁK & MAJČIN, 2013).

Dominantnou a pôvodnou drevinou v oblasti Skalnatého Plesa je borovica horská, ktorá vplyvom priaznivých teplotných podmienok vystupuje aj do vyšších polôh. Z dlhodobých klimatických meraní vyplýva, že vegetačné obdobie v tejto oblasti trvá od mája do septembra, kedy priemerné mesačné teploty dosahujú a prekračujú úroveň ~5 °C (HLAVATÁ, 2013). Porovnanie dvoch posledných klimatických normálových období (1961–1990 a 1991–2020) poukazuje na významné oteplenie, najmä počas letných mesiacov (júl – august), s nárastom priemernej mesačnej teploty o 1,6 °C. Otepľovanie sa prejavuje aj v ročnom priemere, kde bola zaznamenaná pozitívna teplotná odchýlka o 1,1 °C, z pôvodných 1,7 °C na 2,8 °C. Súčasne bol pozorovaný aj nárast ročného úhrnu zrážok, a to z 1282 mm na 1477 mm, čo poukazuje na súbežné zmeny v teplotných aj zrážkových charakteristikách klímy (LUKASOVÁ et al. 2023).



Obr. 1 Poloha výskumnej lokality v európskom priestore (mapa vľavo) a ohraničenie Národnej prírodnej rezervácie Skalnatá dolina (mapa vpravo). Fotografia v strede zobrazuje územie Skalnatej doliny od Lomnického hrebeňa po Huncovský štít, observatória Skalnaté Pleso a Lomnický štít sú označené červeným krúžkom. Zdroj mapy: mapy.cz ©seznam.cz

Fig. 1 Location of the study area within Europe (left map) and the boundaries of the Skalnatá dolina, National Nature Reserve (right map). The central photo shows the Skalnatá dolina area from the Lomnický Ridge to Huncovský Peak; the Skalnaté Pleso and Lomnický štít observatories are marked with a red circle. Map source: mapy.cz ©seznam.cz.

Klimatické kritériá pre rast alpínskej stromovej vegetácie

Rast drevín vo vysokohorských oblastiach je primárne limitovaný teplotou, ktorá ovplyvňuje základné fyziologické procesy, ako sú metabolizmus, fotosyntéza, príjem vody a bunkové delenie. Experimentálne a terénne štúdie potvrdzujú, že kambiálne a apikálne meristémy sa môžu aktívne vyvíjať pri teplotách na úrovni $\sim 5^{\circ}\text{C}$ (KÖRNER, 2012). Tieto podmienky sú nevyhnutné pre udržanie aktívneho metabolizmu a funkcie koreňového systému počas vegetačného obdobia.

Klimatickú hranicu alpínskej stromovej vegetácie definuje teplotný limit, za ktorým rast stromov nie je možný pre nedostatok tepelnej energie. Poloha tejto hranice sa regionálne líši v závislosti od miestnych klimatických podmienok. Z klimatologického hľadiska je určená teplotnými kritériami:

Kritérium 1: Priemerná teplota najteplejšieho mesiaca v roku $\sim 10^{\circ}\text{C}$ (Köppen, 1884), tzv. 10°C júlová izoterma s obmedzenou teritoriálnou platnosťou pre oblasti s rozšírením medzi $40 - 70^{\circ}$ zemepisnej šírky (Körner, 1998). Pre globálnu analýzu je potrebné použiť kritérium, ktoré zohľadňuje klimatické pomery v širšom časovom a geografickom priestore (KÖRNER & PAULSEN, 2004). Naše záujmové územie sa nachádza v zemepisnej šírke, ktorá je vhodná na použitie uvedeného historického kritéria, preto sme do tejto práce zahrnuli aj analýzu priemernej júlovej teploty vzduchu (pT-JL).

Kritérium 2: Globálna referenčná teplota $\sim 6^{\circ}\text{C}$, tzv. 6°C sezónna izoterma (KÖRNER, 2021) predstavuje priemernú teplotu vzduchu pre vegetačné obdobie, ktoré trvá najmenej 3 mesiace. Táto hodnota bola odvodená na základe rozsiahleho štatistického spracovania z ktorého vyplýva, že globálna bioklimatická referenčná línia sa dá najlepšie predikovať na základe sezónnej priemernej teploty vzduchu $6,4^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ s minimálnou dĺžkou vegetačného obdobia 94 dní (PAULSEN & KÖRNER, 2014). V alpínskom ekotóne Skalnatej doliny sme uvažovali 3 najteplejšie mesiace jún, júl a august (pT-JJA), (Tab. 1).

Kritérium 3: Referenčná teplota $\sim 6^{\circ}\text{C}$ pre vegetačné obdobie s ohľadom na lokálne klimatické pomery. V alpínskom ekotóne Skalnatej doliny priemerná teplota v najteplejších mesiacoch (pT-JJA) výrazne prevyšuje globálnu referenčnú úroveň $\sim 6^{\circ}\text{C}$ (Tab. 1). Pre určenie dĺžky vegetačného obdobia existujú rôzne definície. V horských oblastiach sa vegetačné obdobie často spája s počtom dní s priemernou dennou teplotou vzduchu $\geq 5^{\circ}\text{C}$. Predpokladá sa, že pri týchto teplotách je zachovaný aktívny metabolizmus rastliny a správne fungovanie koreňového systému (Körner, 2012). Podľa klimatických normálov (LUKASOVÁ et al. 2023), vhodné teplotné podmienky pre rast stromovej vegetácie ($\sim 5^{\circ}\text{C}$) v okolí Skalnatého plesa sa vyskytujú v období od mája do septembra. Tieto mesiace boli uvažované ako vegetačné obdobie pri výpočte sezónnej teploty (pTvo-MJJAS).

Tab. 1 Klimatické normály priemerných teplôt vzduchu pre obdobia 1961–1990 a 1991–2020 vo výškovom profile alpínskeho ekotónu Skalnatej doliny (Skalnaté Pleso – 1778 m n. m., Lomnický štít – 2635 m n. m.)

Tab. 1 Climate normals of mean air temperatures for the periods 1961–1990 and 1991–2020 along the elevational profile of the alpine ecotone in Skalnatá dolina (Skalnaté Pleso – 1778 m a.s.l., Lomnický štít – 2635 m a.s.l.)

Mesiac/Obdobie	Observatórium Skalnaté Pleso (1778 m asl)			Observatórium Lomnický štít (2635 m asl)		
	Priemerná teplota vzduchu $^{\circ}\text{C}$			Priemerná teplota vzduchu $^{\circ}\text{C}$		
	1961-1990	1991-2020	Δ	1961-1990	1991-2020	Δ
I	-5.8	-4.5	1.3	-11.1	-10.1	1.0
II	-5.8	-5	0.8	-11.3	-9.8	1.5
III	-3.9	-3.3	0.6	-9.2	-8.3	1.0
IV	0	1.2	1.2	-5.7	-3.8	1.9
V	4.8	5.9	1.1	-1	-0.4	0.6
VI	7.8	9.3	1.5	1.8	4.8	2.9
VII	9.4	11.1	1.7	3.4	4.8	1.4
VIII	9.4	11.2	1.8	3.6	7.0	3.4
IX	6.6	7.0	0.4	1.2	2.4	1.2
X	3.6	3.7	0.1	-1.7	-0.7	1.1
XI	-1.3	0.2	1.5	-6.6	-4.2	2.4
XII	-4.4	-3.2	1.2	-9.8	-8.3	1.4
VI-VIII (JJA)	8.9	10.5	1.6	3.0	5.5	2.5
V-IX (MJJAS)	7.6	8.9	1.3	1.8	3.7	1.9
I-XII	1.7	2.8	1.1	-3.9	-2.2	1.7

Výpočet hornej hranice alpínskej stromovej vegetácie

Na výpočet hornej hranice alpínskej stromovej vegetácie boli použité priemerné denné teploty vzduchu z manuálnych meraní na observatóriách Skalnaté Pleso ($49^{\circ}11'29''\text{N}$, $20^{\circ}14'03''\text{E}$, 1778 m n.m.) a Lomnický štít ($49^{\circ}11'43''\text{N}$, $20^{\circ}12'54''\text{E}$, 2635 m n.m.) za porovnateľné obdobie 1951–2024. Obe observatóriá sa nachádzajú v

alpínskom ekotóne Skalnatej doliny (Obr. 1) a sú zaradené do siete klimatologických staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ). Manuálne merania vykonávajú kvalifikovaní pozorovatelia odčítaním teploty z kalibrovaného ortuťového teplomera, ktorý je umiestnený v štandardnej meteorologickej búde. Z priemerných denných teplôt boli odvodené priemerné teploty vzduchu pre tri rôzne obdobia v roku s ohľadom na kritériá: (1) pT-JL, (2) pT-JJA, (3) pT-MJJAS pre každý rok a lokalitu samostatne.

Nadmorská výška hornej hranice alpinskej stromovej vegetácie bola odvodená z teplotného gradientu ($T_{gr} = \frac{\Delta T}{\Delta H}$, °C m⁻¹) medzi dvomi výškovými hladinami ($H_1 = 1778$ a $H_2 = 2635$ m n.m.), ktoré reprezentujú výškový profil medzi observatóriami Skalnaté Pleso a Lomnický štít. Rozdiel teplôt ΔT znamená rozdiel priemerných teplôt vzduchu medzi týmito hladinami H_2 a H_1 . Vypočítané boli tri varianty teplotného rozdielu: ΔT_1 ako rozdiel priemerných júlových teplôt (pT-J) pre výpočet T_{gr1} , ΔT_2 ako rozdiel priemerných teplôt za obdobie jún–august (pT-JJA) pre T_{gr2} a ΔT_3 ako rozdiel priemerných teplôt za obdobie máj–september (pT-MJJAS) pre T_{gr3} . Na základe týchto gradientov $T_{gr(1-3)}$ boli vypočítané nadmorské výšky zodpovedajúce teplotným kritériám 1–3: $H_{kritérium1} = H_1 + ((10 - pT-JL_{H1})/T_{gr1})$, $H_{kritérium2} = H_1 + ((6 - pT-JJA_{H1})/T_{gr2})$, $H_{kritérium3} = H_1 + ((6 - pT-MJJAS_{H1})/T_{gr3})$. Uvedený mechanizmus výpočtu umožňuje získať údaje o klimatickej hranici alpinskej stromovej vegetácie pre každý rok sledovaného obdobia a následne analyzovať jej dynamiku pomocou štatistických nástrojov, ako je Mann-Kendallov test na určenie trendu a jeho štatistickej významnosti (MANN, 1945; KENDALL, 1975).

VÝSLEDKY A DISKUSIA

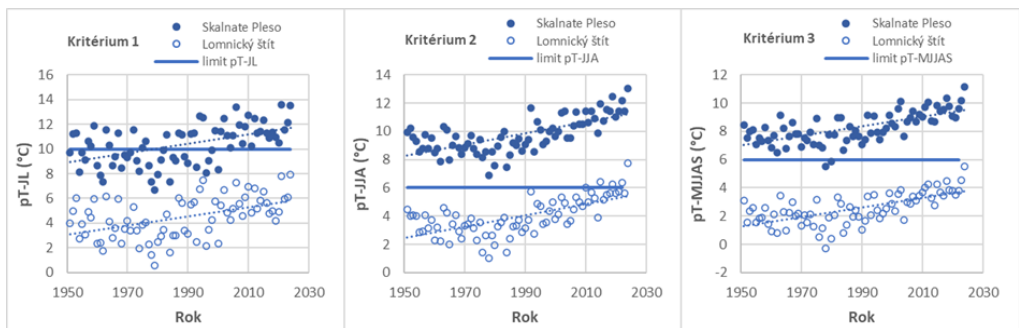
Teplotné pomery v alpínskom ekotóne Skalnatej doliny

Štatistické spracovanie dlhodobého radu meraní teploty vzduchu na observatóriách Skalnaté Pleso a Lomnický štít (Tab. 2) potvrdzuje predpokladané výrazné rozdiely v teplotných podmienkach hornej časti Skalnatej doliny. V období 1951–2024 priemerné teploty vzduchu na Skalnatom Plese prekročili limitné hodnoty vo všetkých kritériách, hoci početnosť prekročení v prípade pT-JL dosiahla iba 58 %. Naopak, priemerné teploty na Lomnickom štíte boli takmer počas celého obdobia výrazne pod limitnými hodnotami, pričom výnimočné prekročenia sa vyskytli v prípade kritéria (2) pT-JJA, a to po roku 2010 (Obr. 2). Štatisticky významný trend otepľovania sa potvrdil vo všetkých analyzovaných prípadoch, pričom priemerná ročná zmena teploty vzduchu sa pohybovala v rozsahu 0,033–0,040 °C (Tab. 3). Rýchlosť otepľovania vo Vysokých Tatrách zodpovedá hodnotám uvádzaným pre iné horské oblasti, ktoré vo všeobecnosti vykazujú rýchlejší nárast teploty v porovnaní s nižšími polohami (MRI, 2015; RANGWALA & MILLER, 2012).

Tab. 2 Štatistické charakteristiky teploty vzduchu s ohľadom na teplotné kritériá pre rast stromovej vegetácie vo výškovom profile Skalnaté Pleso – Lomnický štít za obdobie 1951–2024; N_1 je celková početnosť údajov, N_2 je počet údajov, ktoré spĺňajú teplotné požiadavky, % je percentuálne vyjadrenie podielu N_2/N_1

Tab. 2 Statistical characteristics of air temperature in relation to temperature thresholds for tree-vegetation growth along the Skalnaté Pleso – Lomnický štít elevational profile for the period 1951–2024; N_1 represents the total number of data points, N_2 is the number of data points meeting the temperature requirements, and % indicates the percentage share of N_2/N_1

Kritérium / Limit	Skalnaté Pleso (1778 m n.m.)							Lomnický štít (2635 m n.m.)						
	Teplota vzduchu °C (1951–2024)							Teplota vzduchu °C (1951–2024)						
	N_1	N_2	%	Priemer	σ	Max	Min	N_1	N_2	%	Priemer	σ	Max	Min
(1) pT-JL / 10 °C	74	43	58	10,3	±1,6	13,6	6,7	74	0	0	4,5	1,7	7,9	0,6
(2) pT-JJA / 6 °C	74	74	100	9,8	±1,3	13,1	6,9	74	5	7	4,0	1,3	7,7	1,0
(3) pT-MJJAS / 6 °C	74	72	97	8,3	±1,1	11,2	5,5	74	0	0	2,5	1,1	5,5	-0,3



Obr. 2 Priemerná teplota vzduchu vo výškovom profile Skalnate Pleso – Lomnický štít za obdobie 1951–2024 podľa teplotných kritérií (1–3).

Fig. 2 Mean air temperature along the Skalnate Pleso – Lomnický štít elevational profile for the period 1951–2024 according to temperature thresholds (1–3).

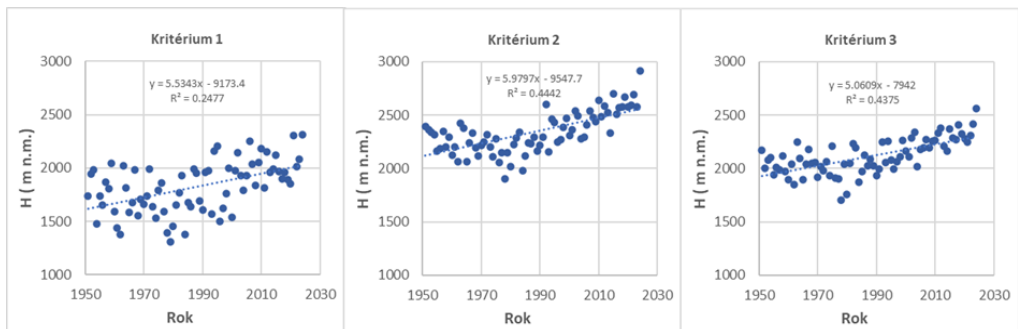
Tab. 3 Mann-Kendallov test štatistickej významnosti trendu zvyšovania teploty vzduchu vo výškovom profile Skalnate Pleso – Lomnický štít za obdobie 1951–2024; N predstavuje početnosť údajov, S je testovacia štatistika určujúca smer (kladný alebo záporný) a silu trendu, p-hodnota < 0.05 potvrdzuje štatistickú významnosť trendu; a, b sú koeficienty lineárnej regresie $y=ax+b$; R^2 je koeficient determinácie.

Tab. 3 Mann-Kendall test of the statistical significance of air temperature trends along the Skalnate Pleso – Lomnický štít elevational profile for the period 1951–2024; N represents the number of data points, S is the test statistic indicating the direction (positive or negative) and strength of the trend, a and b are the coefficients of the linear regression equation $y = ax + b$, p-values < 0.05 confirm the statistical significance of the trend, and R^2 is the coefficient of determination.

Kritérium / Limit	Skalnate Pleso (1778 m n.m.)					Lomnický štít (2635 m n.m.)				
	Teplota vzduchu °C (1951–2024)					Teplota vzduchu °C (1951–2024)				
	Mann-Kendallov test			$y = ax + b$					$y = ax + b$	
	N	S	p-value	a	b	R^2	n	S	p-hodnota	R^2
(1) pT-JL / 10 °C	74	881	< 0.05	0,038	-64,6	0,251	74	827	< 0.05	0,037
(2) pT-JJA / 6 °C	74	1293	< 0.05	0,040	-69,4	0,456	74	1241	< 0.05	0,040
(3) pT-MJJAS / 6 °C	74	1295	< 0.05	0,034	-59,6	0,442	74	1265	< 0.05	0,033

Dynamika hornej hranice alpskej stromovej vegetácie podľa teplotných kritérií 1-3

Nadmorská výška zodpovedajúca teplotnému limitu pre rast drevín vo vysokohorskom prostredí vykazovala v období 1951–2024 značnú variabilitu (Obr. 3). Rozdiel medzi zisteným maximom a minimom predstavoval približne 1000 m pri všetkých troch aplikovaných kritériách (Tab. 4). Významne sa líšili aj priemerné hodnoty, ktoré sa pohybovali od 1826 ± 239 m pre kritérium 1 až po 2337 ± 193 m pre kritérium 2. Vo všetkých prípadoch bol identifikovaný štatisticky významný trend posunu limitnej nadmorskej výšky smerom nahor, s priemernou rýchlosťou približne 5–6 m za rok, čo za celé sledované obdobie predstavuje nárast približne o 400 m (Tab. 4).



Obr. 3 Klimatická hranica rastu alpskej stromovej vegetácie za obdobie 1951–2024 podľa teplotných kritérií (1–3)

Fig. 3 Climatic alpine treeline for the period 1951–2024 based on temperature criteria (1–3).

Tab. 4 Štatistické charakteristiky hornej hranice alpskej stromovej vegetácie s ohľadom na teplotné kritériá (1–3) vo výškovom profile Skalnaté Pleso – Lomnický štít za obdobie 1951–2024; N predstavuje početnosť údajov, a, b sú koeficienty lineárnej regresie $y=ax+b$; R^2 je koeficient determinácie, p-hodnota < 0.05 potvrdzuje štatistickú významnosť trendu, Δ uvádza posun hornej hranice v sledovanom období Δ_1 (m/74 rokov), Δ_2 (m/1rok)

Tab. 4 Statistical characteristics of the upper limit of alpine tree-vegetation with respect to temperature criteria (1–3) in the Skalnaté Pleso – Lomnický štít elevation profile for the period 1951–2024; N represents the number of data points, a and b are the coefficients of the linear regression equation $y = ax + b$; R^2 is the coefficient of determination, p-value < 0.05 confirms the statistical significance of the trend, Δ indicates the shift of the upper limit during the study period: Δ_1 (m/74 years), Δ_2 (m/year).

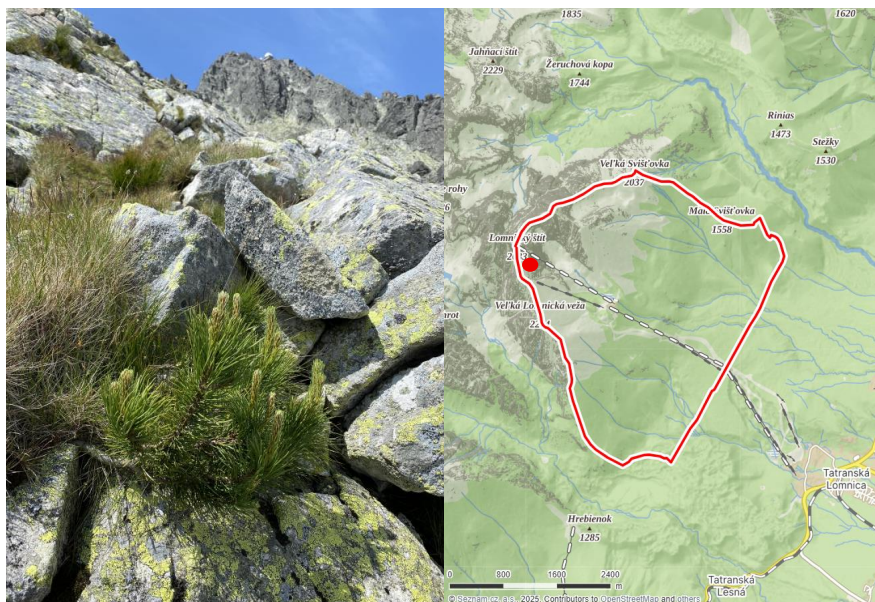
Kritérium / Limit	H (m n.m.)					y = ax + b				H (m n.m.)		Δ_1	Δ_2
	N	Priemer	σ	Max	Min	a	b	R^2	p-hodnota	r. 1951	r. 2024	m	m/r
(1) pT-JL / 10 °C	74	1826	±239	2317	1307	5,5	-9173	0,248	< 0.05	1624	2028	404	5
(2) pT-JJA / 6 °C	74	2337	±193	2917	1907	6,0	-9548	0,444	< 0.05	2119	2555	437	6
(3) pT-MJJAS / 6 °C	74	2116	±165	2563	1705	5,1	-7942	0,438	< 0.05	1932	2301	369	5

Priemerná rýchlosť posunu klimatickej hranice rastu stromovej vegetácie v tejto štúdii (~ 5–6 m/rok) výrazne prevyšuje hodnoty publikované pre iné horské oblasti sveta. Podľa HARSCH et al. (2009) sa vo väčšine študovaných regiónov rýchlosť výškového posunu pohybovala v rozmedzí 0–10 m za desaťročie (~ 0–1 m/rok). Mierne vyššiu hodnotu približne 1,4 m/rok uvádzajú MIHÁILĂ et al. (2021) pre karpatské pohorie Rodna, kde zaznamenali posun alpskej hranice o 180 m za 131 rokov. Porovnateľné hodnoty okolo 1 m/rok boli zistené aj v Alpách (GEHRIG FASEL et al., 2007). V amerických Skalnatých horách dochádzalo k posunu alpskej hranice lesa od 18. storočia do roku 2000 v priemere 0,5 m/rok, pričom medzi jednotlivými lokalitami bola zaznamenaná výrazná variabilita (ELLIOT et al., 2010). V horstve Sayan na Sibíri bola reakcia lesa na zmenu klímy vyjadrená rýchlosťou posunu okolo 0,6 m/rok (KHARUK et al., 2010). Výraznejšie posuny boli pozorované v tropických Andách (2,5–3,5 m/rok; FEELEY et al., 2011) a v Himalájach, kde štúdie uvádzajú hodnoty v rozpätí od 0 do 12 m/rok (GAIRE et al., 2023; KUMAR & KHANDURI, 2024).

V kontexte týchto výsledkov predstavuje výškový posun klimatickej hranice na skúmanej lokalite mimoriadne vysokú hodnotu, čo poukazuje na výraznú klimatickú citlivosť daného vysokohorského ekosystému. Vo Vysokých Tatrách bol najvýraznejší posun zaznamenaný u kosodreviny, ktorá expandovala do vyšších nadmorských výšok, predovšetkým na slnečné a mierne svahovité stanovištia (PISCOVÁ et al. 2023). Z dlhodobého hľadiska (1956–2010) však bol posun hraníc ihličnatých lesov, krovín a alpských lúk smerom nahor hodnotený len ako mierny (SOLÁR & SOLÁR, 2020), čo poukazuje na nižšiu dynamiku výškového posunu v porovnaní s výsledkami tejto štúdie. Počas prvotného terénneho mapovania v alpskom ekotóne Skalnatej doliny (júl 2025) bol najvyšší výskyt tejto dreviny zaznamenaný v lokalite pod Lomnickým štítom a to vo výške približne 2400 m n. m. (Obr. 4).

Kosodrevina v spodnej časti Skalnatej doliny, približne na úrovni 1500–1600 m n.m. vytvára konkurenčné prostredie pre vertikálny posun hornej hranice lesa, kde dominuje smrek obyčajný (*Picea abies*) s prímiesou smrekovca opadavého (*Larix decidua*) a ojedinelým výskytom borovice limovej (*Pinus cembra*). Vo Vysokých Tatrách horná hranica lesa vystupuje aj do vyšších polôh, napr. smrek s limbou na Patrii kulminujú vo výške na úrovni 1700 m n.n. (Plesník, 2010). Súčasné otepľovanie môže predĺžiť vegetačné obdobie a potenciálne zvýšiť tempo rastu drevín na hornej hranici lesa. Predpokladá sa, že v subalpínskych lesoch Západných Karpát bude smrek obyčajný zaznamenávať zvýšený rast v teplejších podmienkach, zatiaľ čo borovica limbová zníži rast v dôsledku teplotného stresu (Marcis et al., 2025).

Ďalší výskum bude orientovaný na podrobné mapovanie rozšírenia kosodreviny a overenie doterajších poznatkov o klimatických podmienkach, ktoré ovplyvňujú rast drevín vo vysokohorskom prostredí.



Obr. 4 Najvyššia poloha (N 49°11.57077', E 20°12.83777', 2400 m n. m.) výskytu borovice horskej v Skalnatej doline zaznamenaná pri terénnom mapovaní pod Lomnickým štítom v roku 2025.

Fig. 4 The highest occurrence of mountain pine (N 49°11.57077', E 20°12.83777', 2400 m a.s.l.) in Skalnatá dolina under Lomnický štít, documented during field mapping in 2025.

ZÁVER

Globálne otepľovanie mení klimatické podmienky v horských oblastiach. Sledovanie zmien klimatickej hranice rastu stromovej vegetácie v prechodovej zóne medzi súvislým lesným porastom a alpínskym pásmom poskytuje dôležité poznatky o vplyve klimatickej zmeny na rozširovanie horských drevín do vyšších nadmorských výšok.

V tejto štúdii sme analyzovali klimatické podmienky alpínskeho ekotónu v Skalnatej doline vo Vysokých Tatrách a to na základe dlhodobých klimatických meraní z observatórií Skalnaté Pleso (1778 m n. m.) a Lomnický štít (2635 m n. m.). Hodnotili sme trendy priemernej teploty vzduchu v období 1951–2024 vo vzťahu k trom teplotným kritériám používaným na určenie klimatickej hranice: (1) priemerná júlová teplota, (2) priemerná sezónna teplota počas letných mesiacov jún–august a (3) priemerná sezónna teplota za vegetačné obdobie máj–september.

Vo všetkých prípadoch sme zaznamenali štatisticky významný trend zvyšovania teploty s priemerným ročným nárastom o 0,03 až 0,04 °C, čo je porovnateľné s hodnotami uvádzanými z iných horských regiónov. Vplyvom tohto otepľovania sa klimatická hranica za viac ako 70 ročné obdobie posunula vyššie približne o 400 metrov, v priemere 5–6 m za rok, čo výrazne prevyšuje hodnoty publikované pre iné vysokohorské oblasti. Prvotné terénne pozorovania potvrdili expanziu borovice horskej, ktorá je dominantnou drevinou alpínskeho ekotónu vo Vysokých Tatrách, do vyšších polôh alpínskeho pásma. Pri terénnom mapovaní v roku 2025 bola najvyššia poloha výskytu tejto dreviny zaznamenaná vo výške približne 2400 m n. m. Ďalší výskum bude zameraný na detailné terénne mapovanie rozšírenia kosodreviny a overenie získaných poznatkov o klimatických limitoch rastu drevín vo vysokohorskom prostredí.

Podakovanie

Prezentovaný príspevok vznikol vďaka finančnej podpore projektov VEGA: 2/0048/25 a 2/0115/25

LITERATÚRA

BADER, M. Y., LLAMBÍ, L. D., CASE, B. S., BUCKLEY, H. L., TOIVONEN, J. M., CAMARERO, J. J., CAIRNS, D. M., BROWN, C. D., WIEGAND, T., & RESLER, L. M. (2021). A global framework for linking alpine-treeline ecotone patterns to underlying processes. *Ecography*, 44(2), 265–292. <https://doi.org/10.1111/ecog.05285>

- BEZÁK, V., & MAJČIN, D. (2013). Stručná charakteristika geologických a geomorfologických pomerov v okolí Skalnatej doliny. In Bičárová (ed), *Observatórium SAV Skalnaté Pleso – 70 rokov meteorologických meraní. Geofyzikálny ústav SAV: Stará Lesná*, 63 p., http://gpi.savba.sk/GPIweb/ofa/images/slovak/Publikacie/Manuscript_70SkP.pdf
- FEELY, K. J., SILMAN, M. R., BUSH, M. B., FARFAN, W., CABRERA, K. G., MALHI, Y., MEIR, P., REVILLA, N. S., QUISIYUPANQUI, M. N. R., & SAATCHI, S. (2011). Upslope migration of Andean trees. *Journal of Biogeography*, 38(4), 783–791. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x>
- FENG, X., LIN, P., & ZHAO, W. (2022). The physiological constraints of alpine treeline in Qilian Mountains. *Forest Ecology and Management*, 503, 119761. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119761>
- GAIRE, N. P., FAN, Z.-X., CHHETRI, P. K., SHAH, S. K., BHUJU, D. R., WANG, J., SHARMA, B., SHI, P., & DHAKAL, Y. R. (2023). Treeline Dynamics in Nepal Himalaya in a Response to Complexity of Factors. In *Ecology of Himalayan Treeline Ecotone* (pp. 519–563). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4476-5_22
- GEHRIG-FASEL, J., GUIBAN, A., & ZIMMERMANN, N. E. (2007). Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science*, 18(4), 571–582. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x>
- HARSCH, M. A., HULME, P. E., MCGLONE, M. S., & DUNCAN, R. P. (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12(10), 1040–1049. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>
- HLAVATÁ, H. (2013). Teplota vzduchu na Skalnatom Plese. In Bičárová (ed), *Observatórium SAV Skalnaté Pleso – 70 rokov meteorologických meraní. Geofyzikálny ústav SAV: Stará Lesná*, 63 p., http://gpi.savba.sk/GPIweb/ofa/images/slovak/Publikacie/Manuscript_70SkP.pdf
- KACZKA, R. J., LEMPA, M., CZAJKA, B., JANECKA, K., RĄCZKOWSKA, Z., HREŠKO, J., & BUGAR, G. (2015). The recent timberline changes in the Tatra Mountains: A case study of the Mengusovská Valley (Slovakia) and the Rybi Potok Valley (Poland). *Geographia Polonica*, 88(2), 71–83. <https://doi.org/10.7163/GPol.0016>
- KAŠPAR, J., & TREML, V. (2016). Thermal characteristics of alpine treelines in Central Europe north of the Alps. *Climate Research*, 68(1), 1–12. <https://doi.org/10.3354/cr01370>
- KENDALL, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London.
- KHARUK, V. I., IM, S. T., & DVINSKAYA, M. L. (2010). Forest–tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(3), 224–233. <https://doi.org/10.1080/02827581003766959>
- KÖPPEN, W. (1884). Die Warmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet. *Meteorologische Zeitschrift*, 1, 215–226.
- KÖRNER, CH. (1998). A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115(4), 445–459. <https://doi.org/10.1007/s004420050540>
- KÖRNER, CH. (2012). *Alpine Treelines*. Springer Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0396-0>
- KÖRNER, CH. (2020). Climatic Controls of the Global High Elevation Treelines. In *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 275–281). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11998-0>
- KÖRNER, CH. (2021). The cold range limit of trees. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(11), 979–989. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.011>
- KÖRNER, CH., & PAULSEN, J. (2004). A World-Wide Study of High Altitude Treeline Temperatures. *Journal of Biogeography*, 31(5), 713–732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x>
- KRIPEL, E. (1986). Postglacial development of vegetation in Slovakia. VEDA. https://www.library.sk/arlsdk/sk/detail-sldk_un_cat-c027069-Postglacialny-vyvoj-vegetacie-Slovenska/
- KULAKOWSKI, D., BARBEITO, I., CASTELLER, A., KACZKA, R. J., & BEBI, P. (2016). Not only climate: Interacting drivers of treeline change in Europe. *Geography*, 8(1), 7–15.
- KUMAR, S., & KHANDURI, V. P. (2024). Impact of climate change on the Himalayan alpine treeline vegetation. *Heliyon*, 10(23), e40797. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40797>
- LEHNER, G., & LÜTZ, C. (2003). Photosynthetic functions of cembra pines and dwarf pines during winter at timberline as regulated by different temperatures, snowcover and light. *Journal of Plant Physiology*, 160, 153–166. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00798>

- LECHLER, L., RIXEN, C., BEBI, P., BAVAY, M., MARTY, M., BARBEITO, I., DAWES, M. A., HAGEDORN, F., KRUMM, F., MÖHL, P., SCHAUB, M., & FREI, E. R. (2024). Five decades of ecological and meteorological data enhance the mechanistic understanding of global change impacts on the treeline ecotone in the European Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 355, 110126. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110126>
- LUKASOVÁ, V., BUCHA, T., MAREKOVÁ, E., BUCHHOLCEROVÁ, A., & BIČÁROVÁ, S. (2021). Changes in the Greenness of Mountain Pine (*Pinus mugo* Turra) in the Subalpine Zone Related to the Winter Climate. *Remote Sensing*, 13(9), 1788. <https://doi.org/10.3390/rs13091788>
- LUKASOVÁ, V., BUCHHOLCEROVÁ, A., ONDERKA, M., BIČÁROVÁ, S., BILČÍK, D., & NEJEDLÍK, P. (2023). How can the transition from conventional to automatic measurements affect the climatological normals? – A case study from an alpine meteorological observatory at Skalnaté Pleso, Slovakia. *Meteorologische Zeitschrift*, 32(5), 431–444. <https://doi.org/10.1127/metz/2023/1200>
- MANN, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13:163-171.
- MARCIS, P., RYBAR, J., ŠEBEŇ, V., MURGAŠ, V., & SITKOVÁ, Z. (2025). *Picea abies* and *Pinus cembra* at high altitudes show different growth reaction to rising temperatures: Study from the Western Carpathian subalpine forests. *Dendrochronologia*, 91, 126325. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2025.126325>
- MIHAILĂ, D., BISTRICEAN, P.-I., & HORODNIC, V.-D. (2021). Drivers of Timberline Dynamics in Rodna Mountains, Northern Carpathians, Romania, over the Last 131 Years. *Sustainability*, 13(4), 2089. <https://doi.org/10.3390/su13042089>
- MRI - Mountain Research Initiative EDW Working Group (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Clim Change* 5, 424–430 (2015). <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- PAULSEN, J., & KÖRNER, CH. (2014). A climate-based model to predict potential treeline position around the globe. *Alpine Botany*, 124(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00035-014-0124-0>
- PISCOVÁ, V., HREŠKO, J., ŠEVČÍK, M., & SLOBODOVÁ, T. (2023). Impacts of Human Activities on the High Mountain Landscape of the Tatras (Example of the Border Area of the High and Belianske Tatras, Slovakia). <https://doi.org/10.5772/intechopen.105601>
- PLESNÍK, P. (2010). Lesná fytoekológia zabezpečuje existenciu a rozvoj biosféry. Vedecká konferencia “Krajina, príroda, biosféra”, Univerzita Komenského v Bratislave.
- RANGWALA, I., & MILLER, J. R. (2012). Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes. *Climatic Change*, 114(3–4), 527–547. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0419-3>
- SOLÁR, J., & JANIGA, M. (2013). Long-term Changes in Dwarf Pine (*Pinus mugo*) Cover in the High Tatra Mountains, Slovakia. *Mountain Research and Development*, 33(1), 51–62. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00079.1>
- SOLÁR, J., & SOLÁR, V. (2020). Land-cover change in the Tatra Mountains, with a particular focus on vegetation. *Eco.Mont (Journal on Protected Mountain Areas Research)*, 12(1), 15–26. <https://doi.org/10.1553/eco.mont-12-1s15>
- ŠKVARENINA, J., & FLEISCHER, P. (2013). Bioklimatické podmienky a vegetácia Skalnatej doliny. In Bičárová (ed), *Observatórium SAV Skalnaté Pleso – 70 rokov meteorologických meraní*. Geofyzikálny ústav SAV: Stará Lesná, 63 p. http://gpi.savba.sk/GPIweb/ofa/images/slovak/Publikacie/Manuscript_70Skp.pdf
- ŠVAJDA, J., SOLÁR, J., JANIGA, M., & BULIAK, M. (2011). Dwarf Pine (*Pinus mugo*) and Selected Abiotic Habitat Conditions in the Western Tatra Mountains. *Mountain Research and Development*, 31(3), 220–228. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-09-00032.1>
- ŽATKOVÁ, L., MILOVSKÝ, R., BECHTEL, A., STAREK, D., PÍPÍK, R., & ŠURKA, J. (2023). n-Alkane and terpenoid fingerprints of modern biomass producers unveil floral changes recorded in postglacial alpine lake sediments, Tatra Mountains, Slovakia. *Organic Geochemistry*, 184, 104672. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2023.104672>

VÝVOJ A VALIDÁCIA BIOKLIMATOLOGICKÉHO MODELU NA PREDIKCIU VNÚTORNEJ KLÍMY VČELIEHO ÚEA

Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ – Ľubomír KORENÝ – Jaroslav VIDO – Jaroslav
ŠKVARENINA

Katedra prírodného prostredia, T. G. Masaryka 24, Technická univerzita vo Zvolene, 960 01 Zvolen, SR,
michaela.hillayova@tuzvo.sk, xkorenym@tuzvo.sk, jaroslav.vido@tuzvo.sk, jaroslav.skvarenina@tuzvo.sk

ABSTRACT

Korená Hillayová M., Korený Ľ., Vido J., Škvarenina J.: Development and validation of a bioclimatological model for predicting the internal climate of a beehive

This paper presents a biometeorological analysis of the internal climate of two beehives (BH1 and BH2) using multiple linear regression. The study's objective was to model the internal temperature and humidity of the hives based on external temperature and humidity data collected during the active beekeeping season. Both the temperature and humidity models were found to be statistically significant, but they exhibited different predictive capabilities. The models for internal temperature demonstrated a low coefficient of determination ($R^2 \approx 0.20\text{--}0.22$), indicating that external weather conditions explain only a limited portion of the variability in the hives' internal temperature. This finding underscores the effectiveness of the bee colony's active thermoregulation. In contrast, the models for internal humidity showed a higher R^2 value ($R^2 \approx 0.32\text{--}0.33$), suggesting a stronger relationship between external and internal humidity levels. However, the models for humidity also had a higher Mean Absolute Error (MAE $\approx 20\text{--}23\%$) compared to the temperature models (MAE $\approx 1.2\text{ }^\circ\text{C}$). The models developed in this study successfully confirm the fundamental relationship between a beehive's internal climate and its external environment, providing an important starting point for further research. To achieve higher predictive accuracy, it will be necessary to incorporate internal variables reflecting the colony's biological activity and to collect year-round data, thereby extending their applicability to the winter period.

Key words: Bee colony, biometeorology, linear regression, microclimate, thermoregulation

ÚVOD

Bioklimatológia je dynamický vedný odbor, ktorý skúma vzájomné pôsobenie živých organizmov a klimatických faktorov na rôznych priestorových a časových škálach (MAAROUF a MUNN, 2005; CHIOU et al., 2015). Pochopenie týchto vzťahov je kľúčové nielen pre predpovedanie zmien v ekosystémoch, ale aj pre praktické aplikácie v poľnohospodárstve, lesníctve či pri ochrane biodiverzity (DAWSON et al., 2011; MORI et al., 2017). V kontexte prebiehajúcich klimatických zmien sa pozornosť upriamuje na reakcie organizmov na zmeny v ich bezprostrednom prostredí, teda na mikroklimatické podmienky (POTTER et al., 2013; PINCEBOURDE et al., 2016).

Včely medonosné (*Apis mellifera*) predstavujú jeden z najvýznamnejších bioindikátorov stavu životného prostredia, pričom ich prežitie a zdravie sú silne závislé od optimálnych mikroklimatických podmienok v ich úli (SHARIF et al., 2022; DAR et al., 2025). Úl je komplexný a termoregulačne aktívny systém, kde včelstvo dokáže aktívne regulovať teplotu a vlhkosť, aby si udržalo optimálne podmienky pre liahnutie plodu, spracovanie medu a prežitie zimného obdobia (ABOU-SHAARA et al., 2017; JARIMI et al., 2020; RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ et al., 2024). Hoci sú tieto vnútorné procesy dobre zdokumentované, stále existuje priestor pre podrobnejšie skúmanie, ako konkrétne vonkajšie klimatické podmienky ovplyvňujú schopnosť včelstva udržiavať túto stabilitu (KORENÁ HILLAYOVÁ et al., 2022). Predchádzajúce práce (napr. JONES et al., 2004; STABENTHEINER et al., 2010; OCKO a MAHADEVAN, 2014) sa zaoberali skúmaním termoregulácie včelstiev vo vnútri úľov, avšak komplexné modelovanie vzťahu medzi vonkajšími a vnútornými klimatickými dátami ostáva nedostatočne preskúmané.

Cieľom tejto štúdie je vývoj a validácia bioklimatologického modelu na predikciu vnútornej klímy včelieho úľa na základe vonkajších klimatických dát (teplota, vlhkosť). Na základe analýzy rozsiahlych časových radov vnútorných a vonkajších podmienok sa pokúsime identifikovať kľúčové faktory a zostaviť predikčný model. Následne

sa v rámci práce vykoná validácia modelu, aby sa preverila jeho schopnosť presne simulovať vnútorné podmienky v úli.

MATERIÁL A METÓDY

Charakteristika experimentálneho územia

Včelstvá sa nachádzajúna strednom Slovensku v obci Piešť II. oblasť Horná Liečna. Územie sa nachádza 48°30'31"N a 19°25'56"E v

nadmorskej výške 535 m n. m. v katastrálnom území mesta Detva. V lokalite prevláda klimageografický subtyp teplej horskej klímy. Priemerná teplota počas roka sa pohybuje cca pri 7,9 °C, priemerný ročný úhrn zrážok je cca 745 mm a priemerná ročná vlhkosť vzduchu 75,2 %. Reliéf má vrchovinový charakter. Vegetačný kryt tvoria hlavne trvalé trávnaté porasty, lúky a pasienky v menšej miere aj lesy, a to bučiny a jedľa – bučiny. V nižších častiach pohoria rastú dubiny a dubové – hrabiny (Korený 2021).

Zber dát vo vnútri úľov

Na zber bioklimatologických dát od mája do augusta 2025 vo vnútri včelieho úľa bol použitý prístroj „Srdce úľa“ (BeeHive Monitoring, Slovenská republika) (Obr. 1a), ktorý je špeciálne navrhnutý na monitorovanie včelstiev bez rušenia ich prirodzeného prostredia. Celkovo boli dáta zbierané z dvoch včelích úľov. Zariadenie s rozmermi 70 x 60 x 8 mm a hmotnosťou 30 g bolo umiestnené vo vnútri úľa, na rámiky s plodom, pričom elektronika smerovala nadol. Prístroj poskytoval údaje o teplote a vlhkosti vo vnútri úľa v 10-minútových intervaloch.

Zber meteorologických dát

Na meranie vonkajších klimatických podmienok od mája do augusta 2025 bola použitá automatická meteorologická stanica so senzorom EMS33 (EMS Brno, Česká republika), ktorá merala teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu v rovnakom období ako srdce úľa. Stanica (Obr. 1b) bola umiestnená na otvorenom priestranstve približne 10 metrov od včelích úľov. Meteorologické premenné sa merali v 10-minútových intervalov. Tento prístup bol zvolený s cieľom získať presnejšiu priemernú hodnotu teploty a minimalizovať tak vplyv mikrometeorologickej variability.

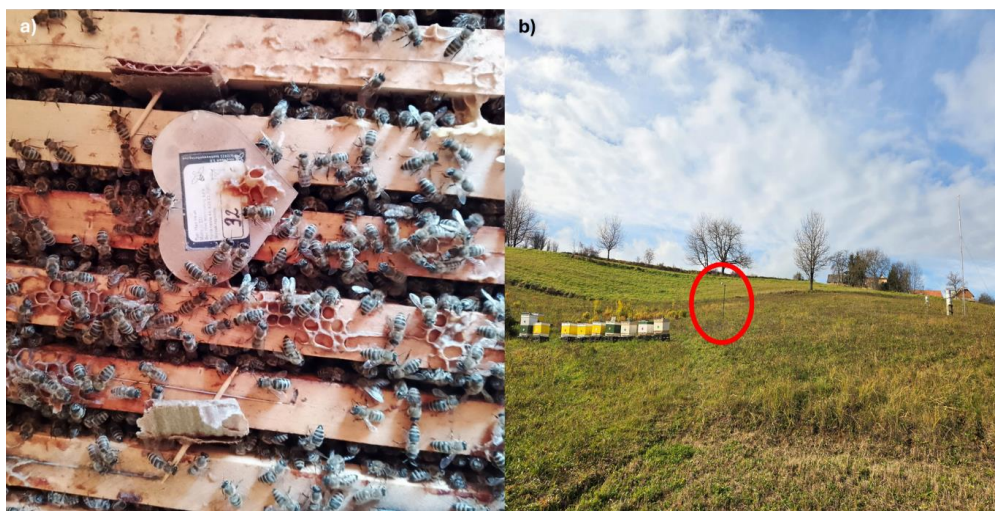
Návrh a validácia predikčného modelu

Na základe zozbieraných rozsiahlych časových radov vnútornej a vonkajšej teploty a vlhkosti z dvoch úľov bol vyvinutý bioklimatologický model na predikciu vnútorných podmienok včelieho úľa. Celkový súbor dát bol rozdelený na tréningovú sadu (80 %) a validačnú sadu (20 %).

Pred samotným modelovaním bola vykonaná deskriptívna štatistická analýza, ktorá zahŕňala výpočet priemerov, mediánov, smerodajných odchýlok, minimálnych a maximálnych nameraných hodnôt pre vnútorné a vonkajšie premenné. Na preskúmanie lineárneho vzťahu medzi premennými bola použitá korelačná analýza, ktorá potvrdila vhodnosť ďalšieho modelovania. Následne bol pre predikciu vnútornej teploty a vlhkosti úľa použitý model viacnásobnej lineárnej regresie s nasledovnou všeobecnou formou:

$$Y_{\text{pred}} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad (1)$$

V tomto modeli Y_{pred} reprezentuje predikovanú hodnotu (vnútornú teplotu alebo vlhkosť), X_1 až X_n sú nezávislé premenné (vonkajšia teplota, vonkajšia vlhkosť) a β_0 až β_n sú regresné koeficienty. Tento prístup, zameraný na modelovanie mikroklimatických podmienok, je v súlade s trendmi v digitálnom včelárstve (ROBUSTILLO et al., 2022). Presnosť a výkonnosť modelu bola overená na validačnej sade dát pomocou štandardných štatistických metrík: stredná kvadratická chyba (RMSE), stredná absolútna chyba (MAE) a koeficient determinácie (R^2).



Obr. 1 Použité zariadenia na zber dát. a) „Srdce úľa“ na meranie vnútorných podmienok, b) Meteorologická stanica
Fig. 1 Equipment used for data collection. a) "Heart of the hive" for measuring internal conditions, b) Meteorological Station

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na základe zozbieraných bioklimatologických dát z dvoch včelích úľov a jednej meteorologickej stanice bola vykonaná deskriptívna štatistická analýza. Celkový dátový súbor obsahoval 36 378 jednotlivých meraní (6063 meraní teploty a 6063 meraní vlhkosti pre každý úľ a meteorologickú stanicu), ktoré boli zozbierané počas aktívnej sezóny včelstiev. Priemerná vonkajšia teplota počas sledovaného obdobia bola 10.53 °C, s výraznými výkyvmi od minima -5.85 °C po maximum 27.46 °C. Priemerná vonkajšia vlhkosť dosahovala 75.43 %, s extrémnym rozsahom od minima 18.91 % po maximum 100 %. Naopak, vnútorné prostredie úľov si udržiavalo stabilnejšiu teplotu, pričom priemerná hodnota pre Úľ₁ bola 20.81 °C a pre Úľ₂ 20.84 °C. Vnútorná teplota v Úľi 1 sa pohybovala od minima 5 °C po maximum 41.2 °C, zatiaľ čo pre Úľ₂ to bolo od 5.7 °C po 40.3 °C. Priemerná vnútorná vlhkosť pre Úľ₁ bola 43.91 % a pre Úľ₂ 46.39 %, s rozsahom od 19.6 % do 61.2 % v Úľ₁ a od 19.2 % do 64.3 % v Úľ₂. Použili sme Durbin-Watsonov test, ktorý potvrdil, že autokorelácia reziduí je nevýznamná/v prijateľnom rozsahu (DW=1,95, p>0.05).

Predikčný model pre vnútornú teplotu

Pre vnútornú teplotu v úľoch 1 a 2 boli vyvinuté modely viacnásobnej lineárnej regresie, ktoré predikujú vnútornú teplotu (Y_{pred}) na základe vonkajšej teploty ($T_{vonkajšia}$) a vonkajšej vlhkosti ($V_{vonkajšia}$). Obe dva modely boli postavené na 4 850 pozorovaniach (trénovacia sada) a sú štatisticky vysoko významné ($p < 0.001$), čo potvrdzuje, že vzťah medzi premennými nie je náhodný.

$$\text{Model pre Úľ}_1: Y_{pred} = 16.60 + 0.14 \cdot T_{vonkajšia} - 0.006 \cdot V_{vonkajšia} \quad (2)$$

$$\text{Model pre Úľ}_2: Y_{pred} = 17.21 + 0.137 \cdot T_{vonkajšia} - 0.005 \cdot V_{vonkajšia} \quad (3)$$

Hodnota koeficientu determinácie (R^2) dosiahla pre Úľ₁ = 0.220 a pre Úľ₂ = 0.205, čo znamená, že približne 20-22 % variability vnútornej teploty je vysvetlených vonkajšími faktormi. Zvyšná variabilita je pravdepodobne spôsobená komplexnými vnútornými faktormi, ako je aktivita včelstva alebo množstvo plodu. Presnosť modelov bola overená na validačnej sade a dosiahla pre Úľ₁ strednú absolútnu chybu (MAE) 1.2 °C a pre Úľ₂ MAE = 1.22 °C, čo svedčí o dobrej predikčnej schopnosti napriek nízkym hodnotám R^2 .

Koeficient pre vonkajšiu teplotu bol v oboch modeloch veľmi podobný (0.140 pre Úľ₁ a 0.137 pre Úľ₂), čo naznačuje, že s nárastom vonkajšej teploty o 1 °C sa vnútorná teplota úľa zvýši približne o 0.14 °C. Podobne aj koeficient pre vonkajšiu vlhkosť bol konzistentne negatívny, s hodnotami -0.006 a -0.005, čo môže súvisieť s termoreguláciou včelstva.

Predikčný model pre vnútornú vlhkosť

Pre vnútornú vlhkosť v úľoch 1 a 2 boli vyvinuté modely viacnásobnej lineárnej regresie, ktoré predikujú vnútornú vlhkosť (Y_{pred}) na základe vonkajšej teploty ($T_{\text{vonkajšia}}$) a vonkajšej vlhkosti ($V_{\text{vonkajšia}}$). Obidva modely sú štatisticky vysoko významné a boli postavené na 4 850 pozorovaniach (trénovacia sada).

$$\text{Model pre } \dot{U}T_1: Y_{\text{pred}} = 25.17 + 0.78 \cdot T_{\text{vonkajšia}} + 0.14 \cdot V_{\text{vonkajšia}} \quad (4)$$

$$\text{Model pre } \dot{U}T_2: Y_{\text{pred}} = 24.31 + 0.84 \cdot T_{\text{vonkajšia}} + 0.16 \cdot V_{\text{vonkajšia}} \quad (5)$$

Hodnota koeficientu determinácie (R^2) dosiahla pre $\dot{U}T_1 = 0.323$ a pre $\dot{U}T_2 = 0.328$, čo je výrazne vyššie ako v prípade modelov pre teplotu. To naznačuje, že vonkajšie faktory majú väčší vplyv na variabilitu vnútornej vlhkosti než teploty. Presnosť modelov bola overená na validačnej sade, kde MAE pre $\dot{U}T_1$ bolo 20.08 % a pre $\dot{U}T_2 = 23.37$ %. Hoci je MAE v absolútnych číslach vysoké, modely sú silnejšie vo vysvetľovaní celkovej variability.

Koeficienty pre vonkajšiu teplotu (0.78 pre $\dot{U}T_1$ a 0.84 pre $\dot{U}T_2$) a vonkajšiu vlhkosť (0.14 a 0.16) sú v oboch úľoch pozitívne a konzistentné, čo poukazuje na silný a priamy vzťah medzi vonkajšími a vnútornými vlhkosťmi podmienkami.

Vyvinuté modely sú síce štatisticky významné, no pre dosiahnutie vyššej predikčnej presnosti je potrebné do analýzy zahrnúť aj ďalšie vnútorné premenné, ktoré odrážajú biologickú aktivitu včelstva. Tieto modely však úspešne demonštrujú základný vzťah medzi vnútornou klímou úľa a vonkajším prostredím a potvrdzujú, že včelstvá aktívne regulujú svoju vnútornú teplotu.

ZÁVER

Vo výskumnej práci sme sa venovali modelovaniu vnútornej teploty a vlhkosti v dvoch včelích úľoch ($\dot{U}T_1$ a $\dot{U}T_2$) pomocou viacnásobnej lineárnej regresie. Modely boli postavené na základe vonkajšej teploty a vonkajšej vlhkosti. Napriek tomu, že oba modely pre teplotu boli štatisticky vysoko významné a ich koeficienty konzistentné, zistili sme, že sú schopné vysvetliť len 20-22 % variability vnútornej teploty. Naopak, modely pre vnútornú vlhkosť dosiahli vyššiu hodnotu R^2 (≈ 0.32 - 0.33), čo naznačuje, že vonkajšie podmienky majú na vnútornú vlhkosť úľa výraznejší vplyv než na teplotu. Táto relatívne nízka hodnota R^2 pre teplotu a mierne nárasty chybovosti (MAE a RMSE) potvrdzujú, že vnútorné termoregulačné a vlhkosťné procesy včelstva sú ovplyvnené aj inými, vnútornými faktormi, ktoré neboli v tejto štúdii zohľadnené.

Získané modely preto slúžia ako základný nástroj, ktorý demonštruje existenciu priameho vzťahu medzi vonkajšími a vnútornými podmienkami úľa počas aktívnej včelárskej sezóny. Pre dosiahnutie vyššej predikčnej presnosti v reálnych aplikáciách bude do budúcnosti potrebné navrhnuť komplexnejšie modely, ktoré zohľadnia aj premenné odrážajúce biologické procesy včelstva a zber dát v zimnom období.

PodĎakovanie

Autori ďakujú programu EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti pre Slovensko v rámci projektu č. 09I03-03-V04-00380 (<https://enviherb.tuzvo.sk/>), a Vedeckej agentúre Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže SR a Slovenskej akadémie vied (VEGA) v rámci projektov VEGA 1/0443/23 a VEGA 1/0562/24.

LITERATÚRA

- ABOU-SHAARA, H. F., OWAYSS, A. A., IBRAHIM, Y. Y., & BASUNY, N. K. (2017). A review of impacts of temperature and relative humidity on various activities of honey bees. *Insectes sociaux*, 64(4), 455-463. <https://doi.org/10.1007/s00040-017-0573-8>
- DAR, S. A., SAAD, M., HASAN, W., DEVI, Y. K., RIDOUANE, F. L., ALYAMMAHI, K., ... & EL-SAMAD, L. M. (2025). Solitary Bees as Vital Bioindicators: A Comprehensive Review of the Diversity, Decline, and Conservation Imperatives of the Halictidae Family. *Entomological Research*, 55(6), e70047. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.70047>
- DAWSON, T. P., JACKSON, S. T., HOUSE, J. I., PRENTICE, I. C., & MACE, G. M. (2011). Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *science*, 332(6025), 53-58. DOI: 10.1126/science.1200303
- CHIOU, C. R., HSIEH, T. Y., & CHIEN, C. C. (2015). Plant bioclimatic models in climate change research. *Botanical studies*, 56(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40529-015-0104-8>
- JARIMI, H., TAPIA-BRITO, E., & RIFFAT, S. (2020). A Review on Thermoregulation Techniques in Honey Bees (Apis Mellifera) Beehive Microclimate and Its Similarities to the Heating and Cooling Management in Buildings. *Future Cities & Environment*, 6. <https://doi.org/10.5334/fce.81>

- JONES, J. C., MYERSCOUGH, M. R., GRAHAM, S., & OLDROYD, B. P. (2004). Honey bee nest thermoregulation: diversity promotes stability. *Science*, 305(5682), 402-404. DOI: [10.1126/science.1096340](https://doi.org/10.1126/science.1096340)
- KORENÁ HILLAYOVÁ, M., KORENÝ, L., & ŠKVARENINA, J. (2022). The local environmental factors impact the infestation of bee colonies by mite *Varroa destructor*. *Ecological Indicators*, 141, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109104>
- KORENÝ, L. (2021). Vplyv teploty a vlhkosti vzduchu na spád klieštika včelieho (*Varroa destructor*). Bakalárska práca. Zvolen: TU Z, 2021.
- MAAROUF, A. R., & MUNN, R. E. (2005). Bioclimatology. In *Encyclopedia of world climatology* (pp. 158-165). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_29
- MORI, A. S., LERTZMAN, K. P., & GUSTAFSSON, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12-27. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- OCKO, S. A., & MAHADEVAN, L. (2014). Collective thermoregulation in bee clusters. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(91), 20131033. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.1033>
- PINCEBOURDE, S., MURDOCK, C. C., VICKERS, M., & SEARS, M. W. (2016). Fine-scale microclimatic variation can shape the responses of organisms to global change in both natural and urban environments. *Integrative and Comparative Biology*, 56(1), 45-61. <https://doi.org/10.1093/icb/icw016>
- POTTER, K. A., ARTHUR WOODS, H., & PINCEBOURDE, S. (2013). Microclimatic challenges in global change biology. *Global change biology*, 19(10), 2932-2939. <https://doi.org/10.1111/gcb.12257>
- ROBUSTILLO, M. C., PÉREZ, C. J., & PARRA, M. I. (2022). Predicting internal conditions of beehives using precision beekeeping. *biosystems engineering*, 221, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.006>
- RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, S., BEJAR, A. A. G., ROMO-CHACÓN, A., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ-RÍOS, H., & OROZCO-AVITIA, J. A. (2024). Hive temperature regulation by honeybees in response to extreme conditions. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i3.3082>
- SHARIF, M. Z., DI, N., & LIU, F. (2022). Monitoring honeybees (*Apis* spp.)(Hymenoptera: Apidae) in climate-smart agriculture: A review. *Applied Entomology and Zoology*, 57(4), 289-303. <https://doi.org/10.1007/s13355-021-00765-3>
- STABENTHEINER, A., KOVAC, H., & BRODSCHNEIDER, R. (2010). Honeybee colony thermoregulation—regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. *PLoS one*, 5(1), e8967. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008967>

VPLYV ZMENY KLÍMY NA KVITNUTIE BREZY PREVISNUTEJ (*BETULA PENDULA* L. NA ÚZEMÍ SLOVENSKA

Jana ŠKVARENINOVÁ - Ivan MREKAJ

Katedra aplikovanej ekológie, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, email: skvareninova@tuzvo.sk, mrekaj.ivan@gmail.com

ABSTRACT

Škvareninová, J., Mrekaj, I.: The impact of climate change on the flowering of silver birch (*Betula pendula* L. in Slovakia

The paper presents the impact of climate change on the phenological manifestations of silver birch (*Betula pendula* L.) in Slovakia during two 30-year periods: 1961-1990 and 1991-2020. Changes in full flowering were evaluated according to the international BBCH 65 scale using trend analyses. Climate change was evaluated using meteorological elements – air temperature and precipitation during the two periods. Significant changes were observed in the second period. The average monthly air temperature between the periods increased by 1.1 °C, confirming the upward trend. It rose statistically significantly in April by 2.6 °C. Changes in total precipitation between the monitored periods were neither clear nor systematic. Temperature changes accelerated the onset of flowering, with a trend of 14 days earlier and a 5-day longer duration of the phase in the second period.

Key words: meteorological trends, phenological trends climate change, Silver birch (*Betula pendula* L.)

ÚVOD A PROBLEMATIKA

Fenológia je spoľahlivým nástrojom na zaznamenávanie zmien v krajine prostredníctvom fenologického monitoringu. Jarné fenologické fázy predstavujú jeden z najpreskúmanejších a často citovaných príkladov ekologickej reakcie na postupné klimatické otepľovanie (Post, 2013). Príklady skoršieho nástupu jarných fenologických fáz zahŕňajú širokú škálu životných prejavov rastlín. Napríklad skorší nástup jarných fenofáz ako je zalistenie a kvitnutie a na ne nadväzujúce biorytmy živočíchov boli zaznamenané za posledné dve desaťročia vo viacerých prácach (COOK et al., 2004, 2012; PARMESAN, 2007; ROOT et al., 2003) ako aj v piatej hodnotiacej správe IPCC (FIELD et al., 2014). Jedným z hlavných poznatkov týchto prác je aj rýchlejší postup jarných fenofáz v severnejších zemepisných šírkach ako v južnejších (PARMESAN, 2007). Dôležité údaje vplyvu klimatickej zmeny lesných drevín môžu poskytnúť dlhodobé fenologické merania a pozorovania (LANGVALL–LÖFVENIUS 2021). Dlhé časové rady fenologických pozorovaní sú predpokladom pre zisťovanie trendov vývoja fenologických fáz a hľadanie ich vzťahu ku klimatickej zmene (ASSE et al., 2018). Dôsledky zmeny klímy sa v pôvodných areáloch drevín neprejavujú rovnomerne. Reakcie rôznych ekotypov na tieto zmeny prostredníctvom dlhodobých fenologických prejavov dajú odpoveď na vývoj klímy aj v regionálnych podmienkach (LUKASOVÁ et al., 2020). Fenológia význam aj v humánnej medicíne a to hlavne pri monitoringu výskytu peľových alergénov v ovzduší. Podľa Svetovej alergiolologickej organizácie dochádza ku každoročnému zvyšovaniu počtu alergikov, pričom približne 20-30% svetovej populácie trpí nejakou formou alergie. Najvýraznejším alergénom spôsobujúcim alergickú nádkhu v Európe sú peľe tráv a brezy (KHVARAHM et al., 2017). Vplyv teplotných mestských ostrovov urýchľuje kvitnutie a tým aj predlžuje pôsobenie alergénov v ovzduší (JOCHNER–MENZEL, 2015). Následným oneskoreným kvitnutím v okolitej krajine sa transport peľových zŕn a ich pôsobenie v urbánnom prostredí môže predĺžiť. Meniaci sa klíma zohráva v súčasnosti jednu z dôležitých úloh v tom, kedy začínajú a ako dlho trvajú peľové sezóny. Podľa Biedermanna et al. (2019) sa hladiny peľu brezy v posledných desaťročiach zvýšili a obdobie expozície sa predĺžilo v dôsledku zmeny klímy, čo má za následok zvýšenie prevalence senzibilizácie peľom brezy. Existuje však veľká medziročná variabilita v peľovej sezóne, čo sťažuje presné určenie pôsobenia zmeny klímy. Vysokým koncentraciám brezového peľu v ovzduší napomáhajú aj horúce a suché obdobia, ktoré zároveň spôsobujú skoršie uvoľňovanie peľu.

Cieľom práce je analýza vplyvu zmeny klímy hodnotená meteorologickými prvkami (teplota vzduchu, zrážky) na kvitnutie brezy previsnutej v lesných ekosystémoch Slovenska pomocou dvoch 30 ročných časových

radov. Dlhodobé rady údajov sme získali z databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu v Bratislave a sú doplnené o vlastné pozorovania.

MATERIÁL A METÓDY

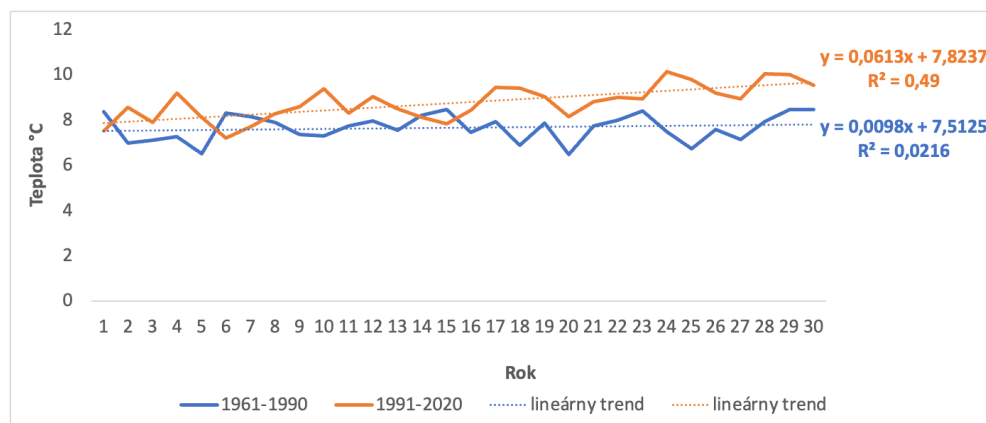
V prvom období rokov 1961-1990 prebiehali pozorovania na 36 lokalitách, v druhom období 1991-2020 sa pozorovania rozšírili o 30 lokalít, kde sa daný druh vyskytoval prirodzene. Výšková členitosť územia na ktorom sme analyzovali kvitnutie brezy predstavuje interval 100-1330 m n.m. Tento autochtónny druh sme si vybrali pre jeho vysoké prirodzené rozšírenie a zastúpenie na území Slovenska. Obdobia použité na výpočet normálov boli zvolené kvôli zosúladeniu období navrhovaných fenologických normálov a štandardných klimatologických normálov určených Svetovou meteorologickou organizáciou WMO (World Meteorological Organization, 2017). Fenologické aj meteorologické údaje poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ). Fenologické údaje, ktoré sme spracovali boli pozorované podľa rozličných metodík. Preto sme ich zjednotili a prepojili s medzinárodnou fenologickou stupnicou BBCH kódov (MEIER 1997), ktorá sa používa aj pre súčasné pozorovania v sieti SHMÚ. Hodnotili sme generatívnu fenofázu **plné kvitnutie (BBCH 65)** - deň, kedy samčie jahňady intenzívne uvoľňujú peľ aspoň na polovici jedincov danej skupiny.

Fáza bola pozorovaná na skupine 10 jedincov v dospelom veku (viac ako 50 rokov) na každej lokalite. Získané dátumy nástupu sme nahradili poradovým číslom dňa v roku (DOY) z dôvodu ďalšieho spracovania dát. Do analýzy boli zahrnuté len lokality, ktorých rad pozorovaní prevyšoval 70% úplných pozorovaní pre danú fázu. Dôvodom takéhoto zníženia boli chýbajúce dáta pri zmene metodiky a prechode na medzinárodnú stupnicu. Ak na lokalite bolo aspoň 70% pozorovaní pokladáme výpočet priemeru nástupu fenologických fáz za reprezentatívny pre dané časové obdobie a nazývame ho fenologický normál. Meteorologické údaje sme čerpali zo staníc, ktoré boli najbližšie k fenologickej stanici. Porovnávané boli jedno, dvoj a troj mesačné priemery teplôt vzduchu a sumy atmosférických zrážok pred nástupom fenologickej fázy. Vzťah medzi fenofázou a meteorologickými prvkami sme určili pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu. Hranicu pre hladinu štatistickej významnosti p sme stanovili na 0,05.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Meteorologické prvky a zmena klímy

Analýza **priemernej ročnej teploty vzduchu** na vybraných meteorologických stanicích (Obr. 1) preukázala otepľovanie v druhom období 1991-2020. V prvom období 1961-1990 dosiahla priemerná ročná teplota vzduchu hodnotu 7,7 °C. V druhom období vzrástla o 1,1 °C, čím sa potvrdil stúpajúci trend zmeny teplôt. Tento trend je štatisticky významný a dokumentuje celkové oteplenie medzi obdobiami o 1,8 °C. V druhom období bol zaznamenaný najvýraznejší nárast priemernej mesačnej teploty v apríli, kedy trend priemernej teploty vzduchu štatisticky významne stúpol až o 2,6 °C (Tab. 1).



Obr. 1 Priebeh a trend priemernej ročnej teploty vzduchu v dvoch obdobiach
Fig. 1 Course and trend of average annual air temperature in two periods

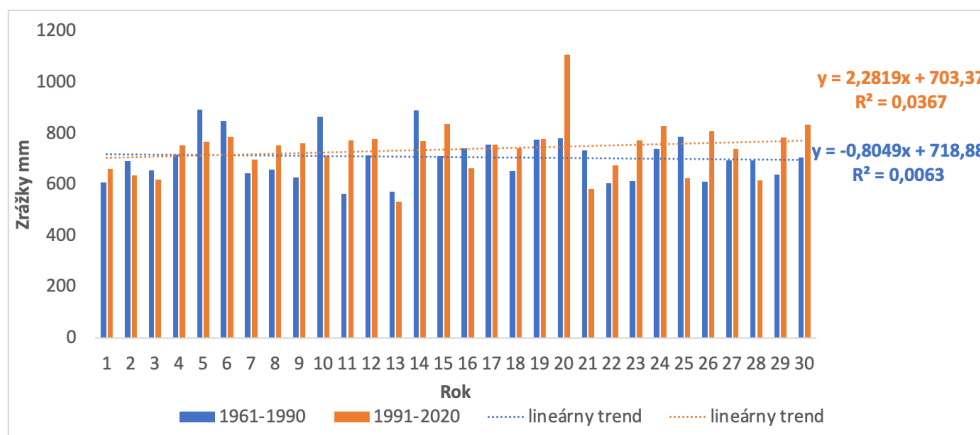
Podrobnejšie skúmanie priemerných mesačných teplôt vzduchu pre mesiace január až apríl (Tab. 1) potvrdilo nárast teplôt v druhom 30-ročnom období vo všetkých analyzovaných mesiacoch. Najväčšie zvýšenie priemernej mesačnej teploty bolo zaznamenané v januári, kedy sa teplota zvýšila o 1,5 °C. Tieto zistenia ukazujú zmenu teplotných podmienok na vybraných meteorologických staniciach, s dôrazom na štatisticky významné otepľovanie v druhom období.

Tab. 1 Priemerná teplota vzduchu a trendy v jednotlivých mesiacoch (*štatisticky významné)

Tab. 1 Average air temperature and trends in individual months (*statistically significant)

Mesiac	1961-1990		1991-2020		Zmena medzi obdobiami (°C)
	Priemerná teplota (°C)	Lineárny trend (°C)	Priemerná teplota (°C)	Lineárny trend (°C)	
Január	-3.6	2.0	-2.1	0.1	1.5
Február	-1.4	0.7	-0.5	2.4	0.9
Marec	2.7	1.6	3.5	1.9	0.8
Apríl	8.1	-1.0	9.3	2.6*	1.2

Pri trendových analýzach **priemerného ročného úhrnu zrážok** v sledovaných obdobiach (Obr. 2) bol zaznamenaný nárast zrážok v druhom období o 68 mm, avšak táto zmena sa nepreukázala ako štatisticky významná. Štatisticky významný trend poklesu zrážok bol potvrdený len pre mesiac apríl v druhom období (Tab. 2). Ostatné mesačné trendy neboli štatisticky významné. Tieto výsledky naznačujú, že zmeny v úhrne zrážok medzi sledovanými obdobiami neboli jednoznačné ani systematické, pričom len niektoré mesiace a trendy vykazovali štatistickú významnosť. Takéto poznatky môžu byť dôležité nielen pri hodnotení zmien fenologických prejavov, ale aj potenciálnych dôsledkov na hydrologické podmienky v sledovanom území.



Obr. 2 Priebeh a trend priemerného ročného úhrnu zrážok v dvoch obdobiach

Fig. 2 Course and trend of average total precipitation in two periods

Tab. 2 Priemerné úhrny zrážok a trendy (*štatisticky významné)

Tab. 2 Average total precipitation and trends (*statistically significant)

Mesiac	1961-1990		1991-2020		Zmena medzi obdobiami (mm)
	Suma zrážok (mm)	Lineárny trend (mm)	Suma zrážok (mm)	Lineárny trend (mm)	
Január	41.5	10.6	42.6	21.4	1.1
Február	39.4	-8.2	41.9	18.3	2.5
Marec	38.9	3.0	42.9	0.4	4.0
Apríl	51.1	8.4	48.0	-29.5*	-3.1

Plné kvitnutie (BBCH 65)

Priemerný nástup fenologickej fázy plného kvitnutia brezy (Tab. 33) bol v prvom hodnotenom období 24. apríla, v druhom období bol posun nástupu o 2 dni skôr. Trvanie fenologickej fázy plného kvitnutia sa v prvom období pohybovalo v rozsahu 20 až 25 dní, zatiaľ čo v druhom období sa fáza predĺžila priemerne o 2 až 5 dní. Predĺženie trvania tejto fázy môže byť dôsledkom teplotných výkyvov a období ochladenia v čase kvitnutia. Trendová analýza ukázala v prvom období oneskorevanie nástupu fenologickej fázy o 2 dni, ale tento trend nebol štatisticky významný. V druhom období bol pozorovaný výrazný posun trendu k skoršiemu nástupu fázy až o 14 dní a bol štatisticky významný. Breza tak výrazne reagovala na zmenu klímy, ktorá sa prejavila hlavne nárastom aprílovej teploty, kedy kvitnutie dosahovalo najväčšiu intenzitu.

Tab. 3 Charakteristiky fenologickej fázy (*štatisticky významné)

Tab. 3 Characteristics of the phenological phase (*statistically significant)

1961-1990			1991-2020		
priemerný dátum nástupu	trend	dĺžka fázy	priemerný dátum nástupu	trend	dĺžka fázy
24/04	2.1	22	22/04	-14.1*	27

V druhom období bol vzťah medzi plným kvitnutím a viacmesačnou teplotou vzduchu silný (Tab. 4). Záporné hodnoty korelačných koeficientov jednoznačne preukázali, že s narastajúcou teplotou vzduchu dochádzalo k skoršiemu nástupu fenologickej fázy. Tento jav je znakom adaptívnej reakcie brezy na klimatickú zmenu, najmä na trend rastúcich jarých teplôt, čím sa významne urýchlil proces kvitnutia.

Tab. 4 Korelačné koeficienty a štatistická významnosť pre teplotu vzduchu a fázu BBCH 65 (tučné písmo - najsilnejšia korelácia, *štatisticky významné)

Tab. 4 Correlation coefficients and statistical significance for air temperature and BBCH stage 65 (bold font - strongest correlation, *statistically significant)

Obdobie	Február	Marec	Apríl	3 mesiace Ø	2 mesiace Ø
1961-1990	-0.586*	-0.605*	-0.426	-0.780*	-0.770*
1991-2020	-0.436	-0.645*	-0.523*	-0.762*	-0.857*

Vzťah medzi plným kvitnutím a zrážkami (Tab. 5) bol v oboch obdobiach slabý a nepreukázal štatistickú významnosť. Táto skutočnosť naznačuje, že množstvo zrážok a pôdnej vlhkosti, ako aj ich distribúcia v období pred nástupom kvitnutia nezohrávali dominantnú úlohu pri nástupe fázy.

Tab. 5 Korelačné koeficienty a štatistická významnosť pre zrážky a fenologickú fázu BBCH 65 (tučné písmo - najsilnejšia korelácia, *štatisticky významné)

Tab. 5 Correlation coefficients and statistical significance for precipitation and BBCH stage 65 (bold font - strongest correlation, *statistically significant)

Obdobie	Február	Marec	Apríl	3 mesiace Ø	2 mesiace Ø
1961-1990	-0.066	0.296	0.125	0.165	0.265
1991-2020	-0.273	0.002	0.168	-0.056	0.137

Výsledky analýzy kvitnutia poukazujú na skorší nástup medzi obdobiami 1961-1990 a 1991-2020, čo odráža vplyv rastúcej jarnej teploty ako dôsledok klimatickej zmeny. Silnejšia korelácia medzi nástupom fenologickej fázy a

teplotou vzduchu v druhom období potvrdzuje význam otepľovania ako kľúčového faktora. Slabý vplyv zrážok dokumentuje, že jarná fenofáza je primárne ovplyvňovaná teplotou vzduchu, čo uvádza aj práca (MENZEL et al., 2020). Výsledky autorov Studer et al. (2005), ktorí sledovali vplyv klimatických prvkov (teploty a zrážok) na priebeh jarných fáz v podmienkach meniacej sa klímy taktiež potvrdili vplyv teploty ako hlavného faktora pri nástupe jarných fenofáz, zatiaľ čo významný vplyv zrážok sa nepreukázal. K podobným výsledkom došiel aj výskum vo Fínsku (KUBIN et al. 2014), kde sa pri jarných fenologických fázach prejavil len vplyv teploty. Tento poznatok korešponduje aj s našimi výsledkami o vplyve teploty na priebeh kvitnutia.

Na zmeny zvýšenej teploty vzduchu v jarnom období citlivo reagujú dreviny zvlášť vo fáze kvitnutia. Pri dlhších časových radoch 1961–2008 vplyvom otepľovania viacerí autori zaznamenali skoršie kvitnutie lesných drevín až o takmer 11–13 dní (BAUER et al., 2014). Výsledky práce Roetzera et al. (2000) už na prelome storočí uvádzajú pre lesné dreviny v strednej Európe posun 40 ročného trendu jarných fáz až o 13–15 dní skôr, čo je v zhode aj s našou trendovou analýzou. Alergici ocenia informácie o skoršom kvitnutí brezy, ktoré ukázali v našich podmienkach za posledných 30 rokov posun až o 14 dní. Podľa výsledkov zo Švajčiarska (FREI-GASSNER, 2008) bol posun ku skoršej peľovej sezóne v období 1969–2006 o 15 dní. Údaje z južného Nemecka (ROJO et al. 2021) potvrdili, že zmena klímy zvýši zaťaženie vzduchu peľom v dôsledku skoršieho nástupu kvitnutia spôsobeného jarným otepľovaním. Newnham et al. (2013) v rokoch 1995–2010 nezistili žiadny posun trendu, ale potvrdili silnú koreláciu s marcovou teplotou vzduchu. Z našich výsledkov vyplynula rovnaká štatisticky významná korelácia s marcovou mesačnou teplotou pred nástupom fázy. Najvýznamnejšia sa ukázala dvojmesačná teplota pred plným kvitnutím. Veľký vplyv teploty na kvitnutie brezy uvádza aj práca Malkiewicz et al. (2016) so štatisticky významnými hodnotami korelačných koeficientov (-0,63 až -0,87) pri pravdepodobnosti 95%.

ZÁVER

Zmena klímy sa na území Slovenska počas 60 ročného obdobia (1961–1990 a 1991–2020) prejavila štatisticky významným nárastom priemernej teploty vzduchu v období 1991–2020 o 1,1 °C. Najviac sa to prejavilo stúpajúcim trendom aprílovej teploty. Priemerné ročné úhmy zrážok v sledovaných obdobiach sa nepreukázali ako štatisticky významné. Na zmeny zvýšenej teploty vzduchu v jarnom období citlivo reagovala breza previsnutá vo fáze plného kvitnutia (BBCH 65). Trend nástupu kvitnutia sa v druhom období posunul o 14 dní skôr a preukázala sa jeho štatistická významnosť. Fenofáza sa predĺžila o 5 dní. Pri priaznivom počasí to môže alergickým pacientom predĺžiť pôsobenie nežiadúcich účinkov alergénov. Táto analýza zmien termínov začiatku kvitnutia alergénov v jednotlivých regiónoch pomôže upraviť a nastaviť pacientom včasnú liečbu.

Pod'akovanie: Autori ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR za podporu projektu: VEGA 1/0057/22 a 1/0443/23.

Funding: This research was supported by the Science Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic: VEGA No 1/0057/22 and 1/0443/23.

LITERATÚRA

ASSE, D., CHUÏNE, I., VITASSE, Y., YOCOZO, N. G., DELPIERRE, N., BADEAU, V., RANDIN, C. F. (2018). Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricul. For. Meteorol.*, 252, 220–230.

BAUER, Z., BARTOŠOVÁ, L., BAUEROVÁ, J., TRNKA, M., ŠTEPÁNEK, P., MOZNÝ, M. (2014). Observed Phenological Response of Ecosystems to the Climate: Part I. – Flood-PlainForest. Brno: Mendel University.

BIEDERMANN, T. et al. (2019). Birch pollen allergy in Europe. *Allergy*, 74(7), 1237–1248.

COOK, B. I., MANN, M. E., D'ODORICO, P., SMITH, T. M. (2004). Statistical simulation of the influence of the NAO on European winter surface temperatures: Applications to phenological modeling. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 109, D16106.

COOK, B. I., WOLKOVICH, E. M., PARMESAN, C. (2012). Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 109, 9000–9005.

FIELD, C. B., BARROS, V. R. (Eds.). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.

FREI, T., GASSNER, E. (2008). Climate change and its impact on birch pollen quantities and the start of the pollen season an example from Switzerland for the period 1969–2006. *International Journal of Biometeorology*, 52, 667–674. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-008-0159-2>

JOCHNER, S., MENZEL, A. (2015). Urban phenological studies - Past, present, future. *Environmental Pollution*, 203, 250–261.

- KHWARAHM, N. R., DASH, J., SKJØTH, C. A., NEWNHAM, R. M., ADAMS-GROOM, B., HEAD, K., ATKINSON, P. M. (2017). Mapping the birch and grass pollen seasons in the UK using satellite sensor time-series. *Science of the Total Environment*, 578, p. 586–600.
- KUBIN, E., POIKOLAINEN, J., KARHU, J., TOLVANEN, A. (2014). “The spring and autumn phenophases of the broadleaves trees indicate the extension of growing season in the boreal forest environment,”in EGU General Assembly Conference Abstracts (Vienna: Geospots Vienna), 4882.
- LANGVALL, O., LÖFVENIUS, M. (2021). Long-term standardized forest phenology in Sweden: a climate change indicator. *Int. J. Biometeorol.*, 65(3), 381-391.
- LUKASOVÁ, V., VIDO, J., ŠKVARENINOVÁ, J., BIČÁROVÁ, S., HLAVATÁ, H., BORSÁNYI, P., ŠKVARENINA, J. (2020). Autumn phenological response of European beech to summer drought and heat. *Water*, 12(9), 2610.
- MALKIEWICZ, M., DRZENIECKA-OSIADACZ, A., KRYNICKA, J. (2016). The dynamics of the Corylus, Alnus, and Betula pollen seasons in the context of climate change (SW Poland). *Science of the Total Environment*, 573, 740-750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.103>.
- MEIER, U. (1997). *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. BBCH Monograph*. Berlin: Blackwell Wissenschafts.
- MENZEL, A., YUAN, Y., MATIU, M., SPARKS, T., SCHEIFINGER, H., GEHRIG, R., ESTRELLA, N. (2020). Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*, 26(4), 2599-2612.
- NEWNHAM, R. M., SPARKS, T. H., SKJØTH, C. A., HEAD, K., ADAMS-GROOM, B., SMITH, M. (2013). Pollen season and climate: is the timing of birch pollen release in the UK approaching its limit?. *International journal of biometeorology*, 57, 391-400. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-012-0563-5>.
- PARMESAN, C. (2007). Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, 13, 1860–1872.
- ROETZER, T., WITTENZELLER, M., HAECKEL, H., NEKOVAŘ, J. (2000). Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *Int. J. Biometeorol.* 44, 60–66. doi: 10.1007/s00484000 0062.
- ROJO, J., OTEROS, J., PICORNELL, A., MAYA-MANZANO, J. M., DAMIALIS, A., ZINK, K., BUTERS, J. (2021). Effects of future climate change on birch abundance and their pollen load. *Global change biology*, 27(22), 5934-5949. <https://doi.org/10.1111/gcb.15824>
- ROOT, T. L., PRICE, J. T., HALL, K. R., SCHNEIDER, S. H., ROSENZWEIG, C., POUNDS, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421, 57–60.
- STUDER, S., APPENZELLER, C., DEFILA, C. (2005). Inter-annual variability and decadal trends in alpine spring phenology: a multivariate analysis approach. *Clim. Chang.* 73, 395–414. doi: 10.1007/s10584-005-6886-z
- WMO. (2007). *Commission for Climatology*. Expert team on climate monitoring. World Meteorological Organisation. Ziskané 21. Septembra, 2022, z <http://www.omm.urv.cat/media/documents/WMO.pdf>.

DYNAMIKA ZMIEN OBVODU KMEŇOV SMREKOVCA OPADAVÉHO V ZÁVISLOSTI OD VEKU A KLIMATICKÝCH FAKTOROV

Adriana LEŠTIANSKA¹ – Katarína STŘELCOVÁ¹ – Peter FLEISCHER JR.^{1,2} – Peter FLEISCHER SR.^{1,2}

¹Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovensko, *adriana.lestianska@tuzvo.sk

²Správa Tatranského národného parku, Tatranská Lomnica 14066, 059 60 Vysoké Tatry, Slovensko

ABSTRACT

Leštianska A., Střelcová K., Fleischer P. Jr., Fleischer P. Sr.: Dynamics of Stem Circumference Changes in European Larch Depending on Tree Age and Climatic Factors

The rapid increase in climate extremes, manifested primarily through more frequent heatwaves, uneven precipitation distribution, and the occurrence of droughts, poses a serious threat to the stability of forest ecosystems. Continuous monitoring of the tree stem increment throughout the year is crucial for the understanding of the trees reactions to changes in meteorology and evaluating the adaptive capacity of prevailing tree species to recent environmental global changes. This study focuses on the assessment of the dynamics of stem circumference changes of European larch (*Larix decidua*, Mill.) individuals at two age stages (20 and 100 years old) growing in the High Tatras Mts. (Vyšné Hágy, 1065 m a. s. l.). Data on stem circumference changes were recorded using digital band dendrometers DRL26 (EMS Brno, CZ) with automatic data logging. These data were analysed in relation to climatic and soil factors during the climatically different growing seasons (April to September) of 2022 and 2024. The analysis revealed that the year 2022 was characterized by a precipitation deficit with uneven distribution, leading to prolonged dry periods. These conditions affected stem growth, particularly in older larch trees, which exhibited no radial increment; instead, stem shrinkage was observed. In contrast, younger (20-year-old) individuals were not significantly impacted by these unfavourable climatic conditions. In contrast, during the growing season in 2024, the total precipitation was higher, and no prolonged dry period occurred at the beginning of the season. Under these more favourable conditions, the monitored individuals, regardless of age, exhibited a positive increase in stem circumference.

Key words: climate extremes, stem circumference changes, dendrometer, European larch, High Tatras Mts.

ÚVOD

V posledných desaťročiach dochádza k výraznému nárastu výskytu klimatických extrémov prejavujúcich sa v častejších dlhotrvajúcich vln horúčav, nerovnomernom rozložení zrážok a intenzívnejších obdobiach sucha (IPCC 2021). Dôsledky týchto zmien pre lesné ekosystémy môžu byť rôzne (REYER et al. 2013; REICHSTEIN et al. 2013). Okrem iného, môžu narušiť fyziologickú a metabolickú integritu stromov, čo následne ovplyvňuje rast stromov a v konečnom dôsledku môžu spôsobiť až rozsiahlu úmrtnosť stromov vedúcu k odumieraniu lesov s vážnymi následkami v kontexte ekosystémových služieb (ALLEN et al. 2010; ANDEREGG et al. 2012; STŘELCOVÁ et al. 2023). Rastová odozva stromov na klímu môže byť pozitívna ako aj negatívna a v čase sa mení (PRETSCH et al. 2020; MENSAH et al. 2021). Je druhovo špecifická (EILMANN a RIGLING 2012) a zároveň sa tento efekt líši v závislosti od geografických oblastí, zloženia porastu, veku stromov a od konkrétnych podmienok lokality (LATTE et al. 2015; TOOCHI 2017). Štúdie, ktoré hodnotili vzťahy stromov mierneho pásma k vode počas prirodzene sa vyskytujúceho sucha naznačujú, že dospelé stromy reagujú na sucho veľmi citlivo (KÖCHER et al. 2009; BRINKMANN et al. 2016). Zvlášť citlivé na tieto zmeny sú horské oblasti, kde sa klimatické vplyvy prejavujú intenzívnejšie v dôsledku nadmorskej výšky a komplexných mikroklimatických podmienok (BENISTON 2003; ENGLER et al. 2011). V kontexte globálnej klimatickej zmeny, sucho v strednej Európe aj v horských a podhorských oblastiach (napr. v oblasti Vysokých Tatier) sa stáva potenciálnym problémom. V porovnaní s dlhodobým režimom zrážok sa v súčasnosti

vyskytujú intenzívnejšie zrážky, ale s menšou frekvenciou. Čoraz častejšie sú aj 10 a viacdňové periódy bez zrážok (STŘELCOVÁ et al. 2023).

Stromy rastúce v miernom pásme sú prispôsobené sezónnemu cyklu, s obdobím vegetačného pokoja počas zimy a vegetačným obdobím počas leta (MANZEL a FABIAN 1999). Zmeny hrúbky stromu sú výsledkom reverzibilných procesov napučievania a zmenšovania kmeňov stromov súvisiacich s vodou v dôsledku meniaceho sa vodného potenciálu, vrátane nezvratných prírastkov kmeňa v dôsledku delenia buniek a zväčšenia buniek v kambiu vo vzťahu k faktorom prostredia (DESLAURIERS et al. 2007; MAATEN et al. 2013; ZWEIFEL et al. 2016). Tieto dva procesy je potrebné oddeliť, aby sa získali hnacie sily rastu a deficitu vody v stromoch (KNÜSEL et al. 2021). Ako uvádzajú ZWEIFEL et al. (2005), transpiračný prúd umožňujúci prenos živín a vody xylémom priamo ovplyvňuje zmeny obvodu kmeňa a spôsobuje tzv. napučiavanie v dôsledku príjmu vody a zmršťovanie kmeňa v dôsledku výdaja vody. Amplitúda denného zmršťovania je funkciou straty vody z listov a absorpcie vody koreňmi. Je známe, že načasovanie a veľkosť denných zmien vo veľkosti obvodu kmeňa sú určené najmä priebehom transpirácie a obsahom vody v pôde (KOZŁOWSKI a WINGET 1964), ktoré súvisia hlavne s množstvom zrážok a vlhkosťou vzduchu a teda s mikroklimatickými podmienkami, ktoré sa môžu rýchlo meniť za rôznych poveternostných podmienok (VIEIRA et al. 2013). Pokles hodnôt deficitu tlaku pár (VPD) v dôsledku poklesu teploty vzduchu v noci a uzatvorením prieduchov do značnej miery znižuje transpiráciu, dochádza k rehydratácii a doplneniu zásob vody rastlinou v dôsledku absorpcie vody z pôdy (ZWEIFEL et al. 2006, VIEIRA et al. 2013). Paralelne prebieha hrúbkový rast kmeňa a tvorba dreva, ktoré nezvratne zväčšujú priemer kmeňa (OBERHUBER et al. 2014).

Procesy súvisiace s príjmom a výdajom vody sú detekovateľné pomocou dendrometrov, zariadení s vysokým časovým rozlíšením na vysoko presnej úrovni (DESLAURIERS et al. 2007; OBERHUBER et al. 2014; OBOJES et al. 2018). Poskytujú časové rady fluktuácií obvodu kmeňa v rôznych časových škálach, t. j. od krátkodobých zmien (napr. hodinové, denné) až po sezónny rast stromov (LEŠTIANSKA et al. 2015, 2020, 2023, 2025; OBERHUBER et al. 2015; ZWEIFEL et al. 2021). Tieto kontinuálne a nedeštruktívne merania zmien obvodov kmeňov umožňujú lepšie pochopiť dynamiku rastu a vodného stavu stromov bez nutnosti vykonávať pomerne komplikovaný odber vzoriek z asimilačných orgánov z korún stromov pre určenie napr. vodného potenciálu (OBERHUBER et al. 2015). Význam kontinuálneho monitoringu zmien obvodov kmeňov pomocou dendrometrov bol preukázaný viacerými štúdiami realizovanými v lesoch Slovenska, ktoré potvrdzujú vysokú senzitivitu stromov voči krátkodobým výkyvom v dostupnosti vody a klimatickým extrémom a poukazujú na rozdielne reakcie rôznych druhov drevín ako napr. smrek obyčajný, jedľa biela, smrekovec opadavý, borovica lesná či buk lesný (JEŽÍK et al. 2011; LEŠTIANSKA et al. 2015, 2020, 2023, 2025). Podobné výsledky boli zaznamenané aj v štúdiách zo švajčiarskych a rakúskych Álp, kde autori (napr. OBERHUBER et al. 2015; OBOJES et al. 2018; GRUBER et al. 2020; ZWEIFEL et al. 2021) zdôrazňujú potrebu vysokofrekvenčného merania ako nástroja na odhalenie kritických stresových období a analýzu fyziologických reakcií lesných porastov na meniace sa klimatické podmienky. V rámci strednej Európy sa tento prístup čoraz viac využíva pri hodnotení odolnosti lesov a adaptívneho manažmentu (LINDNER et al. 2010).

Výskum fyziologických a rastových reakcií drevín na aktuálne klimatické podmienky môže poskytovať dôležité poznatky o ich odolnosti a adaptačnom potenciáli (JAMNICKÁ et al. 2019), čo umožňuje lepšie predikovať dopady klimatickej zmeny a plánovať adaptívny manažment lesov (LINDNER et al. 2010). Napriek tomu však pretrvávajú nedostatok informácií o schopnostiach konkrétnych druhov drevín odolávať zmeneným podmienkam prostredia, čo komplikuje rozhodovanie o vhodnom druhovom zložení budúcich porastov (VITALI et al. 2017).

V rámci štúdie sme analyzovali radiálnu aktivitu stromov smrekovca opadavého (*Larix decidua*, Mill.) vo vzťahu k veku stromov a klimatickým podmienkam. Jedným z hlavných cieľov bolo z nameraných kontinuálnych hodnôt zmien obvodov kmeňov pomocou dendrometrov vyhodnotiť vnútro sezónnu a medzi sezónnu dynamiku vodného stavu a rastu stromov a následne analyzovať vplyv faktorov prostredia so zameraním na klimatické faktory. Tento prístup nám umožnil porovnať fyziologickú reakciu so zameraním na rastové procesy vo vysokom časovom rozlíšení počas dvoch klimatických odlišných vegetačných sezón 2022 a 2024 s dôrazom na extrémne výkyvy počasia.

MATERIÁL A METÓDY

Charakteristika územia a rastlinný materiál

Skúmané porasty sa nachádzajú na pokalamitnej výskumnej ploche Danielov dom (49°07'16" S, 20°09'43" V; LHC: Vysoké Tatry; Lesný celok: Vyšné Hágy). Výskumné plochy sa nachádzajú v nadmorskej výške 1065 m n. m. a podľa klasifikácie Zmlníka (1976) reprezentujú 6. lesný vegetačný stupeň (smrekovo-bukovo-jedľový).

Monitoring zmien obvodu kmeňov sa realizuje na vybraných dvoch výskumných plochách s veľmi podobnými klimatickými podmienkami, ktoré sú vo vzdialenosti od seba približne 100 metrov. Výskumné plochy sú orientované na juh a priemerný sklon svahu približne 10 %. Pôda je kamenitá, plytká, miestami balvanitá, pôvodom z ľahších zvetralín kyslých hornín (<https://gis.nlcsk.org/islhp/mapa>, www.podnemapy.sk). Na jednej výskumnej ploche sú sledované zmeny obvodu kmeňov prostredníctvom dendrometrov nainštalovaných na piatich vybraných starších jedincoch (S) smrekovca opadavého (označenie: 1L–5L) vo veku 100 rokov podobných rozmerov (priemerná hrúbka v prsnej výške $33,1 \pm 5,2$ cm a priemerná výška skúmaných jedincov $27 \pm 2,4$ m). Na ploche sa jednotlivo vyskytujú staršie 100-ročné smrekovce (<https://gis.nlcsk.org/islhp/mapa>). Na druhej ploche sú dendrometre nainštalované na

štyroch mladých jedincoch (M) smrekovca opadavého (označenie: L1–L4) (priemerná hrúbka v prsnej výške $20,5 \pm 3,6$ cm a priemerná výška skúmaných jedincov $7,2 \pm 1,2$ m) vo veku 20 rokov. Na výskumnej ploche dominuje smrek obyčajný so zastúpením 60 %. Smrekovec opadavý predstavuje 20 % a jednotlivito sa v poraste vyskytuje borovica lesná, breza a jarabina vtáčia (<https://gis.nlc.sk.org/islhp/mapa>).

Zmeny obvodu kmeňov

Údaje o zmenách obvodu kmeňov (ZOK, mm) sú získavané pomocou obvodových pásových dendrometrov DRL26 (EMS Brno, CZ) s automatickým záznamom údajov do zabudovaného datalogera a s vysokou presnosťou merania ($\pm 0,01$ mm) (Obr. 1). Dendrometre boli nainštalované na vybraných stromoch v prsnej výške ($d_{1,3}$) v apríli roku 2022. Údaje boli kontinuálne merané a zaznamenávané v 20-minútových intervaloch. Získané údaje boli následne spracované v programe Mini32 a MS EXCEL. Pre možnosť porovnania priebehu zmien obvodu kmeňov jednotlivých stromov, druhu drevín a vegetačných sezón boli hodnoty upravené tak, že za začiatok merania v rámci sezóny bol stanovený dátum 1. apríl a koniec 30. september. Prvá hodnota zmeny obvodu kmeňa na začiatku sezóny (1. apríl) bola upravená pre každý jedinec na hodnotu 0. Posledná hodnota (30. septembra) predstavuje veľkosť sezónnej zmeny obvodu kmeňov. Zmeny obvodu kmeňov na mesačnej úrovni boli vypočítané tak, že prvá hodnota bola odpočítaná od poslednej nameranej hodnoty v danom mesiaci.



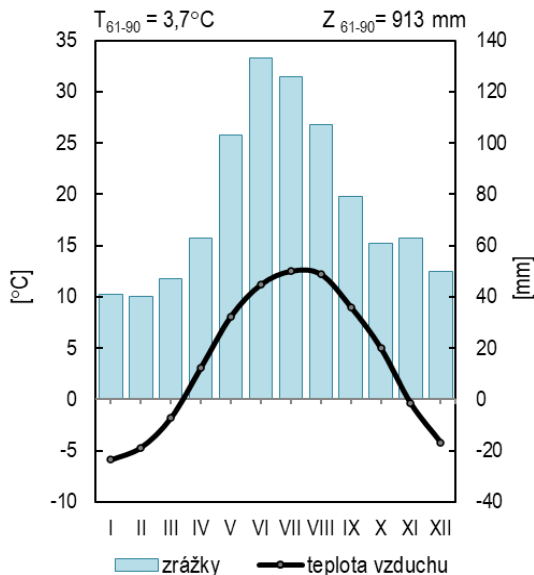
Obr. 1 Dendrometer DRL 26 (EMS Brno, CZ)
Fig.1 Dendrometer DRL 26 (EMS Brno, CZ)

Podmienky prostredia a metodika meraní

Za účelom zistenia poveternostných podmienok počas sledovaného obdobia boli použité meteorologické údaje prevzaté z meteorologickej stanice Tatranská Lomnica – Štart ($49^{\circ}10'29''$ S, $20^{\circ}14'47''$ V; nadmorská výška: 1114 m n. m), ktorá patrí do siete lesníckeho biometeorologického monitoringu Technickej univerzity vo Zvolene a Národného lesníckeho centra (www.forestweather.sk). Meteorologické údaje: teplota vzduchu (TV, $^{\circ}$ C), relatívna vlhkosť vzduchu (RV, %) a zrážky (Z, mm) sú zaznamenávané automatickou meteorologickou stanicou (EMS Brno, CZ) inštalovanou na otvorenom priestranstve v podobnej nadmorskej výške ako výskumné plochy. Deficit tlaku pár (VPD, Pa) bol vypočítaný na základe nameraných údajov vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu. Údaje sú zaznamenávané v intervale každých 10 minút. Mesačné a sezónne klimatické charakteristiky (priemer, úhrny) boli odvodené z nameraných meteorologických údajov teploty vzduchu a zrážok a porovnané s dlhodobými priemermi za obdobie rokov 1961–1990 vypočítanými prostredníctvom interpolácie z údajov nameraných na klimatologických staniách Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ): Skalnaté pleso (1778 m n. m.) a Tatranská Lomnica (827 m n. m.) (Obr. 2). Meteorologická stanica je exponovaná južne s priemernou ročnou teplotou na úrovni $3,7^{\circ}$ C (dlhodobý priemer 1961–1990). Priemerná teplota v priebehu vegetačného obdobia sa pohybuje okolo $9,4^{\circ}$ C. Priemerný ročný úhrn zrážok je 913 mm a k najvyšším úhrnom zrážok dochádza najmä v skorších letných mesiacoch máj, jún a júl (Obr. 2).

Ďalšia z meraných veličín bol pôdny vodný potenciál (PVP, bar). PVP sa meral na každej výskumnej ploche zvlášť v troch hĺbkach 15, 30 a 50 cm. Na meranie pôdneho vodného potenciálu sa používa zariadenie dataloger MicroLog SP3 vybavený senzormi - sadrovými bločkami (Delmhorst GB2) od firmy EMS Brno (www.emsbrno.cz). Údaje sú automaticky zaznamenávané pomocou datalogera v 20-minútových intervaloch. Pre ďalšie analýzy boli pre každú plochu vypočítané priemerné hodnoty z troch hĺbok a vyjadrené v MPa. Hodnoty blízke sa 0 MPa predstavujú dostatok vody dostupnej pre rastliny. Najnižšou možnou merateľnou hodnotou je $-1,4$ MPa. Čím sú hodnoty bližšie

k -1,4 MPa, tým je väčší nedostatok vody v pôde. Naopak, čím sú hodnoty bližšie k 0 MPa, tým je pôda viac nasýtená vodou (Obr. 3).



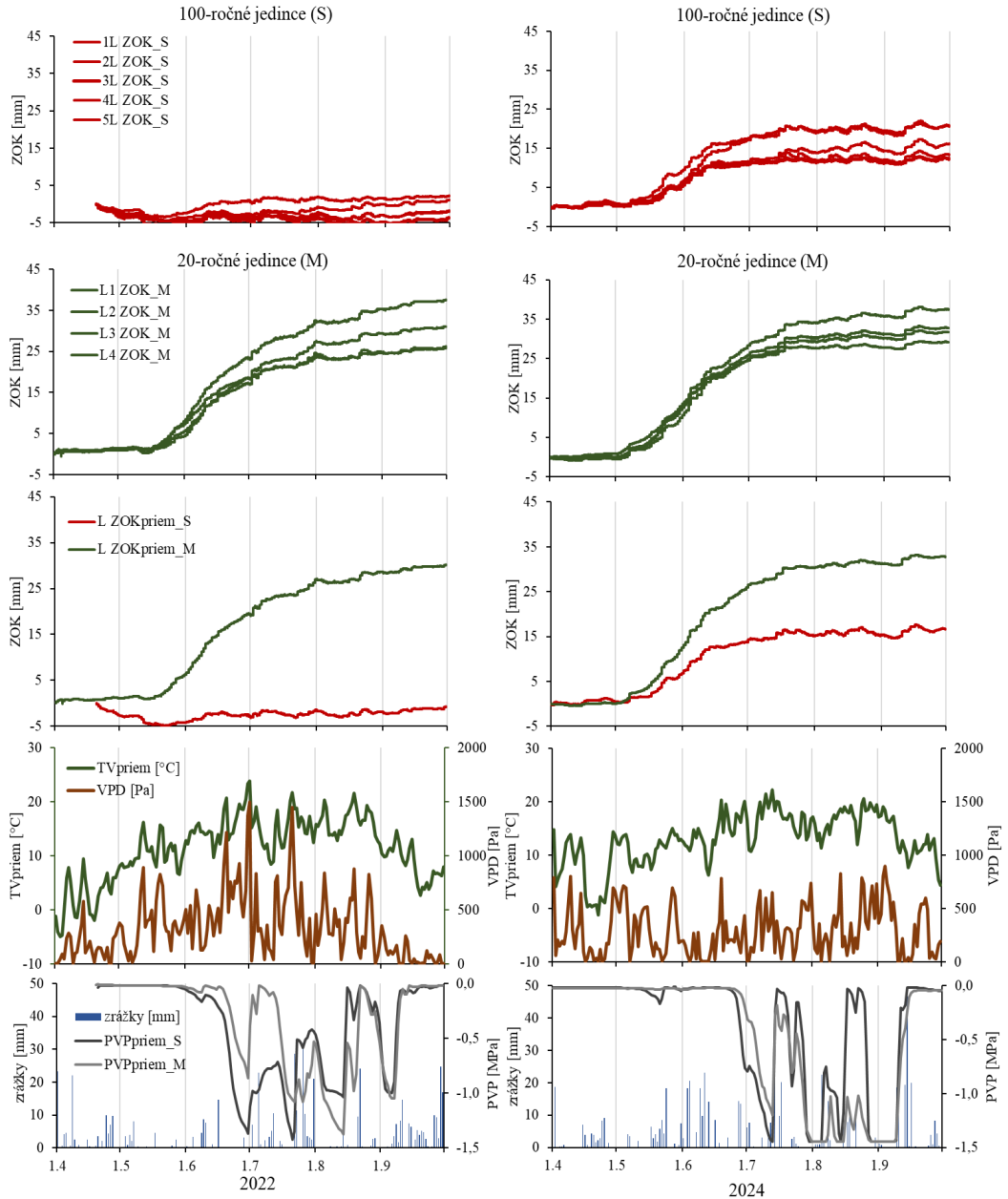
Obr. 2 Klimadiagram pre lokalitu Tatranská Lomnica – Štart (1140 m n. m.). Mesačné a ročné údaje teploty vzduchu a zrážok sú vypočítané ako dlhodobé priemerné hodnoty za obdobie rokov 1961–1990 na základe odvodených dát zo staníc SHMÚ: Skalnaté pleso (1778 m n. m.) a Tatranská Lomnica (827 m n. m.)

Fig. 2 Climadiagram for the Tatranská Lomnica – Štart locality (1,140 m a. s. l.). Monthly and annual data on air temperature and precipitation are calculated as long-term average values for the period 1961–1990 based on derived data from SHMÚ stations: Skalnaté pleso (1,778 m a. s. l.) a Tatranská Lomnica (827 m a. s. l.)

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Počas vegetačných sezón rokov 2022 a 2024 boli zaznamenané výrazné rozdiely v rastovej dynamike medzi monitorovanými 20-ročnými (M) a 100-ročnými (S) jedincami smrekovca opadavého, ktoré úzko korelovali s vývojom meteorologických podmienok a hodnotami pôdneho vodného potenciálu. Detailná analýza dennej a mesačnej dynamiky prírastkov kmeňov v kombinácii s environmentálnymi premennými (Obr. 3, Tab. 1) a sezónnymi charakteristikami (Tab. 1 a 2) umožňuje identifikovať obdobia stagnácie rastu a následnej tvorbe prírastku na obvode kmeňa v závislosti od priebehu počasia. Obr. 3 ilustruje synchronizáciu medzi priaznivými klimatickými podmienkami a rastovou odozvou stromov. V mesiacoch s nižším VPD a optimálnym PVP sa zaznamenal najvyšší rast (Tab. 1). Sezóna roku 2022 bola charakteristická klimaticky nepriaznivými podmienkami (Obr. 3, Tab. 1). Jarné mesiace (apríl a máj) sa vyznačovali nižšími teplotami, nerovnomerne rozloženými zrážkami a postupným nárastom hodnôt tlaku vodných pár v priebehu sezóny (Obr. 3), pričom mesačný priemer v júni dosiahol až 541,9 Pa (Tab. 1). Podľa SHMÚ bol rok 2022 z hľadiska výskytu sucha na Slovensku výnimočný. Na základe priestorového ročného úhrnu atmosférických zrážok a priemernej teploty vzduchu bol rok 2022 piaty najchudobnejší na zrážky od roku 1881 a tiež piaty najteplejší od roku 1931 (Zdroj: www.shmu.sk). Takýto priebeh počasia bol na Slovensku potvrdený na regionálnej až lokálnej úrovni vo viacerých štúdiách (napr. FAŠKO et al. 2022; SITKOVÁ et al. 2023). Extrémne suché podmienky sa vyskytli na viac ako polovici územia Slovenska a trvanie sucha bolo na niektorých miestach dlhšie ako 200 dní (Zdroj: www.shmu.sk). Mesiace máj a jún roku 2022 boli extrémne suché na väčšine územia a s narastajúcim výparom sa sucho prehľbovalo, s čím korešpondujú aj výsledky našich meraní (Obr. 3 a 4, Tab. 1). Veľmi zlá situácia bola na konci júna a v prvej polovici júla nastalo čiastočné zlepšenie, ale len na krátky čas (Obr. 3). Vysoká letná VPD v kombinácii s nízkymi sezónnymi zrážkami viedla k výraznému vysušeniu pôdy, kde hodnota PVP postupne klesala do výrazne stresových záporných hodnôt -1,45 MPa v júni, júli a auguste 2022 a zostala nízka počas týchto mesiacov s výnimkou krátkodobých zrážkových udalostí (Obr. 3). Najnižší mesačný priemer PVP bol zaznamenaný na ploche starších stromov v júli (-0,833 MPa) (Tab. 1). V septembri 2022 už bola situácia priaznivejšia (Obr. 3, Tab. 1). Tieto faktory viedli k výraznému rastovému útlmu, pričom staršie jedince zaznamenali za celú sezónu zápornú hodnotu zmeny obvodu kmeňa $-0,76 \pm 1,98$ mm (Obr. 3). V porovnaní s tým mladšie jedince dosiahli v sezóne roku 2022

výrazne vyšší rast s prírastkom na obvode $30,22 \pm 5,49$ mm s vrcholom v júni ($13,08 \pm 1,99$ mm), pričom PVP sa v tom istom mesiaci pohyboval na úrovni $-0,223$ MPa (Tab. 1).



Obr. 3 Denná dynamika zmien obvodu kmeňov (ZOK [mm]) smrekovca opadavého v dvoch vekových štádiách: mladé 20-ročné (M) a staršie 100-ročné jedince (S) a denná dynamika klimatologických a pôdnych charakteristík v období apríl–september rokov 2022 a 2024: priemerná teplota vzduchu (TVpriem [°C]), úhrn zrážok (zrážky [mm]), deficit tlaku pár (VPD [Pa]) a pôdny vodný potenciál (PVPpriem [MPa])

Fig. 3 Daily dynamics of stem circumference changes (ZOK [mm]) of European larch in two age stages: young 20-year-old (M) and older 100-year-old individuals (S) and daily dynamics of climatological and soil characteristics in the period of April–September of the years 2022 and 2024: average air temperature (T [°C]), total precipitation (Z [mm]), vapor pressure deficit (VPD [Pa]) and soil water potential (PVP [MPa])

V roku 2024 boli meteorologické podmienky priaznivejšie (Obr. 3 a 4, Tab. 2). Sezóna 2024 bola celkovo zrážkovo bohatšia v porovnaní s rokom 2022 (Obr. 3 a 4, Tab. 1 a 2), VPD dosahoval nižšie hodnoty a pôdna vlhkosť bola podstatne vyššia, najmä v máji a júni (Obr. 3, Tab. 1 a 2). Obr. 4 dokumentuje anomálie teploty vzduchu a zrážok v porovnaní s dlhodobým priemerom (1961–1990), pričom sezóna 2024 bola v kľúčových mesiacoch máj a jún teplotne miernejšia v porovnaní s rokom 2022 (Obr. 3 a 4, Tab. 1 a 2) a jún bol zrážkovo nadpriemerný (Obr. 4). Tieto podmienky boli priaznivejšie pre rast všetkých monitorovaných jedincov (Obr. 2, Tab. 2). Staršie stromy dosiahli pozitívny sezónny prírastok na obvode kmeňa $16,63 \pm 3,61$ mm, pričom maximum rastu nastalo v júni ($6,99 \pm 2,23$ mm). Mladé stromy si opäť udržali vysokú rastovú aktivitu s celkovým prírastkom $32,79 \pm 3,46$ mm, pričom nižšia smerodajná odchýlka signalizuje vyššiu stabilitu rastu (Obr. 3, Tab. 2). Z hľadiska sezónneho priebehu boli identifikované jasné posuny rastových fáz. Kým v roku 2022 došlo k výraznému útlmu rastu už v apríli a máji, v roku 2024 sa rastové maximum posunulo do júna, kedy boli klimatické a edafické podmienky optimálne. Tieto sezónne rozdiely poukazujú na potrebu kontinuálneho monitoringu rastových reakcií v závislosti od klimatických anomálií a ich načasovania. Získané dáta potvrdili základné poznatky v oblasti krátkodobej tvorby kmeňov stromov. Prírastok kmeňa pozitívne súvisí so zrážkami a relatívnou vlhkosťou a negatívne s teplotou a suchom (DESLAURIERS et al. 2005). Z porovnania oboch sezón taktiež vyplýva, že kombinácia nízkeho PVP a vysokého VPD má synergický, negatívny účinok na rast stromov. Tento poznatok korešponduje s výskumom FU et al. (2022), ktorí zdôrazňujú, že VPD môže významne redukovať efektívnosť ekosystémovej produkcie. Podobne FU et al. (2022) a LIU a SENEVIRATNE (2021) konštatujú, že hoci je pôdna vlhkosť dominantným rastovým faktorom, VPD predstavuje silnú sekundárnu zložku, ktorá môže dramaticky ovplyvniť transpiráciu a fotosyntézu. V našej štúdií bol tento efekt obzvlášť zreteľný v roku 2022, keď kombinácia sucha a vysokého VPD viedla u starších jedincov k úplnému potlačeniu rastu.

Získané údaje vo všeobecnosti potvrdili tvrdenie, že výkyvy počasia veľmi dobre odrážajú sezónne zmeny prírastkov kmeňov a že odlišné podmienky prostredia majú za následok významné rozdiely v prírastku kmeňa stromu v rôznych vekových štádiách počas vegetačného obdobia. Viaceré štúdie (napr. KÖCHER et al. 2009; BRINKMANN et al. 2016) preukázali, že dospelé stromy reagujú na sucho veľmi citlivo. BRINKMANN et al. (2016) preukázali, že stromy v reakcii na nízku pôdnu vlhkosť výrazne znížili tok miazgy na niekoľko týždňov. Naše výsledky jednoznačne potvrdzujú, že staršie stromy sú citlivejšie na kombináciu nízkej pôdnej vlhkosti a vysokého VPD, čo je v súlade so zisteniami OBERHUBERA et al. (2015), ktorí preukázali zníženie kambiálnu aktivitu a rast najmä počas suchých období. Rovnako GRUBER et al. (2020) poukazujú na to, že *Larix decidua* vykazuje v podmienkach sucha vyšší deficit vody v kmeni a menej efektívnu rehydratáciu počas nočných hodín. Vyššia elasticita a efektívnejšie využívanie dostupných zdrojov, ako aj aktívnejšia vodná bilancia, môžu vysvetľovať ich schopnosť udržať pozitívny prírastok aj počas stresu. Tieto poznatky podporujú aj zistenia CAI et al. (2024), ktorí poukazujú na výraznú úlohu veku rastlín v reakcii na kombinované pôsobenie sucha a VPD. Mladšie stromy reagovali na klimatické podmienky pružnejšie, čo potvrdzuje ich fyziologickú plasticitu a schopnosť adaptácie, ako preukázali aj iní autori (napr. GRUBER et al. 2020; SHI et al. 2025). Tieto jedince si dokázali udržať pozitívny rast aj v menej priaznivých obdobiach, pravdepodobne vďaka aktívnejšiemu metabolizmu, efektívnejšej regulácii vodného režimu a výhodnejšej architektúre koreňového systému.

Tab. 1 Mesačné a sezónne zmeny obvodu kmeňov (ZOK [mm]) $\pm$ smerodajná odchýlka (SD) 100-ročných jedincov (S) a 20-ročných jedincov (M) and klimatologických charakteristik: priemerná teplota vzduchu (TVpriem [°C]), zrážky [mm], deficit tlaku pár (VPD [Pa], pôdny vodný potenciál (PVP [MPa]) počas sezóny (apríl–september) roku 2022

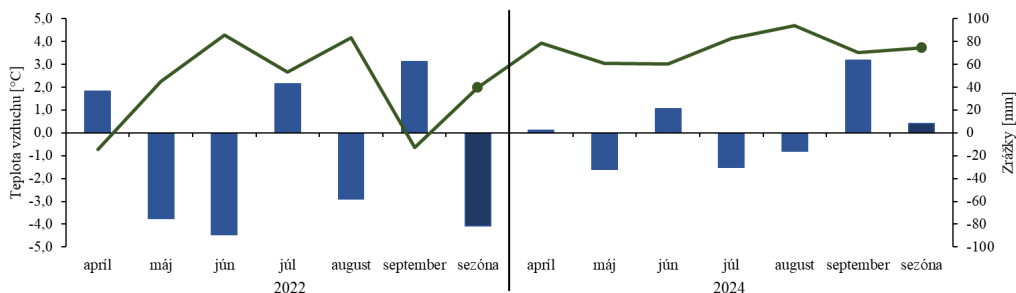
Tab. 1 Monthly and seasonal in stem circumference changes (ZOK [mm]) $\pm$ standard deviation (SD) of 100-year-old individuals (S) and 20-year-old individuals (M) and climatological characteristics: average air temperature (TVavg [°C]), precipitation [mm], vapor pressure deficit (VPD [Pa], soil water potential (PVP [MPa]) during the season (April–September) of 2022

obdobie	2022						
	ZOK [mm] $\pm$ SD		TVpriem [°C]	zrážky [mm]	VPD [Pa]	PVPpriem_S [MPa]	PVPpriem_M [MPa]
	S	M					
apríl	-2,63 $\pm$ 0,57	0,31 $\pm$ 0,13	2,4	99,6	149,6	-0,020	-0,015
máj	-1,55 $\pm$ 0,24	5,13 $\pm$ 1,61	10,4	27,4	360,5	-0,022	-0,022
jún	1,37 $\pm$ 0,49	13,08 $\pm$ 1,99	15,4	43,4	541,9	-0,480	-0,223
júl	1,35 $\pm$ 0,73	7,63 $\pm$ 1,85	15,2	168,6	454,1	-0,833	-0,532
august	-0,44 $\pm$ 0,88	1,60 $\pm$ 1,13	16,4	49,0	366,2	-0,495	-0,725
september	1,13 $\pm$ 0,15	1,64 $\pm$ 0,47	8,3	140,8	76,9	-0,263	-0,278
sezóna (apríl–september)	-0,76 $\pm$ 1,98	30,22 $\pm$ 5,49	11,4	528,8	324,9	-0,353	-0,299

Tab. 2 Mesačné a sezónne zmeny obvodu kmeňov (ZOK [mm]) $\pm$ smerodajná odchýlka (SD) 100-ročných jedincov (S) a 20-ročných jedincov (M), klimatologických charakteristik: priemerná teplota vzduchu (TVpriem [°C]), zrážky [mm], deficit tlaku pár (VPD [Pa], pôdny vodný potenciál (PVP [MPa]) počas sezóny (apríl–september) roku 2024

Tab. 2 Monthly and seasonal in stem circumference changes (ZOK [mm]) $\pm$ standard deviation (SD) of 100-year-old individuals (S) and 20-year-old individuals (M) and climatological characteristics: average air temperature (TVavg [°C]), precipitation [mm], vapor pressure deficit (VPD [Pa], soil water potential (PVP [MPa]) during the season (April–September) of 2024

2024							
obdobie	ZOK [mm] $\pm$ SD		TVpriem [°C]	zrážky [mm]	VPD [Pa]	PVPpriem_S	PVPpriem_M
	S	M					
apríl	0,46 $\pm$ 0,21	0,08 $\pm$ 0,56	7,0	65,6	253,2	-0,019	-0,023
máj	6,34 $\pm$ 1,78	12,45 $\pm$ 1,25	11,2	70,6	337,3	-0,046	-0,027
jún	6,99 $\pm$ 2,23	13,38 $\pm$ 1,52	14,2	153,8	182,4	-0,095	-0,037
júl	1,37 $\pm$ 0,84	4,40 $\pm$ 1,14	16,7	95,6	311,7	-0,755	-0,713
august	0,18 $\pm$ 0,14	0,92 $\pm$ 0,62	16,9	90,8	333,9	-0,868	-1,334
september	1,30 $\pm$ 0,34	1,55 $\pm$ 0,12	12,5	142,0	304,6	-0,492	-0,550
sezóna (apríl–september)	16,63 $\pm$ 3,61	32,79 $\pm$ 3,46	13,1	618,4	287,2	-0,379	-0,447



Obr. 4 Anomálie priemerných mesačných a sezónnych hodnôt teploty vzduchu a úhrnov zrážok v sledovanom období apríl–september rokov 2022 a 2024 v porovnaní s dlhodobými klimatickými podmienkami v období 1961–1990. Čiara 0 predstavuje dlhodobú priemernú mesačnú teplotu vzduchu a dlhodobý mesačný úhrn zrážok

Fig. 4 Anomalies of monthly and seasonal mean air temperature and precipitation totals values in the studied period April–September of the years 2022 and 2024 in comparison to long-term climate conditions in the period 1961–1990. The 0 line represents the long-term monthly mean air temperature and long-term monthly precipitation total

Z výsledkov štúdie možno konštatovať, že kombinácia vysokofrekvenčných dendrometrických meraní a súbežných environmentálnych údajov predstavuje robustný nástroj na sledovanie rastových reakcií lesných drevín. Tento prístup umožňuje identifikovať nielen kritické stresové obdobia, ale aj rastové optimum a variabilitu medzi jednotlivými vekovými kategóriami. Výsledky zároveň poukazujú na nižšiu odolnosť starších jedincov smrekovca opadavého voči suchu a teplotnému stresu, pričom mladšie stromy zohrávajú významnú stabilizačnú rolu v podmienkach klimatickej nestability. Tieto poznatky sú prakticky využiteľné pri plánovaní dlhodobých adaptačných stratégií v lesnom hospodárstve, predovšetkým pri návrhu vekovej a druhovej štruktúry porastov zohľadňujúcej meniace sa klimatické podmienky.

ZÁVER

Výsledky experimentálnej štúdie poukazujú na významný vplyv veku stromov smrekovca opadavého (*Larix decidua* Mill.) na ich rastovú dynamiku a schopnosť reagovať na klimatické podmienky počas vegetačných sezón. Porovnanie klimaticky odlišných rokov 2022 a 2024 poskytlo jedinečný pohľad na fyziologickú plasticitu mladších a starších jedincov v podmienkach klimatických extrémov. Výsledky indikujú, že dynamika zmien obvodu kmeňov smrekovca opadavého je výrazne ovplyvnená kombináciou klimatických faktorov a veku stromov. Staršie jedince vykazovali vyššiu citlivosť na klimatické extrémny, najmä počas suchých a teplých období s vysokou hodnotou tlaku vodných pár (VPD) a nízkym pôdnym vodným potenciálom (PVP), čo viedlo k potlačeniu rastu. Naopak, mladšie

jedine si udržali pozitívny prírastok aj v stresových podmienkach, čo poukazuje na ich vyššiu rastovú plasticitu. Tieto výsledky potvrdzujú, že vek stromov je kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim ich rastovú dynamiku a schopnosť adaptácie na klimatický stres. Detailná analýza mesačných zmien umožnila identifikovať kritické obdobia rastového útlmu a rastového maxima, čím sa zvýšila presnosť interpretácie sezónnej dynamiky. Tieto poznatky zdôrazňujú význam vysokofrekvenčného monitoringu fyziologických procesov stromov a potrebu zohľadniť vekovú štruktúru porastov pri hodnotení ich odolnosti voči klimatickým výkyvom.

Získané výsledky predstavujú dôležitý podklad pre návrh adaptačných stratégií v lesnom hospodárstve, najmä v kontexte meniacej sa klímy. Kombinácia dendrometrických meraní a environmentálnych údajov sa ukázala ako efektívny nástroj na sledovanie rastových reakcií drevín, identifikáciu stresových období a posúdenie vzájomných interakčných vzťahov v systéme pôda–drevina–atmosféra. Včasná diagnostika fyziologických zmien môže významne prispieť k efektívnemu plánovaniu manažmentu lesných ekosystémov.

PodĎakovanie

Autori ďakujú Agentúre na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-21-0224, APVV-18-0390 a Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied na základe zmluvy č. VEGA 1/0285/23 a VEGA 1/0057/22 za finančnú podporu pri riešení projektu, v rámci ktorého vznikol prezentovaný príspevok.

LITERATÚRA

ALLEN, C.D., MACALADY, A.K., CHENCHOUNI, H., BACHELET, D., McDOWELL, N., VENNETIER, M. et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259 (4), s. 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>

ANDEREGG, W.R.L., KANE, J.M., ANDEREGG, L.D.L. 2012. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change* 3, s. 30–36. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1635>

BENISTON, M. 2003. Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change* 59, s. 5–31. <https://doi.org/10.1023/A:1024458411589>

BRINKMANN, N., SEEGER, S., WEILER, M., BUCHMANN, N., EUGSTER, W., KAHMEN, A. 2016. Employing stable isotopes to determine the contribution of transpiration to total ecosystem evapotranspiration in a temperate grassland. *Biogeosciences* 13, s. 2201–2211. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2201-2016>

CAI, G., KÖNIG, M., CARMINATI, A., ABDALLA, M., JAVAUX, M., WANKMÜLLER, F., AHMED, M.A. 2024. Transpiration response to soil drying and vapor pressure deficit is soil texture specific. *Plant and Soil* 500, s. 129–145. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05818-2>

DESLAURIERS, A., MORIN, H. 2005. Intra-annual tracheid production in balsam fir stems and the effect of meteorological variables. *Trees* 19, s. 402–408. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0398-8>

DESLAURIERS, A., ROSSI, S., ANFODILLO, T., SARACINO, A. 2007. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology* 27 (6), s. 765–773. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.6.863>

EILMANN, B., RIGLING, A. 2012. Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiology* 32 (2), s. 178–187. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps004>

ENGLER, R., RANDIN, C.F., THUILLER, W., DULLINGER, S., ZIMMERMANN, N.E., ARAÚJO, M.B., et al. 2011. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology* 17 (7), s. 2330–2341.

FAŠKO, P., MARKOVIČ L., IVANÁKOVÁ, G., KAJABA, P., 2022. Extraordinary to extremely low precipitation totals in Slovakia in the years 2021 and 2022 in the historical context since 1881. *APOL* 3, 87–9

FU, Z., CIAIS, P., PRENTICE, I.C., GENTINE, P., MAKOWSKI, D., BASTOS, A., LUO, X., GREEN, J.K., STOY, P.C., YANG, H., HAJIMA, T. 2022. Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a large range of soil water deficits. *Nature Communications* 13 (1), 989. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28652-7>

GRUBER, A., WIESER, G., OBERHUBER, W. 2020. Intra-annual dynamics of stem water deficit in *Pinus sylvestris* and *Larix decidua* at a dry Alpine site. *Tree Physiology*, 40(5): 643–655. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa010>

IPCC 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

JAMNICKÁ, G., FLEISCHER, P., JR., KONÔPKOVÁ, A., PŠIDOVÁ, E., KUČEROVÁ, J., KURJAK, D., ŽIVČÁK, M., DITMAROVÁ, L. 2019. Norway Spruce (*Picea abies* L.) Provenances Use Different Physiological Strategies to Cope with Water Deficit. *Forests* 10, 651. <https://doi.org/10.3390/f10080651>

JEŽÍK, M., BLAŽENEC, M., STŘELCOVÁ, K., DITMAROVÁ, L. 2011. The impact of the 2003–2008 weather variability on intra-annual stem diameter changes of beech trees at a submontane site in central Slovakia. *Dendrochronologia* 29 (4), s. 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2011.01.009>

- KNÜSEL, S., PETERS, R.L., HAENI, M., WILHELM, M., ZWEIFEL, R. 2021. Processing and Extraction of Seasonal Tree Physiological Parameters from Stem Radius Time Series. *Forests* 12 (6), 765. <https://doi.org/10.3390/f12060765>
- KÖCHER, P., GEBAUER, T., HORNA, V., LEUSCHNER, C. 2009. Leaf water status and stem diameter variations in five temperate broad-leaved tree species differing in drought tolerance. *Tree Physiology* 29 (6), s. 689–700. <https://doi.org/10.1051/forest/2008076>
- KOZŁOWSKI, T.T.; WINGET, C.H. 1964. Diurnal and seasonal variation in radii of tree stems. *Ecology*, 45, s. 149–155
- LATTE, N., LEBOURGEOIS, F., CLAESSENS, H. 2015. Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia* 33, s. 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.01.002>
- LEŠTIANSKA, A., MERGANIČOVÁ, K., MERGANIČ, J., STŘELCOVÁ, K. 2015. Intra-annual patterns of weather and daily radial growth changes of Norway spruce and their relationship in the Western Carpathian mountain region over a period of 2008–2012. *Journal of Forest Science* 61 (7), s. 315–324. <https://doi.org/10.17221/24/2015-JFS>
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR, MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER, P., STŘELCOVÁ, K. 2020. Influence of warmer and drier environmental conditions on species-specific stem circumference dynamics and water status of conifers in submontane zone of Central Slovakia. *Water* 12 (10), 2945. <https://doi.org/10.3390/w12102945>
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR, MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER, P. SR., STŘELCOVÁ, K. 2025. Intra-annual dynamics of stem circumference variation and water status of four coniferous tree species (*Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Larix decidua* and *Abies alba*) under warmer and water-limited conditions. *Biologia* 80, 1125–1142. <https://doi.org/10.1007/s11756-024-01693-7>
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR, MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER, P. SR, NALEVANKOVÁ, P., STŘELCOVÁ, K. 2023. Effect of provenance and environmental factors on tree growth and tree water status of Norway Spruce. *Forests* 14 (1), 156. <https://doi.org/10.3390/f14010156>
- LINDNER, M., MAROSCHEK, M., NETHERER, S., KREMER, A., BARBATI, A., GARCIA-GONZALO, J., et al. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259 (4), s. 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- LIU, Y. Y., SENEVIRATNE, S. I. 2021. Soil moisture dominates ecosystem productivity response to climate extremes. *Nature Climate Change* 11(2), s. 145–151. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18631-1>
- MAATEN, E., BOURIAUD, O., VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M., MAYER, H., SPIECKER, H. 2013. Meteorological forcing of day-to-day stem radius variations of beech is highly synchronic on opposing aspects of a valley. *Agricultural and Forest Meteorology* 181, s. 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.07.009>
- MANZEL, K., FABIAN, P. 1999. Tree physiology and forest decline. *Environmental Pollution* 105 (3), s. 327–333.
- MENSAH, A.A., HOLMSTRÖM, E., PETERSSON, H., NYSTRÖM, K., MASON, E.G., NILSSON, U. 2021. The millennium shift: Investigating the relationship between environment and growth trends of Norway spruce and Scots pine in northern Europe. *Forest Ecology and Management* 481, 118727. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118727>
- OBERHUBER, W., GRUBER, A., KOFLER, W., SWIDRAK, I. 2014. Radial stem growth in response to microclimate and soil moisture in a drought-prone mixed coniferous forest at an inner Alpine site. *European Journal of Forest Research* 133 (3), s. 467–479. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0777-z>
- OBERHUBER, W., HAMMERLE, A., KOFLER, W. 2015. Tree water status and growth of saplings and mature Norway spruce (*Picea abies*) at a dry distribution limit. *Frontiers of Plant Science* 6, 703. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00703>
- OBOJES, N., MEURER, A., NEWESELY, CH., TASSER, E., OBERHUBER, W., MAYR, S., TAPPEINER, U., 2018. Water stress limits transpiration and growth of European larch up to the low subalpine belt in an inner-alpine dry valley. *New Phytologist* 220, 460–475. <https://doi.org/10.1111/nph.15348>
- PRETSCH, H. 2020. The course of tree growth. Theory and reality. *Forest Ecology and Management* 478, 118508. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118508>
- REYER, C. P. O., LEUZINGER, S., RAMMIG, A., WOLF, A., BARTHOLOMEUS, R. P., BONFANTE, A., et al. 2013. A plant's perspective of extremes: Terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global Change Biology* 19 (1), s. 75–89. <https://doi.org/10.1111/gcb.12023>
- REICHSTEIN, M., BAHN, M., CIAIS, P., FRANK, D., MAHECHA, M.D., SENEVIRATNE, S.I., et al. 2013. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* 500, s. 287–295. <https://doi.org/10.1038/nature12350>
- SITKOVÁ, Z., KONÓPKA, M., RYBÁR, J. 2023. Analýza klímy a priebehu počasia na Slovensku v roku 2022. *APOL* 4 (2), s. 183–191.
- SHI, C., ZHOU, Y., CUL, N., NIU, L., YAO, H. 2025. Divergent responses of vegetation productivity to soil moisture and vapor pressure deficit across China. *Journal of Geographical Sciences* 35, s. 1405–1431. <https://doi.org/10.1007/s11442-025-2377-5>
- STŘELCOVÁ, K., LEŠTIANSKA, A., LAPIN, M. 2023. Sucho, stromy a rastliny. *Les & Letokruhy* 24, 24–29. ISSN 1336-9766.
- TOOCHI, E.C. 2017. Forest and environment: Developments in global change ecology. *Forest Research and Engineering: International Journal* 1, s. 100–105.
- VIEIRA, J., ROSSI, S., CAMPELO FREITAS, H., NABAIS, C. 2013. Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 180, s. 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.009>

- VITALI V., BÜNTGEN U., BAUHUS J. 2017. Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south western Germany. *Global Change Biology* 23 (12), s. 5108–5119. <https://doi.org/10.1111/gcb.13774>
- ZLATNÍK, A. 1976. Lesnícka fytoecenológia. SZN, Praha, 495 s.
- Zweifel R., Zimmermann L., Newbery D.M. 2005. Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiology* 25 (2), s. 147–156. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.2.147>
- ZWEIFEL R., ZIMMERMANN L., ZEUGIN F., NEWBERY D.M. 2006. Intra-annual radial growth and water relations of trees: implication towards a growth mechanism. *Journal of Experimental Botany* 57, s. 1445–1459. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj125>
- ZWEIFEL, R., HAENI, M., BUCHMANN, N., EUGSTER, W. 2016. Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytologist* 211, s. 839–849. <https://doi.org/10.1111/nph.13995>
- ZWEIFEL, R., ETZOLD, S., STERCK, F., et al. 2021. Determinants of legacy effects in pine and spruce growth after severe drought. *Nature Plants* 7, s. 381–388. <https://doi.org/10.1111/nph.16582>

BRUSNICA ČUČORIEDKOVÁ (*VACCINIUM MYRTILLUS* L.) AKO INDIKÁTOR ZAŤAŽENIA HORSKÝCH OBLASTÍ SLOVENSKA ORTUŤOU

Hana OLLEROVÁ¹ – Andrea ZACHAROVÁ¹ – Jaroslav ŠKVARENINA² – Miroslav VANEK¹ – Jana ŠKVARENINOVÁ³

¹Katedra environmentálneho inžinierstva, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, email: ollerova@tuzvo.sk, andrea.zacharova@tuzvo.sk

²Katedra aplikovanej ekológie, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, email: jana.skvareninova@tuzvo.sk

³Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, email: skvarenina@tuzvo.sk

ABSTRACT

Ollerová, H., Zacharová, A., Škvarenina, J., Vanek, M., Škvareninová, J.: Bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) as bioindicator of mercury pollution in Slovak mountainous regions

The aim of this study was to assess the suitability of bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) as a bioindicator of mercury (Hg) contamination in mountain ecosystems of the Tatras and the Low Tatras. Soil samples and aboveground plant tissues (leaves, twigs and fruits) were collected at ten locations and analysed for total mercury content using an AMA-254 atomic absorption spectrophotometer. Sampling was done in time of ripeness of bilberry fruit BBCH 87). Mercury concentrations in soils ranged from 0.11377 to 0.38033 mg·kg⁻¹, with the highest values recorded in the Javorová dolina locality and the lowest in Zadné Meďodoly. Hg concentrations in plant tissues showed a clear pattern: the highest values were found in leaves (0.0147–0.03134 mg·kg⁻¹), followed by twigs (0.00555–0.01031 mg·kg⁻¹), while the lowest concentrations were measured in fruits (0.00083–0.00273 mg·kg⁻¹). ANOVA confirmed statistically significant differences among plant organs as well as among sampling sites. The results show that *Vaccinium myrtillus* is not a bioaccumulative indicator of the presence of Hg in the environment, as mercury does not accumulate in its aboveground biomass. If needed, the assimilatory organs of bilberry can be used as a bioindicator of mercury, since they accumulate Hg to the greatest extent compared to the fruits and twigs.

Key words: bilberry, bioindicator, mercury, mountainous regions, Tatry, Slovakia

ÚVOD

V globálnom kolobehu ortuti zohráva dôležitú úlohu atmosféra, v ktorej je dominantnou formou ortuti elementárna ortuť. Jej zotrvanie v atmosfére sa odhaduje na 1-2 roky. Práve takýto dlhý čas zotrvania v atmosfére jej umožňuje prenos na obrovské vzdialenosti od zdroja. Z atmosféry sa odstraňuje prostredníctvom suchej a mokrej depozície po oxidácii na Hg²⁺ v oblačnej vrstve (ZHU et al., 2016).

Do rastlín sa atmosférická ortuť dostáva cez prieduchy asimilačných orgánov počas respirácie, akumuláciou Hg²⁺ na povrchu asimilačných orgánov z mokrej a suchej depozície a z pôdy vo forme rozpustenej Hg cez koreňovú sústavu. Vegetácia ovplyvňuje environmentálne faktory na povrchu zeme tým, že znižuje slnečné žiarenie, teplotu a rýchlosť vetra a slúži ako povrch pre príjem Hg (ZHU et al., 2016). Viacero autorov uvádza, že Hg v asimilačných orgánoch pochádza výlučne z atmosféry (LINDBERG, 2002; LODENIUS et al., 2003). Približne 80 % celkovej Hg akumulovanej v nadzemnej biomase sa nachádza v listoch a približne 1 % z tejto Hg je metylovaná (ERICKSEN et al., 2003).

Pre posúdenie zaťaženia horských oblastí Slovenska Hg sme sa rozhodli použiť ako bioindikátor *Vaccinium myrtillus* L. (brusnica čučoriedková), keďže je to značne rozšírený dlhoveký druh, ktorý je súčasťou mnohých spoločenstiev. Hrá zásadnú úlohu v kolobehu živín a je dôležitým zdrojom potravy pre mnoho druhov hmyzu, vtákov a cicavcov, čím vytvára spojenie medzi zásobou kovov v pôde a hornými trofickými úrovňami v znečistenom prostredí

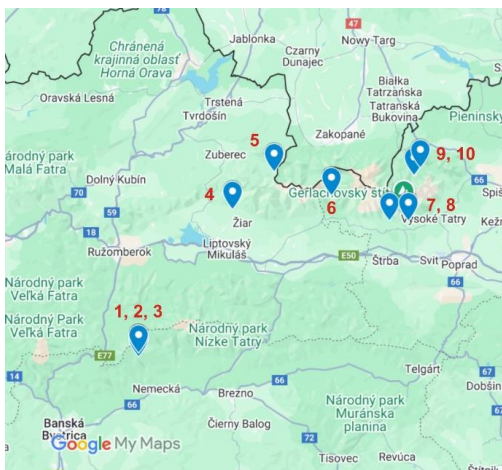
(EEVA et al., 2018). Navyše, keďže jej koreňový systém je vo všeobecnosti plytký, môže čučoriedka ľahko prijímať kovy z hornej vrstvy pôdy, v ktorej dochádza ku kumulácii kovov pochádzajúcich z atmosférickej depozície.

Čučoriedka je druh, ktorý je relatívne tolerantný voči rôznym environmentálnym stresorom, ako je dlhodobé znečistenie toxickými stopovými kovmi. Na silne znečistených miestach je schopná rásť, regenerovať sa a šíriť sa, čo umožňuje čučoriedke slúžiť ako modelový druh lesného poschodia boreálnych lesov, ktoré boli vystavené znečisteniu kovmi (EEVA et al., 2018, UHLIG et JUNTILA, 2001, SALEMAA et al., 2004, TAULAVUORI et al., 2013), vrátane Hg. Čučoriedka je zároveň potenciálnym indikátorom kvality pôdy vďaka svojej dobrej tolerancii voči vysokým množstvám niektorých ťažkých kovov a môže sa využiť na efektívnu kolonizáciu kontaminovaných lokalít (KANDZIARA-CIUPA et al. 2013; KUKLA et KUKLOVÁ 2008; SALEMAA et al. 2004; TAULAVUORI et al. 2013). Je veľmi pravdepodobné, že je tolerantná voči ťažkým kovom, pretože je známa ako hyperakumulátor mangánu, má detoxikačné mechanizmy a nevykazuje žiadne príznaky fytotoxicity (REEVES 2006).

METODIKA

Za účelom posúdenia vhodnosti brusnice čučoriedkovej ako potenciálneho bioindikátora zaťaženia životného prostredia Hg, sme odobrali vzorky pôdy a čučoriedok, pričom biomasu čučoriedok sme rozdelili na listy, konáriky (výhonky) a plody. Vzorky boli odobrané na konci vegetačného obdobia, v dobe plnej zrelosti plodov (BBCH 87) z 10 lokalít na území Nízkych Tatier a Tatier, konkrétne z lokalít (obr. 1):

- Tatry: Javorova dolina, Pod Ostrvou, Nad Novou Poliankou, Zadné Meďodoly Zadná Látaná, Červenec a Tichá dolina
- Nízke Tatry: Kabenec, Košarisko a Železný posed.



Obr. 1 Mapa lokalít pre odber čučoriedok a pôdy

Fig. 1 Map of sampling locations

(1 – Kabenec; 2 – Košarisko; 3 – Železný posed; 4 – Zadná Látaná; 5 – Tichá dolina; 6 – Pod Ostrvou; 7 – Červenec; 8 – Nad Novou Poliankou; 9 – Javorova dolina; 10 – Zadné Meďodoly)

Vzorky pôdy boli odoberané z hĺbky 0-30 cm a pozostávali z 5 čiastkových vzoriek. Rastlinné vzorky boli odoberané ako olistené konáriky s plodmi čučoriedok. Jednotlivé vzorky pozostávali z aspoň 5 jedincov. Rastlinný materiál bol následne rozseparovaný na listy, konáriky (výhonky) a plody. Pôda aj rastliny boli vysušené pri laboratórnej teplote a zhomogenizované.

Analýza Hg bola vykonaná na jednoúčelovom absorpčnom spektrofotometri AMA 254 (Altec Ltd. Praha) s detekčným limitom 0,01 ng Hg. Každá vzorka bola analyzovaná trikrát pri dosiahnutí relatívnej smerodajnej odchýlky na úrovni 10 % a menej. Kontrola merania bola zabezpečená meraním certifikovaných referenčných materiálov IAEA-V-10 a NCS-DC73033. Navážka jednotlivých vzoriek sa pohybovala od 40 do 60 mg. Parametre analýzy predstavovali 60 s pre sušenie, 180 s pre rozklad a 45 s pre uštieňovanie pri meraní pôdných vzoriek a 45 s – 150 s a 45 s pri analýze rastlinných vzoriek. Hg bola stanovená zvlášť v listoch, výhonkoch aj plodoch čučoriedky.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Pre posúdenie brusnice čučoriedkovej (*Vaccinium myrtillus* L.) ako potenciálne vhodného bioindikátora zaťaženia horských oblastí ortuťou sme analyzovali 10 vzoriek pôd a celkovo 30 vzoriek čučoriedok z pohorí Tatry a Nízke Tatry. Celkové výsledky sú v tab. 1 a 2.

Obsah Hg v pôde

Ortuť v pôde sa pohybuje v intervale 0,11377 (Zadné Meďodoly) až 0,38033 mg.kg⁻¹ (Javorová dolina) (tab.1). Nasledujú lokality tak isto nachádzajúce sa v Tatrách – Nad Novou Poliankou (0,35862 mg.kg⁻¹) a Červenec (0,30137 mg.kg⁻¹). Aritmetický priemer pre obsah ortuti v pôdach Slovenska v A horizonte je 0,23 mg.kg⁻¹, medián je 0,8 mg.kg⁻¹ (ČURLÍK et ŠEFČÍK, 1999). Obsah ortuti na niektorých sledovaných lokalitách s výskytom čučoriedok je mierne vyšší. Táto skutočnosť môže byť ovplyvnená viacerými faktormi. Jedná sa hlavne o cezhraničný prenos Hg prostredníctvom suchej a mokrej depozície. Hlavne pri severozápadnom prúde sú zasiahnuté vrcholové polohy Tatier a Nízkych Tatier.

Tab. 1 Koncentrácie Hg v pôdach sledovaných lokalít (mg.kg⁻¹)

Tab.1 Mercury concentration in soil in study areas (mg.kg⁻¹)

Lokalita	Koncentrácia Hg	Smerodajná odchýlka
Košarisko	0,1382	0,00552
Železný posed	0,13686	0,0041
Kabenec	0,20735	0,0101
Tichá dolina	0,14795	0,0181
Javorová dolina	0,38033	0,01335
Pod Ostrvou	0,1525	0,01276
Nad Novou Poliankou	0,35862	0,00663
Zadné Meďodoly	0,11377	0,00711
Zadná Látaná	0,18796	0,02047
Červenec	0,30137	0,0283

Obsah ortuti závisí od jej obsahu v materskej hornine, od pôdotvorných substrátov a vďaka prchavosti sa môže akumulovať v povrchových horizontoch, čo je spôsobené sorpciou Hg humusom, prípadne väzbou na C a S. Všeobecne platí, že organické pôdy a organické horizonty majú vyšší podiel ortuti ako minerálne horizonty. Pôdy majú väčšiu kapacitu sorbovať organické formy ortuti. Ďalším vstupom ortuti je atmosférická depozícia, množstvo opadu organickej hmoty, v ktorej je akumulovaná ortuť (GWOREK, et al., 2020).

Podľa zákona 220/2004 Z. z. je limitná hodnota pre obsah ortuti v hlinitých a piesočnato-hlinitých poľnohospodárskych pôdach 0,5 mg.kg⁻¹. I keď naše skúmané lokality predstavujú lesné pôdy, tento limit nie je prekročený.

Obsah Hg v čučoriedkach

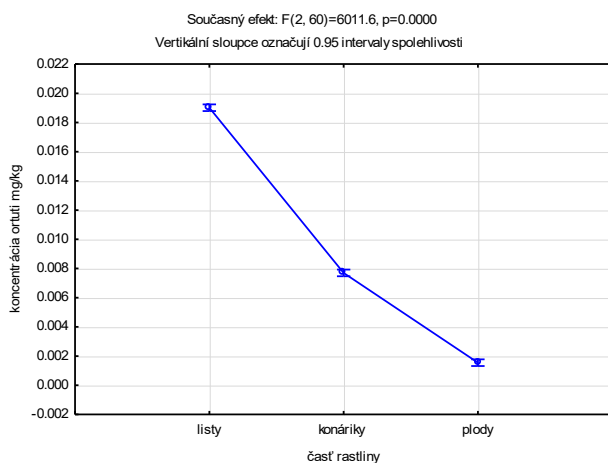
Na základe analýz ortuti v nadzemných orgánoch čučoriedok môžeme konštatovať, že najnižšie koncentrácie sme zaznamenali v plodoch, vyššie v konárikoch a najvyššie v listoch (obr. 2). V plodoch sa priemerné hodnoty ortuti pohybujú v intervale 0,00083 – 0,00273 mg.kg⁻¹, v konárikoch od 0,00725 – 0,01031 mg.kg⁻¹ a v listoch od 0,0147 do 0,03134 mg.kg⁻¹ (tab. 2). Najnižšiu hodnotu v plodoch a listoch sme pozorovali na lokalite Nad Novou Poliankou a v konárikoch pod Ostrvou (obidve lokality sú v Tatrách). Najvyššia hodnota v plodoch bola nameraná v Tichej doline (Západné Tatry), v konárikoch a v listoch na lokalite Kabenec (Nízke Tatry).

Tab. 2 Koncentrácie Hg v nadzemnej časti biomasy čučoriedky obyčajnej (mg.kg⁻¹)
Tab. 2 Mercury concentration in above-ground biomass of bilberry (mg.kg⁻¹)

Lokalita	Časť rastliny	Koncentrácia Hg	Smerodajná odchýlka
Košarisko	Listy	0,01723	0,00056
	konáriky	0,00915	0,00045
	Plody	0,00147	0,00011
Železný posed	Listy	0,01831	0,00168
	konáriky	0,00819	0,00045
	Plody	0,00156	0,00003
Kabenec	Listy	0,03134	0,00105
	konáriky	0,01031	0,00136
	Plody	0,00151	0,00003
Tichá dolina	Listy	0,01905	0,00019
	konáriky	0,00726	0,00052
	Plody	0,00273	0,00005
Javorová dolina	Listy	0,01831	0,00161
	konáriky	0,00724	0,00068
	Plody	0,00129	0,00015
Zadná Látaná	Listy	0,0175	0,00012
	konáriky	0,00847	0,00036
	Plody	0,00156	0,00004
Červenec	Listy	0,02141	0,00029
	konáriky	0,00743	0,00065
	Plody	0,00146	0,00016
Zadné Med'odoly	Listy	0,01697	0,00041
	konáriky	0,00612	0,00082
	Plody	0,00164	0,00004
Pod Ostrvou	Listy	0,01531	0,00016
	konáriky	0,00555	0,00039
	Plody	0,00135	0,00018
Nad Novou Poliankou	Listy	0,0147	0,00013
	konáriky	0,00725	0,00027
	Plody	0,00083	0,00012

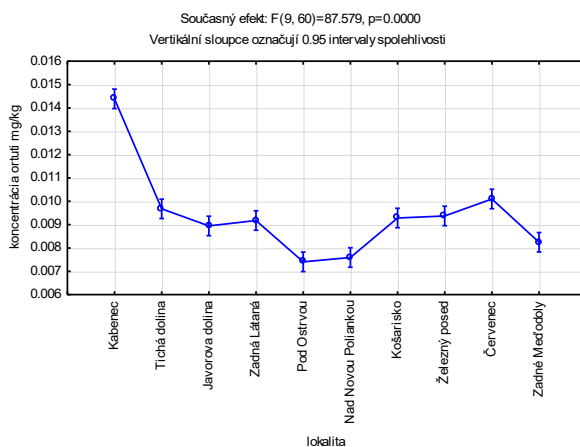
Ostatní autori skúmajúci obsah Hg v čučoriedkach uvádzajú podobné koncentrácie Hg. MAXIMOVÁ et al. (2018) ukazuje obsah Hg v listoch čučoriedky z oblasti Vysokých Tatier a Veľkej Fatry v podobnom rozsahu 0,018 – 0,026 mg.kg⁻¹, avšak v konárikoch uvádzajú rádoovo vyššie koncentrácie Hg, a to na úrovni 0,012 – 0,015 mg.kg⁻¹. MAILMAN et BODALY (2005) v čerstvej nadzemnej biomase čučoriedok v Ontáriu stanovili množstvo Hg 0,011 mg.kg⁻¹.

Podľa analýzy variancie možno konštatovať, že rozdiely v koncentracii ortuti medzi jednotlivými časťami rastlín sú štatisticky významné. Intervaly spoľahlivosti sa neprekrývajú. Najvyššia priemerná hodnota je v listoch 0,019 ± 0,0046 mg.kg⁻¹, potom v konárikoch 0,0077 ± 0,0015 mg.kg⁻¹ a najmenšia v plodoch 0,0026 ± 0,004 mg.kg⁻¹ (obr. 2). Najvyššie koncentrácie Hg, v porovnaní s inými časťami nadzemnej biomasy, sú pomerne typické (REIMAN et al., 2007, OBRIST et al., 2016).



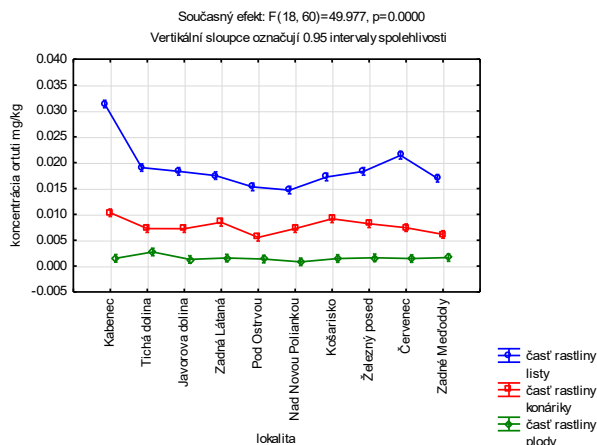
Obr. 2 Obsah ortuti (mg.kg^{-1}) v listoch, konárikoch a plodoch čučoriedok súhrne zo všetkých lokalít
Fig. 2 Mercury concentration (mg.kg^{-1}) in leaves, twigs and fruits of bilberries aggregated across all sampling sites

Pri hodnotení totálnej koncentrácie ortuti podľa lokalít konštatujeme (obr. 3), že rozdiely sú štatisticky významné, najvyššia hodnota je na lokalite Kabenec, nasleduje Červenec, najnižšia priemerná hodnota je Pod Ostrvou. Ide o zmiešané koncentrácie z celej nadzemnej biomasy podľa lokalít.



Obr. 3 Obsah ortuti (mg.kg^{-1}) v nadzemnej biomase čučoriedky podľa jednotlivých lokalít
Fig. 3 Concentration of mercury (mg.kg^{-1}) in above-ground biomass of bilberries at single localities

Bioakumulačný a nadväzne naň bioindikačný potenciál čučoriedky ukazuje bioakumulačný koeficient (BAK), ktorý predstavuje podiel obsahu Hg v listoch a v substráte (SASMAZ et al., 2008). V asimilačných orgánoch čučoriedky sa kumuluje v porovnaní s konárikmi a plodmi najväčšie množstvo Hg, avšak stále rádovo menej ako je obsah Hg v pôde. BAK nižší ako jedna znamená, že v listoch nedochádza ku významnej kumulácii Hg z pôdy a rastlina nekumuluje ani výrazné množstvá z atmosféry, napriek tomu, že hlavný zdroj Hg v asimilačných orgánoch pochádza z atmosféry (GUSTIN et al., 2004, FRESHOLTZ et al., 2003, ASSAD et al., 2016).



Obr. 4 Obsah ortuti (mg.kg^{-1}) na lokalitách v jednotlivých častiach čučoriedky (listy, konáříky, plody)
Fig. 4 Mercury content in single bilberry parts (leaves, twigs and fruits) at study localities (mg.kg^{-1})

Podľa obr. 4 vidíme, že koncentrácia ortuti v plodoch je vyrovnaná na všetkých sledovaných lokalitách, štatisticky významný rozdiel je len medzi Tichou dolinou voči všetkým ostatným. Rozdiely v obsahu ortuti v plodoch medzi ostatnými lokalitami nie sú štatisticky významné. Väčšie rozdiely medzi lokalitami sú v listoch, rozdiely vo väčšine prípadov sú štatisticky významné. Vyššie hodnoty boli zistené v listoch na lokalitách v Nízkych Tatrách. V plodoch sú najvyššie hodnoty na lokalitách v západných Tatrách. Rozdiely v obsahu ortuti v konárikoch sú medzi lokalitami vo väčšine prípadov štatisticky významné.

ZÁVER

Analýza obsahu Hg v pôde a nadzemnej biomase brusnice čučoriedkovej v horských oblastiach Slovenska neukázala zvýšené zaťaženie sledovaných lokalít ortuťou. Koncentrácie ortuti v pôdach sa na všetkých sledovaných lokalitách pohybovali pod legislatívnymi limitmi. Najvyššie koncentrácie Hg v rastlinách boli konzistentne zaznamenané v listoch. Plody vykazovali najnižšie hodnoty. Vo všeobecnosti, koncentrácie Hg v nadzemnej biomase čučoriedok z jednotlivých lokalít boli veľmi vyrovnané.

Najvyššie koncentrácie Hg v listoch boli zistené na lokalitách Kabenec a Červenec, zatiaľ čo najnižšia priemerná koncentrácia bola na lokalite Nad Novou Poliankou. Rozdiely v obsahu Hg v celkovej nadzemnej biomase medzi lokalitami boli štatisticky významné a odrážajú kombináciu vplyvov atmosférickej depozície, lokálnych mikroklimatických podmienok, typu pôdy a geomorfologických špecifik.

Výsledky ukazujú, že *Vaccinium myrtillus* nie je bioakumulačným indikátorom prítomnosti Hg v životnom prostredí, keďže v nadzemnej biomase ortuť nekumuluje. V prípade potreby sa asimilačné orgány brusnice čučoriedkovej môžu použiť ako bioindikátor ortuti, keďže v porovnaní s plodmi a konárikmi kumulujú Hg v najvyššej miere.

PodĎakovanie: Autori ďakujú agentúre VEGA za finančnú podporu pri riešení projektu č. 1/0057/22, v rámci ktorého vznikol prezentovaný príspevok.

LITERATÚRA

ASSAD M, PARELLE J, CAZAUX D, GIMBERT F, CHALOT M, TATIN-FROUX F., 2016. Mercury uptake into poplar leaves. *Chemosphere* 146:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.103>

EEVA T, HOLMSTRÖM H, ESPÍN, S., SÁNCHEZ-VIROSTA, P., KLEMOLA, T., 2018. Leaves, berries and herbivorous larvae of bilberry *Vaccinium myrtillus* as sources of metals in food chains at a Cu-Ni smelter site. *Chemosphere* 210:859–866. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.099>

ČURLÍK, J., ŠEFČÍK, P., 1999. *Geochemický atlas Slovenska : Pôdy*. Bratislava : Ministerstvo životného prostredia SR. ISBN 80-88833-14-0

ERICKSEN JA, GUSTIN MS, SCHORRAN DE, JOHNSON DW, LINDBERG SE, COLEMAN JS., 2003. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage. *Atmos Environ* 37: 1613-1622 [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00008-6)

- FRESCHOLTZ TF, GUSTIN MS, SCHORRAN DE, FERNANDEZ GC., 2003. Assessing the source of mercury in foliar tissue of quaking aspen. *Environ Toxicol Chem* 22:2114–2119. <https://doi.org/10.1002/etc.5620220922> 155.
- GUSTIN MS, ERICKSEN JA, SCHORRAN DE, JOHNSON DW, LINDBERG SE, COLEMAN JS, 2004. Application of controlled mesocosms for understanding mercury air- soil-plant exchange. *Environ Sci Technol* 38:6044–6050. <https://doi.org/10.1021/es0487933>
- GWOREK B., DMUCHOWSKI, W., BACZEWSKA-DABROWSKA, A. H. 2020. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe* 32:128 <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x>
- KANDZIORA-CIUPA, M., CIEPAŁ, R., NADGÓRSKA-SOCHA, A., BARCZYK, G., 2013. A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in *Vaccinium myrtillus* L. leaves in polluted and non-polluted areas. *Environmental Science and Pollution Research International*, 20(7), 4920–4932. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1461-4>
- KUKLA, J.; KUKLOVÁ, M. 2008. Growth of *Vaccinium myrtillus* L. (*Ericaceae*) in spruce forests damaged by air pollution. *Pol. J. Ecol.* 56, 149–155. [[Google Scholar](#)]
- LINDBERG SE, DONG W, MEYERS T., 2002. Transpiration of gaseous elemental mercury through vegetation in a subtropical wetland in Florida. *Atmos Environ* 36:5207–5219. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00586-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00586-1)
- LODENIUS, M., TULISALO, E., SOLTANPOUR-GARGARIET A., 2003. Exchange of mercury between atmosphere and vegetation under contaminated conditions. *Science of Total Environment* 304:169-174
- MAXIMOVÁ, N., SAGANOVÁ, M., SLOVÁKOVÁ, E., VACULÍK, M., 2018. Akumulácia a fyziologické účinky vybraných ťažkých kovov na rast a vývin brusnice čučoriedkovej (*Vaccinium myrtillus* L.). In. HNILIČKA, F. (ed.), 2018. *Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin 2018*. Zborník recenzovaných vedeckých prác. s. 92-95 ISBN: 978-80-89408-31-3
- MAILMAN, M., BODALY, R.A. 2005. 'Total mercury, methyl mercury, and carbon in fresh and burned plants and soil in Northwestern Ontario', *Environmental Pollution*, 138(1), s. 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.02.005>.
- OBRIST D, PEARSON C, WEBSTER J, KANE T, LIN CJ, AIKEN GR, ALPERS, CHN., 2016. A synthesis of terrestrial mercury in the western United States: spatial distribution defined by land cover and plant productivity. *Sci Total Environ* 568:522–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.104>
- REEVES, R.D. 2006. Hyperaccumulation of trace elements by plants. In. *Phytoremediation of metal-contaminated soils*, (eds. J.L. Morel, G. Echevarria and N. Goncharova), s. 25-52. Nato Science, 68. Springer, Berlin, Germany.
- REIMANN, C., ARNOLDUSSEN, A., FINNE, T. E., KOLLER, F., NORDGULEN, Ø., ENGLMAIER, P., 2007. Element contents in mountain birch leaves, bark and wood under different anthropogenic and geogenic conditions. *Applied Geochemistry* 22, s. 1549 – 1566.
- SALEMAA, M., CARCAILLET, C., SALKINOJA-SALONEN, MLEMAA M., 2004. Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland. *Sci Total Environ* 324:141–160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.025>
- SASMAZ, A., OBEK, E., HASAR, H., 2008. The accumulation of heavy metals in *Typha latifolia* L. grown in a stream carrying secondary effluent. *Ecological engineering* 33, s. 278-284.
- TAULAVUORI, K., LAINE, K., TAULAVUORI, E. , 2013. Experimental studies on *Vaccinium myrtillus* and *Vaccinium vitis-idaea* in relation to air pollution and global change at northern high latitudes: a review. *Environ Exp Bot* 87:191–196. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.10.002>
- UHLIG C, JUNTILA O., 2001. Airborne heavy metal pollution and its effects on foliar elemental composition of *Empetrum hermaphroditum* and *Vaccinium myrtillus* in Sør-Varanger, northern Norway. *Environ Pollut* 114:461–469. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00225-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00225-6)
- ZHU W, LIN CJ, WANG X, SOMMAR J, FU X, FENG X., 2016. Global observations and modeling of atmosphere-surface exchange of elemental mercury: a critical review. *Atmos Chem Phys* 16:4451–4480. <https://doi.org/10.5194/acp-16-4451-2016>
- Zákon č. 220/2004 Z. z. o ochrane a využívaní poľnohospodárskej pôdy a o zmene zákona č. 245/2003 Z. z. o integrovanej prevencii a kontrole znečisťovania životného prostredia a o zmene a doplnení niektorých zákonov.