





**ACTA  
FACULTATIS  
FORESTALIS  
ZVOLEN**

**66/1  
2024**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE**

Vedecký redaktor / Executive editor:  
JUDr. Mgr. Zuzana Dobšínská, PhD.

Výkonný redaktor / Managing editor:  
doc. Ing. Martin Lieskovský, PhD.

Predseda redakčnej rady / Editor in Chief:  
doc. Mgr. Ing. Rastislav Šulek, PhD.

Redakčná rada / Editorial board:  
prof. Ing. Marek Fabrika, PhD.  
prof. Ing. Peter Jaloviar, PhD.  
Dr. h. c. prof. Ing. Rudolf Kropil, PhD.  
doc. Ing. Daniel Kurjak, PhD.  
doc. Ing. Ján Merganič, PhD.  
prof. Dr. Ing. Jaroslav Šálka  
prof. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc.  
prof. Ing. Karol Ujházy, PhD.

ACTA FACULTATIS FORESTALIS ZVOLEN 66 1/2024

Vydala Technická univerzita, T. G. Masaryka 2117/24, 960 01 Zvolen, IČO 00397440  
Vydanie I. – jún 2024

Rozsah 205 strán

Náklad 100 výtlačkov

Tlač a grafická úprava: Vydavateľstvo TU vo Zvolene

Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

Vydanie publikácie schválené Edičnou radou TU vo Zvolene dňa 19.2.2024, číslo EP 21/2024

Za vedeckú úroveň tejto publikácie zodpovedajú autori a recenzenti.

Periodikum s periodicitou dvakrát ročne.

Evidenčné číslo 3861/09

© Technická univerzita vo Zvolene

ISSN 0231-5785

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



## OBSAH – CONTENTS – INHALT

<b>Lýdia ŠTOFANÍKOVÁ – Alena SLIACKA KONÔPKOVÁ:</b> Efekt aplikácie nanočastíc kremíka na rastliny vystavené hyperkoncentracii zinku .....	7
<b>Ján BLAHOVEC – Milan MOZOL – Jakub RYBOVIČ – Jerguš RYBÁR:</b> Overenie metódy stanovenia objemu mŕtveho dreva spracovaním bodových mračien z pozemného LiDAR-u .....	19
<b>Dénes BENKE – Eszter VISI-RAJCZI – Tamás HOFMANN:</b> Antioxidant capacity of medical plants produced in agroforestry system .....	35
<b>Dominik GRETSCH – Martin LIESKOVSKÝ:</b> Hodnotenie výkonnosti akumulátorových prenosných reťazových píl pri priečnom delení vlákňinového dreva.....	49
<b>Soňa GREŇČIKOVÁ:</b> Pôdna respirácia a jej komponenty v horskom smrekovom lese pod vplyvom mikroklimatických faktorov .....	69
<b>Jaroslav ŠKVARENINA – Milan Ostrihoň – Lenka MALOVCOVÁ – Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ – Martin JANČO – Peter BORSÁNYI – Ľubomír KORENÝ – Ilja VYSKOT:</b> Požiarovosť lesov a požiarne klíma Západných Tatier .....	87
<b>Jana ŠKVARENINOVÁ:</b> Fenologická odozva proveniencií jedle bielej ( <i>Abies alba</i> mill.) zo Slovenska na zmeny podmienok prostredia.....	105
<b>Adriana LEŠTIANSKA – Peter FLEISCHER JR. – Katarína STŘELCOVÁ:</b> Hodnotenie dynamiky rastu a vodného stavu rôznych druhov lesných drevín v klimaticky odlišných rokoch s využitím dendrometrov.....	119
<b>Andrea ZACHAROVÁ – Hana OLLEROVÁ – Jakub MIŠÁNI – Miroslav VANEK:</b> Zhodnotenie vybraných faktorov ovplyvňujúcich mieru kumulácie ortuti v ihliciach smreka obyčajného ( <i>Picea abies</i> (L.) karst.).....	131
<b>Miriám HANZELOVÁ – Jaroslav VIDO – Zuzana GREŠTIK ORAVCOVÁ – Jaroslav ŠKVARENINA:</b> Historické bioklimatologické merania na území ŠLP .....	139
<b>Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ – Ľubomír KORENÝ – Ján HOLÉCY – Jaroslav ŠKVARENINA:</b> Návrh testovania nového ekologicky a environmentálne bezpečného prípravku ošetrovania včelstiev proti varroóze.....	157

**Ľubomír KORENÝ – Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ – Janka LAFFÉRSOVÁ – Jaroslav ŠKVARENINA:**

Návrh ekologických postupov prevencie a liečby varroózy  
u včiel medonosných použiteľných pre slovenských včelárov..... 171

**Hana Ollerová – Andrea ZACHAROVÁ – Radoslav DUVAČ – Miroslav VANEK:**

Kumulácia ortuti v hríbe smrekovom (*Boletus edulis* Bull.)  
v lesných ekosystémoch stredného Slovenska..... 187

**Miroslav VANEK:**

Aggregated transfer factor for <sup>137</sup>Cs in wild berries soil - fruits system  
in relation to selected environmental factors ..... 199

# EFEKT APLIKÁCIE NANOČASTÍC KREMÍKA NA RASTLINY VYSTAVENÉ HYPERKONCENTRÁCII ZINKU

Lýdia ŠTOFANÍKOVÁ – Alena SLIACKA KONÔPKOVÁ

ŠTOFANÍKOVÁ, L. – SLIACKA KONÔPKOVÁ, A. : Efekt aplikácie nanočastíc kremíka na rastliny vystavené hyperkoncentracii zinku. Acta facultatis forestalis, Zvolen

## ABSTRAKT

Toxicita ťažkých kovov je jednou z najviac sa zrýchľujúcich abiotických stresových faktorov súčasnosti. Tento problém pochádza zo širokej škály antropogénnych a prírodných činiteľov. Tieto činitele výrazne zvyšujú aj obsah zinku v pôde, ktorý je vo vysokých koncentráciách pre rastliny toxický a môže viesť k fyziologickým poruchám, ako je inhibícia fotosyntézy, spomalenie príjmu živín a v konečnom dôsledku tak negatívne ovplyvniť produkciu biomasy. Ako jedna z možností na zmiernenie vplyvu abiotických a biotických stresových činiteľov sa javí aplikácia kremíka, ktorá navyše v podobe nanočastíc dokáže efektívnejšie vstupovať do rastlinných organizmov. Cieľom experimentu bola analýza foliárnej aplikácie kremíka v podobe nanočastíc (SiNPs) u pšenice jarnej TC19 pestovanej v hydroponickom roztoku obsahujúcom zvýšené koncentrácie zinku vo forme síranu zinočnatého. V prvom rade sme sa zamerali na hodnotenie morfológických charakteristík ako dĺžku koreňov a výhonkov v čerstvom stave a počet listov. Následne sme sa zaoberali rozdielmi v procesoch súvisiacich s primárnou fázou fotosyntézy, konkrétne obsah chlorofylu a parametre fluorescencie chlorofylu *a*. U zinkom – stresovaných rastlín sme pozorovali pozitívny efekt foliárnej aplikácie SiNPs na výkonnosť fotochémiu, ktorá bola popísaná parametrami fluorescencie chlorofylu *a*. Pozitívne účinky SiNPs sme však pri morfológických parametroch nepreukázali. Pri nestresovaných jedincoch sme nepozorovali ani pozitívny, ani negatívny vplyv foliárnej aplikácie SiNPs ani u jedného z meraných parametrov.

**Key words:** kremík, nanočastice, zinok, pšenica, zmiernenie stresu

## Úvod

Kremík (Si) je druhým najrozšírenejším prvkom v pôde pokrývajúci až 25% celkovej zemskej kôry (Souri et al. 2021). Množstvo prijatého a akumulovaného Si sa u rôznych rastlinných druhov výrazne odlišuje (Ma, Yamaji 2006), pričom vo vyšších množstvách je akumulovaný u jednoklíčnolistových rastlín ako je napr. ryža, pšenica, či jačmeň. Z tohto dôvodu získava čoraz väčšiu pozornosť predovšetkým v odvetví poľnohospodárstva (Richmond, Sussman 2003).

Predpokladá sa, že v budúcnosti môže vzniknúť problém s dostupnosťou kvalitnej poľnohospodárskej pôdy ako dôsledok vysokého nárastu populácie na zemi. To by mohlo viesť k využívaniu menej kvalitnej, priam až nevhodnej pôdy na pestovanie poľnohospodárskych plodín a práve v tomto prípade by aplikácia kremíka mohla priniesť značné benefity (Greger et al. 2018).

Abiotický stres patrí medzi závažné problémy, ktoré negatívnym spôsobom ovplyvňujú rastlinné organizmy. U postihnutých rastlín dochádza k poklesu fyziologickej aktivity, pričom rastliny môžu začať vytvárať reaktívne formy kyslíka (ROS), ktoré spôsobujú ďalšie poškodenia bunkových štruktúr. To môže mať fatálne dôsledky, akými sú napríklad zmeny ich funkčných vlastností, čo následne vedie k ďalším fyziologickým a metabolickým zmenám (Deshmukh et al., 2017).

Bolo dokázané, že práve kremík dokáže efektívne bojovať proti abiotickým a biotickým stresovým činiteľom akou je aj toxicita ťažkých kovov. Tento problém pochádza zo širokej škály antropogénnych a prírodných činiteľov (Souri et al. 2021). Emisie z priemyslu, aplikácia kalov a agrochemikálii, ako antropogénnych činiteľov, zvyšujú obsah zinku v pôde, ktorý je vo vysokých koncentráciách pre rastliny toxický. Jeho nadmerná akumulácia v koreňoch je zapríčinená pravdepodobne tvorbou chalátov s transportérmi železa (Makovníková et al. 2006). Kremík dokáže v tomto smere znížiť jeho transport a zvyšovať adsorpciu  $Zn^{2+}$  z rastlín (Souri et al. 2021). Predpokladá sa, že najúčinnjšou formou kremíka je kremík vo forme nanočastíc. V takejto forme dokáže kremík vďaka svojej veľkosti efektívnejšie vstupovať do rastlinných organizmov, čo môže v rastlinách podnecovať viaceré fyziologické a metabolické aktivity (Rastogi et al. 2019).

Cieľom predkladanej práce je preto sledovať pôsobenie kremíka v podobe nanočastíc - Aerosil 380 na fyziologické a morfológické parametre pšenice jarnej, ktorá rástla v stresujúcom prostredí v dôsledku zaťaženia zinkom.

Hypotézou bolo, že zinok, v nadmernom množstve ako toxický kov, zníži množstvo asimilačných pigmentov, zníži efektívnosť primárnych fotochemických dejov, pričom sa naopak zvýši fluorescenciu chlorofylu *a*. Tento proces negatívne ovplyvní morfológické charakteristiky, znakom čoho bude spomalenie vo vývoji a raste podzemných (koreň) a nadzemných orgánov (výhonkov). Druhou hypotézou je zníženie negatívnych dopadov Zn na rastliny po foliárnej aplikácii nanočastíc kremíka vo všetkých skúmaných parametroch.

## **Materiál a metódy**

### **Rastlinný materiál a experimentálny dizajn**

Na analýzu bola použitá pšenica jarná odrody TC19. V prostredí *in vitro* bolo vypestovaných cca 150 rastlín. Na začiatku experimentu (29.2.2024) sme semená

pšenice jarnej dali naklíčiť do misky s filtračným papierom namočeným vo vode, ktorý sme udržiavali vlhký počas celej doby klíčenia. Klíčenie prebiehalo pri izbovej teplote. V ďalšom kroku sme naklíčené semená preložili do hydroponického, tzv. Hoglandovho roztoku, ktorý obsahuje všetky potrebné živiny pre správny rast rastlín. Pšenicu sme nechali v roztoku 1 týždeň. Následne sme k jednej polovici rastlín do roztoku pridali 2 Mm zinku vo forme síranu zinočnatého, ktorý je pre rastliny ľahko dostupný. Táto koncentrácia by však pre dané rastliny mala predstavovať stresové podmienky. Týmto sme si vytvorili prvé 2 varianty rastlín a to, rastliny stresované síranom zinočnatým a kontrolné rastliny nestresované Zn. Po štyroch dňoch sme na polovicu zinkom stresovaných a polovicu zinkom nestresovaných rastlín aplikovali nanočastice kremíka, konkrétne Aerosil 380 s veľkosťou nanočastíc do 20 mikrometrov a s koncentráciou 1 mg na 1 liter roztoku. Roztok bol aplikovaný na listy rozprašovaním. Týmto sme vytvorili 4 varianty:

- I. C – kontrolný variant bez pridania zinku a nanočastíc kremíka
- II. Zn – variant s pridaným zinkom, ale bez nanočastíc kremíka
- III. SiNPs – variant bez pridaného zinku, ale s nanočasticami kremíka
- IV. Zn + SiNPs – variant s pridaným zinkom aj nanočasticami kremíka

Každé 2 – 3 dni bol roztok menený, pričom zakaždým bol opätovne aplikovaný kremík a zinok podľa toho o aký variant pšenice išlo. Po uplynutí dva a pol týždňa od prvého stresovania oboch foriem Zn sme začali prvé merania.

**Tabuľka 1 Zloženie Hoglandovho živného roztoku**  
**Table 1 Composition of Hogland's nutrient solution**

Makroživiny	Molarita
<b>Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b>	<b>2 mM</b>
<b>K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>0,7 mM</b>
<b>MgSO<sub>4</sub></b>	<b>0,5 mM</b>
<b>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></b>	<b>0,1 mM</b>
<b>KCl</b>	<b>0,1 mM</b>
<b>Fe-EDTA</b>	<b>20 μM</b>
Mikroživiny	Molarita
<b>CuSO<sub>4</sub></b>	<b>0,2 μM</b>
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub></b>	<b>1 μM</b>
<b>(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub></b>	<b>0,01 μM</b>
<b>ZnSO<sub>4</sub></b>	<b>0,5 μM</b>
<b>MnSO<sub>4</sub></b>	<b>0,5 μM</b>

### Meranie fyziologickej výkonnosti

#### *Obsah asimilačných pigmentov*

Najdôležitejší dej prebiehajúci v rastlinných organizmoch je proces fotosyntézy. Významnou súčasťou sú fotosynteticky aktívne pigmenty, chlorofyly,

ktorých úlohou je zachytávanie slnečného žiarenia o určitej vlnovej dĺžke (Špulák et al., 2011). Najvýznamnejší z nich je tzv. aktívny chlorofyl, inak nazývaný chlorofyl *a*, ktorého úlohou je absorbovať fotóny slnečného žiarenia o vlnovej dĺžke od 400 do 700 nm. Následným prebudovaním zachytenej energie na energiu chemických väzieb vzniká ATP (adenozíntrifosfát).

Obsah chlorofylov sme merali chlorofylometrom SPAD-502Plus (Konica Minolta) s ktorým sme vykonali 10 meraní pre každý variant.

### ***Fluorescencia chlorofylu a***

Fluorescencia chlorofylu je neefektívne vyžiarenie fotónov slnečného žiarenia späť do prostredia o vlnovej dĺžke vyššej ako 650 nm (Maxwell, Johnson 2000). Tento dej je v tesnej korelácii s primárnymi fotochemickými procesmi. Meranie tohoto parametra patrí medzi nedeštruktívne metódy, vďaka ktorému dostaneme presný pohľad na efektivitu resp. neefektivitu primárnej fázy fotosyntézy u danej rastliny.

V prvom kroku sme vzorky zatemnili na 30 min, aby sa spotrebovala všetka energia, ktorú rastliny už zachytili zo slnečného žiarenia. Po adaptovaní rastlín na tmu sme ich v ďalšom kroku ožiarili vysokou intenzitou žiarenia ( $3500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) po dobu 1s, vďaka čomu sme boli schopní zmerať fluorimetrom HandyPEA nasledujúce parametre:

F0- bazálna/minimálna fluorescencia chlorofylu v listoch adaptovaných na tmu

FM- maximálna fluorescencia chlorofylu v listoch adaptovaných na tmu

FV- variabilná fluorescencia,  $FV = FM - F0$

FV/FM- maximálny kvantový výťažok PSII/ maximálna efektivita fotochémié

PI- index fotochemickej výkonnosti

Týmto spôsobom sme vykonali 10 meraní u každého variantu pšenice TC19.

### **Morfologická charakteristika**

#### ***Dĺžka výhonkov, koreňa a počet listov***

Dĺžku podzemnej a nadzemnej časti v čerstvom stave u pšenice jarnej TC19 sme zisťovali u 10 jedincov z každého variantu. Jednotlivé rastliny sme najprv odfotografovali a následne sme boli schopní softvérom ImageJ odmerať dĺžku výhonkov a koreňa.

### **Matematicko-štatistické vyhodnotenie**

Po vykonaní jednotlivých meraní boli dáta štatisticky spracované v programe STATISTICA. Jednotlivé varianty boli porovnávané pomocou jednofaktorovej analýzy variancie (ANOVA) a párového testu.

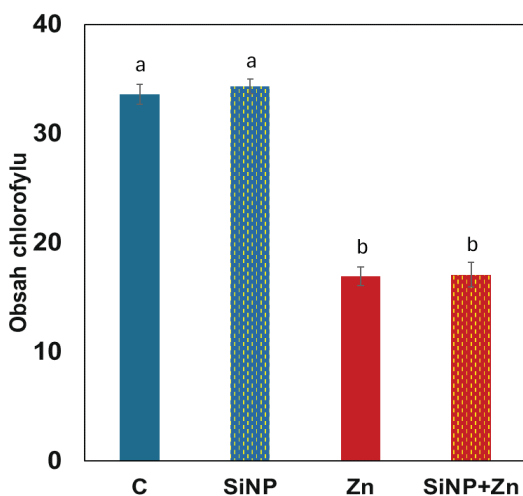
### **Výsledky**

#### **Meranie fyziologickej výkonnosti**

Obr. č. 1 nám znázorňuje prehľad obsahu chlorofylu v asimilačných orgánoch jednotlivých variantov pšenice jarnej TC19. Ako prvé si môžeme všimnúť

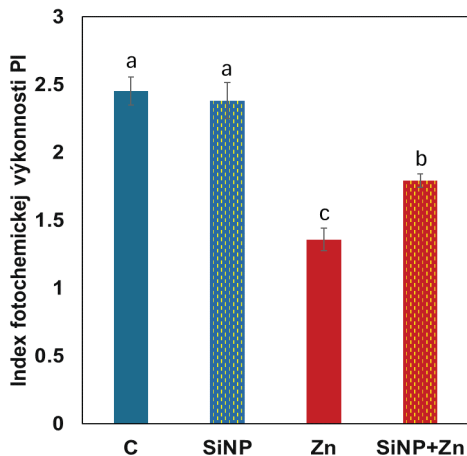
výrazné štatistické rozdiely medzi variantmi rastúcimi v zinkom zaťaženom prostredí a nestresovanými variantmi.

Z výsledkov vyplýva najvyšší obsah chlorofylu u variantu s označením SiNP, čo predstavuje rastliny s foliárnou aplikáciou SiNPs. Podobné výsledky vykazuje skupina bez pridaného síranu zinočnatého alebo nanočastíc Si, čiže tzv. kontrola (C), pričom výsledky u oboch variantov presahujú hodnotu 30. Rozdiel medzi variantmi ovplyvnenými abiotickou formou stresu v podobe síranu zinočnatého nie je štatistický významný. Ich výsledky sa nepatrne blížia k hodnote 20.

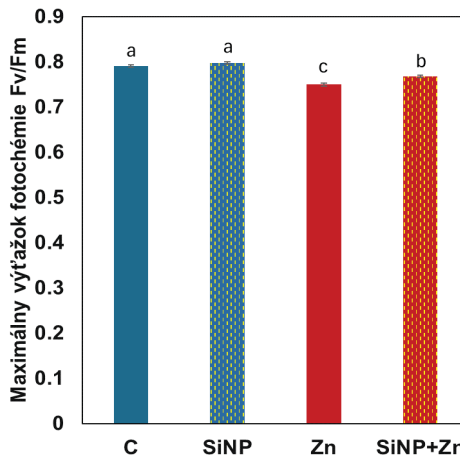


Obr. 1 Obsah chlorofylu  
Fig. 1 Chlorophyll content

Index fotochemickej výkonnosti PI znázornený na Obr.č.2 nám preukázal štatisticky významné rozdiely medzi variantmi, ktoré vidíme v troch prípadoch. Okrem štatisticky významného rozdielu medzi zinkom - stresovanými rastlinami a kontrolou, analýza preukázala štatisticky významný rozdiel aj u zinkom - stresovaných rastlín s foliárnou aplikáciou SiNPs a variantom s označením Zn, ktorý má najnižšie hodnoty. Taktiež sa v tomto prípade preukázal významný štatistický rozdiel medzi spomínanou skupinou SiNP + Zn a kontrolou, čiže vo viac ako 95% prípadov boli hodnoty medzi jedincami odlišné. Rozdiel medzi variantom SiNP a kontrolou nie je štatisticky významný, pričom ich hodnoty sa blížia k 2,5.



Obr. 2 Index fotochemickej výkonnosti PI  
Fig. 2 Performance index



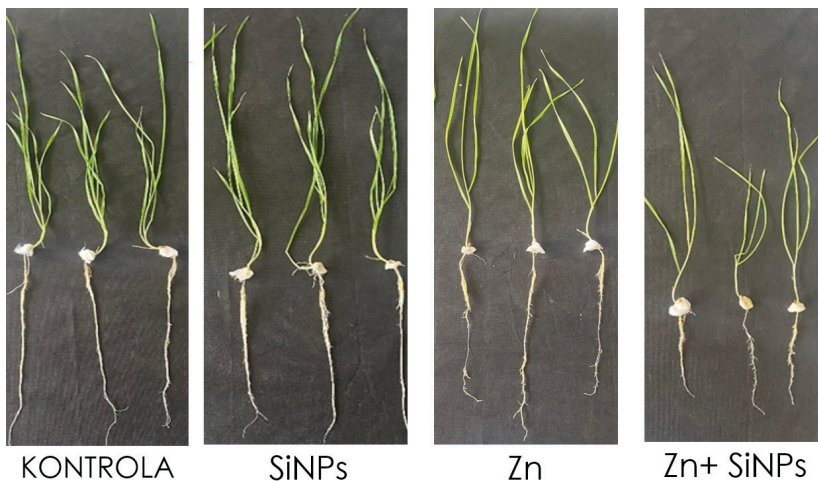
Obr. 3 Maximálny výtazok fotochémie  
Fig. 3 Maximum efficiency of photochemistry

Obr. č. 3 nám znázorňuje rozdiel medzi variabilnou fluorescenciou a maximálnou fluorescenciou chlorofylu *a* v listoch adaptovaných na tmu, pričom výsledkom je maximálny kvantový výtazok fotochémie. Keď si porovnáme kontrolu so SiNP variantom zistíme, že rozdiel nie je štatisticky významný, pričom ich výsledná hodnota je na úrovni 0,8. Z analýzy opäť vyplývajú tri štatisticky významné rozdiely. Štatisticky najmenej efektívnu fotochémiu sme zaznamenali u zinkom - stresovaných rastlín. Foliárna aplikácia SiNPs u zinkom-stresovaných rastlín viedla k zvýšeniu efektívnosti primárnej fotochémie, avšak tieto hodnoty stále nedosahovali hodnoty zinkom – nestresovaných rastlín.

### Morfologické charakteristiky

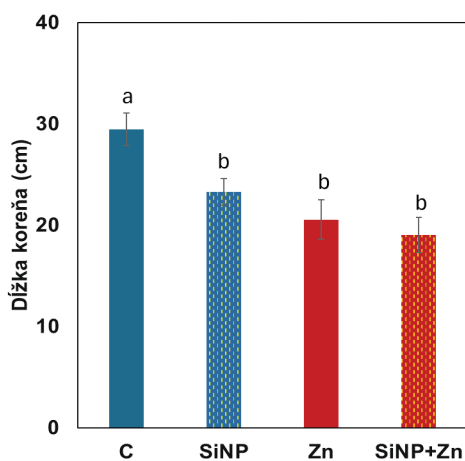
Na Obr. č. 4 vidíme dĺžky výhonkov a koreňov u jednotlivých variantov pšenice jarnej TC19. Môžeme si všimnúť množstvo vedľajších, resp. bočných koreňov u tretieho a štvrtého variantu. Príčinou javu je pravdepodobne zinok, no v tejto chvíli ešte nevieme jednoznačne vysvetliť, prečo daný jav nastal.



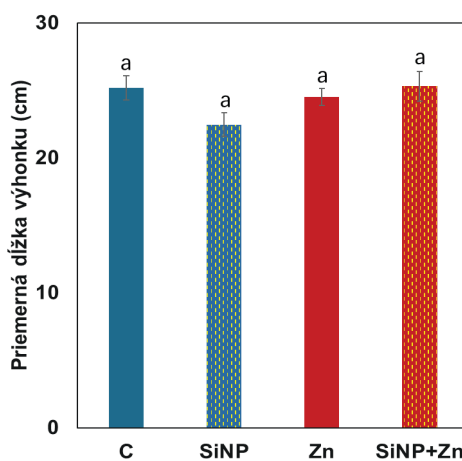


Obr. 4 Porovnanie bočných koreňov medzi variantmi  
 Fig. 4 Comparison of lateral roots between variants

Výsledky znázornené na Obr. č. 5 nám preukázali štatisticky významný rozdiel v dĺžke koreňov medzi kontrolou a ostatnými variantmi označenými SiNP, Zn a SiNP + Zn. Priemerne druhý najdlhší koreň bol preukázaný u variantu s foliárnou aplikáciou nanočastic kremíka. Tretie v poradí sú rastliny, ktoré boli vystavené pôsobeniu Zn v podobe síranu zinočnatého a štvrtý bol variant vystavený stresovým činiteľom s foliárnou aplikáciou nanočastic kremíka. Medzi týmito tromi variantmi však rozdiel nebol štatisticky významný.



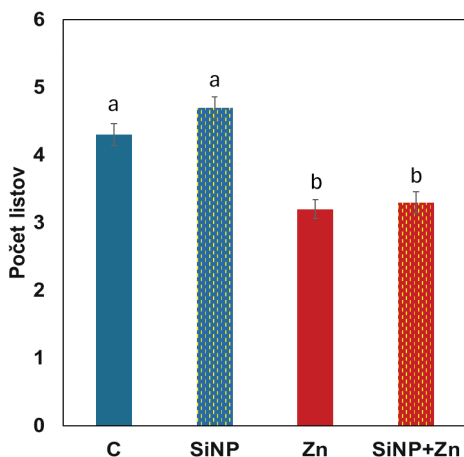
Obr. 5 Dĺžka koreňov  
 Fig. 5 Root length



Obr. 6 Priemerná dĺžka výhonku  
 Fig. 6 Average shoot length

Obr. č. 6 znázorňujúci priemerné dĺžky výhonkov v cm taktiež preukázal najvyššie hodnoty pri variante v zinkom – stresovanom prostredí. Vzhľadom k tomu, že rozdiely v analýze nie sú štatisticky významné, tento výsledok je skôr náhodný.

Na Obr. č. 7 si v prvom rade môžeme všimnúť štatisticky významný rozdiel u variantov v zinkom – stresovanom prostredí a zinkom – nestresovanom prostredí. Najvyšší počet asimilačných orgánov bol preukázaný u variantu s foliárnou aplikáciou SiNPs. Po porovnaní daného variantu s kontrolným, však nebol preukázaný štatisticky významný rozdiel.



Obr. 7 Počet listov

Fig. 7 The number of leaves

## Diskusia

Analýza obsahu asimilačných pigmentov a fluorescencie chlorofylu *a* nám umožňuje pozrieť sa na efektívitu primárnej fázy fotosyntézy (Kalaji et al. 2014). Keďže sa, v porovnaní s morfológickými charakteristikami jedná o citlivejšie a dynamickejšie parametre, pri oboch metódach sme pozorovali štatisticky významné rozdiely medzi jednotlivými variantmi.

Výsledný experiment poukázal na negatívne pôsobenie zvýšenej koncentrácie zinku, ako abiotického stresového faktora, ktorý eliminoval priebeh najdôležitejšieho deja prebiehajúceho v rastlinných organizmoch a to fotosyntézy, konkrétne primárnych fotochemických dejov. Čo je dôležité, bol preukázaný štatisticky významný rozdiel v parametroch fluorescencie chlorofylu akou je fotochemická výkonnosť a maximálny kvantový výťažok, kde sa potvrdili pozitívne účinky po foliárnej aplikácii SiNPs na zinkom- stresované rastliny.

Z analýzy obsahu asimilačných pigmentov vyplýva zníženie daných hodnôt u zinkom stresovaných rastlín, čo dokazuje negatívny vplyv zinku na primárnu fázu fotosyntézy. Ak sa v listoch nachádza málo asimilačných pigmentov, tento jav degraduje priebeh primárnej fázy fotosyntézy, keďže chlorofyly fungujú ako zberače fotónov slnečného žiarenia o určitej vlnovej dĺžke (Taiz & Zeiger 2010). Výslednou analýzou sme však zistili, že kremík nedokázal úplne potlačiť negatívne pôsobenie síranu zinočnatého v danom parametri, ale dokázal jeho vplyv zmierniť.

V prípade morfológických charakteristík, ako je dĺžka výhonkov v cm, sme nepozorovali negatívny vplyv zinku. Pri počte listov bol rozdiel medzi zinkom- nestresovanými a zinkom stresovanými rastlinami štatisticky významný. V prípade dĺžky koreňov sme pozorovali negatívny dopad zinku na daný parameter. Pri nestresovaných jedincoch sme však nepozorovali ani pozitívny, ani negatívny vplyv foliárnej aplikácie SiNPs.

Výsledok morfológických charakteristík môže byť pravdepodobne zapríčinený zvolenou aplikáciou SiNPs alebo krátkou dobou experimentu. Foliárnu aplikáciu sme však museli zvoliť kvôli citlivosti pšenice na zmeny pH v hydroponickom roztoku (Shi et al. 2023). Zaujímavosťou v tomto meradle je množstvo vedľajších respektíve bočných koreňov u zinkom- stresovaných rastlín.

## **Záver**

V tejto práci sme sledovali pôsobenie foliárnej aplikácie kremíka v podobe nanočastíc - Aerosil 380 u pšenice jarnej odrody TC19, ktorá rástla v stresujúcom prostredí v dôsledku zaťaženia zinkom v podobe síranu zinočnatého. Predmetom merania boli morfológické a fyziologické charakteristiky.

Positívne účinky foliárnej aplikácie SiNPs v zinkom – stresovanom prostredí sme pozorovali pri meraniach fluorescencie chlorofylu *a*, kde sme sa zaoberali maximálnou efektívnosťou fotochémiie a indexom fotochemickej výkonnosti. Pri analýze obsahu chlorofylu a morfológických meraniach, čiže dĺžky podzemných, nadzemných orgánov a počet listov sme nezaznamenali pozitívne účinky foliárnej aplikácie SiNPs v zinkom - stresovanom a ani v zinkom - nestresovanom prostredí.

Do budúcnosti by sme odporúčali dlhšiu dobu experimentu, čo by sa mohlo prejavovať štatisticky významnejšími rozdielmi hlavne v morfológii jedincov. Taktiež by bola pravdepodobne vhodnejšia iná forma aplikácie SiNPs akou je priama aplikácia do roztoku, čím by sme dosiahli vyššiu absorpciu, a tým aj efektívnejší príjem daného prvku. Určite by sme ponechali rast rastlín v hydroponickom roztoku, čo má značné výhody v tom, že počas rastového procesu vidíme vývoj koreňového systému. Naším cieľom je okrem iného skúmať dané parametre na drevinách, čo by síce z časového hľadiska bolo zdĺhavejšie ale o to zaujímavejšie. Semenáčky by sme museli, ako aj v tomto experimente, pestovať v hydroponii, pričom konkrétnu aplikáciu SiNPs by sme ešte museli prehodnotiť.

## Literatúra

- Deshmukh, R. K., Ma, J. F., & Bélanger, R. R. (2017). Role of silicon in plants. *Frontiers in plant science*, 8, 307829.
- Greger, M., Landberg, T., & Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2), 41.
- Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., ... & Ahmad, P. (2014). The use of chlorophyll fluorescence kinetics analysis to study the performance of photosynthetic machinery in plants. In *Emerging technologies and management of crop stress tolerance* (pp. 347-384). Academic Press.
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in plant science*, 11(8), 392-397.
- MAKOVNÍKOVÁ, J., Barančíková, G., Dlapa, P., & DERCOVÁ, K. (2006). Anorganické kontaminanty v pôdnom ekosystéme. *Chemické listy*, 100(6), 424-432.
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of experimental botany*, 51(345), 659-668.
- Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., ... & Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. 3 *Biotech*, 9, 1-11.
- Richmond, K. E., & Sussman, M. (2003). Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Current opinion in plant biology*, 6(3), 268-272.
- Shi, C., Wang, P., Wang, G., Hu, T., Ru, Z., & Feng, S. (2023). Responses of root characteristics and nitrogen absorption and assimilation to different pH gradients of winter wheat at seedling stage. *Plos one*, 18(12), e0293471.
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., & Ahmad, P. (2021). Silicon and plants: current knowledge and future prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 906-925.
- Špulák, O. N. D. Ř. E. J., Vítámvás, J., Kacálek, D. U. Š. A. N., & Kuneš, I. V. A. N. (2011). Fluorescence chlorofylu, chemismus a obsah fotosynteticky aktivních pigmentů u listů buků vápněných do jamky. *Zprávy lesnického výzkumu*, 56(4), 301-309.
- TAIZ, L. and ZEIGER, E. 2010: Plant Physiology, 5th Edition. The Benjamin Cummings Publishing Company, Redwood City - California.

### Adresa autora:

Bc. Lýdia Štofániková  
Mgr. Alena Sliacka Konôpková, PhD.  
Katedra integrovanej ochrany lesa a krajiny  
Lesnícka fakulta  
Technická univerzita vo Zvolene  
Masarykova 24  
960 53 Zvolen  
Slovenská republika  
e-mail: lyastofanikova@gmail.com  
e-mail: alena.konopkova@tuzvo.sk

### Summary : EFFECT OF APPLICATION OF SILICON NANOPARTICLES ON PLANTS EXPOSED TO ZINC HYPERCONCENTRATION

Heavy metal toxicity is one of the most accelerating abiotic stressors today. This problem stems from a wide range of anthropogenic and natural factors. These factors also significantly increase the content of zinc in the soil, which is toxic for higher plants in high concentration and can lead to physiological disorders such as inhibition of photosynthesis,

slowing down of nutrient uptake and ultimately negatively affect biomass production. One of the options for mitigating the impact of abiotic and biotic stressors appears to be the application of silicon, which, moreover, can enter more efficiently to the plants in the form of nanoparticle. The aim of the experiment was to analyze the effect of application of silicon in the form of nanoparticles (SiNPs) in spring wheat TC19 grown in a hydroponic solution containing elevated concentrations of zinc in the form of zinc sulfate. The wheat plants were divided into 4 variants. Firstly, we focused on morphological traits such as length of roots and shoots in the fresh state and the number of leaves. Subsequently, we dealt with differences in processes related to the primary phase of photosynthesis, namely chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters. In zinc-stressed plants, we observed a positive effect of foliar application of SiNPs on photochemistry performance, which was described by chlorophyll a fluorescence parameters. However, we did not observed positive effects of SiNPs in morphological parameters. In non-stressed individuals, we observed neither a positive or negative effect of foliar application of SiNPs in any of the measured parameters.

**Key words:** silicon, nanoparticle, zinc, wheat, stress mitigation



## OVERENIE METÓDY STANOVENIA OBJEMU MŔTVEHO DREVA SPRACOVANÍM BODOVÝCH MRAČIEN Z POZEMNÉHO LIDAR-U

Bc. Ján BLAHOVEC – Bc. Milan MOZOL – Bc. Jakub RYBOVIČ – Ing. et Ing. Jerguš RYBÁR, PhD.

**BLAHOVEC, J. – MOZOL, M. – RYBOVIČ, J. – RYBÁR, J.:** Overenie metódy stanovenia objemu mŕtveho dreva spracovaním bodových mračien z pozemného LiDAR-u. Acta facultatis forestalis, Zvolen

---

### ABSTRAKT

In this study, we explored the possibilities of determining the volume of deadwood using point clouds obtained from terrestrial LiDAR through SLAM technology, specifically a handheld mobile laser scanner. The data were processed using open-source software CloudCompare and QGIS. Based on a model research sites, we tested two methods for estimating wood volume: the Smalian method, which involves manual identification of trunks, and the zonal statistics method. The results showed that both methods provide similar outcomes when compared to reference measurements. The Smalian method tended to overestimate slightly, while the zonal statistics method showed a tendency to underestimate. Variation was observed in individual trunks, mainly due to overlapping trees with vegetation, which led to an underestimation of trunk length and a systematic overestimation of thickness. Despite these deviations, this technology has great potential for forestry research, although further adjustments to data collection and processing workflows are necessary.

**Key words:** SLAM, Inventory, Deadwood, LiDAR, point cloud

**Kľúčové slová:** SLAM, inventarizácia, mŕtve drevo, LiDAR, bodové mračno

---

### Úvod

Mŕtve drevo predstavuje dôležitý indikátor ekologickej rovnováhy a rozmanitosti lesných ekosystémov, pretože poskytuje priestor pre život mnohým organizmom, najmä dekompozítom. V minulosti bol jeho monitoring riešený v rámci národných inventarizácií a výskumných projektov, pričom sa používali rôzne metódy a klasifikácie, ktoré často prinášali zmeny v postupe a technikách zberu údajov. Súčasná technológia, ako napríklad pozemný LiDAR, prinášajú možnosť rýchlejšieho a presnejšieho hodnotenia lesných ekosystémov, vrátane určenia množstva mŕtveho dreva. Táto štúdia sa sústreďuje

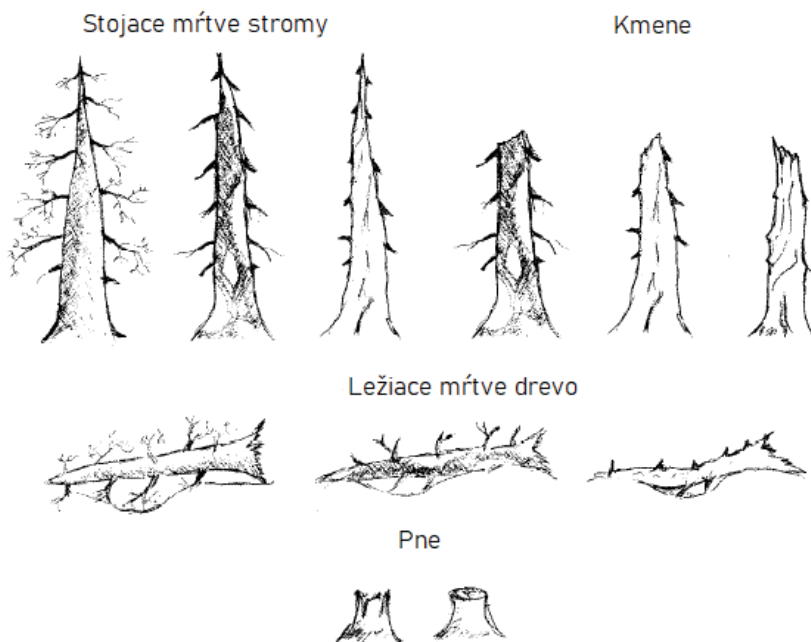
na testovanie nových metód, ktoré s využitím bodových mračien získaných LiDAR-om, môžu zlepšiť a zefektívniť proces monitoringu biodiverzity. Terestrické laserové skenovanie (HMLS) umožňuje tvorbu detailných 3D máp lesných porastov, čo má široké využitie pri lesnom manažmente a obhospodarovaní. Najnovšie technológie, ako SLAM (Simultánna lokalizácia a mapovanie), ktoré sú spojené s ručnými laserovými skenermi, ponúkajú významný potenciál na presné meranie a inventarizáciu lesných zdrojov aj počas pohybu v teréne.

Ešte donedávna sa mŕtve drevo považovalo za negatívny aspekt lesných ekosystémov, ktorý naznačoval zlé hospodárenie, nedostatočnú starostlivosť a nehospodárnosť v lesníctve (Stachura et al. 2007). Jeho potenciál bol vnímaný ako zdroj biotických škodcov, predovšetkým hmyzu (Marage a Lemperiere 2005), ktorý mohol ohroziť ostatné stromy v lesných oblastiach aj v ich okolí. Mŕtve drevo bolo tiež považované za riziko z pohľadu abiotických disturbancií, ako sú požiare. V obhospodarovaných lesoch sa považovalo za prekážku pre lesnícke aktivity (Thomas 2002; Travaglini a Chirici 2006; Travaglini et al. 2007a). Z pohľadu bezpečnosti pracovníkov a návštevníkov lesa boli stojace mŕtve stromy považované za potenciálne nebezpečné (Peterken 1996; Thomas 2002), a preto sa odporúčalo ich čo najskôr odstrániť, aby sa znížilo riziko pre verejnosť (Pasierbek et al. 2007).

Termín „mŕtve drevo“ sa vo všeobecnosti vzťahuje na všetok odumretý drevný materiál v lesoch, vrátane kmeňov, konárov, vetiev a koreňov, avšak nezahŕňa odumreté časti živých stromov. Mŕtve drevo teda pokrýva aj podzemné časti drevín (Harmon a Sexton 1996) a môže vzniknúť prirodzene v dôsledku starnutia, konkurencie, kalamít alebo lesníckych zásahov (Rondeux a Sanchez 2009). Materiál ležiaci na pôde lesa alebo stojace odumreté stromy a kríky sú príkladmi nadzemnej nekromasy (Pyle a Brown 1999). Odumreté korene drevín a ďalšie podpovrchové drevo, ktoré je väčšinou silne rozložené a nachádza sa v minerálnej pôde alebo na lesnej hrabanke, sú takisto súčasťou mŕtveho dreva (Harmon a Sexton 1996).

Odumreté drevo plní množstvo dôležitých funkcií, vďaka čomu je neoddeliteľnou súčasťou ekologických procesov. Množstvo, kvalita, štruktúra mŕtveho dreva a pňov sú kľúčovými ekologickými indikátormi prirodzenosti a biodiverzity ekosystému. Pri hospodárskom využívaní a spracovaní sa z intenzívne obhospodarovaných porastov prioritne odstraňujú dreviny s kvalitným kmeňom, zatiaľ čo v rámci negatívneho výberu sa dreviny s nižšou kvalitou alebo materiál z prvých výchovných zásahov sa často ponechávajú (Šebeň 2017; Šebeň et al. 2015; Šmelko et al. 2006; 2014). Typickým rozlišovacím znakom medzi hospodárskym a prírodným lesom je preto množstvo a zastúpenie mŕtveho dreva v rôznych fázach rozkladu (Korpel 1989). Je tiež dôležité zdôrazniť, že mŕtve drevo je kľúčovým prvkom v procese viazania uhlíka v lesnom ekosystéme. Odumreté drevo zohráva významnú úlohu pri prenose uhlíkových zlúčenín z drevnej hmoty do pôdy alebo ich emisiách do ovzdušia počas mikrobiálneho rozkladu.



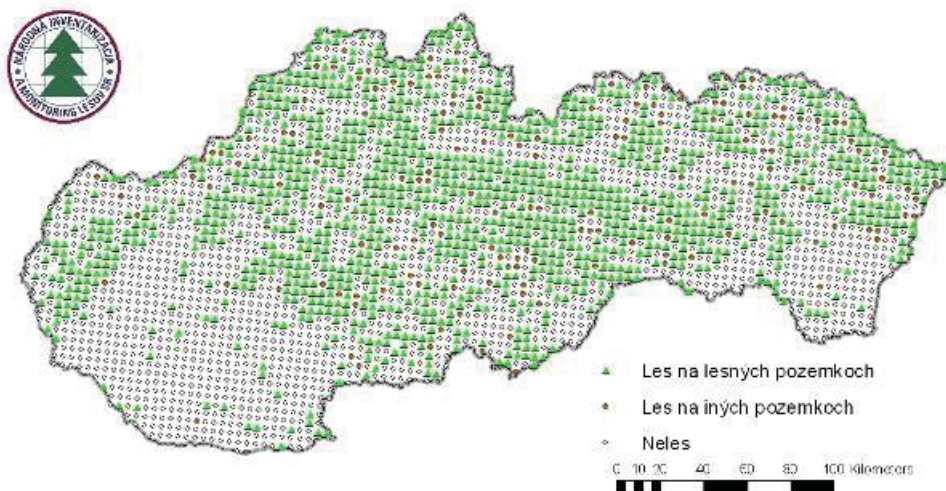


**Obr. 1:** Nadzemné mŕtve drevo (Merganičová et al. 2012)  
**Fig. 1:** Above-ground deadwood (Merganičová et al. 2012)

Je tiež dôležité zdôrazniť, že mŕtve drevo je kľúčovým prvkom v procese viazania uhlíka v lesnom ekosystéme. Odumreté drevo zohráva významnú úlohu pri prenose uhlíkových zlúčenín z drevnej hmoty do pôdy alebo ich emisiách do ovzdušia počas mikrobiálneho rozkladu.

### **Mŕtve drevo v lesoch Slovenska**

Hlavným a spoľahlivým zdrojom informácií o množstve mŕtveho dreva v lesoch je národná inventarizácia a monitoring lesov na Slovensku (NIML). Tento proces zahŕňa systematické periodické zbieranie rôznych údajov o lesoch, vrátane indikátorov biodiverzity.



**Obr. 2:** Siet' inventarizačných plôch (Šebeň 2017)  
**Fig 2:** Network of inventory plots (Šebeň 2017)

V pravidelnej sieti s rozmermi 4x4 km (jedna plocha zodpovedá približne 1600 ha) sa na viac než 1400 špeciálnych kruhových inventarizačných plochách (IP) zbierajú údaje v desaťročných intervaloch. Okrem plochy lesa sa získavajú aj ďalšie charakteristiky, ako drevinové zloženie, štruktúra, zásoba dreva, obnova a mŕtve drevo, prostredníctvom terestrickej inventarizácie. Táto sieť 4x4 km bola navrhnutá tak, aby sa čo najviac priblížila sieti monitoringu zdravotného stavu lesov, ktorý používa rozloženie 16x16 km. Inventarizačné plochy sú číslované od severu na juh a od východu na západ s odstupom 4 km. V rámci NIML1 sa zistila priemerná hodnota celkového množstva odumretého dreva v slovenských lesoch, ktorá činila  $37,7 \pm 2,1$  m<sup>3</sup>/ha. Celkový objem odumretého dreva dosiahol  $81,9 \pm 4,7$  miliónov m<sup>3</sup>, čo je významne viac než priemer v iných európskych krajinách.

NIML2 sa zistilo, že celkový objem odumretého dreva vo všetkých lesoch na Slovensku dosahoval  $93,8 \pm 5,9$  miliónov m<sup>3</sup>, čo zodpovedá priemeru  $42 \pm 3$  m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>. Odumreté drevo bolo rozdelené do rôznych hrúbkových tried: drevo s hrúbkou do 10 cm tvorilo 20,5 % celkového objemu, hrúbka od 11 do 20 cm mala podiel 23,2 %, od 21 do 30 cm predstavovalo 18,3 %, od 31 do 40 cm 14,2 %, a drevo s hrúbkou nad 40 cm zaberalo 23,8 % objemu (Šebeň 2017).

Kategoríe pozemkov	Objem bežný	Objem štandardizovaný	Celkový objem	Podiel z celkového objemu
	$m^3 \cdot ha^{-1}$		mil. $m^3$	%
Lesný pozemok	39,3 ± 2,4	45,2 ± 2,8	87,0 ± 5,7	92,7 ± 5,7
Nelesný pozemok	3,1 ± 0,8	23,8 ± 5,3	6,8 ± 1,8	7,3 ± 1,6
Spolu	42,4 ± 2,5	42,4 ± 2,5	93,8 ± 5,9	100

**Obrazok 3:** Odumreté drevo rozdelené podľa kategórií pozemkov (Šebeň 2017)

**Fig 3:** Dead wood divided by land categories (Šebeň 2017)

## Metódy merania objemu mŕtveho dreva

### Stojace sucháre

Objem stojacích suchárov sa určoval rovnakým spôsobom ako pri živých stromoch, a to pomocou česko-slovenských objemových rovníc (Petráš a Pajčík 1991), ktoré zohľadňovali výšku a priemer  $d_{1,3}$  každého stromu. Pre dosiahnutie porovnateľnosti s ostatnými zložkami odumretého dreva sa zvolila objemová jednotka HSK (objem s kôrou), ktorá zahŕňala aj peň. Pri porovnávaní podielu odumretého a živého dreva je dôležité použiť rovnakú objemovú jednotku HSK aj pre živé stromy, ktoré sa na Slovensku bežne vyjadrujú v HBK (objem bez kôry).

### Vyt'ažené pne

V rámci NIML1 boli vyvinuté nové rovnice na výpočet objemu vyt'ažených pňov. Tieto rovnice vychádzajú z rôznorodých tvarov kmeňov stromov, ktoré boli popísané v štúdií (Šmelko et al. 2006). Vstupnými premennými pre tieto rovnice sú priemer na hornej reznej ploche pňa (označovaný ako D) a výška pňa (označovaná ako H).

- Ihličnaté stromy V (peň)  $m^3 = 0,724703 \cdot D^2,014485 \cdot H1,02642 / 1\ 000\ 000$
- Listnaté stromy V (peň)  $m^3 = 0,46533 \cdot D^2,094175 \cdot H1,060645 / 1\ 000\ 000$

### Ležiaca hrubina

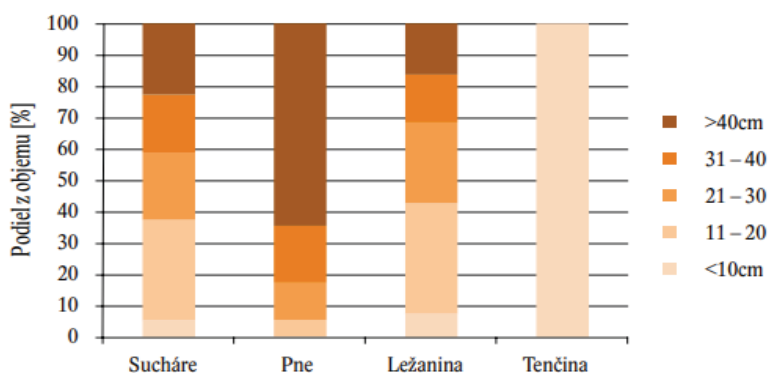
V rámci NIML1 bol na výpočet objemu hrubej ležaniny použitý Smalianov vzorec. Hrubá ležanina predstavuje drevo s hrúbkou väčšou ako 7 cm na tenšom konci a nachádza sa na určenej ploche (označenej ako IP alebo subplocha). Objem ležaniny sa vypočítava na základe nameranej hrúbky  $d_1$  a  $d_2$  (v centimetroch) s kôrou na oboch koncoch a dĺžky L (v centimetroch) každého kusu dreva (Šmelko et al. 2006).

$$V(\text{ležanina})m^3 = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d_1^2 + d_2^2}{2} \right) \cdot L / 1\ 000\ 000 = 0,3927 \cdot (d_1^2 + d_2^2) \cdot L / 1\ 000\ 000$$

## Ležiaca tenčina

V programe NIML1 sa objem tenkej ležaniny odhadoval pomocou regresného vzorca (Šmelko et al. 2008), ktorý vychádzal z odhadu pokrývnosti a priemernej hrúbky tenkej ležaniny. V NIML2 bola vyvinutá objektívnejšia metóda, ktorá využívala merania na líniovom výbere s dĺžkou tranzektu  $2 \times 25$  m a aplikovala model (Šmelko a Merganič 2008) na výpočet objemu.

$$V_{tenč} = \frac{1,2337}{4 \cdot L} \sum_{i=1}^m d_i^2$$



**Obrázok 4:** Podiely objemu typov odumretého dreva rozdelené podľa hrúbkových kategórií (Šebeň 2017).

**Fig 4:** Volume shares of dead wood types divided by thickness categories (Šebeň 2017)

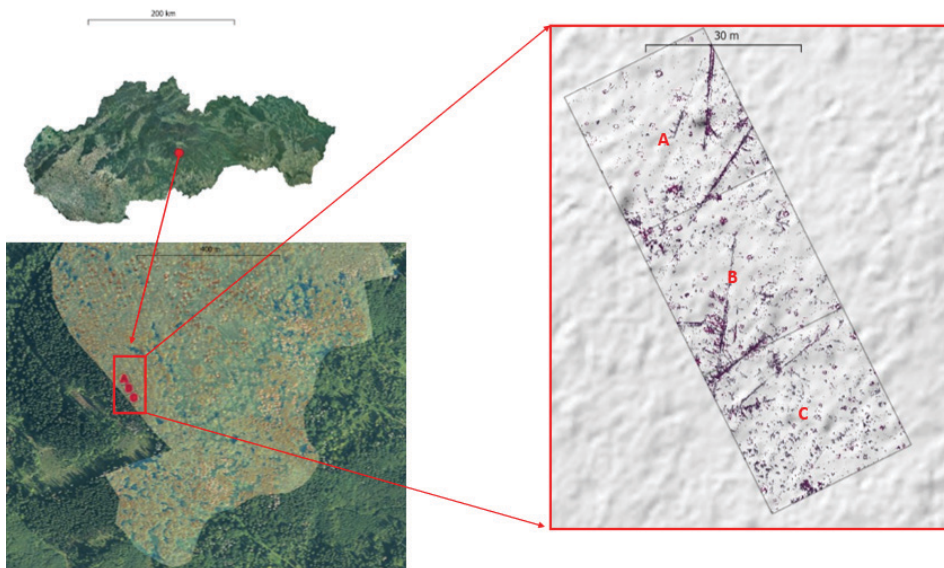
## Materiál a metódy

### Výskumný objekt

Výskum sme realizovali v národnej prírodnej rezervácii Dobročský prales. NPR Dobročský prales je jednou z najstarších lesných rezervácií na Slovensku a v strednej Európe. Leží vo výške 720 až 1000 metrov nad morom a jej celková rozloha činí 104 hektárov, pričom 100 hektárov z tejto plochy pokrývajú lesy v ochrannom pásme. Pre zaujímavosť v tejto prírodnej rezervácii bola jedľa, ktorá mala vek 450-500 rokov a bola zlomená vetrom v roku 1964. Jej priemer kmeňa vo výške 1,3 m bol 193 cm, obvod dosahoval 7 metrov a výška bola 56 metrov, objem tejto jedli bol  $47\text{m}^3$  a lesné porasty tu dosahujú zásobu  $750\text{m}^3$ .

Výskumný dizajn bol vyvinutý v rámci projektu APVV-20-0391 „Monitoring lesných porastov v trojdimenzionálnom priestore a čase pomocou inovatívnych prístupov blízkeho dosahu“. Transekt zameraný na kvantifikáciu objemu mŕtveho dreva sa nachádza blízko

západnej vnútornej hranice národnej prírodnej rezervácie a pozostáva z troch subplôch (A, B, C). Tieto subplochy majú rozmery 30 x 30 m (900 m<sup>2</sup>) a spoločne tvoria transekt s rozmermi 30 x 90 m.

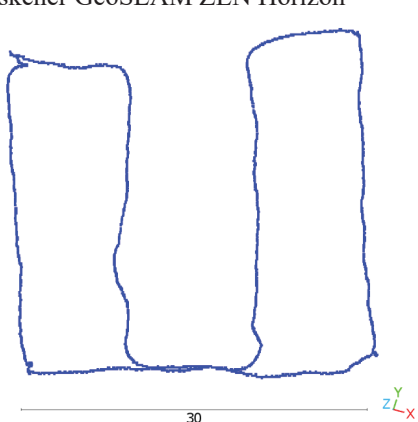


**Obr. 5:** Mapa s pozíciami a parametrami TVP

**Fig 5:** „Map with positions and parameters of permanent research plot

### Technické vybavenie

Topcon 9000, Topcon Hiper SR, Milimetrová priemerka a pásmo, Ručný mobilný laserový skener GeoSLAM ZEN Horizon



**Obr. 6:** Trajektória merača po ploche

**Fig 6:** Trajectory of the measuring across the plot

## Postup pri zbere dát a výpočte referenčného objemu mŕtveho dreva

Na TVP sa okrem merania hrúbok a výšok živých stromov zaznamenávali aj priemery ležiaceho mŕtveho dreva v 2-metrových sekciách, ako aj dĺžka kmeňov s hrúbkou nad 7 cm. Z týchto údajov bol pomocou Huberovej metódy pre jednotlivé sekcie vypočítaný referenčný objem mŕtveho dreva na TVP.

## Postup pri spracovaní dát z pozemného LIDAR-u a použité štatistické metódy

Vo voľne dostupnom SW Cloudcompare bolo spracované bodové mračno vo formáte LAS. Spracovanie zahŕňalo vytvorenie rôznych výstupných rastrov a na bodové mračná získanie technológiou SLAM bol použitý nasledujúci postup:

Oddelenie segmentu 2m nad povrchom s použitím nástroja *split*.

- Digitálny model reliéfu (DMR)- bol vytvorený výberom bodov s najnižšou nadmorskou výškou zo segmentu bodov do 3 metrov nad povrchom. Nastavenie rozlíšenia výstupného rastra bolo 10 x 10 cm.
- Digitálny model povrchu (DMP) bol vytvorený výberom bodov s najvyššou nadmorskou výškou zo segmentu bodov 2 metre nad povrchom. Nastavenie rozlíšenia výstupného rastra bolo 10 x 10 cm.
- Digitálny výškový model (DVM) bol vytvorený v prostredí QGIS pomocou rozdielu medzi DMP a DMR s využitím nástroja *raster calculator*. Vrstva DMP bola odpočítaná od vrstvy DMR, pričom hodnoty buniek vo výslednom rastrí predstavujú výšku objektov v rozmedzí od nula do dvoch metrov.
- Na odstránenie šumu a prízemnej vegetácie z DVM bola použitá funkcionálna *reclassify by table*. Všetky bunky s výškou do 15 cm ( $<15 \text{ cm} = 0$ ) boli odfiltrované, čo odstránilo väčšinu šumu spôsobeného prízemnou vegetáciou. Zároveň boli odstránené aj bunky s hodnotou nad 130 cm ( $>130 \text{ cm} = 0$ ), čím sa eliminoval šum zo spodných vetiev podúrovňových stromov a čiastočne aj šum z konárov ležiacich mŕtvych stromov.

Ďalšie spracovanie, zahŕňajúce výpočet objemu buniek rastra, bolo vykonané pomocou nástroja *raster statistics*.

## Metódy na výpočet objemu mŕtveho dreva

### Výpočet s využitím Smalianovho vzorca a manuálnom identifikovaní kmeňov pomocou SW Qgis

V softvéri QGIS boli z výstupného rastra manuálne vytvorené polygóny pokrývajúce ležiace mŕtve kmene. Následne boli vykonané merania dĺžky kmeňov a priemeru v ich strede. Objem mŕtveho dreva bol vypočítaný na základe vzťahu:

$$V = ((\pi/4) * (D^2)) * L$$

### **Metóda zahŕňajúca zonálnu štatistiku a manuálne identifikovanie kmeňov v prostredí QGIS (TLS2).**

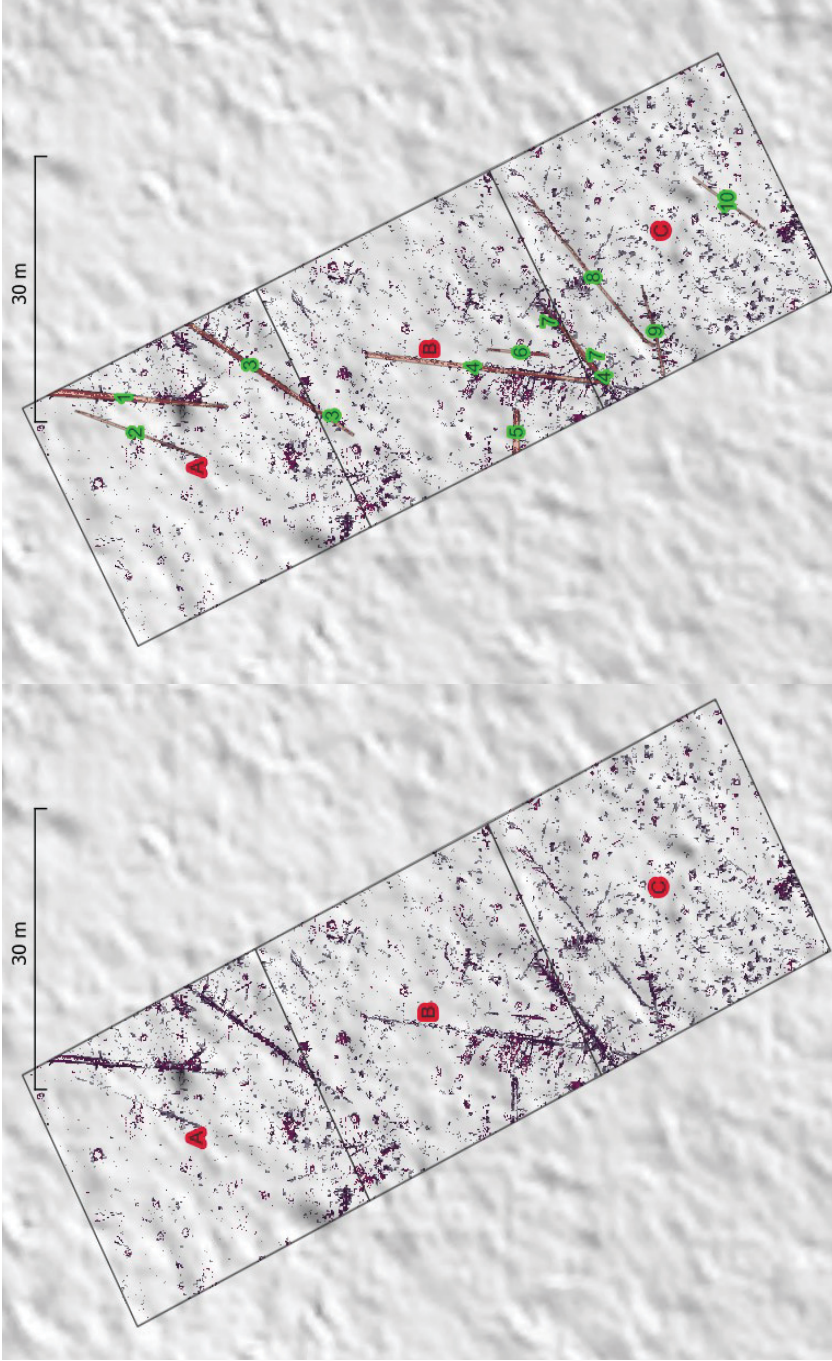
V softvéri QGIS boli z výstupného rastra manuálne vytvorené polygóny, ktoré pokrývali mŕtve kmene. Následne bol vykonaný hromadný výpočet zonálnej štatistiky (súčet hodnôt buniek rastra v rámci polygónu), ktorý bol upravený násobením hodnoty \* 0,01 pre výstup v m<sup>3</sup>. Na vyhodnotenie metódy určovania objemu mŕtveho dreva z bodového mračňa bola vykonaná komparácia získaných výsledkov s referenčnou hodnotou. Veľkosť chyby bola vypočítaná ako jednoduchý rozdiel, pričom boli taktiež vypočítané charakteristiky variability výsledkov (smerodajná odchýlka).

### **Výsledky a diskusia**

#### **Rozdiely objemov mŕtveho dreva v porovnaní s referenčnými údajmi**

Aplikovaním rôznych nastavení v module *reclass* (QGIS) sme dosiahli najlepšie výsledky (vizuálne odlišenie mŕtveho dreva) pri nastavení, ktoré zahŕňalo odstránenie vegetácie a všetkých objektov do výšky 15 cm, ako aj všetkých buniek s hodnotou nad 130 cm. Mŕtve drevo sa totižto väčšinou nachádzalo práve v tomto rozmedzí. Avšak týmto nastavením sa odstránili aj tenšie konce mŕtveho dreva a tenšia dendromasa na hranici registračných 7 cm. V porovnaní s terénnymi údajmi bola hmota nad 7 cm takmer vždy rozpoznateľná aj na rasti. Aby sme uľahčili prácu s rastrom, pri vizualizácii sme zvolili použitie transparentných nulových buniek a tieňovanie od tmavej po svetlú farbu (Obr. 7).





**Obr. 7:** Výsledný raster po rozdelení bodového mračna a reklasifikácii zameranej na zvýraznenie mŕtveho dreva (vľavo pred identifikáciou, vpravo po identifikácii).

**Fig 7:** Resulting raster after segmentation of the point cloud and reclassification aimed at highlighting dead wood (left: before identification, right: after identification).



Metóda využívajúca Smalianov vzorec na základe parametrov polygónov vytvorených nad týmto rastrom mala tendenciu nadhodnocovať objemy, zatiaľ čo metóda založená na zonálnej štatistike skôr podhodnocovala. Pri analýze na úrovni jednotlivých kmeňov sa však vyskytli prípady ako nadhodnotenia, tak aj podhodnotenia.

**Tab. 1:** *Prehľad súhrnných hodnôt objemu mŕtveho dreva pre testované metódy založené na TLS v porovnaní s referenčnými hodnotami ( $V_{REF}$ ).*

**Table 1:** *Overview of the summary values of dead wood volume for tested methods based on TLS compared to reference values ( $V_{REF}$ ).*

Subplocha	Kmeň	$V_{REF}$ $m^3$	$V_{TLS1}$ $m^3$	$V_{TLS2}$ $m^3$
A	1	5.03	6.27	4.63
	2	0.50	0.59	0.54
	3	3.84	4.27	3.46
<b>Sum</b>	<b>3ks</b>	<b>9.37</b>	<b>11.13</b>	<b>8.63</b>
B	3	0.57	0.60	0.29
	4	6.22	5.23	2.86
	5	1.50	1.79	0.84
	6	0.51	0.47	0.67
	7	0.33	0.33	0.62
<b>Sum</b>	<b>5ks</b>	<b>9.12</b>	<b>8.43</b>	<b>5.28</b>
C	4	0.15	0.13	0.16
	7	1.53	1.77	1.24
	8	1.73	1.87	1.46
	9	0.31	0.48	0.73
	10	0.37	0.43	0.15
<b>Sum</b>	<b>5ks</b>	<b>4.08</b>	<b>4.69</b>	<b>3.75</b>

V súvislosti s týmito výsledkami sme sa snažili zistiť príčiny odchýlok od referenčnej zásoby. Tieto nedostatky vychádzajú predovšetkým z troch až štyroch faktorov. Prvým je systematické podhodnocovanie dĺžky kmeňa, ktoré vzniká najmä preto, že najtenšie vrcholové časti kmeňa sú často zakryté vegetáciou a následne odstránené pri filtrovaní, takže nie sú viditeľné ani na vstupnom rastri, ani v bodovom mračne. Ďalším zdrojom chýb je systematické nadhodnocovanie hrúbky ležiacich kmeňov v porovnaní s referenčnými hodnotami. Príčina tejto chyby nie je úplne jasná, pravdepodobne však ide o vplyv vegetácie, zvyškov konárov na kmeni, odpadávajúcej kôry alebo nízkeho rozlíšenia rastra (10 cm).

**Tab 2:** Podhodnotenie dĺžky (Chyba\_L) a nadhodnotenie hrúbky (Chyba\_D), ako aj smerodajná odchýlka ( $\pm$ SD), sú vyjadrené v percentách.

**Table 2:** Underestimation of length (Chyba\_L) and overestimation of thickness (Chyba\_D), as well as the standard deviation ( $\pm$ SD), are expressed as percentages.

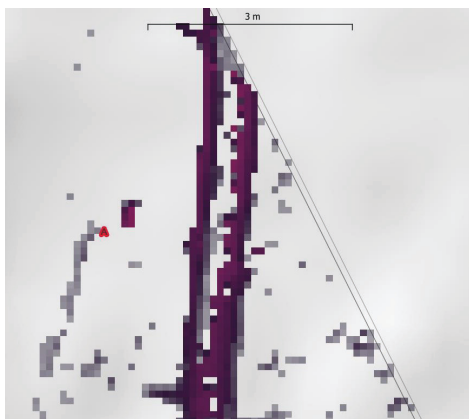
Subplocha	Počet	TLS			
		%Chyba_L	SD_Ch_yba_L	%Chyba_D	SD_Ch_yba_D
A	3	-2.63	$\pm$ 2.46	10.07	$\pm$ 4.44
B	5	-2.88	$\pm$ 3.22	1.56	$\pm$ 6.97
C	5	-5.34	$\pm$ 7.67	10.91	$\pm$ 8.00

Chyby pri určovaní základných vstupných veličín, ktoré sa prejavili predovšetkým pri metóde HMLS1 (Tab. 3), neboli jediným zdrojom odchýlok. Podhodnotenie objemu mŕtveho dreva pri metóde HMLS2 bolo spôsobené odlišnými faktormi. Pretože výpočet objemu kmeňov bol založený na zonálnej štatistike rastra, hrúbka ani dĺžka kmeňov sa nebrali do úvahy ako vstupné údaje.

**Tab 3:** Výsledné hodnoty chýb v porovnaní s referenčnými údajmi

**Table 3:** „Resulting error values compared to reference data

Subplocha	TLS1		TLS2	
	%Chyba	SD_Ch_yba	%Chyba	SD_Ch_yba
A	17.93	6.54	-2.82	10.64
B	0.48	13.59	-5.66	62.60
C	17.31	23.10	9.82	73.31



**Obr. 8:** Prázdne bunky rastra vo vrchnej časti kmeňa spôsobuje podhodnotenie pri metóde HMLS2.  
**Fig 8:** Empty raster cells in the upper part of the trunk cause underestimation in the HMLS2 method.

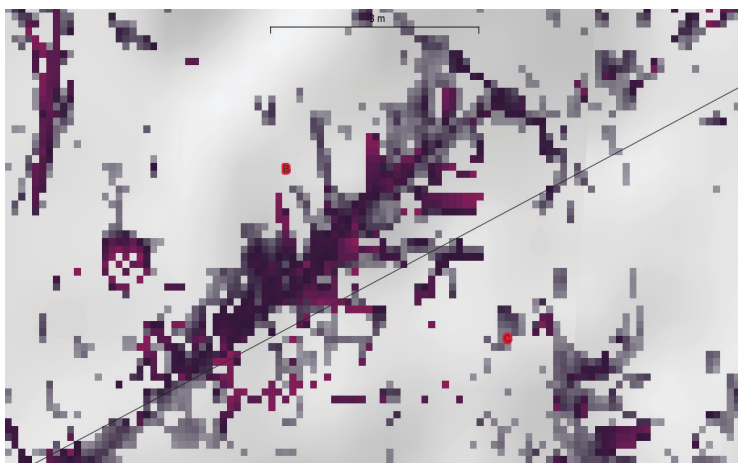
Podhodnotenie bolo spôsobené nedostatočným zachytením vrchnej strany hrubých aj tenších kmeňov ručným skenerom. V dôsledku toho sa na výškovom rastrí objavili prázdne bunky v strede kmeňov, čo viedlo k podhodnoteniu objemu (Obr.8).

Opačný efekt pri zonálnej štatistike (TLS2) môže byť spôsobený prítomnosťou čerstvých ihličnatých vrcholcových zlomov alebo kmeňov s konármi smerujúcimi nahor. Tieto časti vytvárajú šum a obsahujú bunky s vysokými hodnotami, čo môže viesť k lokálnemu nadhodnoteniu výsledných hodnôt.

### Časová náročnosť a potenciál využitia

Pri časovej náročnosti sa skenovanie ručným skenerom s technológiou SLAM ukazuje ako efektívne (napr. plocha 30x30 m za cca 8 minút). Problémom je však spracovanie bodových mračien, ktoré vyžaduje vysokú výpočtovú kapacitu, hlavne operačnú pamäť. V softvéri Cloud Compare je spracovanie rýchle pri malých údajoch, ale s väčšími plochami sa stáva pomalým. Reklasifikácia údajov môže byť tiež zdĺhavá a nastavenia, ktoré sa v rôznych podmienkach líšia, výrazne ovplyvňujú výsledky.

Metóda TLS2 sa javí ako efektívnejšia, pretože umožňuje hromadný výpočet objemu po manuálnom označení polygónov. Automatizácia tohto procesu, napríklad využitím programovacích jazykov, by zvýšila jeho využiteľnosť v prevádzkovej inventarizácii, hlavne v oblasti automatickej segmentácie a identifikácie objektov. Pre špeciálne prieskumy je nutné zlepšiť terénny zber údajov, aby skener zachytával aj vrchné časti ležiacich kmeňov.



**Obrázok 9:** Šum vyvolaný konármi na vrcholci relatívne čerstvého ležiaceho smrekového kmeňa môže pri metóde TLS2 viesť k lokálnemu nadhodnoteniu hodnôt.

**Fig 9:** Noise caused by branches on top of a relatively fresh lying spruce trunk can lead to local overestimation of values in the TLS2 method

## Záver

V tejto práci sme skúmali využitie bodových mračien z ručného skenera s technológiou SLAM na odhad objemu mŕtveho dreva v lesných porastoch. Na ploche v Dobročskom pralese s viac ako 22 m<sup>3</sup> mŕtveho dreva na 2700 m<sup>2</sup> sme overili dve metódy odvodenia objemu:

1. Metóda TLS1 - manuálne odvodenie údajov (dĺžka a hrúbka kmeňa) v QGIS nad reklasifikovaným rastrom.
2. Metóda TLS2 - automatizovaná zonálna štatistika na ručne označených polygónoch.

Zistili sme niekoľko problémov, ako podhodnotenie dĺžky kmeňov (prekrytie bylinným podrastom) a nadhodnotenie hrúbky (vplyv konárov, kôry a vegetácie). Hlavným problémom bola nedostatočná hustota bodového mračna na vrchných častiach hrubých kmeňov, čo spôsobovalo chyby pri TLS2. Tento problém je možné riešiť úpravou skenovacieho postupu.

Aj keď procesy sú zatiaľ časovo náročné, automatizácia by mohla v budúcnosti uľahčiť a zefektívniť využitie, najmä pre metódu TLS2, ktorá je jednoduchšia na aplikáciu po optimalizácii skenovania a spracovania údajov.

## Zoznam použitej literatúry

- STACHURA, K, A BOBIEC, A OBIDZIŃSKI a D K. & WOLKOWYCKI, 2007. *Old trees and decaying wood In forest ecosystems of Poland "Old Wood"*.
- MARAGE, Damien a Guy LEMPERIERE, 2005. The management of snags: A comparison in managed and unmanaged ancient forests of the Southern French Alps. *Annals of Forest Science* [online]. 2005, roč. 62, č. 2, s. 135–142 [cit. 10.5.2023]. ISSN 1286-4560. Dostupné na: doi:10.1051/FOREST:2005005
- THOMAS, 2002. *Dead Wood: From Forester's Bane to Environmental Boon* [online]. [cit. 10.5.2023]. Dostupné na: <https://studylib.net/doc/11232750/dead-wood--from-forester%E2%80%99s-bane-to-environmental-boon-jac...>
- TRAVAGLINI, Davide a Gherardo CHIRICI, 2006. ForestBIOTA project Forest Biodiversity Test-phase Assessments Deadwood assessment Work report. 2006.
- TRAVAGLINI, D., A. BARBATI, G. CHIRICI, F. LOMBARDI, M. MARCHETTI a P. CORONA, 2007a. ForestBIOTA data on deadwood monitoring in Europe. <http://dx.doi.org/10.1080/11263500701401778> [online]. 2007, roč. 141, č. 2, s. 222–230 [cit. 10.5.2023]. ISSN 11263504. Dostupné na: doi:10.1080/11263500701401778
- PETERKEN, G. F. (George Frederick), 1996. Natural woodland : ecology and conservation in northern temperate regions. 1996, s. 522.
- PASIERBEK, T.;Holeksa,J.;Wilczek,Z.;Żywiec,M, 2007. Why the amount of dead wood in Polish forest reserves is so small ? *Nature Conservation* [online]. 2007 [cit. 10.5.2023]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/309312504\\_Why\\_the\\_amount\\_of\\_dead\\_wood\\_in\\_Polish\\_forest\\_reserves\\_is\\_so\\_small](https://www.researchgate.net/publication/309312504_Why_the_amount_of_dead_wood_in_Polish_forest_reserves_is_so_small)
- HARMON, Mark E a Jay SEXTON, 1996. GUIDELINES for MEASUREMENTS of WOODY DÉTRITUS • zn FOREST ECOSYSTEMS. 1996.
- RONDEUX, Jacques a Christine SANCHEZ, 2009. Review of indicators and field methods for monitoring biodiversity within national forest inventories. Core variable: Deadwood. *Environmental Monitoring and Assessment* [online]. 2009, roč. 164, č. 1–4, s. 617–630 [cit. 10.5.2023]. ISSN 01676369. Dostupné na: doi:10.1007/S10661-009-0917-6/METRICS
- PYLE, Charlotte a Michelle M. BROWN, 1999. Heterogeneity of wood decay classes within hardwood logs. *Forest Ecology and Management* [online]. 1999, roč. 114, č. 2–3, s. 253–259 [cit. 16.5.2023]. ISSN 03781127. Dostupné na: doi:10.1016/S0378-1127(98)00356-9

- ŠEBEŇ, Vladimír, 2017. National Forest Inventory and Monitoring SR 2015-2016. Information, Methods, Results [online]. 2017, s. 255 [cit. 16.5.2023]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/323187330\\_Narodna\\_inventarizacia\\_a\\_monitoring\\_lesov\\_SR\\_2015-2016\\_Informacie\\_metody\\_vysledky](https://www.researchgate.net/publication/323187330_Narodna_inventarizacia_a_monitoring_lesov_SR_2015-2016_Informacie_metody_vysledky)
- ŠEBEŇ, Vladimír, Ján MERGANIČ, Ladislav KULLA a Michal BOSELA, 2015. *Metodika zberu údajov (Pracovné postupy pre 2. cyklus NIML SR, 2015-2016)* [online]. B.m.: Národné lesnícke centrum. Dostupné na: <https://opac.crzp.sk/?fn=session>
- ŠMELKO, Š., M. BOŠELA, I. SAČKOV, L. KULLA a V. ŠEBEŇ, 2014. Nové varianty metód na viacúčelové zisťovanie a monitorovanie stavu lesných ekosystémov progresívnymi technológiami. 2014, s. 367.
- ŠMELKO, Štefan, Ján MERGANIČ, Vladimír ŠEBEŇ, R RAŠI a M MORAVČÍK, 2006. *Národná inventarizácia a monitoring lesov Slovenskej republiky 2005-2006, Metodika zberu terénnych údajov*. B.m.: Národné lesnícke centrum.
- KORPEL, Štefan, 1989. *Pralesy slovenska*. B.m.: Veda. ISBN 8022400319
- PETRÁŠ, Rudolf a Jozef PAJTÍK, 1991. Sústava česko-slovenských objemových tabuliek drevin. *Lesnícky časopis* [online]. 1991, s. 49–56 [cit. 16.5.2023]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/290827865\\_Sustava\\_cesko-slovenskych\\_objemovych\\_tabuliek\\_drevin](https://www.researchgate.net/publication/290827865_Sustava_cesko-slovenskych_objemovych_tabuliek_drevin)
- ŠMELKO, Š a J MERGANIČ, 2008. Basic conception of the National Forest Inventory and Monitoring in Slovakia Some methodological aspects of the National Forest Inventory and Monitoring in Slovakia. *JOURNAL OF FOREST SCIENCE*. 2008, roč. 54, č. 10, s. 476–483.



## ANTIOXIDANT CAPACITY OF MEDICAL PLANTS PRODUCED IN AGROFORESTRY SYSTEM

Dénes BENKE – Eszter VISI-RAJCSI – Tamás HOFMANN

**BENKE D. – VISI-RAJCSI E. – HOFMANN T.: Antioxidant capacity of medical plants produced in agroforestry system.** Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

---

### ABSTRACT

In the present work, we investigated the antioxidant content of three medical plants (common sorrel (*Rumex acetosa* L.), ribwort plantain (*Plantago lanceolata* L.) and dwarf periwinkle (*Vinca minor* L.) grown in the agroforestry system of the Bajti Breeding Plant (Hungary). The aim of our research was to examine the seasonal changes in antioxidant content of the species and to find out which soil cover method (control, mulching, bee-pasture and geotextile cover) is the most advantageous for the antioxidant capacity of these species. The antioxidant capacity was examined using the TPC, FRAP and DPPH assays. It was found that the cultivation method resulting in the highest antioxidant content depends on the plant species. In the case of sorrel the highest antioxidant capacities were measured in spring samples with the mulch and bee-pasture covers. In the case of ribwort plantain, the highest FRAP, TPC and DPPH values were measured in the spring/control samples, none of the investigated soil cover methods contributed significantly to the increase of the antioxidant content. Similarly to plantain, for dwarf periwinkle the tested methods did not affect the antioxidant content in any of the studied seasons, the highest values were measured in spring and the lowest in summer. In general, the highest antioxidant capacity values could be measured in spring for the investigated species. Due to the different selectivity of the applied antioxidant assays, the use different methods is necessary for the comparative analysis of the antioxidant contents. Results contribute to the research of the composition of medicinal plants produced in agroforestry systems and the data will serve as a basis for the planning of experiments on further species.

**Key words:** agroforestry, antioxidant capacity, common sorrel, ribwort plantain, dwarf periwinkle

---

### 1. INTRODUCTION

The increasing impacts of climate change will pose growing challenges for both agriculture (AYDINALP AND CRESSER, 2008) and forestry (GUSTAVSSON et al., 2017). Adapting to climate change will require the introduction of new solutions for agricultural technologies (LÁNG et al., 2011). One possible way to do this is to establish and manage agroforestry systems. The cultivation of crops in such systems has a number of positive effects in addition to carbon sequestration (WILLMOTT et al., 2023). One of the main

advantages of agroforestry systems is the possibility to produce quality wood without having to take land out of agricultural cultivation (KOVÁCS et al., 2019). Agroforestry systems allow for a higher utilization of natural resources due to the woody component. This is known as eco-intensification (RIGUEIRO-RODRÍGUEZ et al., 2008). In addition, such systems also provide a number of ecosystem services. Agroforestry systems reduce erosion and deflation, help return organic matter to the soil, increase biodiversity, and protect the agricultural crops from extreme climate impacts (DE JONG et al., 2018).

In addition to traditional crops (cereals, legumes, vegetables, etc.), medicinal plants can also be grown in agroforestry systems. The medicinal plants grown this way can be used for the usual purposes, but also to produce extracts and various groups of compounds (GRIGORE et al., 2015). Medicinal plants contain a wide range of extractives (alkaloids, terpenoids, polypeptides, polyphenols, etc.), many of which have beneficial physiological effects and medicinal value (ONG, 2004) based on their antioxidant properties (CHU, 2011).

Antioxidants are compounds that are present in low concentrations relative to the oxidizable substance and significantly slow or prevent oxidation (HALLIWELL, 1990). The primary physiological role of these compounds is to protect cellular components from the damaging effects of free radicals generated by biochemical reactions in the living organism (YOUNG AND WOODSIDE, 2001), as several diseases are directly related to the presence and excess of free radical (CENA AND CALDER, 2020). Antioxidant compounds also play an important role in both food and pharmaceutical industries. In the food industry, antioxidants are used for food preservation purposes and medicine antioxidants are applied due to their various beneficial health (e.g. anti-inflammatory, anti-cancer, anti-viral) effects.

The aim of the present work is to investigate the antioxidant content of three medicinal plant species (*Rumex acetosa* L., *Plantago lanceolata* L., *Vinca minor* L.) produced using different soil covers and sampled at different stages of the growing season. Antioxidant content was assessed and compared by measuring Folin-Ciocalteu total polyphenol content (TPC), Ferric reducing antioxidant power (FRAP) and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assays. The aim of the study is to find out if soil covering method and harvesting time have an effect on the antioxidant content of the investigated medicinal plants grown in the agroforestry systems.

## **2. MATERIAL AND METHODS**

### **2.1. Site description**

For the research, the samples were collected in the area of the Bajti nursery garden (North-West Hungary). The garden is under the management of the University of Sopron and the Forest Research Institute (ERTI), and its purpose is forest gene conservation



and breeding. In 2021, an agroforestry system was established at the site, in which different herbaceous plant species are cultivated with alley cropping. The agroforestry system covers an area of about 0.5 hectares, which is fenced to exclude wildlife damage. A total of 170 Euramerican poplars (*Populus × euramericana* (Dode) Guiner cv. 'I-214') L. of the species 'I-214' are planted in 17 rows (GUTI, 2023) to provide shade and forest cover.

The plants grown under the trees were planted in three different soil covers: geotextile, mulch and bee-pasture. Both the geotextile and mulch have a positive effect on soil water management and compensate for major thermal fluctuations. It also inhibits weed germination. The bee-pasture cover refers to a site which is surrounded from both sides by a territory where herbaceous plants (mainly *Fabales* spp., *Asterales* spp. and *Brassicales* spp.) were grown. The main benefits of the bee-pasture cover are nutrient recycling to the soil and the creation of a more humid microclimate, however its disadvantage is that it can provide potential hiding places for pests (EFOP-3.6.2-16-2017-00018).

The control area is located outside the tree-shaded area, directly exposed to the sun, and no soil covering methods were applied to the herbaceous crops grown here.

## 2.2 Examined species

Common sorrel (*Rumex acetosa* L. NOT *Rumex acetosella*) is a herbaceous perennial herbaceous plant of the Polygonaceae family. It is widespread in Europe but has also been introduced into Africa, Asia and North America. It is found naturally in meadows and grasslands, but is also cultivated in many places. The plant is very healthy to consume due to its high mineral and vitamin content, and it also has many health benefits (BELLO et al., 2019).

Ribwort plantain (*Plantago lanceolata* L.) is a herbaceous perennial belonging to the plantain family (*Plantaginaceae*). It is a common generalist species worldwide, found in meadows and pastures. It contains a number of biologically active compounds that make its use widespread in traditional medicine (STEWART, 1996).

Dwarf periwinkle (*Vinca minor* L.) is an overwintering perennial in the family *Apocynaceae*. It occurs naturally in lush woodlands and at their borders, but is also frequently occurs as an ornamental plant. One of the most important substances of the dwarf periwinkle is an alkaloid called vincamine, which is used in pharmaceuticals (CIORITA et al., 2021). The active ingredient of the drug Cavinton® (Richter Gedeon Ltd, Budapest, Hungary) - applied for the treatment of cerebral vasoconstriction - is produced by the structural modification of the dwarf periwinkle extractive, vincamine.

## 2.3 Sampling and extraction

The samples were collected in the agroforestry area of the Bajti Breeding Plant on three occasions: on 10 October 2022, 5 May 2023 and 13 July 2023. Approximately 200

grams of plant material (leaves, shoots, flowers combined) were collected randomly for each soil covers (control, geotextile, mulch, bee-pasture) for each species. After collection, the samples were freeze-dried (Wave FD260 lyophilizer, Wave Trockensysteme GmbH, Vienna, Austria) and stored in vacuum-sealed bags under refrigeration until processing.

Before extraction, the samples were chopped using a coffee grinder. From the prepared samples, 0.2 g was weighed into 50 ml centrifuge tubes and 40 ml methanol:water 50:50 v/v solution was added. The samples were then placed in an ultrasonic bath for 3x10 min (Elma Transsonic T570 ultrasonic bath, Elma Schmidbauer GmbH, Singen, Germany). Ultrasonic bath water temperature was kept between 26-30 C° during the extraction process.

## **2.4 Antioxidant capacity assays**

### **2.4.1. TPC method**

Total phenol determination of solutions was performed by the Folin-Ciocalteu method, which is based on the reducing power of the extract (BALOGH, 2010). 400 µl methanol:water 50:50 V/V solution was mixed with 100 µl of extract, followed by adding 2.5 ml of Folin-Ciocalteu reagent. After about 1 min, 2.0 ml of 0.7 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solution was added. The mixture was incubated a water bath at 50°C for 5 min, and then cooled to room temperature. The absorbance of the reaction solution was measured at 760 nm. Three parallel measurements were performed for each sample. Gallic acid was used as the standard compound and the results were expressed in mg gallic acid equivalent/g dry weight (mg GE/g dw.).

### **2.4.2. DPPH method**

The radical scavenging activity of DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical was determined according to a modified protocol of SHARMA AND BHAT (2009). 100 µl of extract was mixed with 100 ml methanol:water 50:50 v/v solution and 2.8 ml DPPH solution (80 mM) and incubated at room temperature in a dark place for 30 min. The decrease in absorbance at 515 nm was measured. Three parallel measurements were performed on each sample. The DPPH radical scavenging capacity was expressed in milligrams of trolox equivalents per gram of dry sample (mg TE / g dw).

### **2.4.3. FRAP method**

The FRAP assay was run following the method of BENZIE AND STRAIN (1996) at 593 nm, applying 5 min reaction time and using ascorbic acid as standard. Three parallel measurements were performed on each sample. Results were expressed as mass equivalents of ascorbic acid per dry weight of sample (mg AE/g dw).

## 2.5. Statistical analysis

Statistica 8 software (StatSoft Inc., Tulsa, USA) was used to compare the results. The calculation method was Tukey HSD,  $p < 0.04$ , and the homogeneity of variances was checked by Bartlett's test.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Common sorrel extracts

The results for common sorrel extracts are summarized in Table 1. Table 2 shows the statistical evaluation of the obtained data.

**Table 1:** Antioxidant capacity values (mean  $\pm$  standard deviation) of TPC (mg GE/g sa), FRAP (mg AE/g sa) and DPPH (mg TE/g sa) of common sorrel samples at different sampling times and for different ground covers. Con: control, Geo: geotextile, Bee: bee-pasture. Control values are indicated in bold.

	TPC (mg GE/g dm.)			FRAP (mg AE/g dm.)			DPPH (mg TE/g dm.)		
	autumn	spring	summer	autumn	spring	summer	autumn	spring	summer
<b>Con</b>	<b>22.0 <math>\pm</math> 1.1</b>	<b>24.2 <math>\pm</math> 0.9</b>	<b>19.3 <math>\pm</math> 0.6</b>	<b>14.6 <math>\pm</math> 0.4</b>	<b>18.2 <math>\pm</math> 0.9</b>	<b>12.8 <math>\pm</math> 0.6</b>	<b>15.3 <math>\pm</math> 1.2</b>	<b>24.4 <math>\pm</math> 0.2</b>	<b>20.4 <math>\pm</math> 0.3</b>
Geo	17.8 $\pm$ 1.1	20.4 $\pm$ 0.8	14.6 $\pm$ 0.2	11.6 $\pm$ 0.3	15.3 $\pm$ 0.2	10.7 $\pm$ 0.2	11.2 $\pm$ 0.4	20.2 $\pm$ 1.3	14.7 $\pm$ 0.1
Mulch	16.7 $\pm$ 0.9	27.1 $\pm$ 0.9	14.2 $\pm$ 0.5	10.9 $\pm$ 0.1	22.1 $\pm$ 0.5	10.2 $\pm$ 0.1	11.8 $\pm$ 2.1	27.4 $\pm$ 1.0	14.0 $\pm$ 1.5
Bee	18.4 $\pm$ 0.6	28.2 $\pm$ 0.7	12.9 $\pm$ 0.3	13.4 $\pm$ 0.4	22.7 $\pm$ 0.7	9.3 $\pm$ 0.6	13.3 $\pm$ 1.1	30.4 $\pm$ 1.1	13.1 $\pm$ 0.4

**Table 2** Analysis of variance of the antioxidant capacity values of TPC (a), FRAP (b) and DPPH (c) in common sorrel samples. Mean: average value (TPC: mg GE/g s.a., FRAP: mg AE/g s.a., DPPH: mg TE/g s.a.). For each method the mean values indicated with different letters (sets) are significantly different at the  $p < 0.04$  level. Con: control, Geo: geotextile, Bee: bee-pasture.

Sample	TPC		Sample	FRAP		Sample	DPPH	
	Mean	set		Mean	set		Mean	set
Bee_summer	12.9	a	Bee_summer	9.3	a	Geo_autumn	11.2	a
Mulch_summer	14.2	a	Mulch_summer	10.2	ab	Mulch_autumn	11.8	ab
Geo_summer	14.6	ae	Geo_summer	10.7	ab	Bee_summer	13.1	ab
Mulch_autumn	16.7	be	Mulch_autumn	10.9	b	Bee_autumn	13.3	ab
Geo_autumn	17.8	bc	Geo_autumn	11.6	bc	Mulch_summer	14	ab
Bee_autumn	18.4	bcd	Con_summer	12.8	cd	Geo_summer	14.7	ab
Con_summer	19.3	cd	Bee_autumn	13.4	de	Con_autumn	15.3	c
Geo_spring	20.4	df	Con_autumn	14.6	ef	Geo_spring	20.2	d
Con_autumn	22	fg	Geo_spring	15.3	f	Con_summer	20.4	d
Con_spring	24.2	g	Con_spring	18.2	h	Con_spring	24.4	e
Mulch_spring	27.1	h	Mulch_spring	22.1	g	Mulch_spring	27.4	ef
Bee_spring	28.2	h	Bee_spring	22.7	g	Bee_spring	30.4	f

For common sorrel, the highest values were measured for the bee-pasture/spring and mulch/spring samples using both TPC and FRAP methods. For DPPH, the bee-pasture/spring sample had the highest antioxidant capacity, with values significantly higher than the corresponding control values. In terms of seasonal variation, plant parts collected in spring contained higher levels of antioxidant compounds than those collected in summer and autumn, both for control and samples cultivated with ground cover.

The antioxidant activity of common sorrel has been investigated by several researchers, who also found a strong antioxidant effect (TUAZON-NARTEA and SAVAGE 2013, SHAGGJAV, 2014). Several publications describe a positive correlation between phenolic components and the antioxidant capacity of some plants (NAZARUK et al., 2008; WIJNGAARD et al., 2009), which was also confirmed by WEGIERA and colleagues (2010). As for polyphenolic compounds, common sorrel contains synapic acid and quercetin in highest amounts (KUCEKOVA et al., 2011; FEDURAEV et al., 2022, LI et al. 2022). The latter study compared the antioxidant capacity of several species of the genus *Rumex* and concluded that the antioxidant capacity of sheep's sorrel (*Rumex acetosella* L.), a species native to Hungary, is more than five times higher than that of common sorrel. The present results showed significant variation in the antioxidant content of the common sorrel samples (presumably due to biosynthesis of phenolic compounds depending on light, heat and other environmental factors).

It can be concluded that the sorrel plants had the highest antioxidant values in the spring/mulch and spring/bee-pasture samples. These results were also significantly higher compared to the values of the samples grown with different ground covers and to that of control samples.

### 3.2. Ribwort plantain extracts

Table 3 shows the results of total phenol, FRAP and DPPH antioxidant capacity of ribwort plantain extracts. Table 4 shows the statistical evaluation of the obtained data.

**Table 3:** Antioxidant capacity values (mean  $\pm$  standard deviation) of TPC (mg GE/g sa), FRAP (mg AE/g sa) and DPPH (mg TE/g sa) of ribwort plantain samples at different sampling times and for different ground covers. Con: control, Geo: geotextile, Bee: bee-pasture. Control values are indicated in bold.

	TPC (mg GE/g s dw.)			FRAP (mg AE/g dw.)			DPPH (mg TE/g dw.)		
	autumn	spring	summer	autumn	spring	summer	autumn	spring	summer
<b>Con</b>	<b>46.0 <math>\pm</math> 0.0</b>	<b>49.8 <math>\pm</math> 0.5</b>	<b>32.9 <math>\pm</math> 1.4</b>	<b>34.6 <math>\pm</math> 0.5</b>	<b>46.3 <math>\pm</math> 3.7</b>	<b>26.1 <math>\pm</math> 1.1</b>	<b>47.8 <math>\pm</math> 9.9</b>	<b>131.9 <math>\pm</math> 5.2</b>	<b>47.9 <math>\pm</math> 1.1</b>
Geo	43.1 $\pm$ 1.9	34.1 $\pm$ 0.7	27.4 $\pm$ 0.8	33.6 $\pm$ 0.3	29.5 $\pm$ 1.2	20.6 $\pm$ 1.5	43.8 $\pm$ 11.1	83.8 $\pm$ 5.2	55.0 $\pm$ 3.2
Mulch	43.7 $\pm$ 1.3	35.0 $\pm$ 1.0	21.9 $\pm$ 0.5	32.0 $\pm$ 1.1	31.4 $\pm$ 0.6	18.0 $\pm$ 0.9	48.0 $\pm$ 5.9	88.2 $\pm$ 1.6	46.9 $\pm$ 2.2
Bee	44.1 $\pm$ 1.7	31.3 $\pm$ 0.8	20.6 $\pm$ 1.2	33.2 $\pm$ 1.3	26.9 $\pm$ 1.3	16.4 $\pm$ 1.4	46.3 $\pm$ 5.4	79.7 $\pm$ 5.2	47.4 $\pm$ 1.8

**Table 4:** Analysis of variance of the antioxidant capacity values of TPC (a), FRAP (b) and DPPH (c) in ribwort plantain samples. Mean: average value (TPC: mg GE/g s.a., FRAP: mg AE/g s.a., DPPH: mg TE/g s.a.). For each method the mean values indicated with different letters (sets) are significantly different at the  $p < 0.04$  level. Con: control, Geo: geotextile, Bee: bee-pasture.

TPC		FRAP		DPPH	
Sample	Mean set	Sample	Mean set	Sample	Mean set
Bee_summer	20.6 a	Bee_summer	16.4 a	Geo_autumn	43.8 a
Mulch_summer	21.9 a	Mulch_summer	18.0 a	Bee_autumn	46.3 a
Geo_summer	27.4 b	Geo_summer	20.6 a	Mulch_summer	46.9 a
Bee_spring	31.3 c	Con_summer	26.1 b	Bee_summer	47.4 a
Con_summer	32.9 cd	Bee_spring	26.9 b	Con_autumn	47.8 a
Geo_spring	34.1 cd	Geo_spring	29.5 bc	Con_summer	47.9 a
Mulch_spring	35.0 d	Mulch_spring	31.4 bc	Mulch_autumn	48.0 a
Geo_autumn	43.1 e	Mulch_autumn	32.0 bc	Geo_summer	55.0 a
Mulch_autumn	43.7 e	Bee_autumn	33.2 bc	Bee_spring	79.7 b
Bee_autumn	44.1 e	Geo_autumn	33.6 bc	Geo_spring	83.8 b
Con_autumn	46.0 e	Con_autumn	34.6 d	Mulch_spring	88.2 b
Con_spring	49.8 f	Con_spring	46.3 e	Con_spring	132 c

In the case of ribwort plantain, the highest values for all three antioxidant capacity measurement methods were measured in the control/spring samples. As for the antioxidant capacity of the samples collected in different seasons, the spring samples had the significantly highest values, but this was only true for the control samples. Among the plants exposed to soil cover, FRAP and TPC values were highest in the autumn samples. The DPPH values showed a completely different trend, with the spring samples performing best, regardless of the type of soil cover. The different „behaviour“ of FRAP, TPC and DPPH in the case of ribwort plantain indicates that it contains antioxidants that are differently selective to the applied methods (HEGEDŮS and STEFANOVITSNÉ, 2012).

Several studies have already researched the chemical composition of ribwort plantain. Out of the more than 200 compounds found in it, chlorogenic acid and verbascoside were found to be most abundant (BEARA et al., 2012; BAJER et al., 2015; BAHADORI et al., 2020). The high antioxidant capacity of the plant has also been demonstrated earlier (DALAR et al., 2012). Moreover, NICHITA et al. (2016) found that there was a direct correlation between the amount of polyphenolic compounds and the antioxidant capacity. In contrast to our measurements, GRIGORE and colleagues (2017) found that the total phenol and flavonoid content of ribwort plantain increased steadily throughout the year. However, SANNA and colleagues (2022) compared the antioxidant capacity of ribwort plantain samples collected from different areas and also measured the highest values for the spring samples. The discrepancy between the results may be due to the fact that the antioxidant content of plants does not only depend on the season, but may also be influenced by other conditions such as weather (ARIES et al., 2011; CHRYSARGYS et al., 2021), soil (MUSCOLO et al., 2019), or geographic location (CHATOUI et al., 2020).

Overall, the highest FRAP, TPC and DPPH values were measured in the spring control samples. It can be concluded that the applied soil cover methods did not significantly contribute to the increase in antioxidant content in studied ribwort plantain samples.

### 3.3. Dwarf periwinkle extracts

The results of the dwarf periwinkle extracts are summarized in Table 5. Table 6 shows the statistical evaluation of the obtained data.

**Table 5:** Antioxidant capacity values (mean ± standard deviation) of TPC (mg GE/g sa), FRAP (mg AE/g sa) and DPPH (mg TE/g sa) of dwarf periwinkle samples at different sampling times and for different ground covers. Con: control, Geo: geotextile, Bee: bee-pasture. Control values are indicated in bold.

	TPC (mg GE/g s dw.)			FRAP (mg AE/g dw.)			DPPH (mg TE/g dw.)		
	autumn	spring	summer	autumn	spring	summer	autumn	spring	summer
<b>Con</b>	<b>46.0 ± 0.0</b>	<b>49.8 ± 0.5</b>	<b>32.9 ± 1.4</b>	<b>34.6 ± 0.5</b>	<b>46.3 ± 3.7</b>	<b>26.1 ± 1.1</b>	<b>47.8 ± 9.9</b>	<b>131.9 ± 5.2</b>	<b>47.9 ± 1.1</b>
Geo	43.1 ± 1.9	34.1 ± 0.7	27.4 ± 0.8	33.6 ± 0.3	29.5 ± 1.2	20.6 ± 1.5	43.8 ± 11.1	83.8 ± 5.2	55.0 ± 3.2
Mulch	43.7 ± 1.3	35.0 ± 1.0	21.9 ± 0.5	32.0 ± 1.1	31.4 ± 0.6	18.0 ± 0.9	48.0 ± 5.9	88.2 ± 1.6	46.9 ± 2.2
Bee	44.1 ± 1.7	31.3 ± 0.8	20.6 ± 1.2	33.2 ± 1.3	26.9 ± 1.3	16.4 ± 1.4	46.3 ± 5.4	79.7 ± 5.2	47.4 ± 1.8

**Table 6:** Analysis of variance of the antioxidant capacity values of TPC (a), FRAP (b) and DPPH (c) in dwarf periwinkle samples. Mean: average value (TPC: mg GE/g s.a., FRAP: mg AE/g s.a., DPPH: mg TE/g s.a.). For each method the mean values indicated with different letters (sets) are significantly different at the p<0.04 level. Con: control, Geo: geotextile, Bee: bee-pasture.

Sample	TPC		Sample	FRAP		Sample	DPPH	
	Mean	set		Mean	set		Mean	set
Con_summer	12.0	a	Con_summer	5.6	a	Mulch_summer	9.9	a
Mulch_summer	13.4	a	Mulch_summer	6.0	a	Geo_summer	10.8	a
Bee_summer	14.8	a	Geo_summer	6.6	a	Con_summer	11.1	a
Geo_summer	15.2	a	Bee_summer	6.9	a	Bee_summer	11.7	a
Bee_autumn	27.6	b	Geo_spring	16.2	b	Bee_autumn	22.5	b
Bee_spring	28.7	bc	Bee_autumn	17.0	bc	Con_autumn	24.3	b
Geo_autumn	29.0	bc	Con_autumn	17.0	bc	Geo_autumn	24.7	b
Geo_spring	29.0	bc	Bee_spring	17.2	bc	Mulch_autumn	25.0	b
Con_autumn	29.3	bc	Geo_autumn	18.2	cd	Geo_spring	31.6	d
Con_spring	30.2	bc	Mulch_autumn	18.8	d	Bee_spring	33.9	cd
Mulch_spring	31.7	c	Mulch_spring	18.9	d	Con_spring	36.9	c
Mulch_autumn	31.9	c	Con_spring	19.2	d	Mulch_spring	38.3	c

In the case of dwarf periwinkle, the soil covers did not affect the antioxidant capacity compared to the corresponding control, according to any of the measurement methods. Again, the antioxidant capacity of the spring samples is the highest and that of the summer samples the lowest.

There is relatively less literature that comprehensively addresses the compounds in dwarf periwinkle and the antioxidant capacity of the plant. Most of the publications deal with indole alkaloids in the plant (FARAHANIKIA et al., 2011; LIU et al. 2016; DUMITRESCU et al., 2021), which is not surprising, since the main active ingredient of the plant is vincamine (SMEYERS et al., 1991; AL-RASHED et al., 2021). In addition, the plant contains high amounts of chlorogenic acid, caffeic acid and rutin (SEZER AND UYSAL 2018; CIORITA et al., 2021). Other studies have also shown that dwarf periwinkle has a high antioxidant capacity which was associated with the polyphenol content (GRUJIC et al., 2015; NECULAI et al., 2023).

In the case of dwarf periwinkle, the tested soil covers did not significantly affect the antioxidant content in any of the tested seasons. The highest values were measured in spring and the lowest in summer.

#### 4. CONCLUSION

In the present work, the antioxidant content of three medicinal plant species (common sorrel, ribwort plantain and dwarf periwinkle) grown under different soil covers (mulch, geotextile, bee-pasture) in the agroforestry system of the Bajti nursery garden (North-West Hungary) was investigated.

In common sorrel the spring/mulch and spring/bee-pasture covers had the highest antioxidant capacities, higher than those of the other covers and of the control samples. For ribwort plantain, the highest FRAP, TPC and DPPH values were measured in the spring control samples. We found that the applied soil covers did not significantly contribute to the increase in antioxidant content. Similarly to the ribwort plantain, in the case of dwarf periwinkle, the tested covering methods did not significantly affect the antioxidant content in any of the seasons tested. The highest values were measured in spring and the lowest in summer.

The results showed that the effect of soil covers on antioxidant content is highly species-dependent, with the highest antioxidant capacity values usually being measured in spring. Due to the different selectivity of antioxidant assays the use several different methods is needed for the comparative analysis of the antioxidant content of plants with different composition and for the assessment of the seasonal variations. Results will contribute to the research on the composition of medicinal plants grown in agroforestry systems and the data will serve as a basis for designing further experiments on investigated species.

#### 5. References

- AL-RASHED, S., BAKER, A., AHMAD, S.S., SYED, A., BAHKALI, A.H., ELGORBAN, A.E., KHAD, M.S. 2021. Vincamine, a safe natural alkaloid, represents a novel anticancer agent. In *Bioorganic Chemistry*. 2021, vol. 107. 104626.

- ARIES, A., FERNANDES, C., CARVALHO, R., BENNETT, R.N., SAAVEDRE, M.J., ROSA, E.A.S. 2011. Seasonal Effects on Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of Six Economically Important Brassica Vegetables. in *Molecules*. 2011, vol. 16, p. 6816-6832.
- AYDINALP, C., CRESSER, M. 2008. The Effects of Global Climate Change on Agriculture. In *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 2008, vol. 3, no. 5, p. 672-676.
- BAHADORI, M.B., SARIKURKCU, C., KOCAK, M.S., CALAPOGLU, M., UREN, M.C., CEYLAN, O. 2020. Plantago lanceolata as a source of health-beneficial phytochemicals: Phenolics profile and antioxidant capacity. in *Food Bioscience*. 2020, vol. 34. 100536.
- BEJER, T., JANDA, V., BAJEOVA, P., KREMR, D., EISNER, A., VENTURA, K. 2016. Chemical composition of essential oils from *Plantago lanceolata* L. leaves extracted by hydrodistillation. In *Journal of Food Science Technology*. 2016, vol. 53, no. 3, p. 1576–1584.
- BALOGH, E. 2010. Determination of antioxidant capacity and its contributing compounds in berry fruits. PhD thesis. Corvinus University of Budapest, Budapest, Hungary. pp 149.
- BEARA, I.N., LESJAK, M.M., ORCIC, D.Z., SIMIN, N.D., CETOJEVIC-SIMIN, D.D., BOZIN, B.N., MIMICA-DUKIC, N.M. 2012. Comparative analysis of phenolic profile, antioxidant, anti-inflammatory and cytotoxic activity of two closely-related Plantain species: *Plantago altissima* L. and *Plantago lanceolata* L. In *Food Science and Technology*. 2012, vol. 47, no. 1, p. 64-70.
- BELLO, O.M., FASINU, P.S., BELLO, O.E., OGBESEJANA, A.B., ADETUNJI, C.O., DADA, A.O., IBITOYE, O.S., ALOKO, S., OGUNTOYE, O.S. 2019. Wild vegetable Rumex acetosa Linn.: Its ethnobotany, pharmacology and phytochemistry. In *South African Journal of Botany*. 2019, vol. 125, p. 149-160.
- BENZIE, I.F.F., STRAIN, J.J. 1996. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. In *Analytical Biochemistry*. 1996, vol. 239, p. 70-76.
- Cena H., Calder P.C. 2020. Defining a Healthy Diet: Evidence for The Role of Contemporary Dietary Patterns in Health and Disease. In *Nutrients*. 2020, vol. 12, no. 2, 334.
- CHATOUI, K., HARHAR, H., KAMIL, T.E., TABYAOU, M. 2020. Chemical Composition and Antioxidant Capacity of *Lepidium sativum* Seeds from Four Regions of Morocco. In *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2020.7302727.
- CHRYSARGYRIS, A., EVANGELIDES, E., TZORTZAKIS, N. 2021. Seasonal Variation of Antioxidant Capacity, Phenols, Minerals and Essential Oil Components of Sage, Spearmint and Sideritis Plants Grown at Different Altitudes. In *Agronomy*. 11. 1766.
- CHU, W.L. 2011. Potential applications of antioxidant compounds derived from algae. In *Current Topics in Nutraceutical Research*. 2011, vol. 9, no. 3, p. 83-98.
- CIORITA, A., ZAGREAN-TUZA, C., MOT, A.C., CARPA, R., PARVU, M. 2021. The Phytochemical Analysis of Vinca L. Species Leaf Extracts Is Correlated with the Antioxidant, Antibacterial, and Antitumor Effects. In *Molecules*. 2021, vol. 26, no. 10, 3040.
- DALAR, A., TÜRKER, M., KONCZAK, I. 2012. Antioxidant capacity and phenolic constituents of *Malva neglecta* Wallr. and *Plantago lanceolata* L. from Eastern Anatolia Region of Turkey. In *Journal of Herbal Medicine*. 2012, vol. 2, p. 42-51.
- DE JONG, W., POKORNY, B., KATILA, P., GALLOWAY, G., PACHECO, P. 2018. Community Forestry and the Sustainable Development Goals: a Two Way Street. In *Forest*. 2018, vol. 9, 331.
- DUMITRESCU, A.M., STANCIU, G., SIRBU, R., BUSURICU, F. 2021. Spectrophotometric Studies of Indolic Compounds from Vinca Minor L. In *European Journal of Natural Sciences and Medicine*. 2021, vol. 4, no. 1, p. 86–96.
- FARAHANIKIA, B., AKBARZADEH, T., JAHANGIRZADEH, A., YASSA, N., ARDEKANI, R.S., MIRNEZAMI, T., HADIJAKHOONDI, A., KHANAVI, M. 2011. Phytochemical Investigation of Vinca minor Cultivated in Iran. In *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*. 2011, vol. 10, no. 4, p. 777-785.
- FEDURAEV, P., SKRYPNIK, L., NEBREEVA, S., DZHOBODZE, G., VATAGINA, A., KALININA, E., PUNGIN, A., MASLENNIKOV, P., RIABOVA, A., KROL, O., CHUPAKHINA, G. 2022. Variability of Phenolic Compound Accumulation and Antioxidant Activity in Wild Plants of Some Rumex Species (*Polygonaceae*). In *Antioxidants*. 2022, vol. 11, 311.
- GRIGORE, A., BUBUEANU, C., PIRVU, L., IONITA, L., TOBA, G. 2015. *Plantago lanceolata* L. Crops- Source of valuable raw material for various industrial applications. In *Scientific papers. Series A. Agronomy*. 2015, vol. 58, p. 207-214.



- GRIGORE, N.M., IVAN, M., VERDES, A., OPRICA, L. 2017. Enzymatic Activity and Non-enzymatic Antioxidants Content in Several Plantago Species (from Valea Ilenei Nature Reserve), During Different Phenophases. In *Revisita de Chimie*. 2017, vol. 68, no. 7, p. 1539-1543.
- GRUJIC, S., M., RADOJEVIC, I.D., VASIC, S.M., COMIC, L.R., TOPUZOVIC, M.D., 2015: Antimicrobial and Antibiofilm Activities of Secondary Metabolites from *Vinca minor* L. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 51. (5). 572-578.
- GUSTAVSSON, L., HAUS S., LUNDBLAD, M., LUNDSTRÖM, M., ORTIZ, C.A., SATHRE, R., TRUONG, N.L., WIKBERG, P.E. 2017. Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, vol. 67, p. 612-624.
- GUTI, E. 2023. Comparative microclimate studies in the alley cropping system at Bajti Plant Breeding Site. Diploma thesis. University of Sopron, Faculty of Forestry, Sopron, Hungary. pp 83.
- HALLIWELL, B. 1990. How to characterize a biological antioxidant. In *Free Radical Research Communications*. 1990, vol. 9, no. 1, p. 1-32.
- HEGEDŰS, A., and STEFANOVITSNÉ, B.E. 2012. Természetes antioxidáns-forrásunk: a gyümölcs. Debrecen: Debreceni Egyetem, AGTC, Kertészettudományi Intézet. pp. 162
- KOVÁCS, K., VIYTI, A., SZALAY, D. 2019. Az agroerdészet szerepe az erdőfelújításban és a növekvő faanyagigény kielégítésében. In *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok*. 2019, vol. 14, no. 2, p. 59-63.
- KUCEKOVA, Z., MLCEK, J., HUMPOLICEK, P., ROP, O., VALASEK, P., SAHA, P. 2011. Phenolic Compounds from *Allium schoenoprasum*, *Tragopogon pratensis* and *Rumex acetosa* and Their Antiproliferative Effects. In *Molecules*. 2011, vol. 16, 9207-9217.
- LÁNG, I., BEDŐ, Z., BALÁZS, E., BÖRNER, A., VEISZ, O. (EDS.). 2011: Climate Change: Challenges and Opportunities in Agriculture, Agricultural Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest. pp 497.
- LI, J.J., LI, Y.X., LI, N. 2022: The genus *Rumex* (Polygonaceae): an ethnobotanical, phytochemical and pharmacological review. In *Natural Products and Bioprospecting*. 2022, vol. 12, 21.
- LIU, J., LIU, Y., PAN, Y. JIE, ZU, Y. G., TANG, Z. H. 2016. Determination of Alkaloids in *Catharanthus roseus* and *Vinca minor* by High-Performance Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry. In *Analytical Letters*. 2016, vol. 49, no. 8, p. 1143-1153.
- MUSCOLO, A., SIDARI, M., SETTINERI, G., PAPALIA, T., MALLAMACI, C., ATTINA, E. 2019. Influence of Soil Properties on Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of *Brassica rupestris* Raf. In *Journal of Soil Science and Plant*. 2019, vol. 19, p. 808–815.
- NAZARUK, J. 2008. Antioxidant activity and total phenolic content in *Cirsium* five species from north–east region of Poland. In *Fitoterapia*. 2008, vol. 79, no. 3, p. 194-196.
- NECULAI, A.M., STANCIU, G., MITTELU, M. 2023. Determination of Active Ingredients, Mineral Composition and Antioxidant Properties of Hydroalcoholic Macerates of *Vinca minor* L. Plant from the Dobrogea Area. In *Molecules*. 2023, vol. 28, no. 15, p. 5667.
- NECULAI, A.M.D., STANCIU, G., SIRBU, R., BUSURICU, F. 2021. Spectrophotometric Studies of Indolic Compounds from *Vinca Minor* L. In *European Journal of Natural Sciences and Medicine*. 2011, vol. 4, no. 1, p. 88-98.
- NICHITA, C., NEAGU, G., CUCU, A., VULTURESCU, V., BERTESTEANU S.V.G. 2016. Antioxidative properties of *Plantago lanceolata* L. extracts evaluated chemiluminescence method. In *AgroLife Scientific Journal*. 2016, vol. 5, no. 2, 95-102.
- ONG, E.S. 2004. Extraction methods and chemical standardization of botanicals and herbal preparations. In *Journal of Chromatography B*. 2004, vol. 812, no. 1-2, p. 23-33.
- RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A. (ED.), MCADAM, J. (ED.), MOSQUERA-LOSADA, M.R. (ED.), 2008: Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects. Springer Science, pp. 462.
- SANNA, F., PILUZZA, G., CAMPESI, G., MOLINU, M.G., RE, G.A., SULAS, L. 2022. Antioxidant Contents in a Mediterranean Population of *Plantago lanceolata* L. Exploited for Quarry Reclamation Interventions. In *Plants*. 2022, vol. 11, 791.
- SEZER, E.N.S., UYSAL, T. 2018. Volatile and Phenolic Compositions of the Leaves of Two *Vinca* L. Species from Turkey. In *Current Perspectives on Medicinal and Aromatic Plants*. 2018, vol. 2, p. 103-110.
- SHAGGJAV, O. 2014. Antioxidant Activity of Some Mongolian Plants. In *Mongolian Journal of Biological Sciences*. 2014, vol. 12, no. 1-2, p. 27-32.
- SHARMA, O.P., BHAT, T.K. 2009. DPPH antioxidant assay revisited. In *Food Chemistry*. 2009, vol. 113, p. 1202-1205.

- SMEYERS, Y.G., SMEYERS, N.J., RENDEZ, J.J., HERNANDEZ-LAGUNA, A., GALVEZ-RUANO, E. 1991. A structural and pharmacological study of alkaloids of Vinca Minor. In *Molecular Engineering*. 1991, vol. 1, p. 153-160.
- STEWART, A.V. 1996. Plantain (*Plantago lanceolata*) - a potential pasture species. In *Journal of New Zealand Grasslands*. 1996, vol. 58, p. 77-86.
- TUAZON-NARTEA, J., SAVAGE, G. 2013. Investigation of Oxalate Levels in Sorrel Plant Parts and Sorrel-Based Products. In *Food and Nutrition Science*. 2013, vol. 4, p. 838-843.
- WEGIERA, M., GRABARCZYK, P., BARANIAK, B., SMOLARZ, H.D. 2011. Antiradical properties of extracts from roots, leaves and fruits of six *Rumex* L. species. In *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*. 2011, vol. 53. no. 1, p. 125-131.
- WIJNGRAARD, H.H., RÖSSLE, C., BRUNTON, N. 2009. A survey of Irish fruit and vegetable waste and by-products as a source of polyphenolic antioxidants. In *Food Chemistry*. 2009, vol. 116, no. 1, p. 202-207.
- WILLMOTT, A., WILLMOTT, M., GRASS, I., LUSIANA, B., COTTER, M., 2023. Harnessing the socio-ecological benefits of agroforestry diversification in social forestry with functional and phylogenetic tools. In *Environmental Development*. 2023, vol. 47, 100881.
- YOUNG, I.S., WOODSIDE, J.V. 2001. Antioxidants in health and disease. In *Journal of Clinical Pathology*. 2001, vol. 54, 176-186.

### Acknowledgement

The implementation of the research was supported by the following projects: EFOP-3.6.2-16-2017-00018 „Growing with nature - Agroforestry as a new breakthrough”, REFOREST - Agroforestry at the forefront of farming sustainability in multifunctional landscapes in Europe, 101060635 (<https://agroforest.eu/>), AGROSUS (Agroecological strategies for sustainable weed management in key European crops), 101084084 (<https://agrosus.eu/>).

### Author's address:

Dénes Benke  
 Dr. Eszter Visi-Rajczi  
 Dr. Tamás Hofmann  
 Institute for Environmental Protection and Natural Conservation  
 Faculty of Forestry  
 University of Sopron  
 Bajcsy-Zsilinszky u. 4.  
 9400 Sopron  
 Hungary

e-mail: [benkedenes@gmail.com](mailto:benkedenes@gmail.com)

e-mail: [hofmann.tamas@uni-sopron.hu](mailto:hofmann.tamas@uni-sopron.hu)

e-mail: [visine.rajczi.eszter@uni-sopron.hu](mailto:visine.rajczi.eszter@uni-sopron.hu)

## Antioxidačná kapacita liečivých rastlín pestovaných v agrolesníckom systéme

### Abstrakt

Táto štúdia skúmala antioxidačný obsah troch liečivých druhov—bežnej šľaveľ (Rumex acetosa L.), prhľavy (Plantago lanceolata L.) a malé periwinkle (Vinca minor L.)—pestovaných v agrolesníckom systéme na Bajti Breeding Plant. Naším cieľom bolo posúdiť sezónne variácie v úrovniach antioxidantov a vyhodnotiť vplyv rôznych metód pokrytia pôdy (kontrola, mulčovanie, včelí pastva a geotextilné pokrytie) na tieto úrovne. Kapacita antioxidantov bola meraná pomocou metód celkového fenolového obsahu (TPC), ferrického redukčného antioxidačného výkonu (FRAP) a 2,2-difenyl-1-pikrylhydrazyl (DPPH). Výsledky naznačili, že najúčinnější pestovateľská metóda sa líšila podľa druhu. V prípade šľaveľa boli najvyššie úrovne antioxidantov zaznamenané na jar pod mulčovaním a včelou pastvou. V prípade prhľavy mali najvyššie hodnoty jar/kontrolné vzorky, zatiaľ čo žiadne pokrytie pôdy významne neovplyvnilo obsah antioxidantov. Malé periwinkle tiež neukázalo vplyv pokrytia pôdy; najvyššie úrovne boli zaznamenané na jar a najnižšie v lete. Celkovo vzorky z jari vykázali najvyššie kapacity antioxidantov vo všetkých druhoch. Variabilita v meraniach antioxidantov naprieč rôznymi metódami zdôrazňuje význam použitia viacerých metód na komplexnú analýzu. Tieto zistenia prispievajú cennými informáciami o zložení liečivých rastlín v agrolesníckych systémoch a budú informovať budúce experimentálne dizajny.

**Kľúčové slová:** agrolesníctvo, antioxidačná kapacita, štiav lúčny, skorocel kopijovitý, Zimozeleň menšia



# HODNOTENIE VÝKONNOSTI AKUMULÁTOROVÝCH PRENOSNÝCH REŤAZOVÝCH PÍL PRI PRIEČNOM DELENÍ VLÁKNINOVÉHO DREVA

Ing. Dominik GRETSCH – Doc. Ing. Martin LIESKOVSKÝ, PhD.

**GRETSCH, D., LIESKOVSKÝ, M.: Hodnotenie výkonnosti akumulátorových prenosných reťazových píl pri priečnom delení vlákňinového dreva.** Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

## ABSTRAKT

Hlavným cieľom práce je otestovanie a porovnanie výkonnosti troch akumulátorových prenosných reťazových píl a jednej prenosnej reťazovej píly so spaľovacím motorom, ktoré má vo vlastníctve Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií. Testovaniu výkonnosti boli podrobené akumulátorové píly Stihl MSA 300C, Stihl MSA 220 c-bq, Husqvarna 536Li xp a benzínová píla Stihl MS 261. Výkonnosť reťazových píl bola testovaná pri priečnom delení zmesi bukového a jaseňového vlákňinového dreva. Testovanie výkonnosti spočívalo v zistení maximálneho času pílenia a plochy prepílených priečnych prierezov na akumulátor, v prípade benzínovej píly na 3 dcl. palivovej zmesi z maximálnej kapacity nádrže 5 dcl. Ako súhrnný ukazovateľ efektivity práce bola následne hodnotená aj plocha prepílená za sekundu. Kvôli minimalizovaniu skreslenia výsledkov bola pílová reťaz pred každým testom strojovo nabrúsená. Priebeh každého testu bol zaznamenaný prostredníctvom kamier. Na každom vykonanom priečnom reze bola dvakrát, kolmo na seba, zmeraná hrúbka. Z hrúbok boli následne pomocou vzorca vypočítané plochy jednotlivých priečnych prierezov. Ako možnosť zvýšenia kapacity elektrickej energie a teda aj výkonnosti, bol v spojení s akumulátorovými pilami Stihl MSA 300C a Stihl MSA 220 c-bq otestovaný aj vysokokapacitný chrbtový akumulátor Stihl AR 3000L. Vzhľadom na rozdiely v kapacite použitých akumulátorov bol pre objektivizáciu výsledkov vykonaný prepočet sledovaných parametrov výkonnosti na 1 Ah kapacity akumulátora.

**Kľúčové slová:** priečne delenie dreva, Husqvarna, Stihl, akumulátorová prenosná reťazová píla

## ÚVOD

Jednou z výziev lesníckych činností je zväziť dôsledky jednotlivých stratégií obhospodarovania a odhadnúť hospodársku, environmentálnu a sociálnu výkonnosť rôznych procesov, produktov alebo služieb (Schweier et al. 2019). Rozvoju trvalo udržateľného obhospodarovania lesov napomáhajú moderné technológie, ktoré je potrebné zavádzať do všetkých činností vykonávaných v lesníctve.

Väčšina prác súvisiacich s ťažbovou činnosťou v lesnom hospodárstve je fyzicky a časovo náročná. Preto ľudia začali využívať stroje na zvýšenie efektivity práce a najmä jej uľahčenie (Erler et al. 2023). Väčšina týchto strojov doteraz funguje na princípe spaľovania fosílnych palív, čím vznikajú emisie negatívne pôsobiace na životné prostredie. Negatívne pôsobenie emisií sa prejavuje tzv. skleníkovým efektom, ktorý má za následok klimatickú zmenu a prináša so sebou veľké množstvo rizík. Z tohto dôvodu je primárnym cieľom v súčasnosti obmedziť vznik skleníkových plynov nahradením bežných spaľovacích motorov modernými technológiami.

Ekonomické faktory sa menia rýchlym tempom a moderné stroje môžu zohrávať pozitívnu úlohu aj v lesných prevádzkach (Schweier et al. 2019). Technický vývoj a optimalizácia pracovných systémov sa preto v posledných rokoch zameriavajú na spoločensky prijateľné a ekologicky udržateľné spôsoby využívania lesníckych strojov (Pandur et al. 2021).

Dôsledkom toho sa do popredia dostáva tzv. elektrotechnika, ktorá neprodukuje emisie ako pri bežných spaľovacích motoroch. Využívanie elektromotorov, napríklad v automobilovom priemysle, sa stalo pomyselným nástrojom na spomalenie globálneho otepľovania. V lesníckom sektore je využívanie elektromotorov v súčasnosti len vo fáze výskumu a to najmä vo veľkých strojoch slúžiacich na približovanie a pod.. Avšak u prenosných reťazových píl sa už aj v dnešnej dobe začínajú využívať elektromotory.

V prenosných reťazových pílach a inom náradí sa jedná o malé elektromotory poháňané energiou uloženou v akumulátoroch (batériách). Tieto batérie sa dobíjajú prostredníctvom nabíjačiek, ktoré napojíme do bežnej siete 230V. Väčšina batérií má univerzálne vyhotovenie aby sa dali použiť vo viacerých druhoch náradia od jedného výrobcu, čo čiastočne znižuje náklady na prevádzkovanie takýchto zariadení (Sténia a.s.).

## 1. CIEĽ PRÁCE

Hlavným cieľom práce je porovnanie výkonnosti troch akumulátorových prenosných reťazových píl Husqvarna 536 Li xp, Stihl MSA 220 c-bq, Stihl MSA 300C a jednej benzínovej reťazovej píly Stihl MS 261.

Pre naplnenie hlavného cieľa boli stanovené nasledovné čiastkové ciele:

- Zmeranie maximálneho času pílenia a plochy prepílených priečných prierezov na akumulátor, v prípade benzínovej píly na 3 dcl. palivovej zmesi, z maximálnej kapacity nádrže 5 dcl.
- Porovnanie plochy prepílenej za sekundu ako súhrnného ukazovateľa efektivity práce.
- Otestovanie a porovnanie výkonnosti MSA 300C pri jednotlivých pracovných režimoch.
- Otestovanie vysokokapacitného chrbtového akumulátora Stihl AR 3000L v spojení s Stihl MSA 300C a Stihl MSA 220 c-bq.

## 2. ROZBOR PROBLEMATIKY

### 2.1. Ťažba dreva prenosnou reťazovou pílou

Prenosné reťazové píly sú stále najbežnejšie používaným nástrojom pri výrube a spracovaní stromov v mnohých oblastiach sveta (Hoffmann et al. 2021). Hoci existujú náznaky, že motomanuálne systémy sa používajú menej často ako v minulosti, naďalej hrajú významnú úlohu v ťažbe dreva (Labelle, Lemmer 2019). V osobitných podmienkach lesníctva v Slovenskej republike (terénne, ekonomické a pod.) sa 85% lesnej ťažby vykonáva prenosnou reťazovou pílou (Gejdoš et al. 2022). Je to spôsobené najmä vďaka jej relatívne nízkym prevádzkovým nákladom a možnosťou práce v ťažko dostupnom teréne (Staněk et al. 2023).

Z pohľadu ohrozenia bezpečnosti a zdravia lesných pracovníkov sú najrizikovejšie pracovné operácie súvisiace s ťažbou dreva, jeho sústreďovaním a odvozom. Veľkosť vznikajúcich rizík najviac ovplyvňujú terénne podmienky, klimatické podmienky a nízka úroveň mechanizácie. Organizácia takejto práce je zložitá, vo veľa prípadoch nie je možná nepretržitá kontrola a preto je práca s reťazovou pílou jednou z najnebezpečnejších činností vykonávaných v lesnom hospodárstve (Suchomel et al. 2011).

Prvé použitie benzínovej reťazovej píly v lesníctve sa datuje na začiatok 20. storočia. Už viac ako storočie výrobcovia zdokonaľujú svoje reťazové píly, aby boli čo najefektívnejšie a najpohodlnejšie (Tomczak, Naskrent 2022). Čoraz väčšia pozornosť venovaná zdraviu pracovníkov a ochrane životného prostredia (Marchi et al. 2018) mala za následok, že aj výrobcovia lesníckeho náradia začali vyvíjať reťazové píly poháňané elektrickou energiou uloženou v Li-ion akumulátoroch (Poje, Mihelič 2020). Tento nový spôsob napájania ponúka značné výhody z hľadiska zdravia operátorov (Colantoni et al. 2016).

### 2.2. Akumulátorové prenosné reťazové píly

Okolo roku 2010 sa začali na našom trhu objavovať prvé akumulátorové reťazové píly. Práca s nimi je komfortná a počas prevádzky nemajú žiadne horúce diely (Simanov, Bernacký 2018). Akumulátorová píla je poháňaná elektromotorom ale oproti bežnej elektrickej píle je energia potrebná na pohon čerpaná z akumulátora a nie z elektrickej siete (Túma 2017). Medzi výhody akumulátorových píl patria nižšia hladina hluku a vibrácií, žiadne priame emisie, možnosť práce v uzavretých priestoroch a nepotrebnosť káblov (Neri et al. 2023).

Aj napriek týmto pozitívnym aspektom majú akumulátorové reťazové píly stále určité nevýhody, ako sú vyššia cena, nutnosť nabíjania akumulátorov z elektrickej siete, menšia odolnosť voči vode, nízka kapacita akumulátorov a riziko prehriatia s možným ovplyvnením produktivity (Pandur et al. 2021).

V posledných rokoch umožnil napredujúci technologický vývoj výrobu výkonných akumulátorových nástrojov, ktoré sa začínajú používať už aj v lesníckych prevádzkach (Laschi et al. 2023). V súčasnosti sú vďaka vylepšeniam deklarované hodnoty výkonu akumulátorových reťazových píl porovnateľné s ich ľahkými benzínovými náprotivkami (Neri et al. 2023). Výrazne sa zlepšil aj výkon Li-ion batérií, pričom výrobcovia deklarujú viac ako 40 minút skutočného rezania. Okrem toho je Li-ion batérie možné recyklovať s účinnosťou 97% w/w, čo umožňuje rekuperáciu väčšiny cenných materiálov v batérii (Neri et al. 2022).

Aj napriek zavedeniu výkonnejších elektrických pohonov a Li-ion batérií s vysokým napätím a nižšou hmotnosťou (Neri et al. 2022), zostáva samotná technológia batérií podstatným nedostatkom pre prácu v lese. Pracoviská sú značne vzdialené od elektrickej siete a pre zabezpečenie plynulej práce počas pracovného dňa piliara je doposiaľ jediným riešením mať k dispozícii väčšie množstvo batérií (Huber et al. 2021).

### 2.3. Vplyv prenosných reťazových píl na obsluhu

Práca s reťazovou pílou si vyžaduje dobrú fyzickú zdatnosť, psychickú koncentráciu, koordináciu pohybov a zaraďujeme ju medzi rizikové práce (Suchomel et al. 2011). Okrem vysokej úrazovosti sú ďalšími problémami drevný prach, hluk, vibrácie a vznik nebezpečenstiev pre životné prostredie (Rukat et al. 2020).

Spomínané riziká sú dôvody vzniku porúch sluchu a vaskulárnych porúch - blednutia prstov, u lesných pracovníkov. Následky vystavenia hluku a vibráciám môžu byť veľmi vážne a príznaky ochorenia sa môžu objaviť aj niekoľko rokov po vystavení (Papandrea et al. 2022). Okrem používania osobných ochranných pracovných prostriedkov by sa mali dodržiavať predpísané prestávky pri práci (Gejdoš et al. 2022).

Vystavenie hluku a vibráciám pri používaní benzínových reťazových píl sa pohybuje medzi 98 až 101 dB(A) a 3,3 až 7,7 m/s<sup>2</sup> (Poje et al. 2018). Podľa výrobcov sa hladina akustického tlaku A pre elektrické reťazové píly pohybuje medzi 83,7 a 96 dB (Rukat et al. 2020). Priemerné zrýchlenie reťaze je nižšie ako zrýchlenie u benzínových reťazových píl, čo má za následok aj nižšie vibrácie (Dimou et al. 2019).

Huber et al. 2021 preukázali, že používanie akumulátorových reťazových píl predstavuje zníženie denného vystavenia obsluhy vibráciám o 45% a hluku až o 78,4% v porovnaní s benzínovou reťazovou pílou. Berúc do úvahy zdravotné a bezpečnostné odporúčania by sa mali akumulátorové reťazové píly uprednostniť pred benzínovými vždy keď to situácia dovoľuje (Neri et al. 2023).



## 2.4. Predmet výskumu

Lesné hospodárstvo Slovenska v súčasnosti čelí rôznym výzvam ako sú pôsobenie škodlivých činiteľov, alebo klimatická zmena. Lesy značne vplývajú na ekologickú stabilitu a tvoria dôležitú zložku životného prostredia. Je potrebné zlepšovať ich zdravotný stav a to nielen zavádzaním jemnejších foriem hospodárenia, ale aj používaním šetrných technológií na ťažbu a dopravu dreva (Allman et al. 2017).

Technológie používané na ťažbu dreva predstavujú významný podiel na celkovom množstve skleníkových plynov emitovaných do atmosféry (Kopseak et al. 2022). Množstvo emisií je možné znížiť zavádzaním ekologickejších technológií (Dimou et al. 2019). Jedným z moderných, ekologických a bezpečnejších spôsobov ťažby dreva je využívanie akumulátorových prenosných reťazových píl.

Pre vyššie spomínané dôvody sú predmetom nášho výskumu akumulátorové prenosné reťazové píly s ohľadom na možnosť ich využívania pri činnostiach vykonávaných v lesnom hospodárstve ako nástroja na zvýšenie ochrany zdravia pracovníkov a zníženie ekologickej záťaže pre životné prostredie.

## 2.5. Objekt výskumu – testované prenosné reťazové píly

Za prenosnú reťazovú pílu so spaľovacím motorom, vhodnú pre naše testovanie sme zvolili Stihl MS 261, pretože sa jedná o často používaný typ reťazovej píly v podmienkach Slovenska. Nádrž píly bola však pri každom teste naplnená len na 3 dcl. z maximálnej kapacity nádrže 5 dcl. palivovej zmesi. Hodnotu 3 dcl. palivovej zmesi sme stanovili na základe pokusu dobíjania akumulátora Stihl AP 300S prostredníctvom benzínového generátora. Pričom na úplné nabitie akumulátora spotreboval generátor v priemere 3,1 dcl. benzínu.

Ako akumulátorové varianty reťazových píl boli našim testom podrobené Stihl MSA 220 c-bq s akumulátorom AP 300S, Stihl MSA 300C s akumulátorom AP 500S a Husqvarna 536 Li xp s akumulátorom BLi 300. Akumulátorové píly Stihl MSA 220 c-bq a Stihl MSA 300C boli otestované aj v spojení s veľkokapacitným chrbtovým akumulátorom Stihl AR 3000L.

Naším cieľom bolo porovnať akumulátorové píly s profesionálnou reťazovou pílou reálne využívanou pri danom type pracovnej činnosti, keďže súčasný výrobcovia označujú ich akumulátorové píly za profesionálne a výkon zrovnateľný s nádržou palivovej zmesi. Základné technické parametre testovaných prenosných reťazových píl a akumulátorov sú zhrnuté v tabuľkách 1 a 2.

**Tabuľka 1** Technické parametre testovaných prenosných reťazových píl  
**Table 1** Technical parameters of tested portable chain saws

Technické parametre	Stihl msa 220 c-bq	Husqvarna 536 Li xp	Stihl msa 300C	Stihl ms 261
Typ		Akumulátorová reťazová píla		Spaľovacia reťazová píla
Druh pohonu	Elektrický (Li-ion akumulátor AP 300S)	Elektrický (Li-ion akumulátor BLi 300)	Elektrický (Li-ion akumulátor AP 500S)	Palivová zmes (benzín 95+olej Stihl HP 1:50)
Výkon motora	2,1 kW	1,4 kW	3,0 kW	3,0 kW
Napätie/energia /kapacita				-
Hmotnosť *	5,6 kg	5,4 kg	7,7 kg	6,9 kg
Dĺžka vodiacej lišty	35 cm (14 <sup>“</sup> )	35 cm (14 <sup>“</sup> )	35 cm (14 <sup>“</sup> )	37 cm (15 <sup>“</sup> )
Hrúbka drážky vodiacej lišty	1,3 mm	1,3 mm	1,3 mm	1,6 mm
Počet vodiacich článkov	50	52	60	62
Delenie reťaze	3/8 <sup>“</sup>	3/8 <sup>“</sup>	0,325 <sup>“</sup>	0,325 <sup>“</sup>
Obehová rýchlosť reťaze	24 m/s	20 m/s	30 m/s	25,6 m/s
Hladina vibrácií L/P	4.8/3.6 m/s <sup>2</sup>	2.5/2.8 m/s <sup>2</sup>	2,6/2,8 m/s <sup>2</sup>	3,5 m.s <sup>2</sup>
Hladina akustického tlaku	89 dB	93 dB	93 dB	102 dB
Hladina akustického výkonu	100 dB	106 dB	104 dB	113 dB
Objem olejovej nádrže	210 ml	200 ml	310 ml	270 ml

\* Zahŕňa pílu, vodiacu lištu, mazací olej a akumulátor alebo pohonnú zmes.

**Tabuľka 2** Technické parametre testovaných akumulátorov  
**Table 2** Technical parameters of the tested accumulators

Technické parametre	Stihl AP 300S	Husqvarna BLi 300	Stihl AR 3000L	Stihl AP 500S
Napätie	36V	36V	36V	36V
Energia	281Wh	337Wh	1483Wh	337Wh
Kapacita	7,8Ah	9,4Ah	41,2Ah	9,36 Ah
Hmotnosť	1,8 kg	1,9 kg	9,5 kg*	1,95 kg

\* Hmotnosť akumulátora (bez popruhov a spojovacieho kábla).

Pre dosiahnutie podmienok zrovnateľných s reálnou prevádzkou ani jedna z testovaných prenosných reťazových píl nebola nová. Všetky boli vo výbornom technickom stave

a málo používané. Na každú z píl bola pred začatím testov namontovaná nová pilová reťaz, ktorá bola po každom vykonanom teste strojovo naostrená.



**Figure 1** Tested portable chainsaws and accumulators

**Obrázok 1** Testované prenosné reťazové píly a akumulátory

Akumulátorová prenosná reťazová píla MSA 300C od firmy Stihl ako jediná disponuje možnosťou voľby pracovného režimu. Počas práce je možné zvoliť si spomedzi troch pracovných režimov (ECO, Výrub, Odvetvovanie), ktorých charakteristiky sú popísané v tabuľke 3. Pre potreby základného testovania výkonnosti a možnosť porovnania s ostatnými reťazovými pilami bol použitý pracovný režim Stínka. V rámci ďalších testov boli samostatne otestované aj ostatné pracovné režimy.

**Tabuľka 3** Charakteristika pracovných režimov Stihl MSA 300C (manuál na obsluhu )

**Table 3** Characteristics of working modes Stihl MSA 300C (operating manual)

Pracovný režim	Obehová rýchlosť reťaze	Výkon
ECO	Nízka	Nízky
Stínka	Stredná	Maximálny
Odvetvovanie	Maximálna (30 m/s)	Maximálny

Stihl AR 3000L je vysokokapacitný chrbtový akumulátor určený pre maximálny prevádzkový čas strojom od firmy Stihl. Kapacita batérie je indikovaná pomocou šiestich diód. Pre prácu je potrebné si samostatne dokúpiť príslušenstvo ako je nosný systém a prípojný vodič pre prepojenie akumulátora s pílou.

### **3. METODIKA**

#### **3.1. Pribeh testovania**

Testovaná bola výkonnosť u vyššie spomínaných typov prenosných reťazových píl a akumulátorov. Hodnotenie výkonnosti spočívalo v zistení maximálneho času pílenia a plochy prepílených priečných prierezov na akumulátor, v prípade benzínovej píly na 3 del. palivovej zmesi (maximálny objem nádrže 5 del.). Testovanie prebiehalo v areály Technickej univerzity vo Zvolene na zmesi bukového a jaseňového vlákniového dreva s približne rovnakou relatívnou vlhkosťou. Hodnotená bola aj plocha prepílená za sekundu, ako súhrnný ukazovateľ efektivity práce.

Na jednotlivých kmeňoch vlákniového dreva boli reťazovými pilami vykonávané priečne rezy, kolmo na pozdĺžnu os kmeňa. Pre minimalizovanie otupenia reťaze prebiehalo pílenie na železnom podstavci a po každom vykonanom teste bola pílová reťaz aj strojovo nabrúsená.

#### **3.2. Časové snímkovanie**

Pre možnosť hodnotenia maximálneho času pílenia reťazových píl bol celý proces testovania zaznamenaný pomocou dvoch kamier. Jedna kamera bola umiestnená na pevnom statíve na okraji pracovnej plochy a druhá priamo na prilbe piliara.

Po vykonaní praktickej časti boli videá z oboch kamier stiahnuté do počítača a pre každý priečny rez bol pomocou stopiek zmeraný čas v sekundách. Sčítaním všetkých časov pílenia od začiatku používania akumulátora až po jeho vybitie, v respektíve po minúte nádrže naplnenej 3 del. palivovej zmesi, sme dostali údaj o maximálnom čase pílenia konkrétnej reťazovej píly.

#### **3.3. Výpočet plôch priečných prierezov**

Na každom priečnom priereze bola dvakrát, kolmo na seba, zmeraná jeho hrúbka pomocou metra. Následne bol z nameraných hodnôt vypočítaný aritmetický priemer a výsledná hodnota sa brala ako reálna hrúbka daného priečného prierezu.

Pre bežné praktické účely sa skutočná plocha priečného prierezu  $Q$  nahrádza kruhovou základňou  $g$  (Šmelko 2007). Z hrúbok jednotlivých priečných prierezov boli preto následne

vypočítané kruhové základne (plochy) pričných prierezov g pomocou vzorca 1.:

$$g = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (cm^2) \quad (1.)$$

g – kruhová základňa

$\pi$  – Ludolfovo číslo (konštanta 3,14...)

d – hrúbka/priemer pričného prierezu

Sčítaním hodnôt kruhových základní prepílených pričných prierezov od začiatku používania akumulátora až po jeho vybitie, v respektíve po minúte nádrže naplnenej 3 dcl. palivovej zmesi, sme dostali výslednú hodnotu výkonnosti vyjadrenej plochou prepílených pričných prierezov.



**Figure 2** Measurement of thicknesses of cross-sections

**Obrázok 2** Meranie hrúbok pričných prierezov

### 3.4. Štatistika počtu meraní

Potrebný počet testov s každým typom prenosnej reťazovej píly bol stanovený na základe vzorca 2.:

$$N = \frac{V_{K\%}}{\Delta ER} \quad (2.)$$

N – počet meraní

$V_{k\%}$  – variačný koeficient (%)

$\Delta ER$  – stanovená chyba (%)

Pred započatím testov sme si pre potreby nášho testovania zvolili maximálnu chybu 3% a teda požadovanú presnosť 97%. Po vykonaní série troch testov sme vypočítali variačné koeficienty sledovaných veličín pre každý typ prenosnej reťazovej píly. Na základe požadovanej presnosti a vypočítaných variačných koeficientov sme následne hľadali potrebný počet testov. Maximálny variačný koeficient dosiahol hodnotu 18%, čo pri stanovenej presnosti predpisuje počet testov 6. Po vykonaní šiestich testov sme opäť vyrátali variačné koeficienty sledovaných veličín. Variačný koeficient ani u jednej z testovaných prenosných reťazových píl neprekročil 18% a preto nebolo potrebné vykonávať ďalšie testy.

Pre potreby testovania výkonnosti chrbtového akumulátora a jednotlivých pracovných režimov MSA 300C bol vykonaný jeden teste pre každý pracovný režim ako aj každú testovanú akumulátorovú pílu.

### 3.5. Porovnanie výkonnosti

Hodnoty maximálneho času pílenia a plochy prepílených pričných prierezov na akumulátor, v respektíve na 3 dcl. palivovej zmesi, boli následne medzi sebou porovnané. Porovnaná bola taktiež aj plocha prepílená za sekundu.

Vzhľadom na to, že akumulátory testovaných akumulátorových píl majú rozdielnu kapacitu, boli namerané výkonnosti pre objektivizáciu výsledkov prepočítané na 1 Ah kapacity akumulátora. Tento prepočet nám zabezpečil relevantné porovnanie výkonnosti akumulátorových píl bez ohľadu na kapacitu akumulátora.

Výkonnosti chrbtového akumulátora v spojení s MSA 300C a MSA 220 c-bq bola porovnané medzi sebou a po prepočte na 1 Ah kapacity akumulátora aj s hodnotami výkonnosti ich bežných akumulátorov. Stihl AR 3000L nahradí viacero bežných akumulátorov a preto ho nie je možné porovnávať s 3 dcl. palivovej zmesi.

Pre potreby základného testovania výkonnosti MSA 300C bol použitý pracovný režim Stínka. Každý z ostatných pracovných režimov bol podrobený jednému testu výkonnosti. Rozdiely vo výkonnosti pri jednotlivých pracovných režimoch MSA 300C boli medzi sebou taktiež porovnané.

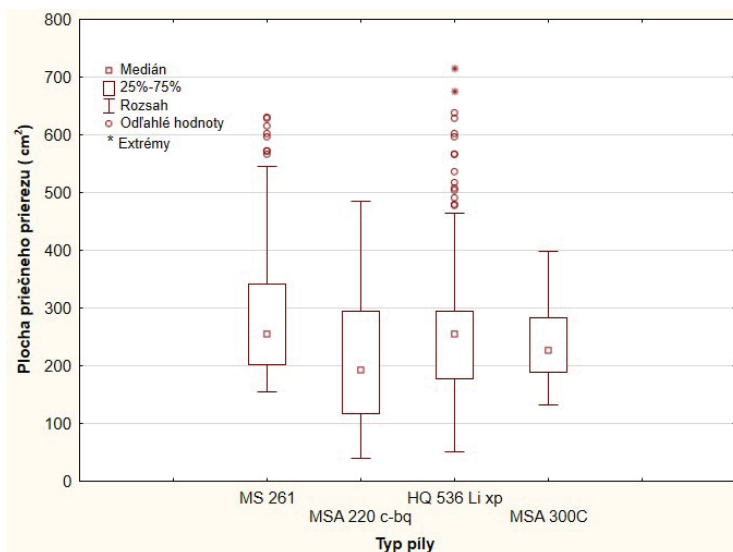
## 4. VÝSLEDKY

Vykonaných bolo po 6 testov výkonnosti s každým typom prenosnej reťazovej píly. Akumulátorové píly Stihl MSA 300C a Stihl MSA 220 c-bq boli podrobené každá jednému testu výkonnosti aj v spojení s chrbtovým akumulátorom.

**Tabuľka 4** Prehľad vykonaných testov výkonnosti  
**Table 4** Overview of performed performance tests

Typ píly	Akumulátor/palivová zmes	Počet	Priemerná atmosférická teplota (°C)
Stihl MSA 220 c-bq	AP 300S (7,8Ah)	6	15,2
Stihl MSA 220 c-bq	AR 3000L (41,2 Ah)	1	14,1
Stihl MSA 300C	AP 500S (9,4 Ah)	6	9,5
Stihl MSA 300C	AR 3000L (41,2 Ah)	1	8,3
Husqvarna 536Li xp	BLi 300 (9,4 Ah)	6	17,3
Stihl MS 261	3 dcl. palivová zmes	6	15,9

Na obrázku 3 je zobrazený štatistický prehľad plôch jednotlivých priečných prierezov v závislosti od testovaného typu reťazovej píly. Prevažná väčšina hodnôt sa pohybuje v rozmedzí od 120 do 340 cm<sup>2</sup>. Najmenší rozsah plôch bol zaznamenaný pri akumulátorovej pile Stihl MSA 300C a naopak najväčší pri akumulátorovej pile Stihl MSA 220 c-bq.



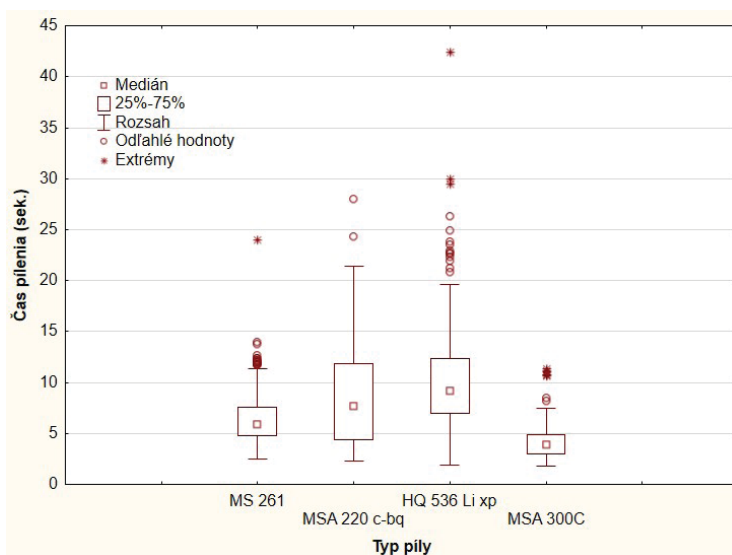
**Figure 3** Statistical overview of individual cross-sectional areas  
**Obrázok 3** Štatistický prehľad plôch jednotlivých priečných prierezov

Priemerná plocha prepílená jedným priečnym rezom bola v prípade benzínovej píly 285,1 cm<sup>2</sup>. Pre akumulátorové varianty to bolo Stihl MSA 220 c-bq 205,3 cm<sup>2</sup>, Husqvarna 536 Li xp 242,5 cm<sup>2</sup> a pre Stihl MSA 300C 237,6 cm<sup>2</sup>.

Obrázok 4 zobrazuje štatistický prehľad časov pílenia pri vykonávaní jedného priečneho rezu. Môžeme povedať, že medzi plochami a časmi priečných prierezov je



priamy vzťah. Priemerný čas vykonania jedného priečného rezu bol s benzínovou pílou 6,4s. Pre akumulátorové varianty to bolo Stihl MSA 220 c-bq 8,7s, Husqvarna 536 Li xp 9,9s a pre Stihl MSA 300C 4,1s. Najmenší rozsah časov bol rovnako ako pri plochách prierezov pri akumulátorovej píle Stihl MSA 300C a naopak najväčší pri Stihl MSA 220 c-bq.

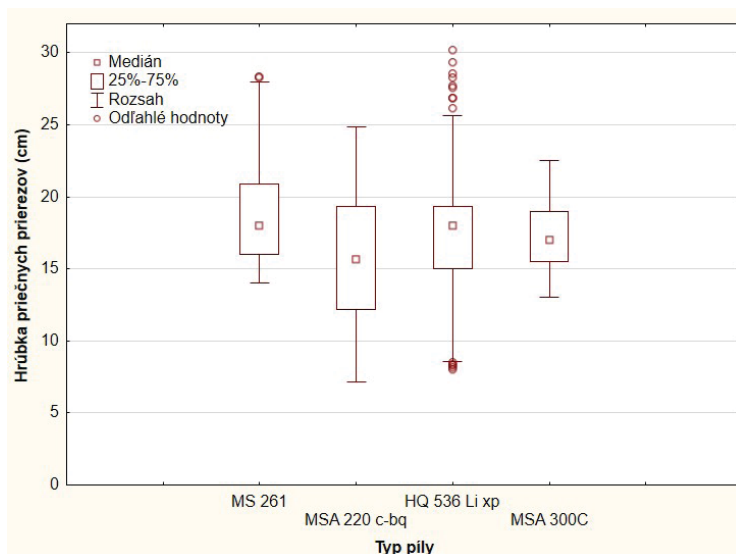


**Figure 4** Statistical overview of sawing times of individual cross-sections

**Obrázok 4** Štatistický prehľad časov pílenia jednotlivých priečných prierezov

Veľkosť prepílených plôch priamo vyplýva z parametrov vlákniového dreva. Čas jednotlivých rezov je taktiež závislý na parametroch píleného dreva avšak značne naň vplývajú aj parametre píly ako sú obehová rýchlosť reťaze a výkon motora. Obrázok 5 zobrazuje štatistický prehľad hrúbok priečných prierezov v závislosti od testovanej reťazovej píly. Väčšina hrúbok sa pohybovala v rozmedzí od 14 do 21 cm, pričom najmenší rozsah bol zaznamenaný u Stihl MSA 300C. Pri testovaní Stihl MSA 220 c-bq bol dosiahnutý najväčší rozsah hrúbok, čo bolo dôvodom aj najväčších rozsahov hodnôt pri ploche priečných prierezov a čase pílenia.





**Figure 5** Statistical overview of the thicknesses of individual cross-sections  
**Obrázok 5** Štatistický prehľad hrúbok jednotlivých priečných prierezov

V tabuľke 5 sú zobrazené výsledné výkonnosti vyjadrené celkovou plochou priečných prierezov a maximálnym časom pílenia na jeden akumulátor alebo 3 dcl. palivovej zmesi. Tabuľka obsahuje aj údaj o ploche prepílenej za sekundu, ktorý zlučuje sledované výkonnosti do jedného komplexného parametra, ako ukazovateľa efektivity práce. Tento parameter je však do značnej miery ovplyvnený parametrami testovanej píly.

**Tabuľka 5** Prehľad priemerných hodnôt výkonnosti testovaných reťazových píl

**Table 5** Overview of average performance values of tested chainsaws

Typ testovanej píly	Plocha priečných prierezov (cm <sup>2</sup> )	Maximálny čas pílenia (s)	Prepílená plocha za sekundu cm <sup>2</sup> /s
Stihl MS 261 (palivová zmes)* <sup>1</sup>	24425,00	549,61	44,86
Stihl MSA 220 c-bq (AP 300S)* <sup>1</sup>	9931,96	417,10	23,80
Husqvarna 536 Li xp (BLi 300)* <sup>1</sup>	18190,75	745,83	24,72
Stihl MSA 300C (AP 500S)* <sup>1</sup>	21416,56	365,21	58,61

\*1 - Priemerná hodnota zo 6 testov na 6 akumulátorov / 6 nádrží naplnených 3 dcl. palivovej zmesi

Z výsledkov je zrejmé, že najväčšiu plochu prepíliť benzínová píla. V prípade plnej nádrže by bola nameraná výkonnosť pravdepodobne vyššia ešte o približne 67%. Spomedzi akumulátorových variant najväčšiu plochu prepíliť Stihl MSA 300C avšak v porovnaní s benzínovou pílou to bolo o 3008,44 cm<sup>2</sup> menej.

Najdlhší čas pílenia dosiahla Husqvarna a naopak najkratší Stihl MSA 300C. Rozdiel medzi týmito akumulátorovými pilami bol takmer dvojnásobný. Benzínová píla dosiahla druhý najdlhší čas pílenia.

Plocha prepílená za sekundu bola ale u akumulátorovej píly Stihl MSA 300C najvyššia, pričom dosiahla takmer dvojnásobne vyššiu hodnotu ako ostatné akumulátorové píly. Vzhľadom na tento parameter sa práca so Stihl MSA 300C javí ako najefektívnejšia spomedzi všetkých testovaných reťazových píl. Píla so spaľovacím motorom dosiahla aj v tomto parametri druhú najvyššiu hodnotu.

Pre korektné porovnanie akumulátorových píl, bez ohľadu na kapacitu akumulátora, bol vykonaný prepočet nameraných výkonností na 1 Ah kapacity akumulátora. Výkonnosť po prepočte zobrazuje tabuľka 6.

**Tabuľka 6** Prehľad parametrov výkonnosti prepočítaných na 1 Ah kapacity akumulátora  
**Table 6** Overview of performance parameters converted to 1 Ah battery capacity

Typ testovanej reťazovej píly	Plocha pričných prierezov (cm <sup>2</sup> )	Čas pílenia (s)
Stihl MSA 220 c-bq (AP 300S 7,8 Ah)* <sup>1</sup>	1273,33	53,47
Husqvarna 536 Li xp (BLi 300 9,4 Ah)* <sup>1</sup>	1935,19	79,34
Stihl MSA 300C (AP 500S 9,4 Ah)* <sup>1</sup>	2278,36	38,85

Najväčšiu plochu na 1 Ah prepíliť MSA 300C a najmenšiu MSA 220 c-bq, čo bolo o 661,86 cm<sup>2</sup> menej ako Husqvarna. Najdlhší čas pílenia na 1 Ah dosiahla Husqvarna a najkratší naopak MSA 300C, pričom rozdiel medzi nimi bol viac ako dvojnásobný. Čas pílenia MSA 220 c-bq bol o 14,62s väčší ako u MSA 300C.

Počas testovania došlo k prehrievaniu akumulátorových píl Stihl MSA 220 c-bq a Husqvarna 536Li xp. Po prepílení určitého množstva rezov sa píla zastavila a pre pokračovanie v testovaní bolo nutné nechať ju vychladnúť. Už po prvom prehriatí píla nedokázala píliť rovnako dlhú dobu ako pred prehriatím. Pokračovaním sa čas pílenia výrazne skracoval až pokiaľ sa nenechala píla úplne vychladnúť. Táto skutočnosť negatívne ovplyvňuje používanie akumulátorových píl v teplejšom období a pri výkonovo náročných činnostiach.

### Porovnanie pracovných režimov Stihl MSA 300C

Pri základných testoch bola akumulátorová píla Stihl MSA 300C testovaná s pracovným režimom Stínka. Pre možnosť zistenia rozdielov vo výkonnosti pri iných režimoch v porovnaní s testovaným, bolo vykonané po jednom teste pre pracovný režim ECO aj Odvetvovanie. Hodnoty sledovaných parametrov výkonnosti nameraných pri jednotlivých pracovných režimoch sú zobrazené v tabuľke 7.

Výkonnosť v režimoch Stínka a Odvetvovanie je dosť podobná. Pri pílení s režimom ECO bola dosiahnutá značne vyššia výkonnosť v maximálnom čase pílenia, ploche

priečných prierezov ako aj počte rezov v porovnaní s ostatnými režimami. Plocha prepílená za sekundu bola však pri režime ECO najmenšia, čo bolo pravdepodobne spôsobené najnižšou obehovou rýchlosťou reťaze. Počet rezov je priamo závislý na hrúbke jednotlivých prierezov, v respektíve ich ploche, ktorá bola pri testovaní s režimom ECO najnižšia.

**Tabuľka 7** Hodnoty výkonnosti Stihl MSA 300C v závislosti od pracovného režimu

**Table 7** Stihl MSA 300C performance values depending on the work mode

Pracovný režim	Plocha priečných prierezov (cm <sup>2</sup> )	Maximálny čas pílenia (s)	Prepílená plocha za sekundu (cm <sup>2</sup> /s)	Priemerná hrúbka (cm)	Počet rezov (ks)
ECO	25403,70	502,22	50,58	15,13	141
Stínka*1	21416,56	365,21	58,61	17,38	90
Odvetvovanie	21941,47	371,10	59,13	18,25	83

\*1 - priemerná hodnota zo 6 meraní na 6 plne nabitých akumulátorov

V režime ECO prepíli MSA 300C o 18,7% väčšiu plochu priečných prierezov a dosiahla o 37,5% dlhší čas pílenia v porovnaní s režimom Stínka. Pri pracovnom režime Odvetvovanie, v porovnaní s režimom Stínka, bola dosiahnutá o 2,45% väčšia plocha priečných prierezov a o 1,61% dlhší čas pílenia. Z hľadiska efektivity práce sú podľa plochy prepílenej za sekundu najvýhodnejšie pracovné režimy Odvetvovanie a Stínka.

### **Porovnanie chrbtového akumulátora Stihl AR 3000L pri práci s MSA 220 c-bq a MSA 300C**

Akumulátorová píla Stihl MSA 220 c-bq je schopná plnohodnotne pracovať v spojení s akumulátormi typu AP ale aj AR, teda vysokokapacitnými chrbtovými akumulátormi (návod na obsluhu MSA 220 c-bq).

Akumulátorová píla Stihl MSA 300C je schopná plnohodnotne pracovať len v spojení s akumulátorom typu AP, konkrétne AP 500S. V prípade použitia akumulátora typu AP nižšej triedy alebo akumulátora typu AR nie je možné meniť pracovné režimy. Takéto spojenie umožňuje výlučne prácu s režimom ECO, pričom píla poskytuje najnižší výkon elektromotora a najnižšiu obehovú rýchlosť reťaze (návod na obsluhu MSA 300C).

Hodnoty sledovaných parametrov výkonnosti počas testovania AR 3000L zobrazuje tabuľka 8.

**Tabuľka 8** Hodnoty dosiahnuté počas testovania chrbtového akumulátora AR 3000L  
**Table 8** Values achieved during testing of the AR 3000L backpack battery

Sledovaný parameter	MSA 220 c-bq	MSA 300C
Plocha priečných priereзов (cm <sup>2</sup> )	51898,22	81562,62
Maximálny čas pílenia (s)	2405,55	2795,61
Prepílená plocha za sekundu (cm <sup>2</sup> /s)	21,57	29,18
Priemerná hrúbka (cm)	22,6	24,12
Počet rezov (ks)	152	177

MSA 300C dosiahla o 57,2% väčšiu plochu priečných priereзов a o 16,2% dlhší čas pílenia v porovnaní s MSA 220 c-bq. Rovnako tak bola schopná prepíliť aj väčší počet priečných rezov, o 25 kusov, a to aj napriek o cca 1,5cm väčšej priemernej hrúbke pílených priereзов. Z hľadiska efektivity práce je práca s MSA 300C v spojení s AR 3000L aj pri pracovnom režime ECO výrazne efektívnejšia v porovnaní s MSA 220 c-bq.

Pre porovnanie výkonnosti testovaných píľ s chrbtovým akumulátorom a ich bežnými akumulátormi, bol vykonaný prepočet výkonnosti na 1 Ah kapacity akumulátora. Výsledky po prepočte zobrazuje tabuľka 9.

**Tabuľka 9** Porovnanie hodnôt po prepočte na 1 Ah  
**Table 9** Comparison of values after conversion to 1 Ah

Typ píly/akumulátor	Plocha priereзов (cm <sup>2</sup> )	Čas pílenia (s)
MSA 300C/AP 500S (ECO)	2702,52	53,43
MSA 300C/AR 3000L (ECO)	1979,68	67,86
MSA 220 c-bq/AP 300S	1273,33	53,47
MSA 220 c-bq/AR 3000L	1259,67	58,39

Čas pílenia na 1 Ah bol u oboch akumulátorových píľ pri práci s chrbtovým akumulátorom výrazne vyšší. Avšak plocha prepílených priečných priereзов na 1 Ah, v spojení s chrbtovým akumulátorom, bola u oboch reťazových píľ naopak nižšia v porovnaní s bežnými akumulátormi. U MSA 220 c-bq sa jednalo o rozdiel iba približne 1% ale v prípade MSA 300C bol tento rozdiel až 36,5% v prospech bežného akumulátora.

## 5. ZÁVER A DISKUSIA

V práci sme hodnotili výkonnosť troch akumulátorových reťazových píľ a jednej benzínovej reťazovej píly pri priečnom delení vlákniového dreva. Výkonnosť reťazových píľ bola hodnotená prostredníctvom maximálneho času pílenia a plochy prepílených priečných priereзов na akumulátor, v prípade benzínovej píly na 3 dcl. palivovej zmesi.

Hodnotená bola aj plocha prepílená za sekundu ako ukazovateľ efektivity práce.

Výsledky naznačujú, že výkonnosť testovaných akumulátorových píl sa približuje výkonnosti benzínovej píly naplnenej 3 dcl. palivovej zmesi a v niektorých parametroch ju aj prevyšujú. V prípade plnej nádrže by bola však výkonnosť akumulátorových píl stále pravdepodobne nižšia vo väčšine parametrov.

Spomedzi akumulátorových píl dominovala Stihl MSA 300C a to najmä v ploche priečných prierezov ale aj efektívite práce. Najdlhší čas pílenia bol však nameraný u Husqvarny, čo bolo takmer dvakrát viac ako u MSA 300C. Tieto zistenia sa potvrdili aj po prepočte na 1 Ah kapacity akumulátora.

Ako alternatíva na zvýšenie výkonnosti akumulátorových píl bolo vykonané aj testovanie chrbtového akumulátora Stihl AR 3000L v spojení s MSA 300C a MSA 220 c-bq. MSA 300C dosiahla pri práci s chrbtovým akumulátorom výrazne vyššiu výkonnosť v porovnaní s MSA 220 c-bq a to aj napriek možnosti pracovať len s pracovným režimom ECO. Táto skutočnosť však vylučuje použitie chrbtového akumulátora s MSA 300C pri výkonovo náročnejších lesníckych činnostiach mimo dosahu elektrickej siete.

Z nášho testovania vyplývajú dva hlavné negatíva akumulátorových píl. Prvým je nutnosť nabíjania akumulátorov z elektrickej siete (Pandur et al. 2021) a zistená nemožnosť plnohodnotného používania modernej MSA 300C s chrbtovým akumulátorom. Pre zvládnutie pracovnej zmeny piliara bude potrebné zaobstaráť pre prácu s akumulátorovou pilou veľké množstvo akumulátorov (Huber et al. 2021), čo značne zvyšuje finančnú náročnosť. Druhým negatívom akumulátorových píl je ich prehrievanie (Pandur et al. 2021, Laschi et al. 2023). V našej štúdií bolo prehrievanie zaznamenané u Stihl MSA 220 c-bq a Husqvarna 536Li xp. Ku prehriatiu došlo už pri priemernej atmosférickej teplote 14,5°C čo výrazne zvýšilo časovú náročnosť a obmedzilo prácu.

Spolu s rastom cien fosílnych palív a obmedzovaním emisií CO<sub>2</sub> sa akumulátorové píly javia ako možná náhrada benzínových píl, najmä pri menej náročných lesníckych činnostiach. Pre úspešné eliminovanie spomínaných nedostatkov bude však potrebný ďalší výskum, ktorý by sa mal zamerať na testovanie životnosti a spoľahlivosti akumulátorových píl v lesníckej praxi. Pretože v lesníctve sa prenosná reťazová píla často využíva v sťažených pracovných podmienkach, čo kladie veľké nároky na spoľahlivosť a odolnosť týchto nástrojov.

## 6. CONCLUSIONS

### **Performance evaluation of accumulator portable chainsaws for transversal sawing of fiber wood**

The main aim of the work was to tested and compared the performance of three modern battery-powered portable chainsaws and one petrol chainsaw owned by

the Department of forest harvesting, logistics and meliorations. Accumulator saws Stihl MSA 300C, Stihl MSA 220 c-bq, Husqvarna 536Li xp and combustion saw Stihl MS 261 were subjected to performance testing. The performance of portable chainsaws was tested when transversely sawing a mixture of beech and ash fibrewood. Performance testing consisted in determining the maximum sawing time and the area of sawn cross-sections for one accumulator, in the case of petrol chainsaw on 3 dcl. of the fuel mixture, from the maximum tank capacity of 5 dcl.. For each of the tested chainsaws, the area sawed per second was subsequently evaluated as a summary indicator of work efficiency.

The results indicate that the performance of the tested accumulator saws is close to that of a petrol saw filled with 3 dcl. fuel mixture and in some parameters even exceed it. However, with a full tank, the performance of accumulator saws would still probably be lower in most parameters. Stihl MSA 300C dominated among accumulator saws. As an alternative to increase the performance of accumulator saws, testing of the Stihl AR 3000L backpack battery in conjunction with the MSA 300C and MSA 220 c-bq was also carried out. The MSA 300C achieved a significantly higher performance when working with a backpack battery compared to the MSA 220 c-bq, despite the possibility of working only with the ECO work mode. However, this fact excludes the use of the backpack battery with the MSA 300C for more demanding forestry activities.

Together with the increase in fossil fuel prices and the limitation of CO<sub>2</sub> emissions, accumulator saws appear to be a possible replacement for petrol saws, especially for less demanding forestry activities. However, further research will be needed to successfully eliminate the shortcomings.

*Podakovanie: Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja, APVV-22-0030 Návrh Smart riešení prepojenia výsledkov požiarného skúšobníctva s počítačom podporovaným modelovaním pre zvýšenie kvality výstupov bezpečnostného výskumu, APVV-22-0001 Optimalizácia hlavných zdravotných a bezpečnostných rizík pri využívaní lesnej biomasy na energetické účely a projektom KEGA 004TU Z-4/2023 Inovatívne metódy hodnotenia kvalitatívneho potenciálu lesných porastov.*

## 7. POUŽITÁ LITERATÚRA

1. ALLMAN, M. – JANKOVSKÝ, M. – ALLMANOVÁ, Z. – FERENČÍK, M. – MESSINGEROVÁ, M. *Negatívne dopady ťažbovo-dopravných technológií na lesnú pôdu a možnosti prevencie v lesoch Slovenska*: vedecká monografia. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2017. ISBN 978-80-228-2925-0.
2. COLANTONI, F. – MAZZOCCHI, F. – COSSIO, M. – CECCHINI, R. – BEDINI, D. M. Comparisons between battery chainsaws and internal combustion engine chainsaws: performance and safety. *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 9, 2016, no. 27, 1315-1337, <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2016.68133>
3. DIMOU, V. – KANTARTZIS, A. – MALESIOS, C. – KASAMPALIS, E. Research of exhaust emissions by chainsaws with the use of a portable emission measurement system. *International journal of forest engineering* 2019. Vol.30, Issue3, P.228-239, DOI10.1080/14942119.2019.1622318

4. ERLER, J. – SPINELLI, R. – STELIAN A. B. – MEDERSKI, P.S. *Technodiversity*. Universitatea Transilvania din Braşov, 2023. ISBN 978-606-19-1636-8
5. GEJDOŠ, M. – HITKA, M. – KAMPF, R. Anthropometrics Parameters of the Adult Population as Ergonomics Modifier for the Chainsaw Handle. *Forests* 2022, 13, 645. <https://doi.org/10.3390/f13050645>
6. HOFFMANN, S. – JAEGER, D. Insights on Motor-Manual Tree Felling in Germany, Recent Developments to Ensure Efficient Operations in Singletree Selection Harvest. *Eur. J. For. Eng.* 2021, 7, 39–44. <https://doi.org/10.33904/ejfe.953226>
7. HUBER, M. – HOFFMANN, S. – BRIEGER, F. – HARTSCH, F. – JAEGER, D. – SAUTER, U.H. Vibration and Noise Exposure during Pre-Commercial Thinning Operations: What Are the Ergonomic Benefits of the Latest Generation Professional-Grade Battery-Powered Chainsaws? *Forests*. 2021; 12(8):1120. <https://doi.org/10.3390/f12081120>
8. KOPSEAK, H. – PANDUR, Z. – BAČIĆ, M. – ZEČIĆ, Ž. – NEVEČEREL, H. – LEPOGLAVEC, K. – ŠUŠNJAR, M. Exhaust Gases from Skidder ECOTRAC 140 V Diesel Engine. *Forests* 2022, 13, 272. <https://doi.org/10.3390/f13020272>
9. LABELLE, E.R. – LEMMER, K.J. Selected Environmental Impacts of Forest Harvesting Operations with Varying Degree of Mechanization. *Croatian Journal of Forest Engineering* 2019, 40(2), 239-257. DOI: 10.5552/crojfe.2019.537
10. LASCHI, A. – NERI, F. – MARRA, E. – FABIANO, F. – FRASSINELLI, N. – MARCHI, E. – PAOLONI, R. – FODERI, C. Comparing the Productivity of the Latest Models of Li-Ion Battery and Petrol Chainsaws in a Conifer Clear-Cut Site. *Forests* 2023, 14, 585. <https://doi.org/10.3390/f14030585>
11. MARCHI, E. – CHUNG, W. – VISSER, R. – ABBAS, D. – NORDFJELL, T. – MEDERSKI P.S. Sustainable Forest Operations (SFO): a new paradigm in a changing world and climate. *Sci Total Environ.* 2018;634:1385–97. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>
12. Návod na obsluhu Stihl MSA 220 c-bq (4.4.2024). Dostupné na internete: [https://www.pilyasekacky.cz/user/related\\_files/stihl\\_msa\\_220\\_c.pdf](https://www.pilyasekacky.cz/user/related_files/stihl_msa_220_c.pdf)
13. Návod na obsluhu Stihl MSA 300C (4.4.2024). Dostupné na internete: <https://www.manualpdf.cz/stihl/msa-300-c/manu%C3%A1l>
14. NERI, F. – LASCHI, A. – MARCHI, E. – MARRA, E. – FABIANO, F. – FRASSINELLI, N. – FODERI, C. Use of Battery- vs. Petrol-Powered Chainsaws in Forestry: Comparing Performances on Cutting Time. *Forests* 2022, 13, 683. <https://doi.org/10.3390/f13050683>
15. NERI, F. – LASCHI, A. – BERTUZZI, L. – GALIPÒ, G. – FRASSINELLI, N. – FABIANO, F. – MARCHI, E. – FODERI, C. – MARRA, E. A Comparison between the Latest Models of Li-Ion Batteries and Petrol Chainsaws Assessing Noise and Vibration Exposure in Cross-Cutting. *Forests* 2023, 14, 898. <https://doi.org/10.3390/f14050898>
16. PANDUR, Z. – ŠUŠNJAR, M.I. – BAČIĆ, M. (2021). Battery Technology – Use in Forestry. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42 (1), 135-148. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.798>
17. PAPANDREA, S.F. – CATALDO, M.F. – ZIMBALATTI, G. – GRIGOLATO, S. – PROTO, A.R. What Is the Current Ergonomic Condition of Chainsaws in Non-Professional Use? A Case Study to Determine Vibrations and Noises in Small-Scale Agroforestry Farms. *Forests* 2022, 13, 1876. <https://doi.org/10.3390/f13111876>
18. POJE, A. – POTOČNIK, I. – MIHELIČ, M. Comparison of Electric and Petrol Chainsaws in Terms of Efficiency and Safety When Used in Young Spruce Stands in Small-Scale Private Forests. *Small-scale Forestry* 17, 411–422 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11842-018-9395-4>
19. POJE, A. – MIHELIČ, M. Influence of Chain Sharpness, Tension Adjustment and Type of Electric Chainsaw on Energy Consumption and Cross-Cutting Time. *Forests* 2020, 11, 1017. <https://doi.org/10.3390/f11091017>
20. RUKAT, W. – JAKUBEK, B. – BARCZEWSKI, R. – WROBEL, M. The Influence of the Direction of Wood Cutting on the Vibration and Noise of Chainsaws. *Tehnički vjesnik*, Vol. 27 No. 6, 2020. <https://doi.org/10.17559/TV-20190719101429>
21. SCHWEIER, J. – MAGAGNOTTI, N. – LABELLE, E.R. Sustainability Impact Assessment of Forest Operations: a Review. *Curr Forestry Rep* 5, 101–113 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00091-6>
22. SIMANOV, V. – BERNACKÝ, R. *Motorová pila a její historie*. Národní zemědělské muzeum, Praha, 2018. ISBN 978-80-88270-03-4.

23. STANĚK, L. – NEVRKLA, P. – JANKOVÝCH, L. – ZEMÁNEK, T. (2023). Rate of chainsaw vibrations in laboratory conditions and level of chainsaw noise at different distances. *Baltic Forestry*, 29(2), id638. <https://doi.org/10.46490/BF638>
24. Sténia a.s. Dostupné na internete: <https://www.stihl.com/default.aspx>
25. SUCHOMEL, J. – SLANČÍK, M. – GEJDOŠ, M. *Obsluha prenosnej reťazovej píly* [online]. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. ISBN 978-80-228-2306-7.
26. ŠMELKO, Š. *Dendrometria*. 2. uprav. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2007. ISBN 978-80-228-1828-5.
27. TOMCZAK, K. – NASKRENT, B. Work Efficiency of Battery-Powered Chainsaws during the Commercial Thinning in the Young Pine Stand. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 22, 18. <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13052>
28. TŮMA, J. *Aku reťazové píly: Nástup akumulátorových reťazových pil* [online]. 2017. Dostupné na internete: <http://www.toolscomp.cz/technologie/>

**Kontaktné údaje:**

Ing. Dominik Gretsch  
Doc. Ing. Martin Lieskovský. PhD.  
Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií  
Lesnícka fakulta  
Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24  
960 01 Zvolen  
Slovenská republika  
Tel. kontakt: +421908589406  
E-mail: [dodo.gretsch@gmail.com](mailto:dodo.gretsch@gmail.com)  
E-mail: [lieskovsky@tuzvo.sk](mailto:lieskovsky@tuzvo.sk)



# PÔDNA RESPIRÁCIA A JEJ KOMPONENTY V HORSKOM SMREKOVOM LESE POD VPLYVOM MIKROKLIMATICKÝCH FAKTOROV

Ing. Soňa GRENČÍKOVÁ

**GRENČÍKOVÁ, S.: Pôdna respirácia a jej komponenty v horskom smrekovom lese pod vplyvom mikroklimatických faktorov.** Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

## ABSTRAKT

Pôdna respirácia je jedným z kľúčových procesov v uhlíkovom cykle na Zemi. Ročne sa ňou do atmosféry uvoľní približne 100 (Gt) uhlíka. Tento proces je výsledkom autotrofnej a heterotrofnej respirácie a je ovplyvnený viacerými faktormi, ktoré v podmienkach meniacej sa klímy naberajú na význame. Zvýšená pozornosť sa emisii uhlíka z pôdy venuje najmä preto, že v pôde je až 2 x viac C ako v atmosfére.

Cieľom predkladanej práce je stanoviť množstvo emitovaného CO<sup>2</sup> z pôdy dvoma nezávislými metódami, porovnať intenzitu autotrofnej a heterotrofnej respirácie, identifikovať faktory ktoré najviac vplyvajú na intenzitu pôdnej respirácie a stanoviť časovo-priestorovú variabilitu pôdnej respirácie v dospelom horskom smrekovom lese vo Vysokých Tatrách. Na sledovanie množstva emitovaného CO<sup>2</sup> z pôdy sme použili uzatvorenú komorovú metódu s dvoma variantmi - manuálnu a automatickú. Manuálne meranie sme robili opakovane v 14 dňovom intervale od apríla do novembra na 34 označených bodoch na dvoch plochách. Automatické meranie prebiehalo kontinuálne od mája do septembra. V oboch prípadoch sme použili IR detektory Vaisala. Na separáciu auto a heterotrofnej zložky pôdnej respirácie sme na výskumných plochách pre dlhodobý výskum založili tzv. trenchy. Prostredníctvom vykopaných rýh a vložení fólií proti prerastaniu koreňov okolo výskumných plôšok 2 x 1 m sme prerušili živé korene a tak eliminovali autotrofnú respiráciu. Hodnoty pôdnej respirácie v lesnom poraste sa pohybovali od 0,18 do 0,8 Priemerne 0,52. V trenchoch hodnoty od 0,26 do 0,54. Priemerné hodnoty manuálneho a automatického merania boli takmer identické. Ambulantné aj automatické meranie potvrdili výraznú sezónnu dynamiku pôdnej respirácie. Najviac C bolo emitovaného v letných mesiacoch. Denná dynamika emisie CO<sup>2</sup> sa výrazne menila v priebehu roka s výrazne modifikovaným stavom vegetácie. Kľúčovým faktorom pre veľkosť pôdnej respirácie bola teplota pôdy (R<sup>2</sup>= 0,9). Vlhkosť sa ako významnejší faktor prejavila v období s deficitom zrážok. Nízka pôdna vlhkosť podmienila pokles celkovej respirácie (auto a heterotrofnej). Na základe zistených údajov o emitovanom uhlíku vyhodnocujeme sezónnu a dennú dynamiku pôdnej respirácie a jej vzťah k mikroklimatickým faktorom, ktoré sú teplota a vlhkosť pôdy. Výsledky našej práce naznačujú, že v skúmanom horskom smrekovom lese vo Vysokých Tatrách je hlavným faktorom toku CO<sup>2</sup> práve teplota pôdy, R<sup>2</sup> dosahoval hodnoty od 0,743 do 0,9437. Kým pri vlhkosti hodnoty korelačného koeficientu R<sup>2</sup> boli od 0,1134 do 0,4621. Taktiež, z výsledkov nášho výskumu vyplýva, že heterotrofná respirácia tvorí menšiu časť celkovej pôdnej respirácie, výnimky môžu byť spôsobené dlhším obdobím bez zrážok.

**Kľúčové slová:** Pôdna respirácia, sekvestrácia uhlíka, autotrofná respirácia, heterotrofná respirácia, meranie CO<sup>2</sup>

## 1. Úvod a problematika

V súčasnosti sa venuje veľká pozornosť prítomnosti CO<sub>2</sub> v atmosfére, a to z dôvodu, že ide o jeden z hlavných skleníkových plynov. Rastúca koncentrácia CO<sub>2</sub> v dôsledku ľudskej činnosti sa považuje za hlavný faktor klimatických zmien. V rámci uhlíkového cyklu zohráva významnú úlohu respirácia pôdy, ktorá vedie k uvoľňovaniu CO<sub>2</sub> do atmosféry.

Respirácia pôdy má schopnosť ovplyvniť klimatické zmeny, pretože CO<sub>2</sub>, ktorý sa pri tomto procese uvoľňuje, patrí medzi najdôležitejšie skleníkové plyny (LUO a ZHOU, 2006). Prostredníctvom fotosyntézy drevín a ďalších rastlín lesný ekosystém viaže atmosféricky uhlík. Vďaka tejto schopnosti sa časť uhlíka prijatého rastlinami stáva súčasťou ich tiel, následne cez opad, mŕtve drevo (vo forme odumretých zvyškov) sa dostáva na pôdu a do pôdy. Jedinečnou schopnosťou drevín je ich dlhodobý hrúbkový rast, na základe čoho sú schopné objem v nich viazaného uhlíka dlhodobo zvyšovať. Vyšší obsah uhlíka je spravidla v lesných pôdach ako v nelesných a dokáže tam pretrvávajúť desiatky až stovky rokov. Rôzne výskumy ukazujú, že lesné ekosystémy absorbujú približne 45% z celkového terestrického organického uhlíka, ktorý sa nachádza v lesnej biomase a týmto spôsobom znižujú množstvo CO<sub>2</sub> v atmosfére (MUND, 2004, KAPUSTA, 2021). Lesné porasty zohrávajú významnú úlohu v znižovaní emisií skleníkových plynov prostredníctvom sekvestrácie uhlíka (FLEISCHER, 2020).

### 1.1. Globálny cyklus a cyklus uhlíka s dôrazom na pôdnu respiráciu

Život na Zemi je poháňaný slnečnou energiou, ktorá sa k nám dostáva vo forme slnečných lúčov. Časť z nich sa odrazí od atmosféry, zvyšná časť dopadá na povrch Zeme. Následne sa takto prijatá energia postupne vracia naspäť do vesmíru formou tepelného žiarenia. Oxid uhličitý je jedným z hlavných skleníkových plynov, ktoré spolu s ďalšími ako je metán, vodná para, N<sub>2</sub>O, ozón a freóny prispievajú ku globálnemu otepľovaniu planéty. Mechanizmus skleníkového efektu spočíva v ich schopnosti absorbovať infračervené žiarenie, ktoré je vyžarované zemským povrchom a následne udržiavať teplotu spodnej vrstvy atmosféry a povrchu Zeme. Podiel každého skleníkového plynu na celkovom skleníkovom efekte nie je len závislý od jeho koncentrácie, ale aj od jeho schopnosti absorbovať a emitovať tepelné žiarenie, ako aj od jeho trvanlivosti v atmosfére. Podľa posledných správ Medzivládneho panelu pre klimatické zmeny (IPCC) sa odhaduje, že oxid uhličitý prispieva k skleníkovému efektu približne 26% (HOUGHTON, 2001).

Koncentrácia uhlíka na Zemi prirodzene fluktuuje. Jeho zastúpenie v atmosfére bolo nižšie len v dobách ľadových inak sa hýbe medzi 200-250 ppm (počet častíc v milióne, inak povedané medzi miliónom molekúl vzduchu je 200 až 250 molekúl CO<sub>2</sub>), tieto čísla vieme z vrtoŕ do ľadovcov. Momentálne je súčasná koncentrácia nad 400 ppm a ďalej

rastie, čo môže byť dôsledkom antropogénnej činnosti a zvýšenou spotrebou fosílnych palív.

Lesné ekosystémy ukladajú asi 45% uhlíka a sú prevládajúcou zložkou suchozemského ekosystému. Schopnosť lesov sekvestrovať uhlík závisí od ich štruktúry a zdravotného stavu. Významne prispievajú k regionálnym a globálnym uhlíkovým cyklom. Preto ich môžeme označovať ako zásobárne uhlíka. Avšak ich schopnosť sekvestrovať uhlík je priamo alebo nepriamo oslabovaná globálnymi klimatickými zmenami a dlhodobými ľudskými zásahmi (GUAN et al., 2023).

Pôdna respirácia je kľúčovým aspektom v cykle uhlíka a dynamike atmosféry. Globálne dochádza k výmene CO<sub>2</sub> medzi oceánmi, zemskou kôrou, biosférou a atmosférou. Rastliny pohltia 120 Pg C z atmosféry, no cez respiráciu uvoľnia podobné množstvo späť. Oceány absorbujú 92 Pg C, pričom uvoľňujú späť 90,6 Pg C (SABINE et al., 2003). Pôda hrá dôležitú úlohu v ukladaní uhlíka, no neskôr môže tento uhlík opäť uniknúť do atmosféry. Množstvo uhlíka v lesoch a pôdach sa odhaduje na 1146 PG C. Respirácia ovplyvňuje ekosystémovú produkciu a cyklus uhlíka začína fotosyntézou, pri ktorej sa CO<sub>2</sub> premieňa na organické zlúčeniny. Časť tohto uhlíka sa neskôr uvoľňuje späť do atmosféry cez respiráciu rastlín. Respirácia je rozdelená na autotrofnú (nadzemná a podzemná) a heterotrofnú (mikrobiálna) (TRUMBORE et al., 1996, DAVIDSON et al., 2000). Rýchlosť odtoku CO<sub>2</sub> z pôdy závisí od teploty, pričom globálne otepľovanie môže zvýšiť tok uhlíka z pôdy a zmeniť ekosystémy z úložísk uhlíka na jeho zdroje (COX et al., 2000).

## **1.2. Autotrofná respirácia**

Autotrofnou respiráciou označujeme respiráciu rastliny, ktorá prebieha v jej celej nadzemnej a aj podzemnej časti. Autotrofné organizmy sú schopné produkovať energeticky bohaté látky (cukry) prostredníctvom fotosyntézy, ktorá je spotrebávaná pri raste nového rastlinného tkaniva a pre udržanie živého tkaniva (LUO A ZHOU, 2006).

## **1.3. Heterotrofná respirácia**

K heterotrofnej respirácii dochádza pri rozklade organickej hmoty v pôde za pôsobenia mikrobiálnych organizmov. Týmto procesom organizmy získavajú energiu rozkladom organických zlúčenín produkovaných inými živými organizmami, pretože heterotrofné organizmy nie sú schopné produkovať svoju vlastnú potravu prostredníctvom fotosyntézy, namiesto toho využívajú konzumáciu inej organickej hmoty (rastlín, zvierat, húb a baktérií). Heterotrofné dýchanie je jednou z primárnych mechanizmov, prostredníctvom ktorých suchozemské ekosystémy uvoľňujú CO<sub>2</sub> do atmosféry (NISSAN et al., 2023).

#### **1.4. Faktory podmieňujúce rýchlosť pôdnej respirácie**

Respirácia je citlivá na okolité podmienky, najmä na teplotu a vlhkosť. Autotrofná respirácia je viac ovplyvňovaná teplotou vzduchu, zatiaľ čo heterotrofná respirácia je ovplyvňovaná teplotou a vlhkosťou pôdy (GOULDENA et al., 1996).

##### **1.4.1. TEPLOTA**

Teplota má významný vplyv na rýchlosť respirácie ekosystémov, s globálnym otepľovaním sa zvyšuje aktivita respiračných procesov. Tento nárast vedie k uvoľňovaniu väčšieho množstva CO<sub>2</sub> do atmosféry, čo ovplyvňuje terestrické ekosystémy a ich schopnosť viazať uhlík. Vyššie teploty podporujú rastlinné metabolické procesy a aktivitu mikroorganizmov, čo zvyšuje rýchlosť rozkladu organických látok a tým aj respirácie (VALENTINI et al., 2000).

Pri nižších teplotách klesá aktivita enzýmov, zatiaľ čo pri vyšších teplotách je respirácia pôdy závislá od množstva dostupného substrátu (DAVIDSON et al., 2006).

##### **1.4.2. VLHKOSŤ**

Vplyv vlhkosti na respiráciu ekosystémov je komplexný a závisí od mnohých faktorov, ako je lokalita, druh pôdy, teplota a ďalšie. Očakávané globálne otepľovanie môže ovplyvniť hydrologický cyklus a množstvo zrážok, čo má priamy dopad na vlhkosť pôdy a respiráciu. To následne ovplyvňuje ukladanie uhlíka v pôde v budúcnosti (DENG, DONGZHOU et al., 2009).

Štúdia od REICH et al. (2023) skúmala vplyv otepľovania na pôdnu respiráciu v boreálnych lesoch v závislosti od pôdnej vlhkosti. Zistili, že pri extrémne suchej pôde (10%) otepľovanie má malý alebo negatívny vplyv. Naopak, pri vyššej vlhkosti pôdy má otepľovanie pozitívny vplyv na pôdnu respiráciu. Extrémne vlhké pôdy však môžu obmedziť prístup kyslíka pre pôdne mikroorganizmy, zatiaľ čo extrémne suché pôdy môžu inhibovať rast rastlín a mikroorganizmov.

#### **1.5. Princíp merania pôdnej respirácia**

Využívanie respiračných komôr predstavuje jednu z metód na sledovanie plynnej výmeny medzi pôdou a atmosférou, vrátane produkcie CO<sub>2</sub>. Základným princípom respiračných komôr je umiestnenie uzavretej komory nad povrchom pôdy, pričom vzduch cirkuluje medzi komorou a infračerveným senzorom, ktorý zaznamenáva koncentráciu CO<sub>2</sub>. Po umiestnení komory nad povrch pôdy začne koncentrácia CO<sub>2</sub> stúpať v dôsledku jeho uvoľňovania z pôdy. Množstvo absorbovaného infračerveného žiarenie je priamo

úmerné koncentracii CO<sub>2</sub>. Týmto spôsobom je možné monitorovať dynamiku respirácie pôdy, ktorá zahŕňa procesy ako rozklad organických látok mikroorganizmami v pôde a uvoľňovanie CO<sub>2</sub> ako vedľajšieho produktu (RYAN a LAW, 2005).

Existujú automatické a manuálne metódy meraní respirácie pôdy, pomocou respiračných komôr.

Manuálne merania pôdnej respirácie sa vykonávajú pomocou prenosných automatizovaných gazometrických systémov alebo manuálnych systémov, ktoré nemerajú nepretržite. Pri manuálnych meraniach je dôležité, aby okraje komory boli tesne priliehajúce k povrchu pôdy, aby sa zabránilo úniku vzduchu a zabezpečila presná meranie (FIELD et al., 1989). Ďalšou možnosťou je vytvoriť ohraničený povrch pôdy plastovým kruhom zasadeným do pôdy niekoľko centimetrov pod povrchom, čo minimalizuje difúziu CO<sub>2</sub> z okolitej pôdy a umožňuje výpočet toku CO<sub>2</sub> na jednotkovú plochu.

Automatické komory fungujú ako uzavretý gazometrický systém, čo znamená, že počas merania nedochádza k výmene vzduchu s okolím. Nainštalované automaty merajú pôdnu respiráciu kontinuálne. Otvárajú a zatvárajú komoru v 5-minútových intervaloch. Záznam koncentrácie CO<sub>2</sub> (v ppm), teploty a vlhkosti pôdy je registrovaný v intervaloch 10 sekúnd. Z rýchlosti nárastu koncentrácie CO<sub>2</sub> v uzavretej komore, objemu vzduchu a plochy pôdy sa vypočíta tok CO<sub>2</sub> z pôdy do atmosféry. (JANOUSH et al., 2004).

## 2. Ciele práce

Hlavným cieľom našej práce je stanoviť pôdnu respiráciu v roku 2023 v dospelých smrekových porastoch na trvalej výskumnej ploche (TVP) vo Vysokých Tatrách.

Pri riešení tejto problematiky budeme ďalej hodnotiť

- Rozdiel v množstvo emitovaného CO<sub>2</sub> z pôdy pri použití dvoch nezávislých metód (manuálne ambulantné a automatizované kontinuálne meranie) pomocou uzavretých komôr.
- Podiel jednotlivých komponentov, t.j auto a hetero zložky na celkovú pôdnu respiráciu,
- priestorovú a časovú variabilitu pôdnej respirácie a jej kľúčové mikroklimatické faktory.

## 3. Metodika práce

### 3.1. Charakteristika územia

Pôdnu respiráciu sledujeme na plochách určených pre dlhodobý ekologický výskum (LTER) v TANAP-e. Porasty prevažne tvoria spoločenstvá smrekovcových smrečín, s dominanciou smreka a s variabilnou štruktúrou z dôvodu historických udalostí

(pastva, požiare) a lesníckej činnosti. Vek porastotvorných stromov sa pohybuje medzi 60 a 140 rokmi. V podraze dominujú acidiofilné druhy smrekového lesa (*Vaccinium myrtillus*, *Calamagrostis villosa*, *Deschampsia flexuosa* a *Pleurozium schreberi*). Pôdy v týchto oblastiach sú prevažne plytké a skeletnaté podzolované kambizeme na glaciálnych morénach s veľmi kyslým pH a nízkym obsahom bázických katiónov (Fleischer, 2013)

### 3.2. Meranie pôdnej respirácie

Pôdnu respiráciu sme stanovili pomocou metódy uzavretej komory, v ktorej sme pomocou IR detektora sledovali zmenu koncentrácie CO<sub>2</sub> po umiestnení na povrch pôdy počas cca 5 min.. Použili sme dva spôsoby - manuálny a automatický.

- Manuálne merania, komora s rozmermi 10 cm priemer, 10 cm výška. V nej sonda 252 a dataloger Mi70. Meranie na sieti bodov, vybraných metódou stratifikácie výskumnej plochy. Frekvencia 14 dní, čas merania cca 5 min, frekvencia záznamu 10 s.
- Automatické merania, zariadenie na nepretržité meranie, zdvíhanie a kladenie komory na tom istom mieste . Sonda GMP 343.
- Dizajn meracích bodov na pôdnu respiráciu

Výber počtu a polohy meracích bodov vychádzal z vopred uskutočnenej meracej kampane, kde sa na 100 bodoch v sieti 10x10m zistili hodnoty pôdnej respirácie. Cieľom bolo rozdeliť (stratifikovať) výskumnú plochu s výmerou cca 1 ha na relatívne homogénne jednotky, ideálne 2 až 3. Merania sme uskutočňovali na dvoch nezávislých plochách (plocha A,B). Následne bolo náhodne vybraných 20 bodov v každej z týchto jednotiek pre opakované merania. Tieto body sú identifikované a označené plastovými valčekmi s priemerom 10 cm a výškou 4 – 5 cm, ktoré sú zakopané do zeme tak, aby horný okraj valčeka bol na úrovni povrchu pôdy

### Separácia heterotrofnej respirácie

V každom stratum sú pripravené objekty na oddelenie komponentov pôdnej respirácie pomocou metódy trenchingu. Táto metóda je vykonaná vykpaním ryhy so šírkou 30 cm a hĺbkou 70 cm okolo obdĺžnika o veľkosti 2 x 1 m. Týmto spôsobom sú prerušené korene okolitých stromov a vloženie polopriepustnej fólie sa zabráni ich prerastaniu do experimentálneho pedónu. Takto je zabezpečená eliminácia vplyvu autotrofnej respirácie na celkovú pôdnu respiráciu. Tok CO<sub>2</sub> z takto izolovaného pôdneho bloku je výsledkom iba mikrobiálnej aktivity – heterotrofnej respirácie. Každý trench je vybavený tromi plastovými valčekmi na meranie pôdnej respirácie.

## Meranie teploty a vlhkosti pôdy

Teplota a vlhkosť pôdy sú považované za kľúčové faktory pre emisiu CO<sub>2</sub> z pôdy. Monitorovali sme vlhkosť pôdy pomocou sondy ML2x Delta theta UK umiestnenej na štyroch rôznych miestach počas merania respirácie pri každom meranom bode. Zo získaných údajov sme vypočítali priemer pre každý bod. Teplotu sme sledovali pomocou termometra ThermoLab Nemecko umiestneného v čase merania respirácie do 2 a následne do 10 cm.

Automatické meranie pre plochu A prebiehalo od 19.5.2023 do 30.9.2023. Manuálne merania sme striedavo vykonávali na ploche A a ploche B v období od 23.4.2023 do 10.11.2023.

### 3.3. Spracovanie dát

#### 3.3.1. VÝPOČET TOKU ZO ZMENY KONCENTRÁCIE

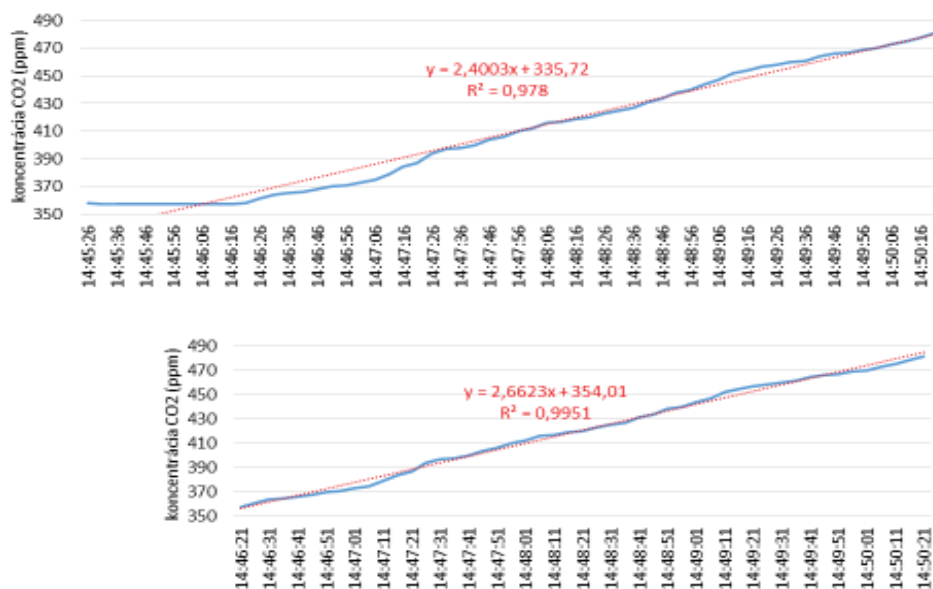
Tok CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>h) sme stanovili zo zmeny koncentrácie získanej s meracím zariadením Vaisala. V prvom kroku sa z nameraných údajov stanovil úsek s lineárnym nárastom koncentrácie. Obyčajne prvých 30 sekúnd merania je poznačených zmenou podmienok a rozkolísanou koncentráciou CO<sub>2</sub>. Po stabilizácii tlakových pomerov je rast CO<sub>2</sub> v uzavretej komore lineárny. Príklad na obr. 1. Hore sú všetky zaznamenané údaje, dole sú len tie, kedy rast CO<sub>2</sub> bol lineárny.

Proces zahŕňa výber intervalu s postupným nárastom koncentrácie (pri uzavretej komore) a použitie lineárneho trendu na identifikáciu spojitej série hodnôt s dôveryhodným trendom (pri R<sup>2</sup> > 0,9). Extrémne hodnoty sú z výpočtu vylúčené, pričom sa zohľadňuje, že tieto hodnoty môžu vzniknúť na začiatku alebo na konci merania, napríklad v prípade nesprávne nasadenej komory na podložku.

Na výpočet toku CO<sub>2</sub> (umol/m<sup>2</sup>/s) použijeme stavovú rovnicu pre ideálny plyn (Drewitt et al., 2002) v tvare:

$$F = \frac{P \cdot V \cdot \Delta CO_2}{R \cdot T \cdot A}$$

kde: F = látkové množstvo, P = tlak vzduchu, V = objem komory, ΔCO<sub>2</sub> = minútový nárast koncentrácie CO<sub>2</sub>, R = univerzálna plynová konštanta, T = teplota vzduchu, A = plocha komory.



**Obrázok 1** Ukážka výberu lineárneho nárastu koncentrácie CO<sub>2</sub> pre výpočet toku zo záznamu manuálneho merania v 5 sekundovom intervale, 3.6.2023

**Figure 1** Sample selection of linear increase in CO<sub>2</sub> concentration for calculating the flux from manual measurement records at 5-second interval, June 3, 2023

### Priestorová variabilita

Na zistenie sme použili 2 plochy A, B a sieť cca 20 bodov, ktoré boli umiestnené do relatívne homogénnych jednotiek.

Na stanovenie optimálneho dizajnu merania pôdnej respirácie sme použili metódu krigingu. Kriging je pokročilá geoštatistická metóda, ktorá sa zakladá na teórii regionálnej zmeny (GUO et al. 2010). Účelom bolo rozdeliť TVP na relatívne homogénne jednotky a podľa ich veľkosti zvoliť primeraný počet monitorovaných bodov. Pri krigingu sa predpokladá, že priestorová variácia nie je úplne náhodná, ani úplne určená, ale je ovplyvňovaná priestorovými autokorelačnými faktormi, posunmi a náhodnou chybou. Princíp krigingu spočíva v kombinácii vážených hodnôt známych premenných v okolí neznámeho miesta na základe ich vzájomných korelácií. Váhy sú určené na základe kovariančných vzťahov medzi známymi premennými. Týmto spôsobom kriging zohľadňuje priestorovú štruktúru dát a snaží sa minimalizovať varianciu odhadovaných hodnôt. (GUO et al., 2023).



### 3.3.2. ČASOVÁ DYNAMIKA

Časové zmeny sme sledovali na dvoch úrovniach. 1. Zmeny v 14 dňových intervaloch na sieti cca 38 fixovaných bodoch manuálnym meraním 2. Zmeny pôdnej respirácie v 10 min intervaloch prostredníctvom automatickej komory s kontinuálnym záznamom. Merania v teréne boli uskutočnené v období od apríla do novembra 2023. Na ploche A bol nainštalovaný automat, ktorý nepretržite meral od 19. mája do 30. septembra 2023. Manuálne merania sa uskutočňovali pravidelne na plochách A a B v dvojtýždňových cykloch, a to od 23. apríla do 10. novembra 2023. Dvojtýždňovými cyklami myslíme, že merania sme uskutočňovali striedavým spôsobom, jeden týždeň na ploche A, ďalší týždeň na plochu B. Na základe týchto meraní sme monitorovali sezónny a denný chod pôdnej respirácie. Manuálne merania sme prevažne uskutočňovali v časovom okne od 10:00 do 15:00, s predpokladom, že zachytíme priemernú dennú hodnotu.

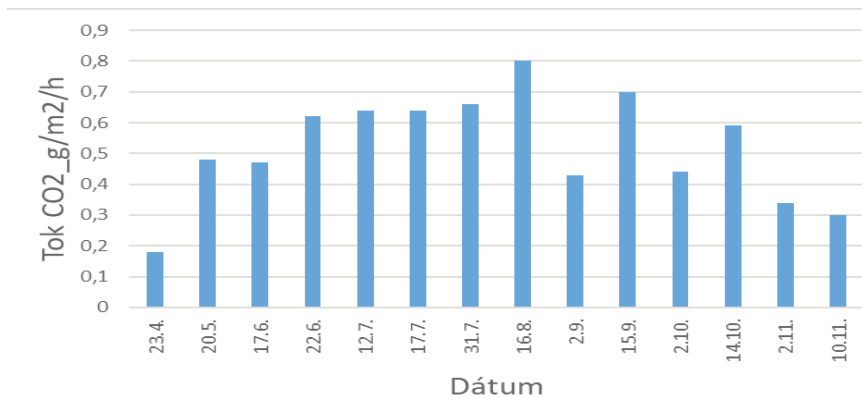
### 3.3.3. REGRESNÁ ANALÝZA

Regresná analýza je štatistická metóda, ktorú sme použili na skúmanie vzťahu medzi nezávislými premennými a závislou premennou. V prípade pôdnej respirácie je nezávislou premennou teplota a vlhkosť pôdy, zatiaľ čo závislou premennou je samotná pôdna respirácia. Regresná analýza nám umožňuje zistiť, do akej miery a akým spôsobom nezávislé premenné ovplyvňujú závislú premennú.

## 4. Výsledky

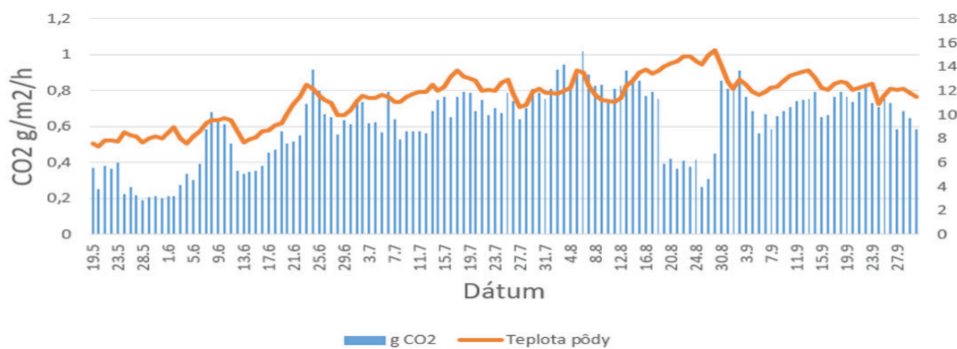
### 4.1. Pôdna respirácia

Priemernú respiráciu zo 17 bodov počas 14 kampaní uvádzame na obr. 2. Na ploche A prebehlo 8 a na ploche B 7 meraní. Z priebehu týchto hodnôt vyplýva výrazný sezónny chod pôdnej respirácie. Začiatkom vegetačného obdobia, v apríli sme namerali najnižšie hodnoty  $0,18 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Pôdna respirácia kulminovala od polovice júla do polovice septembra s maximálnou hodnotou  $0,8 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Ku koncu vegetačného obdobia hodnota respirácie dosahovala  $0,3 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .



**Obrázok 2** Priemerné hodnoty pôdnej respirácie v meracích termínoch z manuálnych meraní  
**Figure 2** Average soil respiration values at measurement times from manual measurements

Kontinuálne merania automatom, ktoré ukazujú postupné zvyšovanie pôdnej respirácie od začiatku vegetačného obdobia vidíme na obr. 3. Toto meranie ukazuje, že pôdna respirácia stúpala pomerne rovnomerne so stúpaním teploty a podobne ako teplota klesala, klesala aj respirácia pôdy. Začiatkom vegetačného obdobia sme namerali najnižšiu hodnotu pôdnej respirácie 0,19 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Najvyššia hodnota pôdnej respirácie 1,02 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, bola nameraná v polovici letnej sezóny 6.8.2023. Automatické merania boli ukončené 30.9.2023 kedy pôdna respirácia dosahovala hodnotu 0,58 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

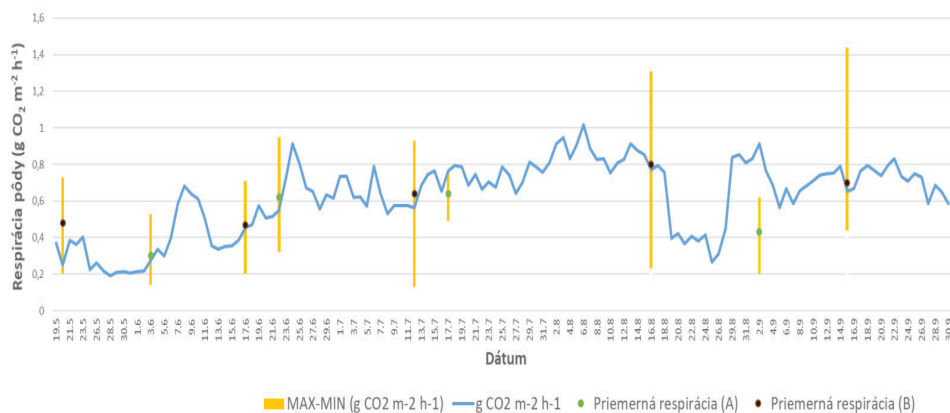


**Obrázok 3** Priebeh denného toku CO<sub>2</sub> z automatického merania  
**Figure 3** Daily CO<sub>2</sub> flux from automatic measurements

#### 4.4. Porovnanie automatického a manuálneho merania pôdnej respirácie

Pre identifikáciu podobnosti, resp. odchýlky sme použili dva prístupy merania, ako uvádzame na obr. 4, automatické a manuálne merania na oboch výskumných plochách. Výsledné priemerné hodnoty z automatického merania (lína) s manuálnymi meraniami dosiahli takmer podobné hodnoty. Porovnanie na tomto obrázku sme vykonali zvlášť pre plochu A a plochu B. Denné priemerné hodnoty sú takmer rovnaké ako hodnoty získané z automatu.

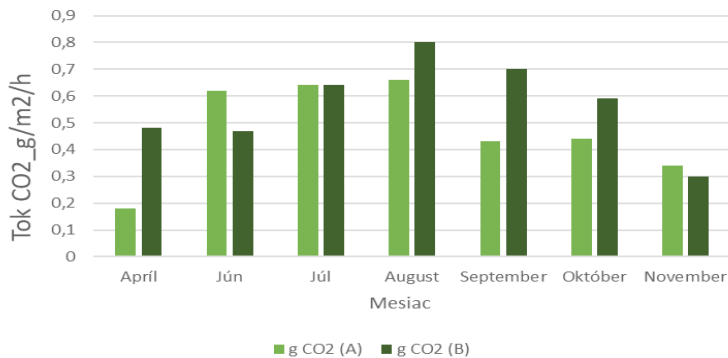
Automatické merania prebiehali kontinuálne počas celých dní od 19.5 – 30.9. 2023, v 10sekundových intervaloch. Manuálne merania sa uskutočňovali v jednotlivých dňoch počas časového okna od 10:00 – 15:00. Z výsledkov môžeme vyvodit', že počas tejto doby sa nám podarilo zachytiť vrchol pôdnej respirácie. Priemerné hodnoty z manuálnych meraní sa zhodujú s priemernými hodnotami automatického merania.



**Obrázok 4** Porovnanie automatického a manuálneho merania pôdnej respirácie  
**Figure 4** Comparison of automatic and manual soil respiration measurements

#### 4.3. Porovnanie manuálnych meraní na ploche A a B

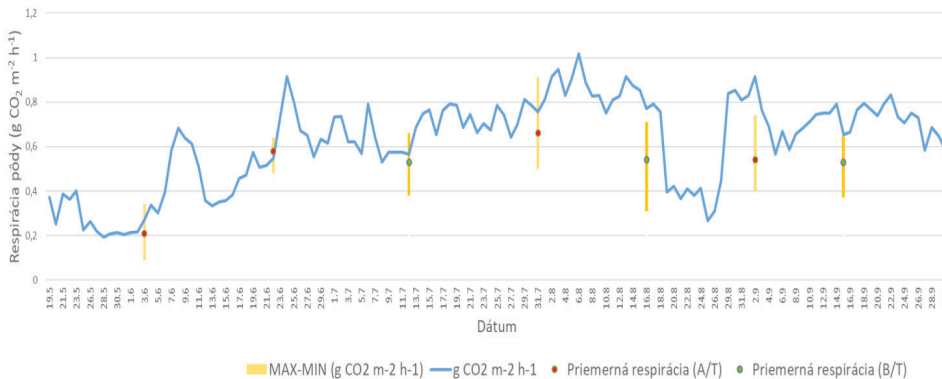
Porovnanie intenzity pôdnej respirácie získanej manuálnymi meraniami na dvoch skúmaných TVP vidíme na obr. 5. Najväčší rozdiel v apríli kedy na ploche A pôdna respirácia dosahovala 0,18 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a na ploche B 0,48 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Hodnoty boli vyrovnané v mesiaci júl kedy na oboch plochách nameraná hodnota pôdnej respirácie bola 0,64 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Nasledujúce väčšie rozdiely počas celej doby meraní sa v konečnom dôsledku celkom vyrovnali a priemer pôdnej respirácie dosiahol na ploche A 0,47 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> a na ploche B 0,57 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.



**Obrázok 5** Porovnanie priemerných hodnôt pôdnej respirácie medzi plochou A a plochou B  
**Figure 5** Comparison of average soil respiration between Area A and Area B

#### 4.4. Porovnanie automatického merania s manuálnym meraním v trenchoch

Porovnanie medzi meraniami pôdnej respirácie z automatického merania a manuálneho merania v trenchoch je zobrazené na obr. 6. Metódou trenchingu sme sa pokúsili zamedziť vplyv autotrofnej respirácie. Jednou z hypotéz bolo, že heterotrofná respirácia tvorí menšiu časť z celkovej pôdnej respirácie ekosystému. Na základe výsledkov môžeme toto tvrdenie potvrdiť, pretože hodnoty heterotrofnej respirácie boli nižšie takmer počas celej doby meraní.

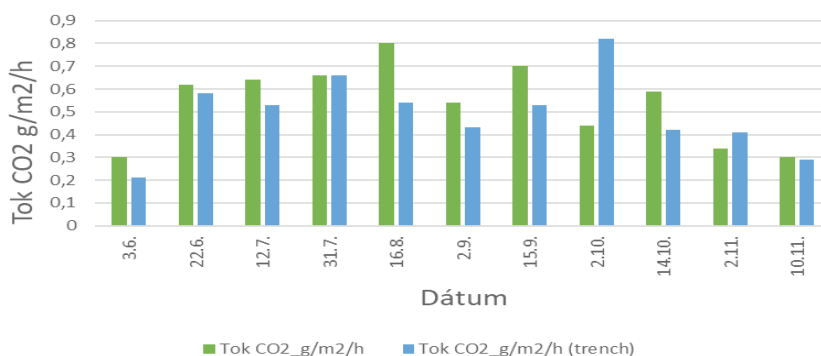


**Obrázok 6** Porovnanie pôdnej respirácie z automatického merania a manuálneho merania v trenchoch

**Figure 6** Comparison of soil respiration from automatic and manual measurements in trenches

#### 4.5. Porovnanie manuálnych meraní pôdnej respirácie s meraniami v trenchoch, heterofna respirácia

Porovnanie priemernej pôdnej respirácie meranej manuálne na TVP a v trenchoch pripravených v nich vidíme na obr. 7. Z výsledkov meraní môžeme konštatovať, že aj keď heterotrofná respirácia tvorila prevažne menšiu časť celkovej respirácie sledovaného ekosystému v horskom smrekovom lese. Výnimkou boli dni v období sucha, vtedy autotrofná respirácia dosahovala nižšie hodnoty ako heterotrofná. Tieto výsledky sa nám podarilo namerať na ploche B, kde mal porast homogénnejšiu štruktúru v porovnaní s plochou A. Dôvodom môže byť, že aj keď teplota pôdy bola pri oboch meraniach okolo 10°C, vlhkosť pôdy bola vyššia práve v trenchoch, kde bol prerušený koreňový systém okolitých drevín rastlín. Vlhkosť v trenchoch bola vyššia ako 30% a mimo nich sa hodnoty vlhkosti pohybovali do 20%.



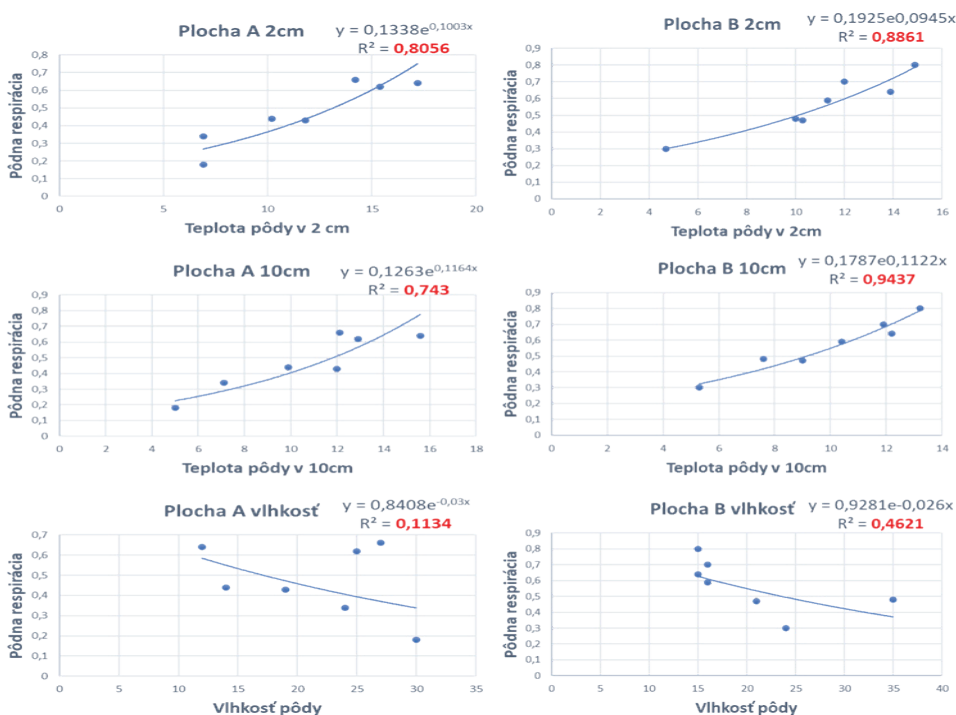
**Obrázok 7** Porovnanie manuálnych meraní pôdnej respirácie v trenchoch a mimo nich  
**Figure 7** Comparison of manual soil respiration measurements inside and outside trenches

#### 4.6. Faktory pôdnej respirácie: teplota a vlhkosť

Rozhodujúcimi faktormi pre veľkosť respirácie sú teplota a vlhkosť pôdy, ktoré sme analyzovali pomocou exponenciálnej závislosti medzi teplotou pôdy v hĺbkach 2 a 10 cm a vlhkosťou, ktorá bola meraná 4x pri každom bode a následne sme z nej vypočítali priemer. Výsledky ukazujú pozitívny vzťah medzi teplotou pôdy a respiráciou, pričom vlhkosť pôdy dosahovala nízky korelačný koeficient  $R^2$ .

Vzťah medzi pôdnou respiráciou a faktormi (teplota, vlhkosť) pre okamžité ambulantné merania získané manuálne vidíme na obr 8. Na ploche A v hĺbke 2 cm dosiahol korelačný koeficient  $R^2 = 0,805$ , čo značí silnú závislosť medzi teplotou pôdy a respiráciou. Podobný trend bol pozorovaný aj v hĺbke 10 cm, kde sme dosiahli  $R^2 = 0,743$ . Naopak, pôdna

vlhkosť vykazuje nízku závislosť s veľkosťou respirácie, kde korelačný koeficient dosiahol hodnotu  $R^2 = 0,113$ . Na ploche B, sme identifikovali ešte vyššiu exponenciálnu závislosť medzi teplotou pôdy v hĺbke 10 cm a respiráciou pôdy  $R^2 = 0,944$ , avšak podobne vysoký vplyv sme pozorovali aj v hĺbke 2 cm,  $R^2 = 0,886$ . Vlhkosť pôdy dosahovala vyššie hodnoty v porovnaní s plochou A, avšak jej korelačná závislosť s respiráciou dosahovala stále nižšie hodnoty,  $R^2 = 0,462$ , čo potvrdzuje menej výrazný vplyv na respiráciu pôdy ako teplota



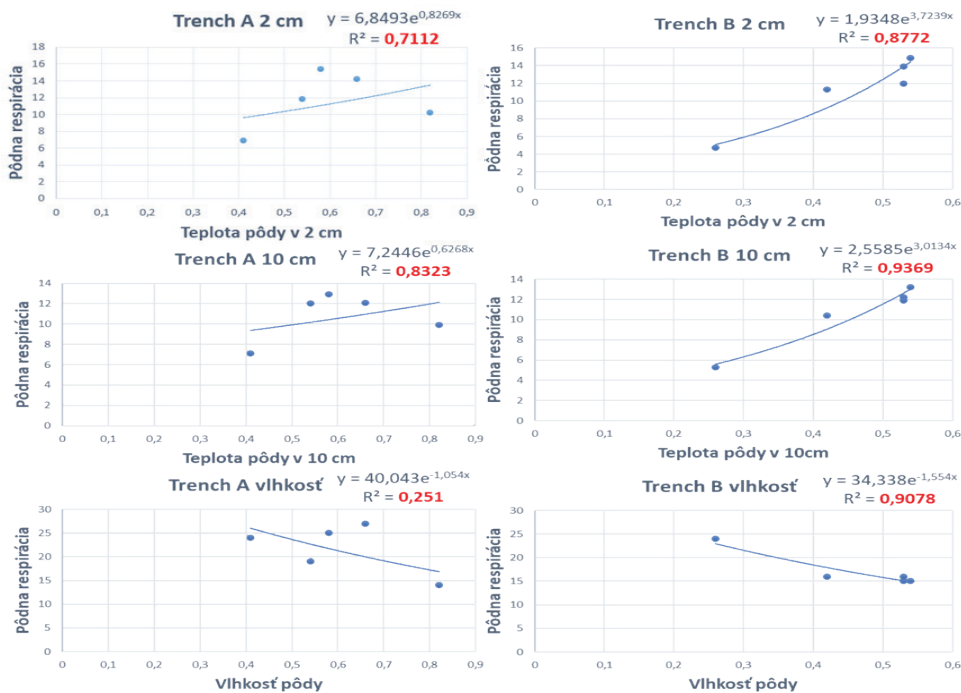
**Obrázok 8** Regresný vzťah medzi teplotou pôdy v 2 a 10cm (°C), vlhkosťou pôdy (%) a pôdnou respiráciou ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )

**Figure 8** Regression equation between soil temperature at 2 cm and 10 cm depth (°C), soil moisture (%), and soil respiration ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )

#### 4.7. Vplyv teploty a vlhkosti pôdy na heterotrofnú respiráciu

Regresný vzťah medzi respiráciou pôdy v trenčoch sledujeme na obr 9. Na ploche A teplota pôdy v hĺbke 2 cm dosiahla korelačný koeficient  $R^2 = 0,7112$ . V hĺbke pôdy 10 cm sme pozorovali podobný trend,  $R^2 = 0,8323$ , čo značí vysokú úroveň závislosti medzi týmito dvoma premennými. Naopak pôdna vlhkosť vykazuje nízku závislosť

s veľkosťou respirácie,  $R^2 = 0,251$ . Na ploche B, v hĺbke 2 cm sme zistili korelačný koeficient  $R^2 = 0,8772$ , zatiaľ čo v hĺbke 10 cm sme dosiahli hodnotu  $R^2 = 0,9369$ . V tomto prípade dosiahla aj vlhkosť pôdy vyššiu korelačnú závislosť  $R^2 = 0,9078$ .



**Obrázok 9** Regresný vzťah medzi teplotou pôdy ( $^{\circ}\text{C}$ ), vlhkosťou pôdy (%) a pôdnou respiráciou ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) v trenchedoch

**Figure 9** Regression equation between soil temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), soil moisture (%), and soil respiration ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) in trenches

## 5. Diskusia

Pôdna respirácia je ekosystémový proces, ktorý uvoľňuje oxid uhličitý z pôdy prostredníctvom respirácie koreňov a vegetácie, mikrobiálnej dekompozície, opadu a organického materiálu. Cieľom práce bolo zistiť pomocou respiračných komôr, automatizovaných a manuálnych závislosť odtoku  $\text{CO}_2$  z pôdy na základe sledovaných mikroklimatických faktorov.

Výsledky z meraní intenzity pôdnej respirácie poukazujú na silnejší vzťah pri teplote pôdy. Od začiatku merania, stúpala pôdna respirácia rovnomerne so stúpaním pôdnej teploty. Vlhkosť pôdy nepreukázala pri týchto meraniach výrazný vplyv. Avšak v auguste sme zaznamenali výrazný pokles, ktorý môže byť spôsobený vysokou pôdnou teplotou

a nedostatkom zrážok v danom období. Rastliny v období sucha a vysokých teplôt znižia svoje fyziologické procesy alebo môžu odumrieť, a zároveň mikrobiálna aktivita v pôde sa zniží pod vplyvom týchto faktorov. Takto môžeme odôvodniť výrazný pokles pôdnej respirácie v čase od 18. do 27. augusta, kedy bola zaznamenaná kombinácia vysokých teplôt a sucha. SUBKE et al.,(2002) vysvetľujú, že vlhkosť pôdy môže ovplyvniť proces respirácie rôznymi spôsobmi. Na jednej strane, keď je obsah vody príliš nízky, môže dochádzať k obmedzeniu uvoľňovania CO<sub>2</sub> z pôdy, čo môže byť spôsobené napríklad suchom. Keďže voda je nevyhnutná pre normálnu metabolickú aktivitu mikroorganizmov v pôde, nedostatok vody môže brániť ich činnosti a tým aj uvoľňovaniu CO<sub>2</sub>. Na druhej strane, keď je obsah vody príliš vysoký, môže dôjsť k obmedzeniu difúzie plynu cez póry v pôde. Tento stav môže viesť k nedostatku kyslíka potrebného pre aeróbný rozklad a tým aj k zníženiu produkcie CO<sub>2</sub> a jeho uvoľňovaniu z pôdy do atmosféry.

Z meraní heterotrofnej respirácie sme zistili, že počas výskumu tvorila prevažne menšiu časť z celkovej respirácie sledovaného ekosystému. Taktiež, RANKIN et al., (2023) poukazujú vo svojej štúdií na výsledky porovnania autotrofnej a heterotrofnej respirácie kedy autotrofná respirácia tvorila až 75% z celkovej respirácie. Avšak počas dlhších období sucha sa príspevok autotrofnej respirácie podstatne znížil. Naopak heterotrofná respirácia rástla s rastúcou teplotou a hĺbkou hladiny vody.

Porovnaním výsledkov z automatického a manuálneho merania sme dospeli k záveru, že hodnoty získané manuálnym meraním sú spoľahlivé, keďže sa takmer zhodujú s hodnotami z automatického merania. Zistené rozdiely pri meraniach boli spôsobené vplyvom vnútornej priestorovej variability daných TVP. Plocha B má homogénnejšiu porastovú štruktúru, oproti ploche A, kde sa striedajú hustejšie a otvorenejšie štruktúry porastu, čo sa odrazilo aj vo výsledkoch. Na základe zistení môžeme tvrdiť, že plocha B je pre dlhodobé sledovanie vybraná správna a jej výsledky sú reprezentatívne. JANOUŠ et al.,(2004) dodávajú, že jednou z nevýhod použitých komôr je len malá vzorka ekosystému alebo len jeho časti, ktorú je možné uzavrieť do respiračnej komory. Preto sa odporúča túto metódu kombinovať s eddy-kovariančným meraním.

## **Záver**

Zistili sme, že meranie pôdnej respirácie komorovou metódou je vhodná a relatívne jednoduchá metóda na zistenie okamžitej emisie CO<sub>2</sub> z pôdy. Výsledky potvrdili, že teplota pôdy za sledované obdobie (apríl – november) mala výraznejší vplyv na emitovanie CO<sub>2</sub> ako vlhkosť pôdy. Pri porovnaní dvoch stanovísk a dvoch metód merania (manuálne ambulantné merania a automatizované kontinuálne) boli výsledky takmer rovnaké. Potvrdilo sa aj, že heterotrofná respirácia tvorí menšiu časť z celkovej respirácie ekosystému.



## Referencie

- Bond-Lamberty, B., Wang, C., & Gower, S. T. (2004). A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration?. *Global Change Biology*, 10(10), 1756-1766.
- Davidson, E. A., Janssens, I. A., & Luo, Y. (2006). On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10. *Global change biology*, 12(2), 154-164.
- Deng, D., Fan, Z., Wang, H., Sun, X., Gao, J., Zeng, D., & Zhang, X. (2009). Influences of soil moisture on soil respiration. *Forest Research, Beijing*, 22(5), 722-727.
- Field, C. B., Ball, J. T., and Berry, J. A. (1989) Photosynthesis, Principles and field techniques. In Plant physiological ecology, field methods and instrumentation (R. W. Pearcy, J. Ehleringer, H. A. Mooney, and P. W. Rundel, eds.), pp. 209–253, Chapman and Hall, New York.
- Fleischer Jr, P., Holko, L., Celer, S., Čekovská, L., Rozkošný, J., Škoda, P., ... & Fleischer, P. (2020). Carbon balance and streamflow at a small catchment scale 10 years after the severe natural disturbance in the Tatra Mts, Slovakia. *Water*, 12(10), 2917.
- Fleischer, P. (2008). Windfall research and monitoring in the High Tatra Mts, objectives, principles, methods and current status. *Contribution to Geodesy and Geophysics*, 38/3, 223–248
- Fleischer, P. (2013) Vplyv prírodných a antropogénnych faktorov na stav a zmeny lesných ekosystémov v TANAPE, habilitačná práca
- Houghton, J.T. Climate change 2001: the scientific basis: contribution of Working Group I to the third assessment report of the Invernonmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2001, ISBN 05-2101495-6, strana 388
- IPCC. (2001) Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change , Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York
- Janouš, D., Urban, O., Pavelka, M., Acosta, M., Havránková, K., Pokorný, R., ... & Klimánková, Z. (2004). Dopad extrémů počasí na tok uhlíku ve smrkovém porostu. *Seminář „Extrémy počasí a podnebí“*, Brno, 11.
- Kapusta, P., 2021. Viazanosť uhlíka lesnými ekosystémami. Dostupné na: [www.enviroportal.sk](http://www.enviroportal.sk).
- Luo, Y., Zhou, X., (2006): Soil Respiration and the Environment. Academic Press, pp.316.
- Mund, M. (2004). Carbon pools of European beech forests under different silvicultural management. *Göttingen: For Waldökosysteme der Universität Göttingen*.
- Rankin, T., Roulet, N., Humphreys, E., Peichl, M., & Järveoja, J. (2023). Partitioning autotrophic and heterotrophic respiration in an ombrotrophic bog. *Frontiers in Earth Science*, 11.
- Ryan, M., G., Law, E., B., 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry* (2005) 73: 3–27.
- Subke, J. A., Reichstein, M., & Tenhunen, J. D. (2003). Explaining temporal variation in soil CO2 efflux in a mature spruce forest in Southern Germany. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(11), 1467-1483.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A. J., Schulze, E. D., Rebmann, C. J. M. E. A. G., Moors, E. J., ... & Jarvis, P. G. (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404(6780), 861-865.

Soil respiration and its components in a mountainous spruce forest under the influence of microclimatic factors

### **Summary**

Soil respiration is an ecosystem process that releases carbon dioxide from the soil through root and vegetation respiration, microbial decomposition, litter, and organic material. The aim of the study was to determine the dependence of CO<sub>2</sub> flux from the soil on observed microclimatic factors using respiratory chambers, both automated and manual.

Chamber-based measurement of soil respiration is a suitable and relatively simple method for assessing immediate CO<sub>2</sub> emissions from the soil. The results confirmed that soil temperature over the study period (April to November) had a more significant influence on CO<sub>2</sub> emissions than soil moisture. In comparison of two locations and two measurement methods (manual measurements and automated continuous measurements), the results were nearly identical. It was also confirmed that heterotrophic respiration represents smaller part of the total ecosystem respiration.

## POŽIAROVOSŤ LESOV A POŽIARNA KLÍMA ZÁPADNÝCH TATIER

Jaroslav ŠKVARENINA<sup>1)</sup>, Milan OSTRIHOŇ<sup>1)</sup>, Lenka MALOVCOVÁ<sup>1)</sup>, Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ<sup>1)</sup>, Martin JANČO<sup>2)</sup> Peter BORSÁNYI<sup>3)</sup>, Ľubomír KORENÝ<sup>1)</sup>, Ilja VYSKOT<sup>4)</sup>

ŠKVARENIA J. *et al.*: Wildfire incidence and fire climatology of the Western Tatras Mts. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

---

### ABSTRACT

The present study investigates the impact of emerging climate change on the risk of wildfires in the mountain forests of the Western Tatras. Analysis of long-term observed climatological data (1961-2023) revealed a significant increase in air temperature and decrease in relative air humidity, leading to aridization of the mountain environment. Evaluation of the fire weather index confirmed this trend and indicated an increasing number of days with high to extreme wildfire danger. For the years 2004 to 2023, we evaluated the wildfire incidence of mountain forests. On average, 81 fires occurred, with the highest number in 2011 (202). There was a highly significant correlation between the number of wildfires and the number of days with high (4) and very high (5) Angstrom Fire Weather Index danger levels ( $p < 0.01$ ). The highest average frequency of wildfires occurred in the spring months of March (18%) and April (34%), with secondary peaks occurring in the summer months of July (8.8%), August (9.5%) and September (7%). Approximately 80% of wildfires occurred between 12 noon and 6 pm local time. The frequency of fires increased during weekend days. The results of this study were obtained under the conditions of the mountain forests of the Western Tatras (Slovak Republic), but have broader applicability to montane temperate and boreal forests. The findings highlight the need for adaptation of forest management and fire protection to new climatic conditions. The study also provides framework management measures for the protection of mountain spruce forests against wildfires.

**Keywords:** occurrence of wildfires, climatic conditions, length of fire seasons, mountain spruce ecosystems, forest protection, Slovak Republic

---

### 1. ÚVOD A PROBLEMATIKA

V období 60tych rokov minulého storočia Slovensko patrilo k územia s nízkym výskytom požiarov lesov (SUROVEC 1989). Klimatické zmeny na Slovensku sú nesporné a ich dôsledky sú čoraz zreteľnejšie. Zvyšujúca sa teplota, extrémne prejavy počasia, ako vlny horúčav, sucho a silné vetry sú toho dôkazom. Meniaci sa režim zrážok, striedanie období sucha a privalových dažďov, spolu s vyššími teplotami a nižšou

---

vlhkosťou, vytvárajú ideálne podmienky pre vznik a šírenie krajinných a lesných požiarov. Lesné požiare sú nielen ničivé pre ekosystémy a biotu, ale majú aj závažné dôsledky pre ľudí a hospodárstvo (ŠKVARENINA *et al.* 2018).

Hlavné príčiny lesných požiarov možno rozdeliť do dvoch kategórií. Prvú označujeme ako **prírodné príčiny**. Patria sem napríklad blesky počas suchých búrok a pri konvektívnom type počasia, ďalej sa uvádza samovznietenie, napríklad pri rozklade rastlinného materiálu. Vo vulkanicky aktívnych regiónoch sa k prírodným príčinám začleňujú aj sopečné erupcie, pri ktorých vyvrhnutá láva a žeravý popol môžu zapáliť vegetáciu. Druhú a u nás najčastejšiu kategóriu tvoria **antropogénne príčiny** (spôsobené človekom), pričom sem konkrétne zaraďujeme napr. nedbalosť (nezahášené ohniská, vyhodené cigarety, turistika, ohňostroje a iné pyrotechnické výrobky). Osobitnú kategóriu tvorí vypaľovanie porastov: (najčastejšie trávnych, resp. aj spaľovanie po ťažbových zvyškov). Ďalšou príčinou bývajú aj technické poruchy (elektrických vedení, lesnej techniky, vlakov, alebo iných zariadení). Žiaľ, niekedy sú požiare zámerne založené z rôznych dôvodov, ktoré sa kategorizuje ako úmyselné podpaľačstvo. Vidíme, že príčiny lesných a krajinných požiarov sú rôznorodé a často sa kombinujú, čo ešte viac zhoršuje situáciu.

**Požiarne klíma** je podľa NWCG (2012) definovaná ako súbor klimatických podmienok, ktoré ovplyvňujú režim lesných požiarov. Predstavujú teda zložený vzorec poveternostných prvkov v priebehu času, ktoré ovplyvňujú správanie sa požiarov v danom regióne. **Počasie** a **klíma** priamo aj nepriamo ovplyvňujú väčšinu aspektov lesných požiarov. Klíma podporuje rast vegetácie tým, že poskytuje dostatočné zrážky, teplotu a slnečné žiarenie. Na druhej strane, počasie zohráva dôležitú úlohu pri vysychaní a horľavosti paliva tým, že podporuje radiačný a konvektívny prenos tepla, evapotranspiráciu a dodáva kyslík do zóny horenia. Počasie a klíma určujú charakteristiky požiarnej sezóny, potenciál vzniku požiaru, miesto vzniku požiaru, správanie požiaru, jeho intenzitu a hasenie, ako aj činnosti pri hasení požiaru (PEREIRA *et al.* 2020). Preto nie je prekvapujúce, že vysoká aktivita požiarov, je spojená s súčasnými anomálnymi atmosférickými podmienkami, konkrétne s termodynamickými a cirkulačnými vzorcami (napríklad vysoká teplota vzduchu, silný horúci a suchý vietor, nízka vlhkosť vzduchu a kumulatívne zrážky) a strednodobými až dlhodobými klimatickými anomáliami (napríklad dlhé obdobia sucha) (OSTRIHOŇ *et al.* 2024).

**Požiarovosť**, resp. **výskyt lesných požiarov** (*wildfire incidence*) sa definujú ako **počet lesných požiarov** (*number of wildfires*) a/alebo **rozsah zhorenej plochy** (*burnt area*) (AGOVINO *et al.* 2021; PEREIRA *et al.* 2024; KAČALA *et al.* 2003). Monitorovaním vzniku požiaru v lese a prírodnom prostredí sa rozumie sledovanie podstaty vzniku a šírenia lesných požiarov, ich priestorových a časových parametrov. Tieto požiare sú často ovplyvňované aj zvláštnosťami terénu. Rovnako ako vegetácia sa vyznačujú geografickou rozmanitosťou. V rámci určitého lesno-klimatického pásma pravdepodobnosť výskytu a vzniku lesného požiaru úzko súvisí s typom krajiny, pôdnymi a hydrologickými a klimatickými

podmienkami územia, charakterom lesnej vegetácie, jej zložením a štrukturálnymi vlastnosťami (CHANDLER *et al.* 1983; VOLOKITINA *et al.* 2008). Geografická variabilita charakteristík požiarov prírodného prostredia je podľa GOLDAMMERA a FURYAEVA (2013) spôsobená: klimatickými vlastnosťami (sezónnosť prírodných požiarov), typom vegetácie a typom lesných podmienok (rozdiely v horľavosti lesa) ako aj zmenami v lese po požiaroch (napr. pyrogénna sukcesia a i.).

Lesné požiare na Slovensku v minulosti postihovali hlavne lesy v nižších vegetačných stupňoch, resp. krasové oblasti s prevahou karbonátových hornín. Od roku 2000 sa ohrozenie lesnými požiaroch rozširuje aj o stredohorské a horské polohy (Spiš, Slovenský raj, Veľká a Malá Fatra, Veporské vrchy a i.). Opakujúce sa víchrice a následné gradácie podkôrneho hmyzu zvyšujú množstvo kalamitného materiálu v horských polohách, ktoré je náchylné na vznietenie a šírenie lesných požiarov (Obr. 1). V posledných dekádach rokov tak evidujeme významný nárast lesných a krajinných požiarov na severnom Slovensku a v našich najvyšších horstvách (KOLEKTÍV PHaZZ 2023; KORENÁ HILLAYOVÁ *et al.* 2023, 2024).

Cieľom predkladanej publikácie bolo posúdiť mieru dopadu nastupujúcej zmeny klímy na potenciál meteorologického požiarneho nebezpečenstva, výskyt lesných a krajinných požiarov v podmienkach horských lesov Západných Tatier. Tiež sformulovať rámcové manažmentové opatrenia na ochranu horských smrekových lesov pred požiaroch z aspektu bezpečnostných vied, lesníctva, ochrany prírody, rekreácie a ekoturizmu.

## 2. METODIKA

Pre predmetné územie Západných Tatier sme použili údaje z klimatologickej stanice Podbanské (972 m n. m.; 49°08'38"S ; 19°54'20"V). Ako doplnkové údaje sme použili dáta z ďalších staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu - SHMÚ (Liptovský Mikuláš- Ondrašová; Nová Polianka, Starý Smokovec a Štrbské Pleso) denné aj mesačné údaje a to pre roky 1961-2023. Zo získaných meteorologických dát sme vypočítali index požiarneho poveternostného nebezpečenstva podľa Angströma v zmysle postupu, ktorý podáva práca ŠKVARENINA *et al.* (2004). Časové rady klimatologických prvkov a charakteristík, ako aj časové rady indexov sucha a požiaroch poveternostných indexov boli vypočítané pomocou lineárnej regresie. Významnosť týchto lineárnych trendov sa testovala pomocou Studentovho t testu podľa postupov, ktoré podávajú ŠMELKO a WOLF (1977) a VILČEK *et al.*, (2016).

Základnú štatistiku požiarov prírodného a lesného prostredia (počet, ich rozloženie podľa mesiacov a počas dňa) v rokoch 2004 – 2023 pre sledovanú oblasť Západných Tatier, sme získali z evidencie Požiarnotechnického a expertízneho ústavu Ministerstva vnútra Slovenskej republiky.



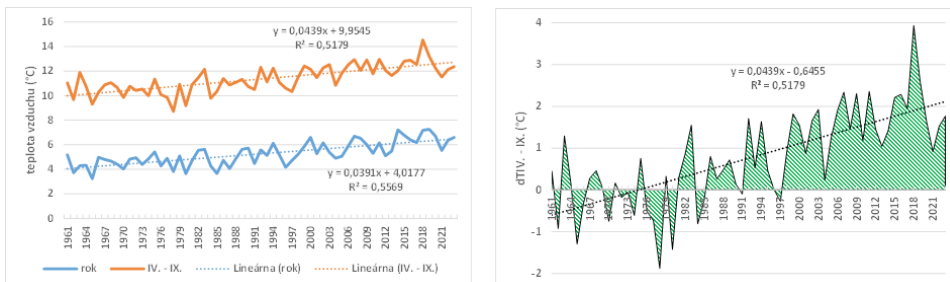
**Obr. 1** Požiare horských lesov významne narastajú približne po roku 2000 hlavne v dôsledku synergického spolupôsobenia otepľovania klímy, veterných a hmyzích kalamít (snímky: Hasičský a záchranný zbor SR).

**Fig. 1** Mountain wildfires have been increasing significantly since around 2000, mainly due to the synergistic interaction of climate warming, windstorm and insect calamities (images: Fire and Rescue Corps of the Slovak Republic).

### 3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

#### 3.1 Zhodnotenie vývoja požiarnej klímy a indexu požiarneho nebezpečenstva v rokoch 1961-2023

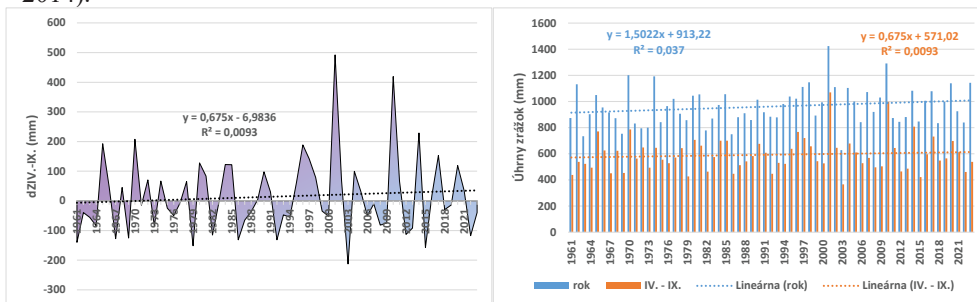
Na základe dlhodobých výsledkov meraní z horskej stanice SHMÚ Podbanské vidíme, že najvýraznejšie zmeny v priebehu uplynulých 63 rokov preukazujú práve teploty vzduchu, a to nielen priemerná ročná teplota vzduchu, ale čo je z hľadiska požiarneho nebezpečenstva významnejšie, aj teplota vo vegetačnom období (resp. teplom polroku) ako to dokumentuje obr. 2. Teplotný nárast v mesiacoch apríl až september sa zvyšuje podstatne rýchlejšie v porovnaní s ročným priemerom (letný polrok nárast o 2,1 °C, ročný priemer o 1,85 °C). Zo štatistického hľadiska majú všetky uvedené teplotné charakteristiky trend vysoko významný ( $p < 0,001$ ). Tento trend na globálnej úrovni potvrdzuje správa IPCC 2017 (O'NEILL *et al.* 2017), a aj štúdie v EU (JACOB *et al.* 2020). Trendy rastu teploty vzduchu na Slovensku už v minulosti signalizovala rozsiahla komplexná štúdia SHMÚ (NEJEDLÍK a MINĐAŠ 2011), ako aj viaceré práce z posledných rokov napr. Melo a LAPIN *et al.* (2022), VÝBERČI *et al.* (2018). Práca autorov HOLKO *et al.* (2016) poukazuje na skutočnosť, že otepľovanie sa nevyhlo ani horským polohám Západných Tatier, kde sa trend rastu priemernej ročnej teploty vzduchu výraznejšie prejavuje od roku 2007, čo má dopady na rast snehovo slabých zím ako aj na skracovanie trvania snehovej pokrývky v horských povodiach.



**Obr. 2** Časový priebeh priemernej ročnej teploty vzduchu za obdobie rokov 1961-2023 (lineárny trend,  $r = 0,720$ ;  $p < 0,001$ ) a teploty vzduchu pre teplý polrok (IV.-IX.)(lineárny trend,  $r = 0,7463$ ;  $p < 0,001$ ) (vľavo); a odchýlky priemernej teploty vzduchu v teplom polroku v rokoch 1961-2023 od klimatologického normálu 1961-1990 (lineárny trend,  $r = 0,720$ ;  $p < 0,001$ ) (vpravo).

**Fig. 2** Time course of annual mean air temperature for the period 1961-2023 (linear trend,  $r = 0.720$ ;  $p < 0.001$ ) and air temperature for the summer half-year (IV.-IX.)(linear trend,  $r = 0.7463$ ;  $p < 0.001$ ) (left); and deviations of the 1961-2023 summer half-year mean air temperature from the 1961-1990 climatological normal (linear trend,  $r = 0.720$ ;  $p < 0.001$ ) (right).

Na rozdiel od teplôt, ročné a letné úhrny atmosférických zrážok vykazujú len mierny rastový trend, ktorý nie je štatisticky signifikantný (obr. 3). Tento trend signalizujú aj okolité stredoeurópske krajiny napr. Maďarsko (KOC SIS, ANDA 2017), stredné a južné Poľsko (ZIERNICKA-WOJTASZEK a KOPCIŃSKA, 2020), Česká republika (STŘEŠTÍK *et al.* 2014).

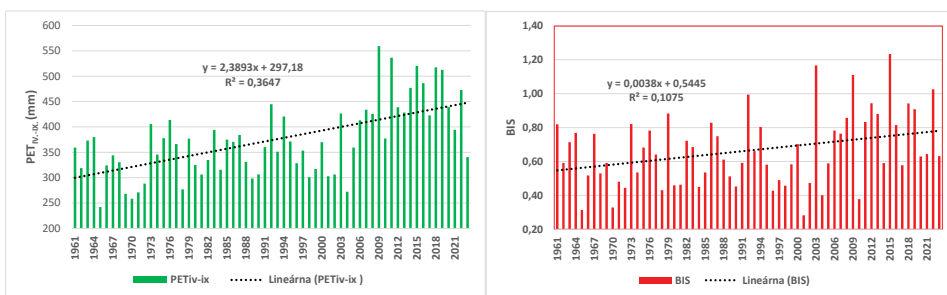


**Obr. 3** Časový trend ročných úhrnov zrážok a úhrnov v teplom polroku (IV.-IX.) za roky 1961-2023 (rok: lineárny trend,  $r = 0,192$ ; n. s.; teplý polrok:  $r = 0,09$ ; n.s.) (vľavo); a odchýlky úhrnov zrážok za teplý polrok od klimatologického normálu (1961 – 1990), (lineárny trend,  $r = 0,009$ ; p n. s.) (vpravo).

**Fig. 3** Temporal trend of annual precipitation and summer half-year (IV-IX) precipitation totals for 1961-2023 (year: linear trend,  $r = 0.192$ ; n.s.; summer half-year:  $r = 0.09$ ; n.s.) (left); and deviations of summer half-year precipitation totals from the climatological normal (1961-1990), (linear trend,  $r = 0.009$ ; p n.s.) (right).



Súvislosti medzi lesnými požiarimi a zrážkami študovalo nespočetné množstvo vedeckých tímov. Najznámejšou prácou je štúdia MUNGERA (1916) z Oregonu v USA, ktorá sa stala aj základom pre prvý požiarový index využívaný v USA a iných krajinách. Munger navrhol jednoduchý index sucha založený na dĺžke obdobia bez zrážok za predpokladu, že vzťah medzi dĺžkou sucha a intenzitou sucha nebol lineárny. Menej zrážok vo všeobecnosti znamená viac požiarov, tento fakt dokumentujú aj mapy požiarneho rizika vypracované projektom JRC EU PESETA III (DE RIGO *et al.* 2017) pre krajiny Európskej únie. V období nízkych zrážok vegetácia vysychá a stáva sa horľavejšou. To vytvára ideálne podmienky pre vznik a ľahké šírenie požiarov (CHENEY a SULLIVAN 2008). Viaceré štúdie však ukázali, že zmeny počasia pri požiaroch majú väčší vplyv na spálenú plochu ako samotné množstvo dažďa reprezentované jeho sumárnym úhrnom napr. FLANNIGAN a WOTTON (2001).



**Obr. 4** Časový trend potenciálnej evapotranspirácie (PET) v teplom polroku (IV.-IX.) za roky 1961-2023 (lineárny trend,  $r = 0,604$ ;  $p < 0,001$ ) (vľavo); a Indexu sucha podľa Budyka (BIS) v teplom polroku (lineárny trend,  $r = 0,328$ ;  $p < 0,01$ ) (vpravo) za roky 1961-2023.

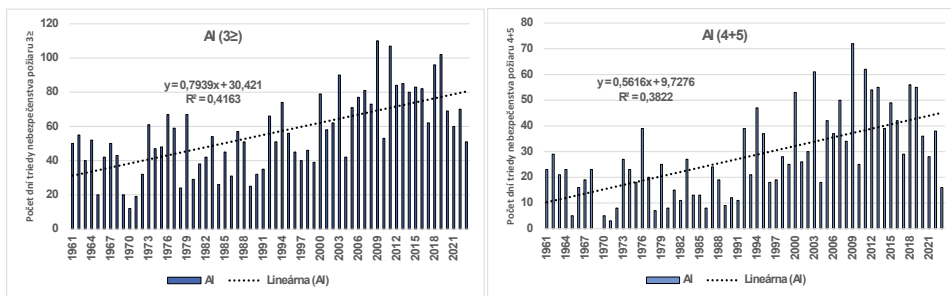
**Fig. 4** Temporal trend of potential evapotranspiration (PET) in the summer half-year (IV.-IX.) for 1961-2023 (linear trend,  $r = 0.604$ ;  $p < 0.001$ ) (left); and Budyko Drought Index (BIS) in the summer half-year (linear trend,  $r = 0.328$ ;  $p < 0.01$ ) (right) for 1961-2023.

Zaujímavé poznatky priniesla analýza vývoja procesov výparu (evapotranspirácie) a indexu sucha (obr. 4). Potenciálna evapotranspirácia (PET) predstavuje celkové množstvo vody, ktoré sa môže vypariť z pôdy (výpar z pôdy) a vegetačného krytu (transpirácia rastlín), keď je pôda nasýtená vodou. Ako vidíme trend PET je štatisticky vysoko významný a svedčí o náraste PET aj v horských polohách Tatier, čo je jednoznačný dôsledok rastu teploty vzduchu a poklesu relatívnej vlhkosti vzduchu. Tento poznatok korešponduje so zisteniami viacerých autorov (SITKOVÁ *et al.* 2022, LEŠTIANSKA *et al.* 2023). Posun tatranskej oblasti k aridizácii dokumentuje index sucha (obr. 4). Index sucha predstavuje premennú na kvantitatívne hodnotenie sucha (najmä v zmysle náhodného sucha), ktorá sa používa aj na definovanie epizód sucha, ako aj ich trendov a časovo-priestorového rozloženia. Index sucha podľa Budyka (BIS) hodnotí absolútne sezónne pomery PET a množstva zrážok (Budyko dryness index PET/P). Jeho trend je významný



na hladine  $p < 0.01$  a naznačuje posun bioklimatických podmienok tatranských lesných ekosystémov z humídnych do semihumídnych pomerov (hodnota BIS nad 1). Podobné výsledky analýz výskytu sucha pomocou BIS z iných oblastí podávajú napríklad práce GAO a GIORGI (2008), ŠKVARENINA *et al.* (2009), CREED *et al.* (2014) a i.

V ďalšej časti hodnotíme trendovosť poveternostného požiarneho indexu podľa Angströma. Index bol kalkulovaný z denných meteorologických údajov. Aby sme mohli zistiť ich trend v rokoch 1961 až 2023 boli absolútne hodnoty indexov zatriedené do príslušných 5 stupňov požiarneho nebezpečenstva lesov (1 - veľmi nízke; 2 - nízke; 3 - stredné; 4 - vysoké; 5 - veľmi vysoké). Trend vývoja indexu Angströma v čase sme hodnotili podľa metodiky (ŠKVARENINA *et al.* 2012 a KORENÁ HILLAYOVÁ *et al.* 2023) t. j. ako početnosť dní od 3 - stupňa požiarneho nebezpečenstva a vyššie ( $3 \geq$ ), a následne ako hodnotenie počtu dvoch najrizikovejších stupňov požiarneho nebezpečenstva (4+5) v konkrétnom roku. Angström index patrí medzi najpoužívanejšie indexy vo svete kvôli dobre prepracovanému vzťahu medzi teplotou vzduchu a relatívnou vlhkosťou. Vlhkosť vzduchu vo výpočte nahrádza zrážky, index je nekumulatívny a preto je vhodný pre aplikáciu v moderných automatických meteorologických prognózných systémoch (Južná Afrika, Nemecko, Srbsko, Slovensko a i.). Obr. 5 podáva 63 ročný prudko rastúci štatistický trend ( $p < 0.001$ ) a to pre triedy nebezpečenstva 3+, ako aj 4+5. Podobné konštatovanie o rastúcom trende AI uvádzajú ŠKVARENINA *et al.* (2012) pre NP Slovenský raj, Koristeková (2018) pre stanicu Sliač, v Nemecku EASTAUGH a HASENAUER (2014), Tošič *et al.* (2020) v Srbsku, TODOROVA *et al.* (2023) v pohorí Rila v Bulharsku pri objasňovaní trendu rastu požiarov.

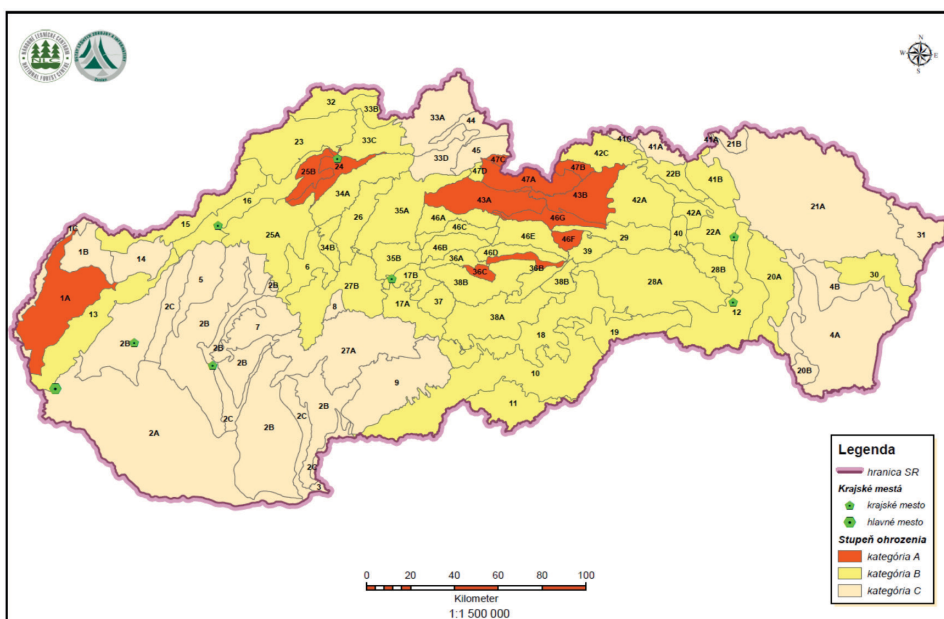


**Obr. 5** Angström index - časový trend počtu dní triedy nebezpečenstva požiaru  $3 \geq$  (vľavo) (lineárny trend,  $r = 0,65$ ;  $p < 0.001$ ) (vľavo); a počet dní triedy nebezpečenstva požiaru 4+5, (lineárny trend,  $r = 0,62$ ;  $p < 0.001$ ) (vpravo) v mesiacoch (IV.-IX.) za roky 1961-2023.

**Fig. 5** Angström index - time trend of the number of days of fire danger class  $3 \geq$  (left) (linear trend,  $r = 0.65$ ;  $p < 0.001$ ) (left); and the number of days of fire danger class 4+5, (linear trend,  $r = 0.62$ ;  $p < 0.001$ ) (right) in months (IV.-IX.) for the years 1961-2023.

### 3.2 Zhodnotenie požiarovosti lesov a prírodného prostredia v rokoch 2004 – 2023

Lesné oblasti a podoblasti s vysokým resp. stredným stupňom ohrozenia požiarom, sú taxatívne stanovené vo vyhláske Ministerstva pôdohospodárstva SR č. 453/2006 Z. z. o hospodárskej úprave lesa a ochrane lesa v znení neskorších predpisov (Kolektív PHaZZ 2023). Obr. 6 poukazuje na skutočnosť, že predmetné územie Západných Tatier (Liptovské Tatry, Roháče, Červené vrchy, Liptovské kopy, Vysoké Tatry (bez Širokej)) a priľahlých častí Liptovskej kotliny spadajú do kategória A lesy s vysokým stupňom ohrozenia požiarom pod kódovým označením 47A a 43A.

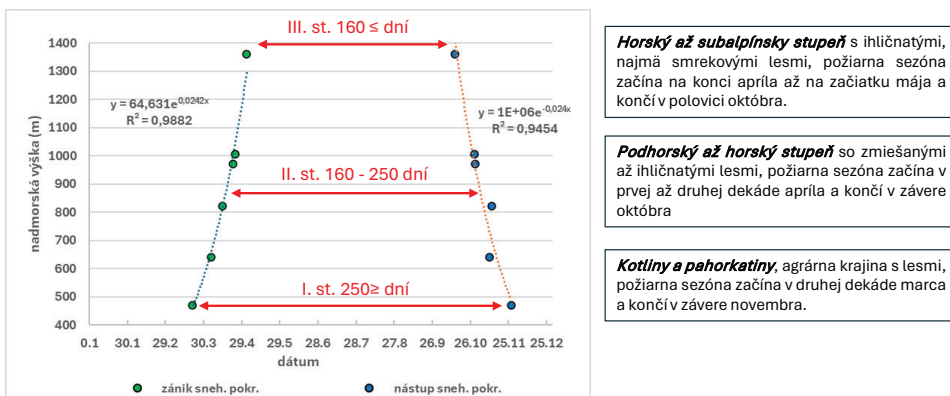


**Obr. 6** Lesné oblasti a podoblasti podľa kategórií ohrozenia požiarom (podľa NLC vo Zvolen 2024). Sledovaná oblasť Západných Tatier je označená kódom 47A a sčasti aj 43A. Spadajú do kategória A - lesy s vysokým stupňom ohrozenia požiarom.

**Fig. 6** Forest areas and sub-areas according to fire hazard categories (according to NLC in Zvolen 2024). The monitored area of the Western Tatras is marked with the code 47A and partly also 43A. They fall into category A - forests with a high degree of fire danger.

Na základe klimatických podmienok, povahy lesov a štatistiky požiarov zostavili CHANDLER *et al.* (1983) MELEKHOV a MAKEEV (ex GOLDAMMER - FURYAEV 2013) prehľady dĺžok požiarnej sezóny v rôznych klimatických oblastiach sveta. Sezóna požiarov v temperátnej resp. boreálnej klimatickej zóne severnej pologule býva najčastejšie

stanovená začiatkom zániku trvalej snehovej pokrývky a nástupom pozitívnych priemerných denných teplôt vzduchu. K intenzívnemu vysušovaniu vegetačných horľavých materiálov nachádzajúcich sa hlavne na povrchu lesnej pôdy, dochádza až po stabilizovanom prechode na priemerné denné teploty nad +5 °C ako aj v neprítomnosti vypadávania zrážok. Začiatok hromadných požiarov pripadá na dni, keď priemerné denné teploty vzduchu prechádzajú cez +5 až +10 °C. Chandler *et al.* (1983) vyjadrili názor, že pre horské podmienky mierneho klimatického pásma sa pre charakteristiku dĺžky požiarnej sezóny najlepšie osvedčila klimatická charakteristika „počet dní so snehovou pokrývkou s výškou nad 1 cm“. Na základe údajov SHMÚ a ÚH SAV z oblasti Západných Tatier sme zhotovili izochiony zániku a nástupu trvalej snehovej pokrývky vo výškovom profile 500 až 1420 m. Obr. 7 prezentuje výškovú stratifikáciu dĺžky požiarnej sezóny v profile od Liptovskej kotliny po subalpínsky horský les Západných Tatier. Izochióny vykazujú štatisticky vysoko významnú závislosť od nadmorskej výšky ( $p < 0.001$ ), a aj preto parametrizáciu dĺžky požiarnej sezóny na podklade izochión dátumov nástupu a zániku trvalej snehovej pokrývky považujeme za spoľahlivú.

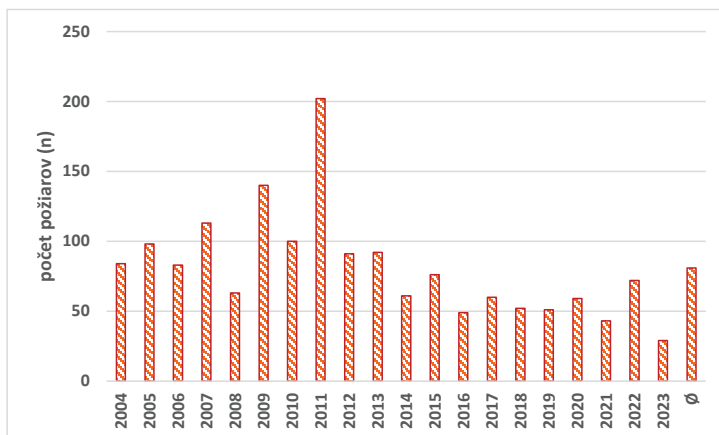


**Obr. 7** Výškové zmeny dĺžky požiarnej sezóny v oblasti Liptovská kotlina - Západné Tatry.

**Fig. 7** Elevation changes in the length of fire seasons in the Liptovská basin - Western Tatras Mts. area.

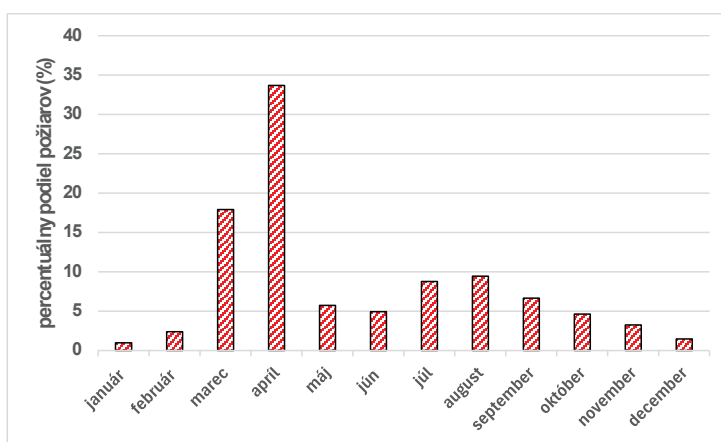
MELEKHOV a MAKEEV (ex GOLDAMMER - FURYAEV 2013) upozorňujú, že v rámci obdobia požiarnej sezóny existujú obdobia vysokého nebezpečenstva vzniku požiaru, ako aj obdobia nízkeho nebezpečenstva vzniku požiaru. Posledné menované sú spojené s rôznymi fenologickými fázami vegetácie, alebo aktívnymi zrážkami, ktoré zabraňujú vznieteniu a šíreniu požiaru. Takže od okamihu topenia snehu a pred objavením sa novej trávatej a bylinnej vegetácie existuje vysoká pravdepodobnosť vznietenia minuloročne suchej vegetácie. Ako sa nový vegetačný porast vyvíja, požiare sa postupne zastavujú, a zvyčajne sa ich frekvencia zvyšuje až počas letného resp. skorého jesene a súvisí s výskytom sucha.

Podľa evidencie Požiarnotechnického a expertízneho ústavu Ministerstva vnútra Slovenskej republiky sme spracovali základnú štatistiku požiarovosti prírodného prostredia (počet, ich rozloženie podľa mesiacov a počas dňa) v rokoch 2004 – 2023 pre sledovanú oblasť Západných Tatier. V priemere za toto obdobie sa evidovalo 81 požiarov (obr. 8), maximálny počet bol registrovaný v roku 2011 (202) a najmenej v roku 2023 (29). Najvyššiu priemernú početnosť dosahovali jarné mesiace: marec (18%) a apríl (34%) a sekundárne maximum sa ukázalo v letných mesiacoch júl (8,8%), august (9,5%) a september (7%), čo dokumentuje obr. 9. Ako uvádzajú (MELEKHOV a MAKEEV ex GOLDAMMER - FURYAEV 2013) vo všeobecnosti je v temperátnej a boreálnej zóne rozloženie prírodných požiarov podľa mesiacov roka veľmi nerovnomerné. Maximum požiaru je perióda požiarnej sezóny, počas ktorého počet požiarov prevyšuje priemer za sezónu. Toto obdobie často zahŕňa 2-3 mesiace s rôznym počtom požiarov. Preto v konkrétnych rokoch existuje aj obdobie «vrcholu požiarov (požiarny pik)» - mesiac alebo časové obdobie blízke trvaniu, počas ktorého dochádza k väčšiemu počtu požiarov ako v predchádzajúcich a nasledujúcich mesiacoch. Takže od okamihu topenia snehu a pred objavením sa novej vegetácie existuje vysoká pravdepodobnosť vznietenia minuloročnej suchej vegetácie. Ako sa trávnatý porast vyvíja, požiare sa zastavujú, zvyčajne sa opakujú počas letného sucha. Marec a apríl predstavujú prechodné obdobie medzi zimou a letom. Počas zimy je pôda často zamrznutá a vlhká, čo bráni šíreniu ohňa. S príchodom jari rastie teplota a mrazy ustávajú, zvyšuje intenzita slnečného žiarenia a veternosť prostredia, čo vysušuje pôdu a vegetáciu (PETROVIČ *et al.* 1972). Horľavosť prírodného prostredia významne ovplyvňuje vlhkosť vzduchu. Ako konštatuje KVETÁK (1991) minimum relatívnej vlhkosti v podhorských až horských polohách Tatier sa najčastejšie vyskytuje koncom marca a v apríli, čo súvisí s rýchlym vzostupom teploty vzduchu na jar a s častým prenikaním arktického vzduchu s malým obsahom vodnej pary na naše územie. Suchá tráva a odumreté asimilačné orgány rastlín a drevín, ktoré sa nahromadili počas jesene a zimy, sa tak stávajú ľahko zápalným materiálom (OSTRIHOŇ *et al.* 2023). S príchodom teplejších jarných dní sa zvyšuje aj ľudská aktivita v prírode, čo tiež zvyšuje riziko požiarov prírodného prostredia (HaZZ 2023). V máji horľavosť horského prírodného prostredia klesá, jednak preto, že rýchly vývoj asimilačných orgánov má za následok vysokú intenzitu transpirácie a nastáva masívny príjem vody rastlinami počas jarných vegetatívnych fenologických fáz (pučanie, rozpuč, zalistenie) a pri raste listov a jarných výhonkov až do obdobia dosiahnutia fázy ich fyziologickej dospelosti v júni (STŘELCOVÁ *et al.* 2009; ŠKVARENINOVÁ a MREKAJ 2022; ŠKVARENINOVÁ *et al.* 2024). Na druhej strane v máji nastáva v našich horstvách rozvoj konvekčných prúdení, kedy prudký vzostup teploty vzduchu v nižších polohách podporuje intenzívny vzrast prenosu vlhkého vzduchu do polôh vyšších. S výstupom sa vzduch adiabaticky ochladzuje a spôsobuje vysokú relatívnu vlhkosť v horských masívoch a hrebeňových polohách (KVETÁK 1991).



**Obr. 8** Prehľad počtu požiarov prírodného prostredia v regióne Západných Tatier a Liptovskej kotliny v rokoch 2004 – 2023

**Fig. 8** Distribution of the number of wildfires in the region of the Western Tatras and the Liptovská basin between 2004 and 2023

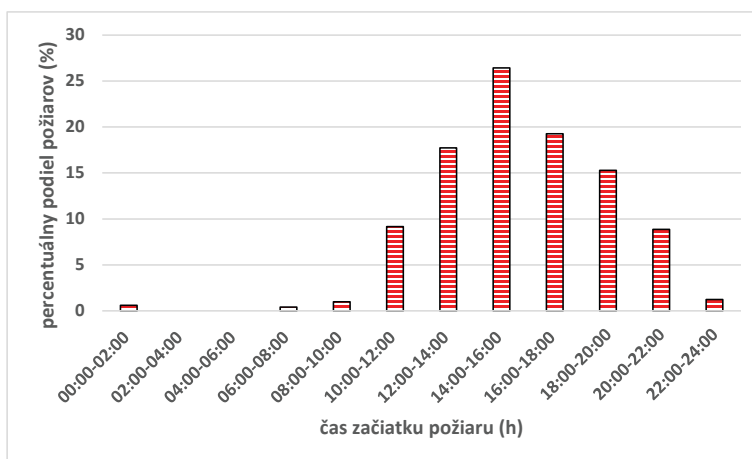


**Obr. 9** Histogram rozloženia požiarov podľa jednotlivých mesiacov v období rokov 2004 – 2023.

**Fig. 9** Histogram of the distribution of wildfires by month in the period 2004-2023

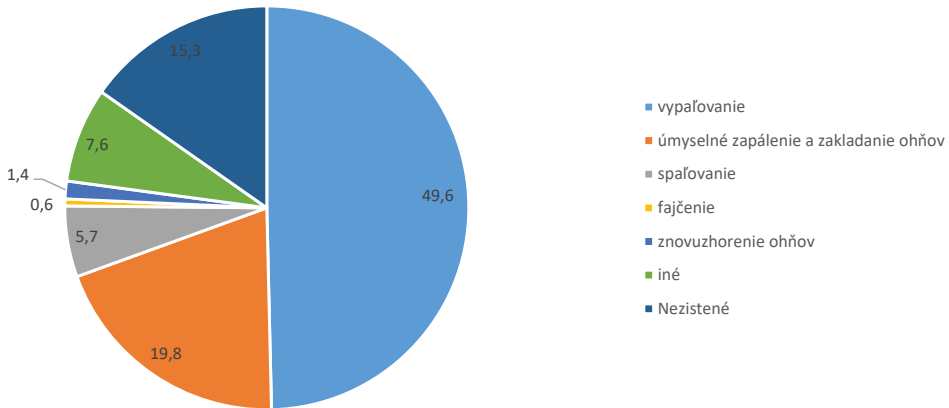
Okrem sezónnej periodicity je tu aj denná periodicita lesných požiarov. Ako vidíme na obr. 10 najčastejšie sa požiare vyskytujú popoludní, keď je vzduch dobre ohriaty a jeho vlhkosť je minimálna. Približne 80% lesných požiarov sa vyskytuje medzi 12. a 18. hodinou miestneho času. V dôsledku zmeny obsahu vlhkosti v prírodných horľavých materiáloch v závislosti od dennej doby sa rýchlosť šírenia a intenzita požiarov líšia, v druhej polovici dňa sa požiare šíria niekoľkokrát rýchlejšie ako v noci, alebo skoro ráno, keď teplota

klesá, zvyšuje sa vlhkosť vzduchu a horľavého materiálu, tvorí sa rosa resp. iné produkty kondenzácie. Tento jav úzko súvisí s denným priebehom obsahu vodnej pary vo vzduchu. Relatívna vlhkosť vzduchu dosahuje svoje minimum popoludní (okolo 14 – 16 h), v čase kulminácie maximálnej teploty vzduchu. Pokles slnečnej radiácie v podvečerných hodinách spôsobuje postupné ochladzovanie, ktoré podnecuje vzrast relatívnej vlhkosti vzduchu až do jej maxima (okolo východu slnka) v skorých ranných hodinách (KVETÁK 1991). Z uvedeného vyplýva, že denný priebeh vzniku požiarov úzko súvisí s denným chodom energetickej bilancie a relatívnej vlhkosti prízemnej vrstvy atmosféry. V noci lesné požiare prakticky nevznikajú (denné požiare však môžu počas noci pretrvávajúť). Podobné zistenia z Českej republiky uvádzajú HOLUŠA *et al.* (2018) a BERČÁK *et al.* (2018) v Nemecku MARX *et al.* (2024) CIESIELSKI *et al.* (2022) v Poľsku a i.



**Obr. 10** Histogram začiatkov vzniku požiarov v priebehu dňa kalkulovaný v rokoch 2004 – 2023  
**Fig. 10** Histogram of wildfire starts per day calculated over the years 2004 – 2023

Na obrázku 11 sú vyhodnotené príčiny vzniku požiarov. Za najčastejšiu príčinu sa považuje vypaľovanie (cca 50 %). Druhou najčastejšou príčinou vzniku požiarov prírodného prostredia je zakladanie ohňa v prírode, ktoré spôsobilo cca 20% požiarov. Početnosť požiarov sa počas pracovných dní týždňa výrazne nelíši, avšak narastá počas víkendových dní a sviatkov. BERČÁK *et al.* (2018) konštatujú, že je dôležité si uvedomiť, že aj počet návštevníkov lesa výrazne ovplyvňuje riziko požiaru. Aj keď sa počet požiarov počas týždňa príliš nelíši, je zrejmé, že počas víkendov, keď je v lesoch viac ľudí, je riziko vyššie. Preto je nevyhnutné, aby pozemné hliadky operovali najmä v čase najvyššieho rizika, teda v popoludňajších hodinách, keď je vzduch najsušší, ako aj v najrizikovejších dňoch z hľadiska frekvencie návštevnosti (OSTRIHOŇ *et al.* 2023).



Obr. 11 Kruhový graf hlavných príčiny vzniku požiarov prírodného prostredia podľa evidencie Požiarnotechnického a expertízneho ústavu Ministerstva vnútra SR evidovaných pre oblasť regiónu Západných Tatier a Liptovskej kotliny v rokoch 2004 – 2023.

Fig. 11 Pie chart of the main causes of wildfires according to the records of the Fire Technical and Expertise Institute of the Ministry of the Interior of the Slovak Republic registered for the area of the region of the Western Tatras and the Liptov Basin in the years 2004 - 2023.

**Tab. 1** Štatistická významnosť korelačných koeficientov medzi počtu dní triedy nebezpečenstva požiaru Angströmovho indexu (AI) a počtom požiarov prírodného prostredia v regióne Západných Tatier v období rokov 2004 – 2023.

**Table 1** Statistical significance of the correlation coefficients between the number of days of the Angström index (AI) fire danger class and the number of wildfires in the region of the Western Tatras in the period 2004 - 2023.

Index	$r_s$	významnosť
AI 3≥	0,465	*p < 0.05
AI 4+5	0,554	**p < 0.01

Početnosti požiarov sme korelovali s výskytom „kritických“ stupňov požiarneho nebezpečenstva (Tab. 1). Pre denné hodnoty požiarneho indexu sme do výpočtu zobrali hodnotenie od 3 – stredného stupňa požiarneho nebezpečenstva (3≥) a hodnotenie počtu dvoch najrizikovejších stupňov požiarneho nebezpečenstva (4+5) v konkrétnom roku. Ako možno vidieť z predloženej tabuľky (1) veľmi významná korelácia medzi výskytom požiaru sa preukázala hlavne pri sume dvoch najrizikovejších stupňoch AI 4+5. Nižšia miera korelácie sa ukázala v prípade AI 3≥. Podobné výsledky zistila pre územie stredného Slovenska KORÍSTEKOVÁ (2018) a ŠKVARENINA *et al.* (2012) pre NP Slovenský raj, v zahraničí napríklad LUKIČ *et al.* (2017) v Slovinsku a Tošič *et al.* (2020) v Srbsku.

### 3.3 Rámcové manažmentové opatrenia na ochranu horských smrekových lesov pred požiarimi

Bola spracovaná rozsiahla štúdia, ktorá sa venuje požiarovosti horských smrečín Západných Tatier a parametrizuje meteorologické požiarne nebezpečenstvo (OSTRIHOŇ 2024). Vychádzajúc z uvedenej práce a v súvislosti s danou témou sumarizujeme prínosy dosiahnutých výsledkov vo forme odporúčaní pre bezpečnostnú prax, oblasť lesníctva ale tiež pre obhospodarovateľov, správcov lesa či pracovníkov resp. turizmus a rekreáciu (napr. správa Chaty pod Náružím a i.) nasledovne:

- Navrhujeme komplexné prehodnotenie súčasného systému ochrany lesov s dôrazom na oblasť kategorizácie. Konkrétne navrhujeme umožniť spracovanie kalamitného dreva v oblastiach s vysokým rizikom požiaru, ktoré sú spôsobené nedostatočnou sieťou lesných ciest, veľkými kalamitnými plochami a nedostatkom vodných zdrojov. Takéto opatrenie by prispelo k zníženiu požiarneho rizika, ochrane biodiverzity (ako aj uhlíkových zásob) a zároveň by umožnilo udržateľné využívanie lesných zdrojov a klimaticky neutrálneho hospodárstva do roku 2050 pri súbežnom zabezpečovaní obnovy, odolnosti a primeranej ochrany všetkých ekosystémov.
- Zintenzívnenie vykonávania hliadkovej činnosti v čase zvýšeného nebezpečenstva vzniku požiaru najmä vo vyznačených najnebezpečnejších oblastiach v dôsledku vysokej návštevnosti turistami danej oblasti. Využitie bezpilotnej leteckej techniky.
- Uvažovanie o vývoji online predpovedi požiarneho nebezpečenstva v spolupráci s Lesníckou fakultou TUZVO, Ústavom hydrológie SAV, SHMÚ a Horskou záchrannou službou a ktorá by presne určovala aktuálne najnebezpečnejšie územia a lokality.
- Vybavenie Chaty pod Náružím potrebným protipožiarным náradím stanoveným vo vyhláske o požiarnej prevencii (napríklad vybudovanie úložných uzatváracích boxov na protipožiarne náradia v určitých vzdialenostiach popri turisticky značenom, v letnom období vysoko frekventovanom chodníku za účelom využitia tohto náradia okoloidúcimi turistami).
- Pravidelné preškolenie všetkých chatárov a službu konajúcej obsluhy na Chate pod Náružím na úseku ochrany pred požiarimi so zameraním na konkrétnu oblasť, spôsobe ohlásenia vzniku požiaru v prípade nedostatočného porytia mobilným signálom. Zaobstaranie bezpilotnej leteckej techniky pre vykonávanie pravidelného monitoringu predmetného územia.
- Vybudovanie informačných bannerov za účelom zvýšenia povedomia ľudí s vyznačením nebezpečných oblastí, preventívnych opatrení, postupe v prípade spozorovania požiaru, najbližších dostupných boxov s protipožiarным náradím, kontaktmi na príslušné orgány (HaZZ, HZS, správca lesného porastu a pod.). Umiestnenie informačných bannerov (resp. online na webstránkach) v určitých vzdialenostiach popri turisticky



značenom, v letnom období vysoko frekventovanom chodníku, na Chate pod Náružím a pred vstupom do turisticky najnavštevovanejších oblastí Západných Tatier. Bannery by mohli taktiež obsahovať ukazovateľ stupňa požiarneho nebezpečenstva v daný deň. Ukazovatele stupňa požiarneho nebezpečenstva by boli vybudované na princípe ukazovateľov požiarneho nebezpečenstva z národných parkov v zahraničí či lavínového nebezpečenstva na Slovensku.

- Podpora resp. výsadba náletových (pionierskych) drevín v okolí turistických chodníkov a iných vysoko frekventovaných miest z dôvodu vykazovania nižšieho požiarneho nebezpečenstva v porovnaní so smrekovými porastmi.

## ZÁVER

Predložená štúdia skúma vplyv nastupujúcich klimatických zmien na riziko vzniku lesných a krajinných požiarov v horských lesoch Západných Tatier. Analýza dlhodobých pozorovaných klimatologických údajov (1961 – 2023) odhalila významný nárast teploty a pokles relatívnej vlhkosti vzduchu, čo vedie k aridizácii horského prostredia. Vyhodnotenie požiarneho poveternostného indexu potvrdilo tento trend a poukázalo na zvyšujúci sa počet dní s vysokým až extrémnym rizikom požiaru. Za roky 2004 až 2023 sme vyhodnotili požiarovosť horských lesov. Priemerne sa vyskytlo 81 požiarov, najvyšší počet v roku 2011 (202). Preukázala sa veľmi významná korelácia medzi počtom požiarov a počtom dní s vysokým (4) a veľmi vysokým (5) stupňom požiarneho nebezpečenstva Angstömovho požiarneho meteorologického indexu ( $p < 0.01$ ). Najvyššiu priemernú početnosť dosahovali požiare v jarných mesiacoch marec (18 %) a apríl (34 %) a sekundárne maximum sa vyskytovalo v letných mesiacoch júl (8,8 %), august (9,5 %) a september (7 %). Približne 80 % lesných požiarov sa vzniklo medzi 12. až 18. hodinou miestneho času. Početnosť požiarov narastala počas víkendových dní.

Výsledky tejto práce boli získané v podmienkach horských lesov Západných Tatier (Slovenská republika), ale majú širšie uplatnenie pre horské temperátne a boreálne lesy. Zistenia zdôrazňujú potrebu adaptácie lesného hospodárstva a požiarnej ochrany na nové klimatické podmienky. Štúdia podáva aj rámcové manažmentové opatrenia na ochranu horských smrekových lesov pred požiarimi.

Vzhľadom na nastupujúcu zmenu klímy a s tým spojené riziko straty biodiverzity pri ničivých lesných požiaroch, vytvára sa aktuálna potreba prijatia prístupov adaptívnej obnovy lesov a ekosystémového riadenia, ktorými sa zvýši odolnosť lesov, predovšetkým fragilných horských lesných ekosystémov na Slovensku a v horstvách strednej Európy. Tieto prístupy predstavujú nevyhnutý predpoklad, ak majú lesy v nasledujúcich desaťročiach plniť svoje sociálno-ekonomické a environmentálne funkcie v krajine.

## Pod'akovanie

Autori d'akujú za podporu projektom Agentúry na podporu výskumu a vývoja (APVV): APVV-21-0224, APVV-18-0347, APVV-19-0340 a APVV-15-0425. Taktiež d'akujú Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) za podporu projektov: VEGA 1/0057/22 a 1/0443/23. Osobitné d'akujeme za podporu a odborné konzultácie plk. PhDr. Eve Krajčiovej (OR HaZZ Liptovský Mikuláš) a Ing. Tomášovi Hrtkovi (Urbárske pozemkové spoločenstvo Bobrovec).

## LITERATÚRA

- AGOVINO, M., CERCIELLO, M., FERRARO, A., & GAROFALO, A. (2021). Spatial analysis of wildfire incidence in the USA: The role of climatic spillovers. *Environment, Development and Sustainability*, 23(4), 6084-6105.
- BERČÁK, R., HOLUŠA, J., LUKÁŠOVÁ, K., HANUŠKA, Z., AGH, P., VANĚK, J., & CHROMEK, I. (2018). Lesní požáry v České republice – charakteristika, prevence a hašení. *Zprávy lesnického výzkumu/Reports of Forestry Research*, 63, 2018 (3): 184-194.
- CIESIELSKI, M., BALAZY, R., BORKOWSKI, B., SZCZESNY, W., ZASADA, M., KACZMAROWSKI, J., & MILANOVIC, S. (2022). Contribution of anthropogenic, vegetation, and topographic features to forest fire occurrence in Poland. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 15(4), 307.
- CREED, I. F., SPARGO, A. T., JONES, J. A., BUTTLE, J. M., ADAMS, M. B., BEALL, F. D., & YAO, H. (2014). Changing forest water yields in response to climate warming: Results from long-term experimental watershed sites across North America. *Global change biology*, 20(10), 3191-3208.
- DE RIGO, D., LIBERTÀ, G., DURRANT, T. H., VIVANCOS, T. A., & SAN-MIGUEL-AYANZ, J. (2017). *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty*. Publisher: Publications Office of the European Union ISBN: 978-92-79-77046-3
- FLANNIGAN, M. D., & WOTTON, B. M. (2001). *Climate, weather, and area burned*. In *Forest fires* Academic Press. (pp. 351-373).
- GAO, X., GIORGI, F., (2008). Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model, *Global and Planetary Change* 62:195–209.
- GOLDAMMER, J. G., & FURYAEV, V. (Eds.). (2013). *Fire in ecosystems of boreal Eurasia* (Vol. 48). Springer Science & Business Media.
- CHANDLER, C., CHENEY, P., THOMAS, P., TRABAUD, L., & WILLIAMS, D. (1983). *Fire in forestry*. Volume 1. Wiley, New York.
- CHENEY, P., & SULLIVAN, A. (Eds.). (2008). *Grassfires: fuel, weather and fire behaviour*. CSIRO Publishing.
- Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S., Katragkou, E., Anders, I., Belda, M., & Wulfmeyer, V. (2020). Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional environmental change*, 20, 1-20.
- KAČALA, J., PISÁRČIKOVÁ, M., POVAŽAJ, M. eds. (2003). *Krátky slovník slovenského jazyka*. (vydanie 4). Bratislava, Vydavateľstvo VEDA, 985 s.
- KOLEKTÍV PHaZZ (2023). *Ochrana lesov pred požiarimi*. Ministerstvo vnútra Slovenskej republiky – Prezídium Hasičského a záchranného zboru. Bratislava. 2023. 15 s.
- LUKIĆ, T., MARIĆ, P., HRNJAK, I., GAVRILOV, M. B., MLADJAN, D., ZORN, M., & STOJSAVLJEVIĆ, R. (2017). Forest fire analysis and classification based on a Serbian case study. *Acta geographica Slovenica*, 57(1), 51-63.
- KORENÁ HILLAYOVÁ, M. K., HOLÉCY, J., KORÍSTEKOVÁ, K., BAKŠOVÁ, M., OSTRIHŇ, 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. K., HOLÉCY, J., KORENÝ, E., & ŠKVARENINA, J. (2024). Reducing the negative impact of wildfire disasters through multi-scenario risk analysis of land investment. *Progress in Disaster Science*, 23, 100359.

HOLKO, L., DANKO, M., HLAVČO, J., KOSTKA, Z.: Long-Term Data on Selected Climatic and Hydrological Characteristics in the Jalovecký potok Catchment (Western Tatra Mts., Liptovská kotlina Basin). *Životné prostredie*, 2016, 50, 2, p. 81 – 86

HOLUŠA, J., BERČÁK, R., LUKÁŠOVÁ, K., HANUŠKA, Z., AGH, P., VANĚK, J., & CHROMEK, I. (2018). Lesní požáry v České republice – definice a rozdělení. *Zprávy lesnického výzkumu/Reports of Forestry Research*, 63(2), 102-111.

KORÍSTEKOVÁ, K. (2018). *Analýza meteorologických podmienok vzniku lesných a krajinných požiarov na Slovensku* (Dizertačná práca). Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2018. 106 s. 8 príloh.

KVETÁK, Š. (1991). Vlhkosť vzduchu. In: *Zborník prác Slovenského hydrometeorologického ústavu*. Bratislava: Alfa, zv. 33/I

LEŠTIANSKA, A., STŘELCOVÁ, K., & FLEISCHER, P. (2023). Hodnotenie bilancie vody v systéme pôda-rastlina-atmosféra na základe monitoringu zmien obvodu kmeňov. *Hydrologie malého povodí 2023*. Editori: Soňa Hnilicová, Miroslav Tesař. Vydal: Ústav pro hydrodynamiku AVČR ISBN: 978-80-87117-22-4

MARX, A., BLAUHUT, V., BOEING, F., FORKEL, M., HAGENLOCHER, M., HERBST, M., & ZIESE, M. (2024). Dürren und Waldbrände unter Klimawandel. In *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (pp. 131-142).

MELO, M., LAPIN, M., & PECHO, J. (2022). Climate in the Past and Present in the Slovak Landscapes—The Central European Context. In *Landscapes and Landforms of Slovakia* (pp. 27-44). Cham: Springer International Publishing.

MUNGER, T.T. 1916: Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Monthly Weather Review* 44: 642-643.

NEJEDLÍK, P., MINĎÁŠ, J., (eds.) (2011). *Dôsledky klimatickej zmeny a možné adaptačné opatrenia v jednotlivých sektoroch*. Záverečná správa zhrnutie Operačného programu OPŽP-PO3-08-5 ITMS 24130120015. Zvolen–Bratislava, EFRA SHMÚ, EMPA.

NWCG (2012). *Glossary of Wildland Fire Terminology*, PMS NWCG; National Wildfire Coordinating Group (NWCG): Boise, ID, USA, 2012.

O'NEILL, B. C., OPPENHEIMER, M., WARREN, R., HALLEGATTE, S., KOPP, R. E., PÖRTNER, H. O., & YOHE, G. (2017). IPCC reasons for concern regarding climate change risks. *Nature Climate Change*, 7(1), 28-37.

OŠTRIHŇ, M., ŠKVARENINA, J., LEŠTIANSKA, A., ZVERKO, J., MAREČEKOVÁ, M. (2023) Porovnanie meteorologicky odlišných rokov 2020 a 2022 z pohľadu nebezpečenstva vzniku lesných požiarov v oblasti Banskobystrického kraja. *Hydrologie malého povodí 2023*. Editori: Soňa Hnilicová, Miroslav Tesař. Vydal: Ústav pro hydrodynamiku AVČR ISBN: 978-80-87117-22-4

OŠTRIHŇ, M. (2024). *Parametrizácia meteorologického požiarneho nebezpečenstva horských smrečín Západných Tatier*. [Dizertačná práca] – Technická univerzita vo Zvolen. Katedra protipožiarna ochrana. Študijný odbor: Bezpečnostné vedy, Študijný program: Protipožiarna ochrana a bezpečnosť, Zvolen: 206 s.

OŠTRIHŇ, M., KORENÁ HILAYOVÁ, M. K., KORÍSTEKOVÁ, 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.

PEREIRA, M. G., PARENTE, J., AMRAOUI, M., OLIVEIRA, A., & FERNANDES, P. M. (2020). The role of weather and climate conditions on extreme wildfires. In *Extreme wildfire events and disasters*. Elsevier. 55-72.

PETROVIČ, Š. (Ed.). (1972). *Klimatické a fenologické pomery Stredoslovenského kraja*. Bratislava: Hydrometeorologický ústav.

SITKOVÁ, Z., RYBÁR, J., & PAVLENDÁ, P. (2022). Sucho 2022 v kontexte dlhodobých klimatických trendov v lesoch Slovenska. *Časopis lesníckej ochrannárskej služby*, 64.

SUROVEC, D., (1989). Hlavné škodlivé činitele v lesoch SSR za roky 1975 – 1986. *Lesnícke štúdie*, č. 45, Bratislava, Príroda, 122 s.

ŠKVARENINA, J., MINDÁŠ, J., HOLÉCY, 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., HRVOJ, J., ŠKVARENINOVÁ, J., (2009). Occurrence of Dry and Wet Periods in Altitudinal Vegetation Stages of West Carpathians in Slovakia. Štrielcová et al. (eds.) *Bioclimatology and Natural Hazards: Time-Series Analysis 1951 2005*. Springer Science +Business Media B.V. 2009:97–106.

ŠKVARENINA, J., HOLÉCY, J., HRÍBIK, M., VIDA, T., (2012). Fire weather indices as the measures of a progressive climate change in the territory of Slovensky Raj. In *V. Symposio nacional sobre incendios forestales: trabajos presentados*. La Murcia: 2012. zv. CD-ROM.

ŠKVARENINA, J., VIDO, J., MINDÁŠ, J., STRELCOVÁ, K., ŠKVARENINOVÁ, J., FLEISCHER, P., & BOŠEĽA, M. (2018). *Globálne zmeny klímy a lesné ekosystémy (Climate Change and Forest Ecosystems)*. Technická univerzita vo Zvolene Technical University in Zvolen: Zvolen, Slovakia.

ŠMELKO, Š., WOLF, J. (1977). Štatistické metódy v lesníctve. Bratislava. *Príroda*, 330 s.

TODOROVA, E., ZHIYANSKI, M., & TODOROV, L. (2023). Using high precision climate data for wildfire risk assessment. *Silva Balcanica*, 24(1), 5-16.

TOŠIĆ, I., ŽIVANOVIĆ, S., & TOŠIĆ, M. (2020). Influence of extreme climate conditions on the forest fire risk in the Timočka Krajina region (northeastern Serbia Idójarás - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service), 124 (3) (2020), pp. 331-347

VILČEK, J., ŠKVARENINA, J., VIDO, J., NÁLEVANKOVÁ, P., KANDRÍK, R., & ŠKVARENINOVÁ, J. (2016). Minimal change of thermal continentality in Slovakia within the period 1961–2013. *Earth System Dynamics*, 7(3), 735-744.

VOLOKITINA, A., SOFRONOV, M., & SOFRONOVA, T. (2008). Topical scientific and practical issues of wildland fire problem. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 13, 661-674.

VÝBERČI, D., PECHO, J., FAŠKO, P., & BOCHNÍČEK, O. (2018). Teplé a chladné obdobia na Slovensku (1951–2017) v kontexte klimatickej zmeny. *Meteorolog. časopis* 21 (2): 101, 108.

#### **Kontaktné údaje autorov:**

<sup>1)</sup> *Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta TU vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen; email: skvarenina@tuzvo.sk*

<sup>2)</sup> *Výskumná základňa pre horskú hydrologiu Liptovský Mikuláš, Ústav hydrologie Slovenskej akadémie vied, v. v. i. Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava,*

<sup>3)</sup> *Slovenský hydrometeorologický ústav, Regionálne pracovisko Banská Bystrica, Zelená 5, 974 04 Banská Bystrica*

<sup>4)</sup> *Ústav environmentalistiky a prírodných zdrojů, Fakulta regionálního rozvoje a mezinárodních studií, Mendelova univerzita v Brne, tř. Generála Píky 7, 61300 Brno, Česká republika*

## **POŽIAROVOSŤ LESOV A POŽIARNA KLÍMA ZÁPADNÝCH TATIER**

### **Abstrakt**

Predložená štúdia skúma vplyv nastupujúcich klimatických zmien na riziko vzniku lesných a krajinných požiarov v horských lesoch Západných Tatier. Analýza dlhodobých pozorovaných klimatologických údajov (1961 – 2023) odhalila významný nárast teploty a pokles relatívnej vlhkosti vzduchu, čo vedie k aridizácii horského prostredia. Vyhodnotenie požiarneho poveternostného indexu potvrdilo tento trend a poukázalo na zvyšujúci sa počet dní s vysokým až extrémnym rizikom požiaru. Za roky 2004 až 2023 sme vyhodnotili požiarovosť horských lesov. Priemerne sa vyskytlo 81 požiarov, najvyšší počet v roku 2011 (202). Preukázala sa veľmi významná korelácia medzi počtom požiarov a počtom dní s vysokým (4) a veľmi vysokým (5) stupňom požiarneho nebezpečenstva Angströmovho požiarneho meteorologického indexu ( $p < 0.01$ ). Najvyššiu priemernú početnosť dosahovali požiare v jarných mesiacoch marec (18%) a apríl (34%) a sekundárne maximum sa vyskytovalo v letných mesiacoch júl (8,8%), august (9,5%) a september (7%). Približne 80% lesných požiarov sa vzniklo medzi 12. až 18. hodinou miestneho času. Početnosť požiarov narastala počas víkendových dní. Výsledky tejto práce boli získané v podmienkach horských lesov Západných Tatier (Slovenská republika), ale majú širšie uplatnenie pre horské temperátne a boreálne lesy. Zistenia zdôrazňujú potrebu adaptácie lesného hospodárstva a požiarnej ochrany na nové klimatické podmienky. Štúdia podáva aj rámcové manažmentové opatrenia na ochranu horských smrekových lesov pred požiarimi.

**Kľúčové slova:** výskyt lesných a krajinných požiarov, klimatické podmienky, požiarne sezóny,

# FENOLOGICKÁ ODOZVA PROVENIENCIÍ JEDLE BIELEJ (*ABIES ALBA* MILL.) ZO SLOVENSKA NA ZMENY PODMIENOK PROSTREDIA

Jaroslav ŠKVARENINOVÁ

ŠKVARENINOVÁ, J.: Phenological response of provenance of white fir (*Abies alba* MILL.) from Slovakia to changes in environmental conditions, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

## ABSTRAKT

Práca podáva prehľad o priebehu fenologickej fázy rozpuk ihlicových púčikov (BBCH 07) a jej trendoch na 26 provenienciách jedle bielej zo Slovenska zaradených podľa nadmorskej výšky do 3 výškových skupín. Zisťovala sa fenologická reakcia skupín na každoročné priemerné marcové a aprílové mesačné teploty vzduchu a neskoré jarné mrazy počas rokov 2006-2024. Proveniencie si zachovávajú postupnosť nástupu fázy podľa nadmorskej výšky, z ktorej pochádzajú. Trendy fázy proveniencií sa so štatistickou významnosťou oneskorujú o 11-18 dní. Významnejší vplyv na nástup fázy má priemerná aprílová teplota vzduchu. Extrémny teploty v podobe neskorých mrazov ju čiastočne ovplyvňujú len ak sa vyskytnú tesne pred alebo počas začiatku fázy súvisle a ich intenzita klesá pod  $-2^{\circ}\text{C}$ . Silné a veľmi silné mrazy nepoškodili púčiky a ihlice v začiatku tejto fázy.

**Kľúčové slová:** jedľa biela (*Abies alba* Mill.), fenológia, teplota vzduchu, neskoré mrazy, proveniencie

## 1. Úvod

Súčasnú rozšírenie a areály drevín sa formovali počas historického vývoja Zeme. Vplyvom zmeny klímy a prudkého otepľovania atmosféry sa postupne menia pôvodné areály. Náhle zmeny môžu spôsobiť rozvrat ekosystémov a znížiť prirodzenú rezistenciu druhov. Fenologické pozorovania umožnia získať cenné poznatky na úrovni druhu a rozšíriť informácie o ďalších biologických reakciách na miestach, kde údaje chýbajú. Zmeny dlhodobých fenologických prejavov dajú odpoveď na vývoj klímy aj v regionálnych podmienkach (Škvareninová, 2013; Lukasová et al., 2020). Sú predpokladom pre zisťovanie trendov fenologických fáz a hľadanie ich vzťahu ku klimatickej zmene (Asse et al., 2018; Wenden et al., 2020). Môžu prispieť k objasneniu prirodzeného rozšírenia drevín a zmien ich pôvodných areálov (Suvanto et al., 2016), na prognózu ich ďalšieho rozšírenia a vitality (Dyderski et al., 2018). Preto mnohí autori skúmajú dynamiku fenofáz drevín a ich reakcie na zmenené klimatické podmienky prostredia (Linderholm, 2006; Rafferty et

al., 2020; Wenden et al., 2020). Fenológia drevín mierneho pásma je lokálne prispôbená klíme a množstvo štúdií s použitím testov pôvodu poukázalo na fenologické rozdiely medzi populáciami (Chmura a Rozkowski, 2002). Pravidelné a dlhoročné pozorovania priebehu fenologických fáz drevín umožnia poznanie klimatického charakteru územia a odhalia zmeny dĺžky rastových a fenologických období, ako aj možné riziká mrazových poškodení. Tieto poznatky sa využijú pri obhospodarovaní lesov, ale aj pri ochrane prírody.

Jedľa biela sa dostala do väčšej pozornosti vedcov od polovice 20. storočia, kedy sa prejavil hromadný ústup tohto druhu v prirodzených porastoch. Hlavným dôvodom bola reakcia na znečistenie SO<sub>2</sub> (Elling et al., 2009), ale aj klimatické zmeny a prudké otepľovanie, ktorými sa vytvorili nevhodné stanovištia pre jej optimálny rast. Podľa Maxime-Hendrika (2011) optimum rastového potenciálu bolo zaznamenané v stredných nadmorských výškach jej prirodzeného areálu. Rastúce teploty spôsobujú posun areálu do vyšších nadmorských výšok, vzhľadom na jej ekologické nároky. Ako drevina oceánskej klímy rastie na stanovištiach s vlhkou pôdou dobre zásobenou živinami, v polohách s ročným úhrnom zrážok 600-700 mm. Je citlivá na teplotné extrémny, poškodzujú ju najmä jarné neskoré a skoré jesenné mrazy (Pagan-Randuška, 1987).

Analýzam fenologických procesov jedle pomocou priameho alebo satelitného pozorovania sa venuje viacero prác (Antonucciho (2017; Csilléry et al., 2020; Jean et al. 2023). Zistili, že teplota je hlavným prvkom pri nástupe jarných fenofáz, čo sa prejavilo postupným nástupom fáz pozdĺž výškových gradientov. Zaujímavá je novšia práca Unuk et al. (2021), ktorá spája fenologickú fázu rozpadu ihlicových púčikov jedle s výskytom ektomykorizných taxónov. Vzhľadom na vysokú pozitívnu koreláciu fázy s niektorými druhmi húb (*Russula ochroleuca*, *Russula illota*, *Tomentella subtilacina* a *Tylospora fibrillosa*) sa vytvára perspektívne využitie identifikácie fázy na lokalitách s obmedzeným prístupom.

Štúdie proveniencií (Vitasse et al., 2009) tiež naznačili premenlivosť fenologických znakov jedle bielej s geografickými súradnicami miesta pôvodu. Takáto geografická variabilita európskych populácií jedle by mohla byť výsledkom lokálneho prispôbenia sa rôznym klimatickým podmienkam miesta pôvodu. Určujúcimi faktormi začiatku jarných fenologických fáz ihličnatých drevín sú okrem teploty aj druhovo špecifické faktory, pri širšom areáli najpravdepodobnejšie fotoperiód a rôzne prahové teploty (Swidrak et al., 2013). Regionálny výskum ponúka jedinečnú príležitosť preskúmať miestne reakcie stromov na zmenu klímy.

Cieľom výskumu v rokoch 2006-2024 bolo zistiť:

- ako prebieha nástup fenologickej fázy rozpad ihlicových púčikov na provenienciách z prirodzených lokalít rozličných nadmorských výšok
- reakciu proveniencií podľa výškových skupín na teplotné zmeny a neskoré jarné mrazy



## 2. Materiál a metódy

Fenologický monitoring jedle bielej prebiehal v rokoch 2006-2024 na provenienciách získaných z 26 prirodzených lokalít Slovenska z nadmorských výšok 550-1100m n. m. Vek jedincov dosahuje 45-57 rokov. Boli vysadené v rovnakých podmienkach prostredia v nadmorskej výške 300m v oblasti Zvolenskej kotliny. Na lokalite prevažuje severo-severozápadná expozícia. Územie patrí do teplej až mierne teplej klimatickej oblasti, do rozhrania teplého mierne vlhkého okrsku s chladnou zimou (T7) až mierne teplého mierne vlhkého pahorkatinového až vrchovinového okrsku (M3) (Lapin et al. 2002).

Pre porovnanie fenologických zmien vplyvom nových podmienok prostredia a nadmorskej výšky z ktorej pôvodne pochádzajú sme proveniencie jedle rozdelili do troch výškových skupín s takmer rovnakým výškovým intervalom 150-200m (Tab. 1). Pochádzajú z 19 orografických celkov Slovenska, z ktorých 12 sa vyskytovalo v chránených územiach (národné parky, chránené krajinné oblasti). Na sledovanie fenologickej fázy rozpuku ihlicových púčikov sme z každej proveniencie náhodne vybrali 10 jedincov. Použili sme platnú metodiku SHMÚ (Braslavská-Kamenský, 1996). Fáza zodpovedá medzinárodnej klasifikácii fenologických fáz BBCH 07 v stupnici BBCH kódov (Meier, 1997). Rozpuk ihlicových púčikov sme pozorovali v hornej tretine koruny na rovnakých svetových stranách, aby sme vylúčili chybu pozorovania. Začiatok nástupu fenofázy bol označený dňom, kedy aspoň 10% stromov dosiahlo danú fenofázu (Obr. 1). Pre spracovanie údajov sme k jednotlivým zaznamenaným kalendárnym dňom priradili poradové číslo od začiatku roka (julian day).



**Obr. 1** Rozpuk ihlicových púčikov  
**Fig. 1** Beginning of bud breaking

Údaje o teplote vzduchu sme získali z vlastnej meteorologickej stanice na danej lokalite. Vyhodnotili sme priebeh fázy v závislosti od priemernej mesačnej teploty vzduchu v mesiacoch marec a apríl, absolútne minimálne a maximálne hodnoty najnižších teplôt vzduchu ( $T_{min}$ ) v mesiaci výskytu fázy (apríl), trendy fázy a ich štatistickú významnosť podľa Pearsnovho korelačného koeficientu.

Pri hodnotení nástupu fázy sme zohľadnili aj výskyt neskorých jarných mrazov a ich intenzitu, ktorá ovplyvňuje priebeh fázy. Mrazový deň nastáva vtedy, keď minimálna teplota vzduchu počas 24 hodín klesne pod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Intenzitu mrazov sme hodnotili podľa modifikovanej stupnice (Scheifinger et al. 2003; Madara 2016):

slabý mráz ( $0^{\circ}\text{C} \leq -0.99^{\circ}\text{C}$ )

mierny mráz ( $-1^{\circ}\text{C} \leq -1.99^{\circ}\text{C}$ )

silný mráz ( $-2^{\circ}\text{C} \leq -3.99^{\circ}\text{C}$ )

veľmi silný mráz ( $\leq -4^{\circ}\text{C}$ )

**Tab.1** Charakteristika pôvodu autochtónnych populácií jedle bielej podľa výškových skupín

**Tab. 1** Characteristics of the origin of autochthonous white fir populations by height groups

výšková skupina/ výškový interval ( m n. m.)	poradové číslo	orografický celok *chránené územie	nadmorská výška (m n. m.)
1 550–750 m n. m.	1	Malá Fatra	550
	2	Turzovská vrchovina	550
	3	Čergov	550
	4	Javorníky	600
	5	Lubovnianska vrchovina	600
	6	Branisko	600
	7	Volovské vrchy	600
	8	Revúcka vrchovina	620
	9	Strážovské vrchy *	700
2 760–950 m n. m.	10	Veľká Fatra *	800
	11	Východné Tatry *	800
	12	Spišsko-gemerský kras *	800
	13	Volovské vrchy	830
	14	Volovské vrchy	850
	15	Kremnické vrchy	850
	16	Nízke Tatry *	900
	17	Kozie chrbyty *	900



	18	Východné Tatry *	900
	19	Kremnické vrchy *	900
3 960–1100 m n. m.	20	Kremnické vrchy	950
	21	Chočské vrchy *	970
	22	Kremnické vrchy *	980
	23	Ponická vrchovina	1000
	24	Podtatranská brázda	1100
	25	Spišsko-gemerský kras *	1100
	26	Poľana *	1100

### 3. Výsledky

Rozpuk ihlicových púčikov nastupoval vo výškových skupinách priemerne od 25. apríla do 2. mája. Prehľad základných štatistických veličín podáva tabuľka 2. Z uvedených hodnôt môžeme konštatovať, že proveniencie si zachovávajú postupnosť nástupu fázy podľa nadmorskej výšky, z ktorej pochádzajú. Najväčšie trendové posuny fázy proveniencií sú od nadmorskej výšky 750 m (16-18 dní) so štatistickou významnosťou a silnou koreláciou.

**Tab. 2** Základné štatistické charakteristiky fázy podľa výškových skupín ( $\emptyset$  - priemerný nástup, Min - najskorší nástup, Max - najneskorší nástup,  $s_x\%$  - variačný koeficient, \* - významný trend)

**Tab. 2** Basic statistical characteristics of the phase by height groups ( $\emptyset$  - mean onset, Min - earliest onset, Max - latest onset,  $sx\%$  - coefficient of variation, \* - significant trend)

výšková skupina	$\emptyset$	min	max	$s_x\%$	trend (dni)	významnosť trendu $p = 0,05$
1	25.4.	15.4.2014	9.5.2022	6.2	11	0.49*
2	29.4.	20.4.2014	14.5. 2021,2022	6.2	16	0.66*
3	2.5.	21.4.2014	15.5.2021	6.3	18	0.74*

Skúmanú fenologickú fázu ovplyvňuje priebeh teploty vzduchu. Pre podrobnejšiu analýzu tejto veličiny sme použili minimálne teploty (výskyt mrazových dní) pred a v čase nástupu fázy, ako aj priemerné mesačné teploty (marec, apríl) pred jej nástupom. Z tabuľky 3 vidieť, že v rokoch 2020-2023 sa vyskytovali chladné jarné obdobia s najvyšším počtom mrazových dní. Z týchto 4 rokov boli roky 2020 a 2021 najchladnejšie s najvyšším počtom mrazových dní (17-19). Boli zaznamenané aj najnižšie absolútne minimálne hodnoty teploty vzduchu, ktoré dosiahli -6,9 a -7,6 °C. Opačným extrémom boli roky 2018 a 2019,

kedy sa vyskytol len jeden mrazový deň slabej a mierne slabej intenzity a najvyššia minimálna hodnota teploty dosiahla 11,5 a 13,7 °C.

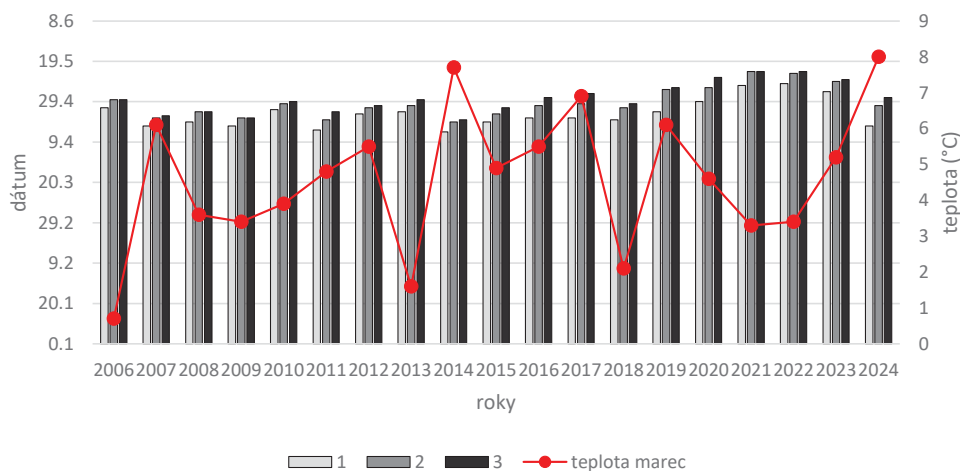
**Tab.3** Počet mrazových dní v apríli a ich výskyt počas fenofázy (\*), najnižšia (min) a najvyššia (max) aprílová minimálna teplota vzduchu (Tmin) v jednotlivých rokoch

**Tab. 3** Number of frost days in April and their occurrence during the phenophase (\*), lowest (min) and highest (max) April minimum air temperature (Tmin) in each year

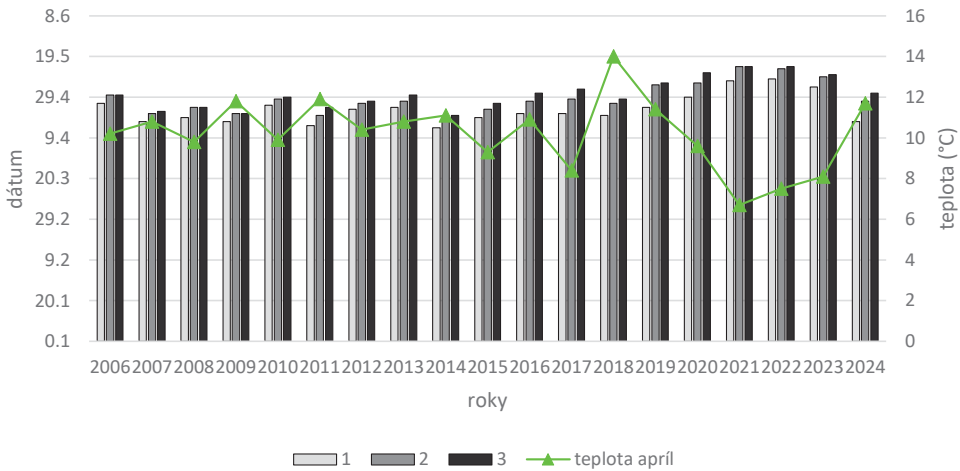
rok	intenzita mrazov (počet dní)				Tmin (°C)	
	slabý	mierny	silný	veľmi silný	min	max
2006	0	0	3	0	-3,3	10,6
2007	3	6*	0	1	-4,5	6,7
2008	2	0	5*	0	-2,7	12,9
2009	1	0	0	0	-0,2	6,7
2010	2	1	1	0	-2,1	8,9
2011	2	0	0	0	-0,4	8,9
2012	0	2	1	1	-5,2	8,8
2013	0	3	1	0	-3,5	13,7
2014	1	1	0	0	-1,6	11,8
2015	2	3	1	2	-4,4	9,5
2016	0	4*	1	0	-3,2	10,4
2017	3*	1	1	1	-4,9	9,9
2018	1	0	0	0	-0,1	13,7
2019	0	1	0	0	-1,6	11,5
2020	2	7*	6	4	-6,9	6,1
2021	5	2	3	6	-7,6	8,2
2022	2	3	5	2	-5,8	8,8
2023	1	1	3	2	-5,1	8,4
2024	2	1	0	0	-1,3	8,8

Fenologické extrémny len čiastočne ovplyvnili nástup rozpuku ihlicových púčikov, čo dokumentujú situácie, kedy fáza prebiehala tesne pred alebo počas výskytu mrazov (\*). Mrazy nespôsobili výrazné oneskorenie jej nástupu. Nízke teploty v podobe neskorých jarných mrazov nepoškodili púčiky ani ihlice v začiatkovej fáze rozpuku, pretože boli čiastočne chránené obalovými šupinami.

Roky 2014 a 2024 sa vyznačovali dlhým teplým jarným obdobím, kedy priemerná teplota v marci dosiahla 7,7 °C a 8°C, v apríli 11,1 °C a 11,7 °C. V týchto rokoch obidva teplé jarné mesiace (marec, apríl) spôsobili najskorší rozpuk púčikov v každej výškovej skupine. V roku 2018 sme aj napriek bezmrazovému obdobiu a najvyššej priemernej mesačnej aprílovej teplote (14 °C) v celom sledovanom období nezaznamenali skorý nástup fenofázy. Ten bol ovplyvnený nízkou priemernou marcovou teplotou vzduchu, ktorá dosiahla len 2,1 °C. Opačným extrémom boli roky 2021 a 2022 s najnižšími priemernými aprílovými teplotami (6,7 a 7,5 °C) a vysokým výskytom aprílových mrazových dní silnej a veľmi silnej intenzity. Táto chladná jar spôsobila posun fenofázy až do prvej polovice mája. Preto sme pri teplotnej analýze použili priemerné dvojmesačné teploty vzduchu pred a počas tejto fázy (Obr. 2 a 3) s prepojením na výskyt teplotných extrémov (Tab. 3).



**Obr. 2** Závislosť nástupu fázy od priemernej marcovej teploty vzduchu  
**Fig. 2** Dependence of phase onset on March mean air temperature



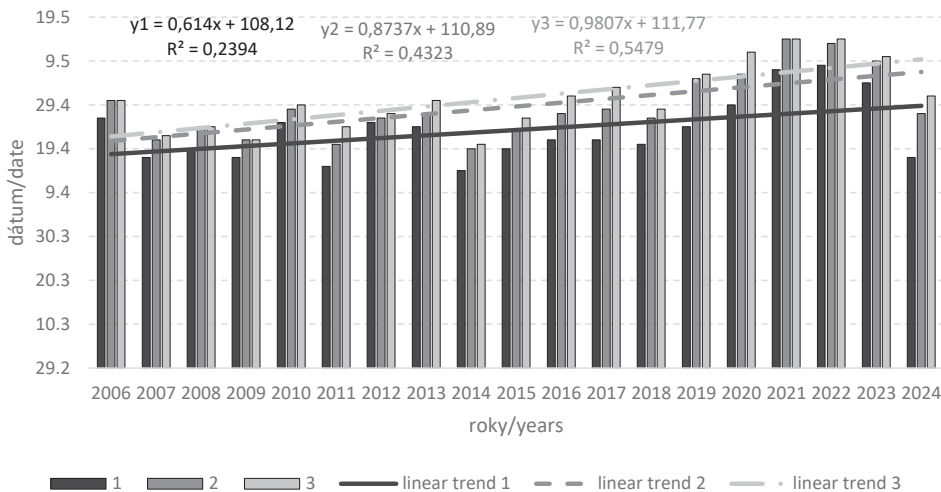
**Obr. 3** Závislosť nástupu fázy od priemernej aprílovej teploty vzduchu  
**Fig. 3** Dependence of phase onset on April mean air temperature

Vzťah medzi nástupom fenologickej fázy a teplotou vzduchu uvádzajú korelačné koeficienty v tabuľke 4. Vplyv priemernej marcovej teploty vzduchu na rozpuk ihlicových púčikov bol slabý bez štatistickej významnosti. Významný vplyv aprílovej priemernej teploty vzduchu na nástup fázy sme zaznamenali vo všetkých výškových skupinách v čase nástupu fázy. Najsilnejšia korelácia sa prejavila v prvej výškovej skupine.

**Tab. 4** Korelačné koeficienty a ich štatistická významnosť (\*) pri 95% spoľahlivosti  
**Tab. 4** Correlation coefficients and their statistical significance (\*) at 95% confidence interval

výšková skupina	marec	apríl
1	0.369	0.739*
2	0.214	0.677*
3	0.13	0.648*

Trendové analýzy (Obr. 4) ukázali posun fázy do neskoršieho obdobia vo všetkých výškových skupinách o 11-18 dní s významným trendom pri 95% spoľahlivosti. Najväčšie oneskorenie sa prejavilo v tretej výškovej skupine, kde bol trend najvýznamnejší. Oneskorenie fázy ovplyvnilo chladné obdobie rokov 2020-2023, kedy fáza prebiehala práve v tejto skupine.



**Obr. 4** Nástup rozpuku ihlicových púčikov a trendy podľa výškových skupín  
**Fig. 4** Onset of needle budbreak and trends by height group

#### 4. Diskusia

Rozpuk ihlicových púčikov sme sledovali v hornej časti koruny na rovnakých svetových stranách, aby sme sa vyhli subjektívnej chybe pozorovania. Fenofáza začína v spodnej časti koruny, ktorá je ovplyvnená mikroklimou porastu. Preto sme túto časť z pozorovania vylúčili. Rovnaký priebeh nástupu fázy u ihličnatých druhov uvádza aj Davi et al. (2011) v podobe teplotného mikroklimatického gradientu. Takéto posuny fázy nastávajú aj pri rôznom dopade svetla na korunu, preto je dôležité pozorovanie v rovnakých častiach koruny aj na rovnakých expozičných stranách. Na podobné metodické princípy pri pozorovaní vegetatívnych fenologických fáz jedle bielej poukazuje aj práca Zahnd et al. (2023). Metodická chyba môže spôsobiť nesprávne výsledky pri hodnotení dĺžky fázy alebo aj vegetačného obdobia.

Výsledky našej analýzy ukázali, že púčiky jedle bielej reagujú na teploty v jarných mesiacoch postupne v závislosti od nadmorskej výšky z ktorej pochádzajú. Z toho vyplýva, že citlivosť populácie na globálne otepľovanie môže byť pre daný druh stabilná, napriek možnej lokálnej adaptácii. Výsledky sa zhodujú s prácou Vitasse et al. (2009), ktorí poukázali na to, že fenológia drevín mierneho pásma je lokálne prispôbená klíme.

Neskoré mrazy boli definované ako dni s priemernou teplotou pod 0°C v špecifickom bezmrazovom období. Reakcia výškových skupín na neskoré jarné mrazy sa prejavila len pri ich výskyte tesne pred fenofázou, pričom dôležitú úlohu zohráva ich intenzita. Najviac ovplyvňujú fenofázu mrazy pod -4 °C, ktoré sú podľa Madarovej klasifikácie

definované ako veľmi silné (Madara 2016). Podľa Gazola et al. (2019) výskyt neskorých mrazov nemá výrazný vplyv na poškodenie ihlíc jedle. Mihai et al. (2018) uvádzajú, že neskoré jarné mrazy sú často príčinou poškodenia mladých ihlíc a výhonkov, najmä ak nie sú dostatočne prispôbené miestnej klíme v mieste výsadby. Poškodenie ihlíc neskorým mrazom súvisí s výskytom silných mrazov koncom jari aj napriek tomu, že v Rumunsku klimatické zmeny ukazujú rastúce teploty vzduchu v jarnom období (Dumitrescu et al., 2015). V našich podmienkach sme ich súvislý výskyt 4-5 dní zaznamenali v rokoch 2020 a 2021. Predkladaná štúdia objasnila, ako na teplotné situácie reagujú jednotlivé výškové skupiny. Nízke teploty rôznej intenzity nespôsobili poškodenie púčikov vo fáze rozpadu. Jedince 2. (760–950 m n. m.) a 3. (960–1100 m n. m.) výškovej skupiny mali púčiky v tomto období čiastočne chránené obalovými šupinami. Genotypy z vyšších nadmorských výšok si zachovávajú väčšiu odolnosť voči mrazu. Jedince 1. skupiny (550–750 m n. m.) sa dokázali na danom stanovišti za viac ako 40 rokov adaptovať na zmenené podmienky prostredia. Poškodenie asimilačných orgánov mrazom sme nezaznamenali ani v prvej skupine. Naše výsledky sú v súlade s údajmi publikovanými Hansenom a Larsenom (2004), ktorí zistili významné rozdiely medzi provenienciami jedle čo sa týka rozpadu púčikov a tiež pozitívnu koreláciu medzi odolnosťou voči zimným mrazom a neskorším rozpadom. Podľa Hofmanna a Bruelheideho (2015) náchylnosť asimilačných orgánov na poškodenie mrazom je druhovo špecifická a závisí od fenológie druhu a geografickej polohy lokality. Vzťah medzi nástupom fenologickej fázy a úhrom zrážok sme nehodnotili. Viaceré práce (Studer et al., 2005; Kubin et al. 2014; Škvareninová-Mrekaj, 2022) ho v jarnom období uvádzajú ako nevýznamný vzhľadom na vysokú pôdnu vlhkosť po zimnom období.

## 5. Záver

Autochtónne populácie jedle bielej si zachovávajú postupný nástup fázy rozpadu ihlicových púčikov podľa výškových skupín, ktoré odrážajú pôvodné lokality ich výskytu. Fenologická fáza odráža každoročný priebeh teploty vzduchu v jarnom období. Možno ju využiť ako orientačný prvok pri teplotných analýzach aj v podmienkach, že teplotné údaje nie sú k dispozícii.

Štatisticky významný vplyv na nástup fázy rozpadu ihlicových púčikov mala priemerná teplota vzduchu v mesiaci apríl, kedy fenologická fáza prebiehala na väčšine proveniencií. Vzťah medzi nástupom fenologickej fázy a aprílovou teplotou vzduchu sa najvýraznejšie prejavil v prvej výškovej skupine, kde bola korelácia najtesnejšia (0,74). Minimálne teplotné extrémny v podobe silných mrazov pod  $-2^{\circ}\text{C}$  ju ovplyvňujú len ak sa vyskytnú tesne pred alebo počas začiatku fázy počas niekoľkých dní za sebou.

Sledovanie fenologických prejavov jedle bielej vo fáze rozpadu ihlicových púčikov má význam pri rozhodovacích procesoch zalesňovania, najmä pri prenose výsadbového materiálu do oblastí s výskytom častých jarných mrazov. Fenologická selekcia

umožní výber najodolnejších jedincov a populácií aj pre lokálne územia s rozmanitým geomorfologickým reliéfom.

**Pod'akovanie:** Autori d'akujú 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

- ANTONUCCI, S. (2017). Phenological responses to climate in meristems of conifers along altitudinal and latitudinal gradients. Doctoral thesis, <https://hdl.handle.net/11695/75080>
- ASSE, D., CHUINE, I., VITASSE, Y., YOCOZ, N.G., DELPIERRE, N., BADEAU, V., DELESTRADE, A., RANDIN, CH. F. (2018). Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252:220–230.
- BRASLAVSKÁ, O., KAMENSKÝ, L. (1996). Fenologické pozorovanie lesných rastlín. SHMÚ, Bratislava, 22 s.
- CSILLÉRY, K., BUCHMANN, N., FADY, B. (2020). Adaptation to drought is coupled with slow growth, but independent from phenology in marginal silver fir (*Abies alba* Mill.) populations. *Evolutionary Applications*, 13(9), 2357–2376.
- DAVI, H., GILLMANN, M., IBANEZ, T., CAILLERET, M., BONTEMPS, A., FADY, B., LEFÈVRE, F. (2011). Diversity of leaf unfolding dynamics among tree species: new insights from a study along an altitudinal gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1504–1513.
- DUMITRESCU, A., BOJARIU, R., BIRSAN, M.V., MARIN, L., MANEA, A. (2015). Recent climatic changes in Romania from observational data (1961–2013). *Theoretical and Applied Climatology*, 122 (1-2), 111–119.
- DYDERSKI, M.K., PAŽ, S., FRELICH, L.E., JAGODZINSKI, A.M. (2018). How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology*, 24(3), 1150–1163.
- ELLING, W., DITTMAR, C., PFAFFELMOSE, K., RÖTZER, T. (2009). Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. *Forest Ecology and management*, 257(4), 1175–1187.
- GAZOL, A., CAMARERO, J. J., COLANGELO, M., DE LUIS, M., DEL CASTILLO, E. M., SERRA-MALUQUER, X. (2019). Summer drought and spring frost, but not their interaction, constrain European beech and Silver fir growth in their southern distribution limits. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107695.
- HANSEN, J. K., LARSEN J. B. (2004). European silver fir (*Abies alba* Mill.) provenances from Calabria, southern Italy: 15-year results from Danish provenance field trials. *European Journal of Forest Research*, 123, 127–138.
- HOFMANN, M., BRUELHEIDE, H. (2015). Frost hardiness of tree species is independent of phenology and macroclimatic niche. *Journal of Biosciences*, 40, 147–157.
- CHMURA, D. J., ROZKOWSKI, R. (2002). Variabilita bukových proveniencií v jarnej a jesennej fenológii. *Silvae genetica*, 51(2-3), 123–127.
- JEAN, F., DAVI, H., ODDOU-MURATORIO, S., FADY, B., SCOTTI, I., SCOTTI-SAINTAGNE, C., PICHOT, C. (2023). A 14-year series of leaf phenological data collected for European beech (*Fagus sylvatica* L.) and silver fir (*Abies alba* Mill.) from their geographic range margins in south-eastern France. *Annals of Forest Science*, 80(1), 35.
- 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*, p. 4882.
- LAPIN M., FAŠKO P., MELO M., ŠĽASTNÝ P., TOMLAIN J. (2002). Klimatické oblasti. In: Atlas krajiny Slovenskej republiky. Bratislava, Ministerstvo ŽP SR, s. 95.
- LINDERHOLM, H. (2006). Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology* 137, 1–14.
- LUKASOVÁ, V., VIDO, J., ŠKVARENINOVÁ, J., BIČÁROVÁ, S., HLAVATÁ, H., BORSÁNYI, P., ŠKVARENINA, J. (2020).

- Autumn phenological responses of European beech to drought and heat. *Water*, 12(9), 2610, doi:10.3390/w12092610.
- MADARA, M. (2016). Výskyt prízemných mrazov na Slovensku za mesiace apríl až október. *Meteorologický časopis*, 19, 67–74.
- MAXIME, C., HENDRIK, D. (2011). Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient. *Trees*, 25(2), 265–276.
- MEIER, U. (1997). Growth stages of plants – Entwicklungsstadien von Pflanzen– Estadios de las plants – Development des Plantes. Blackwell Wissenschaftsverlag. BBCH-Monograph. Berlin und Wien, 622 p.
- MIHAI, G., MIRANCEA, I., BIRSAN, M. V., DUMITRESCU, A. (2018). Patterns of genetic variation in bud flushing of *Abies alba* populations. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 11(2), 284.
- PAGAN, J., RANDUŠKA, D. (1987). Atlas drevín I. Obzor, Bratislava, 357 s.
- RAFFERTY, N.E., DIEZ, J.M., BERTELSEN, C.D. (2020). Changing climate drives divergent and nonlinear shifts in flowering phenology across elevations. *Curr. Biol.*, 30, 432–441.
- SCHEIFINGER H., MENZEL A., KOCH E., PETER CH. (2003). Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theoretical Applied Climatology*, 74, 41–51.
- STUDER, S., APPENZELLER, C., DEFILA, C. (2005). Inter-annual variability and decadal trends in alpine spring phenology: a multivariate analysis approach. *Climatic Change*, 73(3):395–414.
- SUVANTO, S., NÖJD, P., HENTTONEN, H.M., BEUKER, E., MÄKINEN, H. (2016). Geographical patterns in the radial growth response of Norway spruce provenances to climatic variation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 222:10–20.
- SWIDRAK, I., SCHUSTER, R., OBERHUBER, W. (2013). Comparing growth phenology of co-occurring deciduous and evergreen conifers exposed to drought. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 208(10-12), 609-617.
- Škvareninová, J. (2013). The impact of climate change on the phenological responses of ecosystems. Scientific monograph. Technical University in Zvolen, 132 p.
- Škvareninová, J., Mrekaj, I. (2022). Impact of climate change on Norway Spruce Flowering in the Southern Part of the Western Carpathians. *Frontiers In Ecology and Evolution*, 10, 865471.
- UNUK NAHBERGER, T., DAMJANIČ, R., KRAIGHER, H., GREBENC, T. (2021). Potential link between ectomycorrhizal community composition and host tree phenology. *Forests*, 12(12).
- VITASSE Y, DELZON S, BRESSON C, MICHALET R, KREMER, A. (2009). Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone species growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research* 39, 1259–1269.
- WENDEN B., MARIADASSOU M., CHMIELEWSKI F. M., VITASSE Y. (2020). Shifts in the temperature-sensitive periods for spring phenology in European beech and pedunculate oak clones across latitudes and over recent decades. *Global Change Biology* 26:1808–1819.
- ZAHND, C., AREND, M., KAHMEN, A., HOCH, G. (2023). Microclimatic gradients cause phenological variations within temperate tree canopies in autumn but not in spring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 331, 109340.

#### **Kontaktné údaje:**

Prof. Ing. Jana Škvareninová, PhD.  
 Technická univerzita vo Zvolene  
 Fakulta ekológie a environmentalistiky  
 T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen  
 email: skvareninova@tuzvo.sk



## SUMMARY

The paper gives an overview of the phenological phase of needle bud opening (BBCH 07) and its trends in 26 provenances of white fir from Slovakia classified according to altitude into 3 altitudinal groups. The phenological response of the groups to annual mean March and April monthly air temperatures and late spring frosts during the years 2006-2024 was investigated. The provenances retain the sequence of the onset of the phase according to the altitude from which they originate. Provenance phase trends are lagged by 11-18 days with statistical significance. The more significant influence on the onset of the phase is the average April air temperature. Temperature extremes in the form of late frosts affect it only partially affect, if they occur just before or during the onset of the phase continuous and their intensity falls below  $-2^{\circ}\text{C}$ . Strong and very strong frosts do not damage buds and needles at the beginning of this phase.

**Keywords:** silver fir (*Abies alba* Mill.), phenology, air temperature, late frosts, provenance



# HODNOTENIE DYNAMIKY RASTU A VODNÉHO STAVU RÔZNYCH DRUHOV LESNÝCH DREVÍN V KLIMATICKY ODLIŠNÝCH ROKOCH S VYUŽITÍM DENDROMETROV

Adriana LEŠTIANSKA – Peter FLEISCHER JR. – Katarína STŘELCOVÁ

LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR., STŘELCOVÁ, K.: Evaluation of growth and water status dynamics of various forest tree species in climatically different years using dendrometers. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

## ABSTRAKT

Nárast klimatických extrémov prejavujúcich sa zvyšujúcou sa frekvenciou vln horúčav ako aj nerovnomerným rozložením zrážok a výskytom sucha majú za následok nárast zraniteľnosti lesných ekosystémov. Práca je zameraná na analýzu vplyvu klimatických a pôdných faktorov na sezónny radiálny rast a vodnú bilanciu stromov v priebehu klimaticky odlišných sezón (apríl–september) rokov 2021 a 2022. Vodný deficit stromu (VDS) bol odvodený zo záznamov zmien obvodu kmeňov (ZOK) získaných pomocou dendrometrov inštalovaných na dospelých stromoch smreka obyčajného, jedle bielej, borovice obyčajnej a smrekovca opadavého. Štúdia bola vykonaná na území arboréta Borová hora (350 m n. m., stredné Slovensko), ktoré predstavuje teplejšie a suchšie podmienky v porovnaní s pôvodnými biotopmi skúmaných drevín, lokalizovanými v nadmorskej výške nad 800 m n. m. Veľkosti sezónnych ZOK a hodnôt VDS boli druhovo špecifické a preukázali výrazné rozdiely medzi sledovanými sezónami. Sledované dreviny vykazovali odlišné fyziologické reakcie na rôzne podmienky prostredia v spojení s odlišnou stratégiou hospodárenia a uchovávaní vody v kmeni. Zmeny obsahu vody v kmeni boli v úzkom vzťahu s faktormi prostredia. Jedľa a borovica vykázali dvojnásobne vyššie sezónne prírastky na obvode kmeňa v porovnaní so smrekom a smrekovcom.

**Kľúčové slová:** lesné dreviny, dendrometer, zmeny obvodu kmeňa, vodný deficit stromu

## 1. ÚVOD A PROBLEMATIKA

V súvislosti s očakávanými klimatickými zmenami sa čoraz viac prikladá dôraz na monitoring zmien v teplotnom režime a vyššej frekvencie extrémnych poveternostných podmienok, ktoré predstavujú významné riziko pre lesné ekosystémy (SCHULDT *et al.* 2020). Klimatické faktory patria k dôležitým faktorom, ktoré určujú druhové zloženie ekosystémov, riadia ekofyziologické procesy a ovplyvňujú celkovú funkčnosť a stabilitu ekosystémov. V kontexte klimatických zmien je dôležité pochopiť, či sa klimatické

podmienky stávajú viac alebo menej priaznivými pre rast a prežívanie stromov. Odolnosť lesa voči klimatickým extrémom závisí predovšetkým od intenzity pôsobenia faktora, ale aj od špecifických funkčných vlastností dreveniny, pričom citlivosť na faktory sa medzi jednotlivými druhmi líši (VITALI 2017, LEŠTIANSKA *et al.* 2020).

Rast stromov v miernom klimatickom pásme je viazaný na vegetačné obdobie, kedy stromy periodicky zväčšujú svoju hrúbku. V súčasnosti je široko používanou metódou vo výskume vzťahu medzi klímou, rastom a vodnou bilanciou dreveniny monitorovanie zmien obvodov kmeňov pomocou automatických dendrometrov (OBERHUBER *et al.* 2015; LEŠTIANSKA *et al.* 2020, 2023). Zmeny hrúbky stromu nie sú výsledkom len tvorby xylémových pletív, ale sú zapríčinené aj príjmom vody (napučiavanie kmeňa) a výdajom vody (zmršťovanie kmeňa) (DAUDET *et al.* 2005). Nedeštruktívne kontinuálne pozorovania zmien obvodov kmeňa pomocou dendrometrov poskytujú časové rady kolísania zásob vody stromu v rôznych časových škálach, od hodinových, denných zmien až po sezónny rast stromov vo vzťahu k zmenám podmienok prostredia. Amplitúda denného zmršťovania je funkciou straty vody z listov a absorpcie vody koreňmi (ZWEIFEL *et al.* 2006). Kmene stromov sa počas dňa zmenšujú v dôsledku transpirácie vyvolanej transportom vody z koreňov do listov a poklesom zásob vody v kmeni. V noci sa kmene opäť zväčšujú v dôsledku doplnenia vody do pletív. Analýzy dendrometrických údajov umožňujú aj sledovanie suchých a vlhkých období trvajúcich od niekoľko dní po niekoľko týždňov. Jedným zo spôsobov zisťovania zmien obsahu vody v rastlinnom pletive s vysokým časovým rozlíšením je hodnotenie vodného deficitu stromu (VDS). VDS tiež známy ako zmršťovanie kmeňa spôsobené vodným deficitom poskytuje informácie o relatívnom obsahu vody v rastline (ZWEIFEL 2016). VDS je v súčasnosti často využívaný v ekofyziologickom výskume pri hodnotení stresu zo sucha (ZWEIFEL 2016, DIETRICH *et al.* 2018) a je možné ho získať meraním zmien obvodu kmeňa pomocou dendrometra (OBERHUBER *et al.* 2015, LEŠTIANSKA *et al.* 2020, 2023).

V práci analyzujeme rastovú dynamiku a vodnú bilanciu rôznych druhov lesných drevín vo fáze dospelosti (jedľa biela, smrek obyčajný, borovica lesná a smrekovec opadavý) vo vzťahu k atmosférickým a pôdnym faktorom prostredia na základe merania zmien obvodu pomocou pásových dendrometrov v priebehu klimaticky odlišných sezón (apríl–september) rokov 2021 a 2022. Posúdenie druhovo špecifickej rastovej odozvy na klímu je náročné, pretože si vyžaduje homogénne stanovište a porastové podmienky, aby sa určil vplyv len klimatických faktorov. V práci sme sledovali rastové schopnosti rôznych druhov drevín, ktoré rastú na rovnakom mieste v teplejších a suchších podmienkach v porovnaní s ich prirodzenými biotopmi.

## 2. ZÁUJMOVÉ ÚZEMIE, VÝSKUMNÉ PLOCHY A POUŽITÝ MATERIÁL

Zájmové územie sa nachádza v arboréte Borová hora (350 m n. m., GPS: 48°35' N, 19°07' E, Zvolenská kotlina, stredné Slovensko). Predstavuje 2. lesný vegetačný stupeň (bukovo-dubový) a z typologického hľadiska ide o skupinu lesných typov *Fageto-Quercetum* a *Corneto-Quercetum* (<https://geo.enviroportal.sk/atlassr>). Prevládajúce pôdne typy sú kambizem, pararendziny a fluvizeme. Z klimatického hľadiska sa územie nachádza v miernom klimatickom pásme a patrí do teplého až mierne teplého regiónu s chladnou zimou. Priemerná ročná teplota vzduchu je 7,9 °C a ročný úhrn zrážok 651 mm (Tab. 1). Vo vegetačnom období (apríl–september) je dlhodobá priemerná teplota vzduchu 14,7 °C, úhrn zrážok 377 mm. Dlhodobé údaje za obdobie rokov 1961–1990 sú získané zo Slovenského hydrometeorologického ústavu, stanica Sliač (313 m n. m., GPS: 48°38' N, 19°08' E).

Na území arboréta boli založené 4 výskumné plochy, z ktorých každá predstavuje jeden druh dreviny: smrek obyčajný (*Picea abies*), jedľa biela (*Abies alba*), borovica lesná (*Pinus sylvestris*) a smrekovec opadavý (*Larix decidua*). Zájmové územie výskumných plôch predstavuje región s teplejšou a suchšou klímou ako pôvodné prirodzené biotopy sledovaných drevín lokalizované v nadmorskej výške nad 800 m n. m. Dlhodobý priemer (1961–1990) teploty vzduchu súčasnej lokality je vyšší o viac ako 2 °C a ročný úhrn zrážok je približne o 100 mm nižší ako v ich pôvodných biotopoch (Tab. 1).

**Tab. 1** Charakteristika výskumných plôch (Borová hora) a pôvodných lokalít vybraných druhov lesných drevín: jedľa biela (*Abies alba*), smrek obyčajný (*Picea abies*), borovica lesná (*Pinus sylvestris*), smrekovec opadavý (*Larix decidua*), hrúbka kmeňov meraná v prsnej výške ( $d_{1,3}$ ) meraná na začiatku roku 2017 a vek stromov

**Table 1** The characteristics of the research areas (Borová hora) and original location of the selected tree species: Silver fir (*Abies alba*), Norway spruce (*Picea abies*), Scots pine (*Pinus sylvestris*), European larch (*Larix decidua*), stem diameter measured at 1,3 m breast height ( $d_{1,3}$ ) measured at the beginning of 2017 and age of trees

Charakteristika	Borová hora	Pôvodné lokality skúmaných drevín (proveniencie)			
		Jedľa biela	Smrek obyčajný	Borovica lesná	Smrekovec opadavý
Orografický celok	Zvolenská kotlina	Kremnické vrchy	Podtatranská kotlina	Spišsko-gemerský kras	Spišsko-gemerský kras
NV (m n. m.)	350	950	800	950	900
T [°C]	7,9	5,8	5,3	4,8	4,8

<b>Z [mm]</b>	651	786	833	831	831
<b>d<sub>1,3</sub>±std<sub>(2017)</sub> (mm)</b>	-	33,4±5,0	25,3±3,5	30,7±3,5	31,8±3,9
<b>Vek<sub>(2017)</sub> (roky)</b>	-	46	49	37	50

Skratky: NV – nadmorská výška, T - dlhodobý priemer teploty vzduchu a Z - dlhodobý priemer zrážok za obdobie rokov 1961–1990, d<sub>1,3</sub> - hrúbka kmeňov meraná v prsnej výške 1,3 m  
Abbreviations: NV – altitude, T – long-term average of air temperature and Z – long-term average of precipitation for the years 1961–1990, d<sub>1,3</sub> - stem diameter measured at 1,3 m breast height

### 3. MERANIE A SPRACOVANIE ÚDAJOV

#### 3.1. Klimatické a pôdne faktory

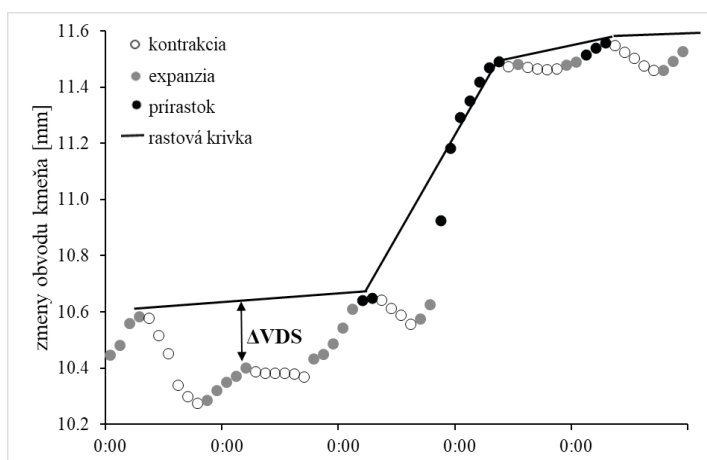
Meteorologické údaje boli v období apríl až september rokov 2021 a 2022 zaznamenávané pomocou automatickej meteorologickej stanice (EMS Brno, CZ) situovanej na voľnej ploche vzdialenej 80–150 m od výskumných plôch. Meteorologická stanica patrí do siete lesníckeho biometeorologického monitoringu ([www.forestweather.sk](http://www.forestweather.sk)). Na meteorologickej stanici prebieha meranie teploty vzduchu (T, °C), globálnej radiácie (GR, W.m<sup>-2</sup>), vlhkosti vzduchu (RV, %) a zrážok (Z, mm). Pre účely tejto štúdie boli ďalej odvodené charakteristiky: vodný sýtosťný deficit (VPD, Pa), potenciálna evapotranspirácia (PET, mm) a klimatická vodná bilancia (KVB, mm). VPD bol vypočítaný z teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu. Potenciálna evapotranspirácia (PET, mm) bola vypočítaná podľa Penmanovej rovnice (PENMAN 1948). Vlhkostné podmienky a dostupnosť vody bola hodnotená pomocou klimatickej vodnej bilancie (KVB) definovanej ako rozdiel medzi zrážkami a potenciálnou evapotranspiráciou. Záporné hodnoty KVB indikujú deficit vody, kladné hodnoty prebytok vody. Denné hodnoty KVB boli kumulované za účelom získania kumulatívnej vodnej bilancie (KVB<sub>kum</sub>) za obdobie apríl až september.

Na každej výskumnej ploche bol prostredníctvom sadrových blokov a MicroLog SP3 (EMS Brno, CZ) meraný pôdny vodný potenciál (PVP, MPa) v hĺbke pôdy 15, 30 a 50 cm. Z hodnôt z troch hĺbok a štyroch výskumných plôch boli vypočítané priemerné hodnoty PVP.

#### 3.2 Zmeny obvodu kmeňa

Na každej ploche bolo vybraných 5 dospelých stromov, na ktoré boli nainštalované dendrometre. Zmeny obvodu kmeňov (ZOK, mm) boli zaznamenávané pomocou automatických pásových dendrometrov DRL26 (EMS Brno, CZ). Dendrometer je pripevnený na kmeň pomocou kovovej pásky obopínajúcej kôru stromu a pomocou datalógera každých 20 minút zaznamenáva drobné zmeny na obvode kmeňa s presnosťou ±1 μm.

Vodný deficit stromu (VDS, mm) bol kvantifikovaný zo záznamov zmien obvodu kmeňa (ZOK) podľa EHRENBERGERA *et al.* (2012) použitím programového balíka R „DendrometerR“. Spojením maximálnej dennej hodnoty a nasledujúcej rovnakej alebo vyššej hodnoty obvodu kmeňa bola vytvorená „rastová krivka“, pričom sa ignorujú obdobia neúplného návratu hodnoty obvodu v dôsledku zmrštenia kmeňa spôsobeného nedostatkom vody. Následne bol stanovený vodný deficit stromu (VDS) ako rozdiel vo veľkosti obvodu kmeňa za podmienok nízkej dostupnosti vody (mínusové hodnoty VDS) vo vzťahu k veľkosti kmeňa za podmienok úplnej hydratácie (VDS = 0) vyjadrenej „rastovou krivkou“ (OBERHUBER *et al.* 2015) (Obr. 1). Klesajúce hodnoty VDS indikujú pokles zásoby vody v pletivách a rastúcu dehydratáciu. Denné hodnoty VDS boli kumulované za účelom získania kumulatívnej vodnej bilancie ( $VDS_{kum}$ ) počas obdobia apríl až september v rokoch 2021 a 2022.



**Obr. 1** Fázy denného cyklu zmien obvodu kmeňa (kontrakcia, expanzia, prírastok), „rastová krivka“ a vodný deficit stromu (VDS)

**Fig. 1** Phases of daily cycle of stem circumference changes (contraction, expansion, increment), “growth-trend line” and tree water deficit (VDS, mm)

#### 4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Prehľad klimatologických charakteristík v sledovaných sezónach (apríl–september) rokov 2021 a 2022 je uvedený v tabuľke 2. Obidve sezóny boli charakterizované priemernými teplotami vzduchu nad dlhodobým normálom (1961–1990), pričom sezóna 2022 bola teplejšia s priemernou teplotou vzduchu +2,3°C nad dlhodobým normálom v porovnaní so sezónou roku 2021 s odchýlkou teploty vzduchu +1,2°C nad dlhodobým normálom. Sezóna 2022 so zrážkovým úhrnom 346 mm bola suchšia v porovnaní s dlhodobým normálom (377 mm), pričom celkový úhrn 397 mm zaznamenaný počas

sezóny 2021 prekročil dlhodobý normál len o 4%. Vyššie teploty vzduchu a nižšie úhrny zrážok v roku 2022 mali za následok vyššie hodnoty deficitu vodných pár (VPD) a potenciálnej evapotranspirácie (PET) a nižšiu hodnotu celkovej klimatickej vodnej bilancie ( $KVB_{kum}$ ) v porovnaní s rokom 2021 (Tab. 2). Na obrázkoch 2 a 3 je zobrazená dynamika priemernej dennej teploty vzduchu, úhrnu zrážok a pôdneho vodného potenciálu za sledované sezóny. Zrážky boli v priebehu sezón výrazne diferencované, pričom denné úhrny zrážok v roku 2021 boli vyššie. Sezóna 2022 bola charakteristická vyšším počtom dní s nízkymi úhrnmi alebo bez zrážok, predovšetkým v mesiacoch máj, jún a júl, čo sa prejavilo aj na hodnotách pôdneho vodného potenciálu (PVP) (Obr. 2 a 3). Na začiatku oboch sezón bola pôda dostatočne nasýtená vodou. V sezóne 2021 PVP výraznejšie kolísal v závislosti od výskytu zrážok, pričom sa hodnoty PVP v priebehu mája až do prvej polovice júla pohybovali v intervale medzi -0,5 až -1,0 MPa. Potom postupne klesali až do konca sledovaného obdobia (Obr. 2). V druhej polovici mája roku 2022 začali hodnoty PVP postupne klesať a tento pokles pokračoval až do konca augusta. Výraznejší nárast PVP je možné pozorovať až v druhej polovici septembra (Obr. 3).

Sezónna dynamika zmien obvodu kmeňov (ZOK) a vodného deficitu stromu (VDS) odvodeného zo ZOK ukázali výrazné rozdiely medzi druhmi ako aj medzi sezónami (Obr. 2 a 3). V oboch rokoch boli prírastky obvodu kmeňa jedle a borovice viac ako dvojnásobné v porovnaní so smrekom a smrekovcom (Tab. 3). ZOK všetkých druhov vykazovali synchronný priebeh s plató, ktoré predstavuje stagnáciu rastu v obdobiach s nízkymi zrážkami a deficitom pôdnej vody (Obr. 2 a 3). Naopak, nárast obvodu kmeňa bolo jasne pozorované po zrážkových udalostiach, čo naznačuje jeho rehydratáciu (VIEIRA *et al.* 2013; ZWEIFEL *et al.* 2005). Sezónny prírastok sledovaných drevín s výnimkou borovice bol v sezóne 2022 v dôsledku obmedzených vlhkových pomerov nižší v porovnaní s rokom 2021. Smrekovec preukázal nižší pokles na sezónnom prírastku v porovnaní s jedľou a smrekom. V roku 2022 predstavoval prírastok o 18% nižší ako v sezóne 2021. Oveľa vyšší pokles bol u smreka (o 33%) a najväčší preukázala jedľa (o 38%) (Obr. 2 a 3, Tab. 3). Okrem toho, v suchšom roku 2022 v priebehu augusta borovica v predbehla jedľu a na konci sledovanej sezóny borovica preukázala vyšší prírastok ako jedľa (Obr. 2 a 3). Podobný priebeh bol zaznamenaný u tých istých jedincoch jedle a borovice aj v klimaticky odlišných sezónach, v zrážkovo dobre zabezpečenom roku 2017 a extrémne suchom roku 2018 (LEŠTIANSKA *et al.* 2020). To naznačuje vyššiu toleranciu borovice voči suchým podmienkam v porovnaní s ostatnými drevinami, čo je v súlade s inými autormi (napr. OBERHUBER *et al.* 1998). CAMARERO *et al.* (2015) tiež potvrdili konzistentný pokles radiálneho prírastku u rôznych druhov drevín v podmienkach sucha. Naopak, smrek obyčajný je v porovnaní s ostatnými drevinami jednou z najcitlivejších na suchu (VAN DER MAATEN THEUNISSEN *et al.* 2013), pretože vzhľadom na plytký koreňový systém je na zrážky a vlhkosť pôdy náročný (HORGAN *et al.* 2003). Naopak, borovica má hlboký



koreňový systém a dokáže získať vodu z podstatne väčších hĺbok ako napr. smrek obyčajný (PRACIAK *et al.* 2013).

**Tab. 2** Klimatická charakteristika sledovaného obdobia apríl až september (A–S) rokov 2021 a 2022.

**Table 2** Climatic characteristic representing the monitored period April–September (A–S) of the years 2021 and 2022.

Obdobie	Z [mm]			T [°C]			GR	RV	PET	VPD	KVB <sub>kum</sub>
	Úhrn [mm]	N [%]	char.	Priem. [°C]	Odch. [°C]	char.	[kWh.m <sup>-2</sup> ]	[%]	[mm]	[kPa]	[mm]
(A–S) 2021	397	104	n	15,6	1,2	snn	814	79	791.5	530.9	-394.5
(A–S) 2022	346	97	n	16,7	2,3	mnn	839	74	862.4	721.2	-516.8

Skratky: Z [mm] - zrážky, T [°C] - teplota vzduchu, GR [kWh.m<sup>-2</sup>] - globálna radiácia, RV [%] - relatívna vlhkosť vzduchu, PET [mm] - potenciálna evapotranspirácia, VPD [kPa] - vodný sýtosťný doplnok, KVB<sub>kum</sub> [mm] - kumulatívna klimatická vodná bilancia, N [%] - percento z dlhodobého priemeru, char. - charakteristika, Priem. [°C] - priemerná teplota vzduchu, Odch. - odchýlka od dlhodobého priemeru, n - normálny, snn - silne nadnormálny, mnn - mimoriadne nadnormálny  
Abbreviations: Z [mm] - precipitation, T [°C] - air temperature, GR [kWh.m<sup>-2</sup>] - global radiation, RV [%] - relative air humidity, PET [mm] - potential evapotranspiration, VPD [kPa] - vapour pressure deficit, KVB<sub>kum</sub> [mm] - cumulative climatic water balance, N [%] - percentage of the long-term average, char. - characteristic, Priem. [°C] - average air temperature, Odch. - deviation from the long-term average, n - normal, snn - strongly above normal, mnn - extremely above normal

Viacere štúdie (napr. OBERHUBER *et al.* 2015; ZWEIFEL *et al.* 2005) potvrdili, že nepriame merania stavu vody stromov (vodný deficit stromu, VDS) sú veľmi cenné pre sledovanie fyziologických reakcií na nedostatok vody. Klesajúce hodnoty VDS znamenajú výraznejší nedostatok vody. Počas sledovaných období VDS postupne klesal u všetkých druhov, aj keď s rôznou veľkosťou (Obr. 2 a 3). Tento trend narušili zrážkové udalosti, po ktorých VDS dosahoval hodnoty blížiacie sa k nule (Obr. 2 a 3). Hodnoty VDS všetkých druhov drevín vykazovali synchronne fluktuácie v oboch rokoch, pričom smrekovec vykazoval najväčší kumulatívny VDS (Tab. 3, Obr. 2 a 3). Najvyššie denné hodnoty VDS počas oboch sezón (Obr. 2 a 3) boli u smrekovca, pretože na rozdiel od ostatných skúmaných druhov si smrekovec zachováva vysokú mieru transpirácie aj v suchých podmienkach (BRÉDA *et al.* 2006). Naopak, najmenšie hodnoty kumulatívnych a denných hodnôt VDS boli stanovené pre jedľu počas oboch rokov, keďže tento druh je známy svojou silnou reguláciou transpirácie (NOURTIER *et al.* 2014).

**Tab. 3** Sezónna dynamika charakteristík rastu a vodného stavu stromu skúmaných drevín (jedľa biela, borovica lesná, smrekovec opadavý a smrek obyčajný).

**Table 3** Seasonal dynamics of growth and stem water status characteristics of the investigated tree species (fir, pine, larch and Norway spruce).

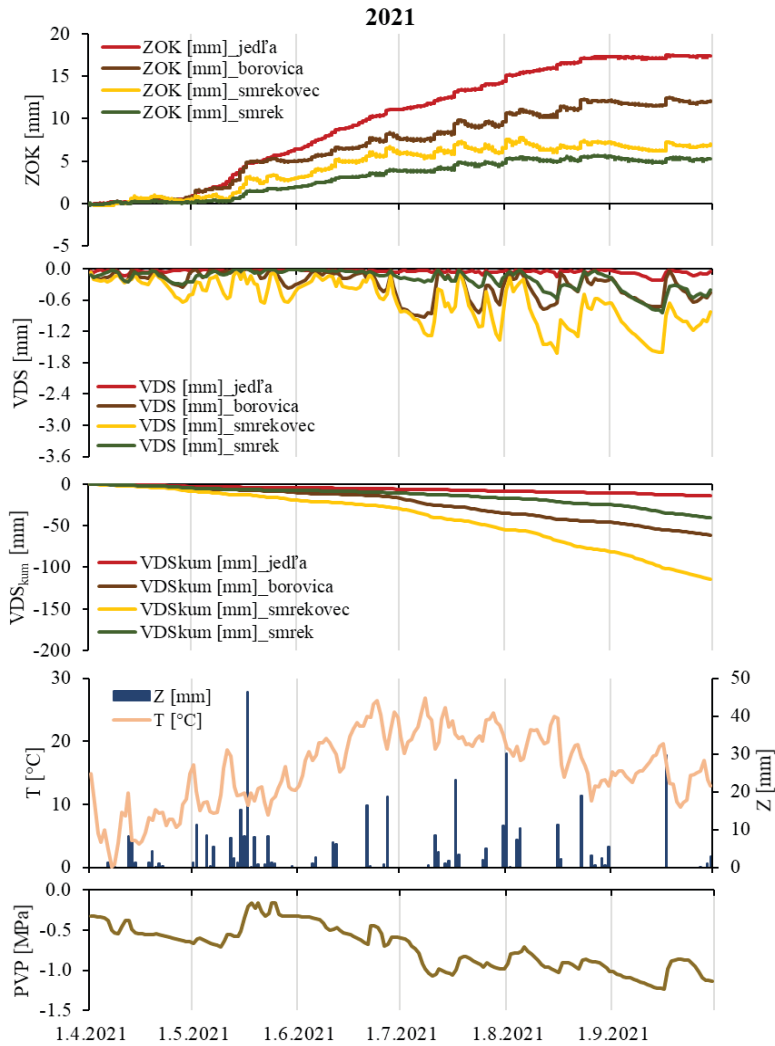
Drevina	2021		2022	
	ZOK[mm]±std	VDS [mm]±std	ZOK [mm]±std	VDS [mm]±std
jedľa biela	17,4±6,0	-14,4±4,0	11,7±4,0	-28,1±12,9
borovica lesná	12,0±2,9	-61,2±14,4	13,3±2,7	-108,7±55,0
smrekovec opadavý	7,0±1,8	-113,8±14,3	5,7±1,0	-193,5±29,5
smrek obyčajný	5,3±2,7	-40,4±9,1	3,3±1,9	-77,7±22,1

Skratky: ZOK - priemerný kumulatívny sezónny prírastok na obvode kmeňa (mm), VDS - priemerný kumulatívny vodný deficit stromu (mm) a std - smerodajná odchýlka

Abbreviations: ZOK - average cumulative seasonal increment (mm), VDS - average cumulative tree water deficit (mm) and std - standard deviation

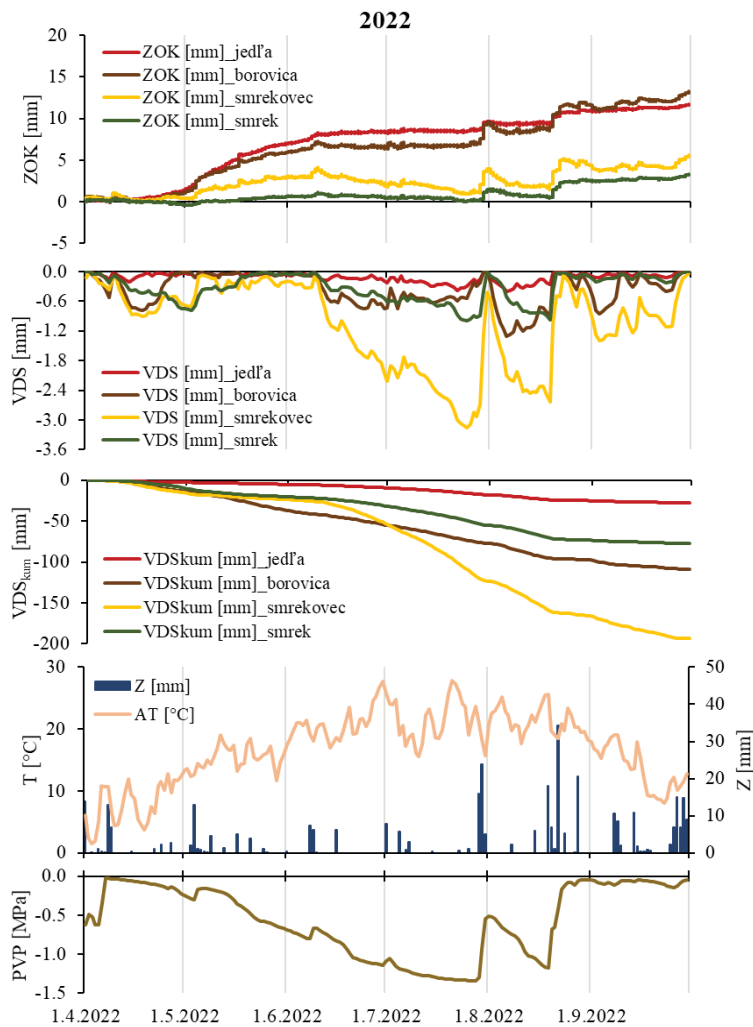
## ZÁVER

Výskum a priebežné monitorovanie fyziologických a rastových reakcií na extrémny počasie môže pomôcť lepšie pochopiť riziká a dopady klimatických zmien na rôzne druhy stromov a lokality. Otvorenou otázkou zostáva výber vhodných metód, ktoré budú na účely posúdenia vplyvu súčasných, ale aj budúcich klimatických faktorov na lesné porasty použité, a ktoré dokážu detegovať reakcie drevín ešte predtým, než sa dajú navonok rozoznať viditeľné zmeny. V práci bola analyzovaná dynamika zmien obvodu kmeňov rôznych druhov drevín (jedľa biela, borovica lesná, smrek obyčajný a smrekovec opadavý) získaných pomocou dendrometrov s vysokým rozlíšením. Skúmané druhy rastú na rovnakom mieste nachádzajúcom sa v nižšej nadmorskej výške v teplejších a suchších podmienkach v porovnaní s ich prirodzenými biotopmi. Podmienky súčasnej lokality tak poskytujú možnosť skúmať reakciu rôznych druhov drevín na predpokladanú budúcu klímu, ktorej budú musieť čeliť aj vo svojich prirodzených biotopoch. Štúdia je zameraná na klimaticky odlišné sezóny rokov 2021 a 2022, kedy priemerná teplota vzduchu prekročila dlhodobý normál a meteorologické sucho v roku 2022 bolo označené za jedno z najzávažnejších období, ktoré postihlo veľkú časť Európy, vrátane Slovenska. Analýzy odhalili rozdiely v sezónnom raste a vodnej bilancii stromov medzi skúmanými druhmi drevín. Jedľa a borovica preukázali intenzívnejšiu rast v porovnaní so smrekom a smrekovcom. V období sucha v roku 2022 borovica v raste predbehla jedľu čo naznačuje, že hoci jedľa pomerne dobre znáša zvýšenie teploty, reaguje citlivejšie, pokiaľ sa vyššia teplota kombinuje s deficitom vody. Vodný deficit stromu sa ukázala ako vhodná charakteristika pre porovnanie vodného stavu rôznych druhov drevín.



**Obr. 2** Denná dynamika zmien obvodu kmeňov (ZOK [mm]) a vodného deficitu kmeňov (VDS [mm]), kumulatívny vodný deficit stromov (VDS<sub>kum</sub> [mm]) štyroch druhov lesných drevín (jedľa, borovica, smrekovec a smrek) a denná dynamika klimatologických a pôdných charakteristík v období apríl–september 2021: priemerná teplota vzduchu (T [°C]), úhrn zrážok (Z [mm]) a pôdny vodný potenciál (PVP [MPa]).

**Fig. 2** Daily dynamics of stem circumference changes (ZOK [mm]) and tree water deficit (VDS [mm]), cumulative tree water deficit (VDS<sub>kum</sub> [mm]) of four tree species (fir, pine, larch and spruce) and daily dynamics of climatological and soil characteristics in the period of April–September of the year 2021: average air temperature (T [°C]), total precipitation (Z [mm]) and soil water potential (PVP [MPa]).



**Obr. 3** Denná dynamika zmien obvodu kmeňov (ZOK [mm]) a vodného deficitu kmeňov (VDS [mm]), kumulatívny vodný deficit stromov (VDS<sub>kum</sub> [mm]) štyroch druhov lesných dreív (jedľa, borovica, smrekovec a smrek) a denná dynamika klimatologických a pôdnych charakteristik v období apríl–september 2022: priemerná teplota vzduchu (T [°C]), úhrn zrážok (Z [mm]) a pôdny vodný potenciál (PVP [MPa]).

**Fig. 3** Daily dynamics of stem circumference changes (ZOK [mm]) and tree water deficit (VDS [mm]), cumulative tree water deficit (VDS<sub>kum</sub> [mm]) of four tree species (fir, pine, larch and spruce) and daily dynamics of climatological and soil characteristics in the period April–September of the year 2022: average air temperature (T [°C]), total precipitation (Z [mm]) and soil water potential (PVP [MPa]) in the study period (April–September) of the year 2022.

## Pod'akovanie

Práca bola podporovaná Agentúrou 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 1/0057/22 a VEGA 1/0285/23.

## Literatúra

- BRÉDA, N., HUC, R., GRANIER, A., DREYER, E., 2006: Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann For Sci* 63, 625–544.
- CAMARERO, J.J., GAZOL, A., SANGÜESA-BARREDA, G., OLIVA, J., VICENTE-SERRANO, S.M., 2015: To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *J. Ecol.* 103, 44–57.
- DAUDET, F.A., AMÉGLIO, T., COCHARD, H., ARCHILLA, O., LACOINTE, A., 2005: Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *J. Exp. Bot.* 56, 135–144.
- DIETRICH, L., ZWEIFEL, R., KAHMEN, A., 2018: Daily stem diameter variations can predict the canopy water status of mature temperate trees. *Tree Physiol* 38 (7), 941–952.
- EHRENBERGER, W., RÜGER, S., FITZKE, R., VOLLENWEIDER, P., GÜNTHARDT-GOERG, M.S., KUSTER, T., ZIMMERMANN, U., AREND, M., 2012: Concomitant dendrometer and leaf patch pressure probe measurements reveal the effect of microclimate and soil moisture on diurnal stem water and leaf turgor variations in young oak trees. *Funct Plant Biol* 39 (4), 297–305.
- HORGAN, G., KEANE, M., & FARRELL, E. P., 2003: The influence of tree species on the growth, development, and persistence of forest ecosystems: Case study on the sensitivity of Norway spruce to drought. *For Ecol Manage* 177 (1), 49–66.
- 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), pp. 156.
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR., FLEISCHER, P. SR., MERGANIČOVÁ, K., STŘELCOVÁ, K., 2020: Interspecific variation in growth and tree water status of conifers under water-limited conditions. *J. Hydrol. Hydromech.* 68 (4), 368–381.
- NOURTIER, M., CHANZY, A., CAILLERET, M., YINGGE, X., HUC R., DAVI, H., 2014: Transpiration of silver Fir (*Abies alba* mill.) during and after drought in relation to soil properties in a Mediterranean mountain area. *Ann. For. Sci.* 71, 683–695.
- OBERHUBER, W., HAMMERLE, A., KOFER, W., 2015: Tree water status and growth of saplings and mature Norway spruce (*Picea abies*) at a dry distribution limit. *Front Plant Sci* 6, pp. 703.
- OBERHUBER, W., STUMBÖCK, M., KOFLER, W., 1998: Climate-tree growth relationships of Scots pine stand (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees* 13, 19–27.
- PENMAN, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc R Soc A* 193, 120–146
- PRACIAK, A., PASALODOS-TATO, M., SPATHELF, P. et al., 2013: The adaptation of pine species to drought and their ecological implications. *For Syst* 22 (3), 463–472.
- SCHULDT, B., BURAS, A., AREND, M., VITASSE, Y., BEIERKUHNEIN, C., DAMM, A., GHARUN, M., GRAMS, T. E. E., HAUCK, M., HAJEK, P., et al., 2020: A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic Appl. Ecol.* 45, 86–103.
- VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M., VAN DER MAATEN, E., & SPATHELF, P., 2013: Drought sensitivity of Norway spruce is higher than that of silver fir along an altitudinal gradient in southwestern Germany. *Ann For Sci* 70 (3), 261–270.
- VIEIRA, J., ROSSI, S., CAMPELO, F., FREITAS, H., NABAIS, C., 2013: Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. *Agric. For. Meteorol* 180, 173–181.

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. *Glob Change Biol* 23 (12), 5108–5119.

ZWEIFEL, R., HAENI, M., BUCHMANN, N., EUGSTER, W., 2016: Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytol* 211, 839–849.

ZWEIFEL, R., ZIMMERMANN, L., NEWBERY, D.M., 2005: Modelling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiol.* 25, 147–156.

ZWEIFEL, R., ZIMMERMANN, L., ZEUGIN, F., NEWBERY, D.M., 2006: Intra-annual radial growth and water relations of trees: implication towards a growth mechanism. *J Exp Bot* 57, 1445–1459.

<https://geo.enviroportal.sk/atlassr>  
[www.forestweather.sk](http://www.forestweather.sk)

#### **Kontaktné údaje autorov:**

LEŠTIANSKA Adriana<sup>1</sup>, FLEISCHER Peter Jr.<sup>1,2</sup>, STŘELCOVÁ, Katarína<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovensko, email: adriana.lestianska@tuzvo.sk

<sup>2</sup>Správa Tatranského národného parku, Tatranská Lomnica, 059 60 Vysoké Tatry, Slovensko

### **Evaluation of growth and water status dynamics of various forest tree species in climatically different years using dendrometers**

#### **SUMMARY**

The work is focused on the analysis of the influence of climatic and soil factors on the seasonal radial growth and water balance of trees during two climatically different seasons (April–September) of the years 2021 and 2022. Tree water deficit (VDS) as a reversible stem circumference changes was derived from records of stem circumference changes (ZOK) obtained using dendrometers installed on mature trees of Norway spruce (*Picea abies*), Silver fir (*Abies alba*), Scots pine (*Pinus sylvestris*) and European larch (*Larix decidua*). The study was conducted on the territory of the Borová hora arboretum (350 m a. s. l., central Slovakia), which represents warmer and drier conditions compared to their original habitats (located above 800 m a. s. l.). In connection with a different management and water conservation strategy in the stem, the monitored tree species showed different physiological reactions to various environmental conditions, and changes in stem water content were closely related to environmental factors. The values of the seasonal ZOK as well as the VDS values were species-specific and showed significant differences between the observed seasons. Fir and pine showed twice higher seasonal increases in stem circumference compared to spruce and larch.

## ZHODNOTENIE VYBRANÝCH FAKTOROV OVPLYVNÚJÚCICH MIERU KUMULÁCIE ORTUTI V IHLCIACH SMREKA OBYČAJNÉHO (*PICEA ABIES* (L.) KARST.)

Andrea ZACHAROVÁ, Hana OLLEROVÁ, Jakub MIŠÁNI, Miroslav VANEK

ZACHAROVÁ, A. – OLLEROVÁ, H. – MIŠÁNI, J. – VANEK, M.: Zhodnotenie vybraných faktorov ovplyvňujúcich mieru kumulácie ortuti v ihliciach smreka obyčajného (*Picea abies* (L.) Karst.). Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

### ABSTRAKT

Rastliny predstavujú dôležitú časť kolobehu ortuti. Na jednej strane zachytávajú najviac atmosférickej ortuti, na druhej ortuť aj emitujú. Príjem, kumuláciu a uvoľňovanie ortuti do a z rastlinných pletív ovplyvňuje veľa faktorov – podmienky prostredia, vlastností rastlín a celkový charakter vegetácie. Naším cieľom bolo zhodnotiť vplyv dvoch klimatických faktorov (priemerná ročná teplota a priemerný úhrn zrážok) na mieru kumulácie Hg v ihliciach smreka obyčajného vo fenofáze konečného oihličenia. Predpokladali sme, že s vyššou teplotou sa zvyšuje výpar Hg z asimilačných orgánov. Zistili sme, že miera kumulácie Hg v ihliciach je od 1  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  do 36  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ . Analýza variácie ukazuje, že vzťah medzi mierou kumulácie Hg a uvedenými klimatickými charakteristikami je síce štatisticky významný ( $p < 0,05$ ), ale pre podrobnejšiu analýzu a stanovenie trendov je potrebných omnoho viac dát. Príspevok predstavuje prvotnú štúdiu, ktorej cieľom je zoznámenie sa so súčasným stavom poznania tejto problematiky a zadefinovanie rámca ďalšieho skúmania.

**Kľúčové slová:** ortuť, *Picea abies*, ihlice, kumulácia, teplota vzduchu, úhrn zrážok

### Úvod

Ortuť (Hg) je vzhľadom na svoju toxicitu a ekotoxicitu celosvetovo monitorovaným ťažkým kovom, pričom biota je považovaná za kľúčový indikátor emisií a (celkových) únikov Hg do ovzdušia, vody a pôdy (UN). Ortuť dokáže v životnom

prostredí cirkulovať až 3000 rokov (Selin, 2009), pričom na jej globálnom kolobehu sa podieľa aj vegetácia. Rastliny v terestrických ekosystémoch môžu absorbovať až 2 200 – 3 600 Mg ortuti ročne, čím sa stávajú najväčším absorbentom Hg z atmosféry (Obrist et al., 2021; Zhou et al., 2021).

Príjem Hg do asimilačných orgánov ovplyvňuje v prvom rade prítomnosť Hg v pôde alebo v atmosfére v jej jednotlivých formách (Gworek et al., 2020). Mnohí autori (napr. Ericksen et al., 2003; Grigal, 2003) poukázali na to, že 90 % Hg v rastlinnej biomase pochádza primárne z atmosféry. Wohlegemuth et al. (2020) tvrdí, že rozdiely v (dennom) príjme Hg asimilačnými orgánmi rôznych druhov drevín nemusia byť výlučne spôsobené len koncentráciou atmosférickej Hg, ale majú skôr pôvod vo fyziologických vlastnostiach drevín. Dôležité sú aj pomery prvkov v listoch (ihliciach), pričom najvýraznejší je vplyv dusíka (Wohlegemuth et al., 2022). Obsah Hg v asimilačných orgánoch ovplyvňuje fenofáza a vek asimilačných orgánov (Rea et al., 2002; Marušková et al., 2005; Mendéz-Lopéz et al., 2022). Ďalšími faktormi sú celkový charakter porastu (napr. Blackwell et al., 2015; Demers et al., 2007), pôdne vlastnosti, najmä pH (Kabata-Pendias et Mukherjee, 2007) a zloženie pôdy vo vrchných pôdnych horizontoch (Navrátil et al., 2024). V lesných ekosystémoch je opad veľmi významným článkom kolobehu Hg (Mačejná et al., 2021; Navrátil et al., 2019).

Širokú škálu faktorov ovplyvňujúcich kumuláciu Hg v asimilačných orgánoch rastlín môžeme rozdeliť do troch základných skupín: prítomnosť Hg v prostredí; vlastnosti rastlín a podmienky prostredia (obr. 1).

prítomnosť Hg v prostredí	vlastnosti rastlín	podmienky prostredia
<ul style="list-style-type: none"> <li>• geochemické anomálie</li> <li>• zdroje antropogénnej ortuti: doprava, priemysel, banská činnosť</li> <li>• vstup Hg prostredníctvom opadu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• anatomické vlastnosti</li> <li>• morfológické vlastnosti</li> <li>• fyziologické procesy</li> <li>• obsah dusíka v listoch</li> <li>• fenofáza</li> <li>• vek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• teplota ovzdušia</li> <li>• úhrn zrážok</li> <li>• pH pôdy</li> <li>• obsah dusíka a síry v pôde</li> </ul>

**Obr. 1** Faktory ovplyvňujúce kumuláciu Hg v rastlinách (v zmysle literárneho prehľadu)  
**Fig. 1** Factors affecting mercury accumulation in plants (according to literature review)

Môžeme očakávať, že priemerná ročná teplota sa zvýši o 4-6 °C a ročný úhrn zrážok sa zníži o 15-20 % do roku 2080 (EEA, 2024). Takéto zmeny klimatických podmienok môžu viesť k zmenám toku ortuti v medzi pôdou a ovzduším. Vegetácia bude v tomto



kolobehu predstavovať dôležitý činiteľ, pretože sa významným spôsobom podieľa nielen na absorpcii, ale aj na emitovaní ortuť do ovzdušia (Bargagli, 2016).

Prác zaoberajúcich sa vplyvom zvyšujúcej sa teploty na kumuláciu, resp. uvoľňovanie Hg do/z rastlín je zatiaľ veľmi málo. Pre komplexné zhodnotenie je potrebný niekoľko desaťročí trvajúci monitoring Hg definovaný na konkrétnom mieste s použitím identického bioindikátora. Jednu z najkomplexnejších štúdií v tejto oblasti napísali Navrátil et al. (2024). V experimentálnom lesnom poraste sledovali vplyv klimatickej zmeny na kumuláciu Hg v opade smrekových ihlíc v priebehu rokov 1992 - 2015.

Naším cieľom bolo zhodnotiť vplyv dvoch klimatických faktorov (priemerná ročná teplota a priemerný úhrn zrážok) na mieru kumulácie Hg v ihliciach smreka obyčajného vo fenofáze konečného oihličenia. Predpokladali sme, že s vyššou teplotou sa zvyšuje výpar Hg z asimilačných orgánov. Ide o prvotnú štúdiu, ktorej cieľom je zoznámenie sa so súčasným stavom poznania tejto problematiky a zadefinovanie rámca ďalšieho skúmania.

## Materiál a metódy

Vzťah medzi mierou kumulácie Hg v rastlinách a meniacimi sa klimatickými podmienkami sme sa rozhodli sledovať na asimilačných orgánoch smreka obyčajného (*Picea abies* (L.) Karst.) vo fáze konečného oihličenia. Táto fáza je definovaná medzinárodnou fenologickou stupnicou kódom BBCH 19 (Meier, 1997). Ihlice boli zozbierané na piatich lokalitách v Banskej Bystrici (Rudlová, Rakytovce, Radvaň, Uhlisko, Fončorda a Fakultná nemocnica s poliklinikou F.D. Roosevelta) a vo Zvolene (Západ, Mestský úrad, Prior, Zámok a Podborová). V Banskej Bystrici boli vzorky odobrané v roku 2023, vzorky zo Zvolena v rokoch 2003, 2008 a 2015, a to na konci príslušného roku vo fenofáze konečného oihličenia. Kritériami výberu lokalít bola geografická blízkosť. Odbery vykonané v širšom časovom rámci a (vzhľadom na charakter zdrojov) približne rovnaké predpokladané zaťaženie prostredia ortuťou.

Odber asimilačných orgánov sa uskutočnil v zmysle STN 48 1001 Odber vzoriek asimilačných orgánov na zisťovanie zdravotného stavu. Na každej lokalite sa odobrali vzorky z 3–5 jedincov, z dvoch vetiev v strednej časti koruny, za účelom získania priemernej vzorky.

Vzorky sme následne rozseparovali podľa jednotlivých vekových tried (3 ročníky ihlíc), vysušili pri laboratórnej teplote a následne zhomogenizovali na jemný prášok pomocou oscilačného guľového mlyna RETSCH MM 301. Doba mletia každej vzorky bola 2 minúty s frekvenciou 25 Hz. Tie sme vysušili pri laboratórnej teplote, preosiali cez 2 mm sito. Ortuť vo vzorkách sme stanovili na jednocelovom absorpčnom spektrofotometri AMA 254 (Altec spol. s r. o., Česká republika). Navážka vzorky sa pohybovala v rozpätí od 30 do 60 mg. Parametre analýzy pre zistenie Hg v ihliciach sú 45 s (sušenie), 150 s (rozklad) a 45 s (ustálenie). Každú vzorku sme merali min. trikrát (rsd nižšie ako 10

%). Kontrola správnosti merania sa uskutočnila meraním certifikovaného referenčného materiálu ERM-CD281 (ERM, Belgicko).

Priemerné teploty vzduchu a priemerné úhrny zrážok (tab. 1) potrebné pre vyhodnotenie vplyvu klimatických pomerov na kumuláciu ortuti v ihliciach sú prevzaté z [www.shmu.sk](http://www.shmu.sk).

**Tab. 1** Priemerná ročná teplota a úhrn zrážok v sledovaných rokoch

**Tab. 1** Average annual temperature and precipitation in selected years

Lokalita	Ukazovateľ	2023	2003	2008	2015
Banská Bystrica	priem. teplota (°C)	9,9	-	-	-
	úhrn zrážok (mm/rok)	1110,9	-	-	-
Sliač	priem. teplota (°C)	-	8,61	9,71	10,3
	úhrn zrážok (mm/rok)	-	504,5	724,3	680,7

## Výsledky a diskusia

Miera kumulácie Hg v ihliciach smreka obyčajného vo vybraných obdobiach a lokalitách je uvedená v tabuľke 2. Porovnávali sme zvýšenie koncentrácie Hg v ihliciach po sebe idúcich ročníkoch. Vo všeobecnosti platí, že s vekom ihlíc sa zvyšuje aj obsah Hg (Ollerová et al., 2010; Méndez-Lopéz et al., 2022). Naše výsledky zodpovedajú uvedenému trendu, aj keď v roku 2003 sme zaznamenali nižšiu koncentráciu v druhoročných ihliciach ako v prvoročných ihliciach (záporné hodnoty v tab. 2).

Miera kumulácie Hg, vyjadrená ako rozdiel koncentrácií Hg v ihliciach po sebe idúcich ročníkov, sa pohybuje od 1  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  do 36  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ . Priemerný nárast koncentrácie je 6,3  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ , pričom vyšší nárast Hg s vekom ihlíc sme zaznamenali vo vzorkách z rokov 2003 – 2015 (6,6  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ) v porovnaní so vzorkami z roku 2023 – 5,4  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ). Pre porovnanie autori Navrátil et al. (2019) uvádzajú kumuláciu Hg v ihliciach na úrovni 6 -10  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ .

Podľa autorov Wohlgemuth et al. (2020) a Méndez-López et al. (2022) sa miera kumulácie Hg s vekom ihlíc znižuje, čo s našimi analýzami úplne nekorešponduje. Rovnako aj údaje v práci Ollerová et al. (2010), kde autorky sledujú kumuláciu Hg na viac ako 80 vzorkách ihlíc, uvedený trend nepotvrďujú.

**Tab. 2** Kumulácia Hg v ihliciach smreka obyčajného, vyjadrená ako rozdiel koncentrácií Hg v ihliciach po sebe idúcich ročníkov ( $r_1$ ,  $r_2$  a  $r_3$ ) na lokalitách Banská Bystrica (BB) a Zvolen (ZV)

**Tab. 2** Mercury accumulation in spruce needles expressed as the difference of Hg concentrations in needles of consecutive years ( $r_1$ ,  $r_2$  a  $r_3$ ) on locations Banská Bystrica (BB) and Zvolen (ZV)

Miesto odberu	Rok odberu	Nárast obsahu Hg medzi $r_2$ a $r_1$ ( $\mu\text{g.kg}^{-1}$ )	Nárast obsahu Hg I medzi $r_3$ a $r_2$ ( $\mu\text{g.kg}^{-1}$ )
BB	2023	5,2	3,4
		7,4	3
		4,5	8,4
		6,5	2,3
		5,5	7,9
ZV	2003	15	6
		5,0	7
		-36	2
		7,0	8
		-1	36
	2008	10	7
		3	13
		4	11
		1	7
		3	1
	2015	11	6
		7	5
		10	11
		12	12
		9	7

**Pozn.** vekové triedy ihlíc (jednoročné, dvojročné a trojročné) sú označené ako  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ .

Wohlegemuth et al. (2022) definovali denný príjem Hg jednotlivými drevinami. Medián denného príjmu Hg listami sa pohyboval v intervale 0,26 ng.Hg.g<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> (jaseň) po 0,20 ng.Hg.g<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> (hrab), pričom denné hodnoty príjmu ihličnatých drevín sú nižšie (0,14 ng.Hg.g<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> (smrekovec) - 0,05 ng.Hg.g<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> (borovica)). V tohoročných ihliciach smreka bol zaznamenaný príjem 0,07 ng.Hg.g<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>. Listnaté dreviny dokážu prijať, vzhľadom na väčšiu listovú plochu, až 5-násobne viac Hg než ihličnaté dreviny (Wohlegemuth et

al., 2020). Spomedzi ihličnatých druhov však môžeme považovať smrek za najvhodnejší indikátor, keďže je veľmi rozšírený, neopadavý a kumuluje viac Hg ako borovica.

Medziročné zmeny Hg v asimilačných orgánoch rastlín na rovnakej lokalite s najväčšou pravdepodobnosťou ovplyvňujú najmä zdroje emitujúce ortuť a klimatické podmienky. V sledovaných obdobiach sme nemali k dispozícii presné údaje o výskyte Hg v atmosfére vo Zvolene a Banskej Bystrici. Môžeme pracovať len s dátami charakterizujúcimi stav v Slovenskej republike. V mestskom prostredí medzi výrazné zdroje atmosférickej Hg patrí, okrem priemyselných podnikov, doprava (Won et al., 2007). V ostatných rokoch došlo na Slovensku k výraznému zníženiu emisií Hg, čo najlepšie ukazuje zníženie emisií Hg o 80 % v roku 2013 oproti roku 1990 (EEA, 2018). Množstvo atmosférickej Hg na Slovensku, mimo silne (historicky) zaťažených oblastí, kolísalo v rokoch 2020 – 2023 v intervale 1,03 – 1,60 ng.m<sup>-3</sup> (SHMÚ, 2021; 2022 a 2023), čo potvrdzuje pomerne nízke zaťaženie prostredia Hg. Vzťah medzi kumuláciou ortuti v asimilačných orgánoch a klimatickými podmienkami sme štatisticky otestovali na príklade kumulácie Hg v ihliciach smreka a priemernou ročnou teplotou a priemerným úhrnom zrážok. Analýza variancie ukazuje, že vzťah medzi mierou kumulácie Hg a uvedenými klimatickými charakteristikami je síce štatisticky významný ( $p < 0,05$ ), ale pre podrobnejšiu analýzu a stanovenie trendov je potrebných omnoho viac dát.

## Záver

Predpovede a klimatické modely ukazujú v budúcnosti zvýšenie teploty a zníženie celkového úhrnu zrážok. Vplyvom klimatickej zmeny môže dochádzať k zmenám v terestrickej časti kolobehu Hg. Vzhľadom na jej prchavosť môžeme predpokladať zvýšenú mieru uvoľňovania Hg z rastlinných pletív. Nižší úhrn zrážok by nemal pôsobiť na zvýšené emitovanie Hg z asimilačných orgánov rastlín do ovzdušia, avšak intenzívne dažde môžu napomáhať vyplavovaniu Hg z listov (ihlič) a obohacovaniu pôdy.

Mieru kumulácie ortuti v ihliciach smreka obyčajného ovplyvňujú okrem mnohých iných faktorov aj zrážky a teplota ovzdušia. Naše výsledky potvrdzujú štatistickú závislosť sledovaných veličín, ale vzhľadom na malý súbor analyzovaných dát nie je možná presná interpretácia závislosti. Predpoklad, že s vyššou teplotou sa zvyšuje výpar Hg z asimilačných orgánov sme nemohli v tejto primárnej štúdií potvrdiť. Uvedenú hypotézu je potrebné overiť na dostatočne veľkom súbore dát prezentujúcich zmenu kumulácie Hg v asimilačných orgánoch rastlín v čase. Ako vhodný bioindikátor odporúčame smrek obyčajný, a to najmä pre jeho rozšírenie, existenciu štúdií kumulácie Hg vykonaných v minulosti a možnosti porovnania viacerých ročníkov. Využitie historických dát, ako ukazuje aj náš prvotný výskum, do istej miery obmedzuje absencia údajov o množstve atmosférickej Hg v dobe vykonania výskumu. Z tohto dôvodu je potrebné založiť nové dlhodobé výskumné štúdie.

## Pod'akovanie

Autori ďakujú agentúre VEGA za finančnú podporu pri riešení projektov č. 1/0057/22, 1/0443/23, v rámci ktorých vznikol prezentovaný príspevok.

## Literatúra

- BARGAGLI, R., 2016. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review. *Sci. Total Environ.* 572: 216 – 231.
- BLACKWELL, B. D., DRISCOLL, C. T., 2015. Deposition of mercury in forests along a montane elevation gradient. *Environ. Sci. Technol.* 49, 5363-5370
- DEMERS, J. D., DRISCOLL, C. T., FAHEY, T. J., YAVITT, J. B., 2007. Mercury cycling in litter and soil in different forest types in the Adirondack region, New York, USA. *Ecological Applications* 17 (5), 1341-1351. doi: 10.1890/06-1697.1
- EEA, 2018. *Changes in mercury emissions*. Dostupné na internete: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/change-in-mercury-emissions-5> [cit. 1. 10. 2024]
- EEA, 2024. *European climate risk assessment*. Executive summary. 37 s. ISBN 978-929480-627-7. doi:10.2800/204249
- ERICKSEN, J.A., GUSTIN, M.S., SCHORRAN, D.E., JOHNSON, D.W., LINDBERG, S.E., COLEMAN, J.S., 2003. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage. *Atmospheric Environment* 37, s. 1613–1622.
- GRIGAL, D. F., 2003. Mercury Sequestration in Forests and Peatlands: A Review. *J. Environmental Quality* 32, s. 393-405.
- GWOREK, B., DMUCHOWSKI, W., BACZEWSKA-DABROWSKA, A., H., 2020. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe* 32: 128.
- KABATA-PENDIAS, A. & MUKHERJEE, A.B., 2007. *Trace Elements from Soil to Human*. Springer-Verlag, Berlin, 23. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
- MAČEJNÁ, Ľ., 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>
- MARUŠKOVÁ, A., OLLEROVÁ, H., KONTRIŠOVÁ, O., KONTRIŠ, J., 2005. Mercury accumulation in foliage during the growing season. *Acta Facultatis Ecologiae*, vol. 13, Suppl. 1, Zvolen, s. 45-48. ISSN 1336-300X.
- MEIER, U., 1997. *Growth stages of plants – Entwicklungsstadien von Pflanzen – Estadios de las plantas – Development des Plantes*. Blackwell Wissenschaftsverlag. BBCH-Monograph. Berlin und Wien, 622 s.
- MÉNDEZ-LÓPEZ, M., GÓMEZ-ARMESTO, A., EIMIL-FRAGA, C., ALONSO-VEGA, F., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E., ARIAS-ESTÉVEZ, M., NÓVOA-MUÑOZ, J.C., 2022. Needle age and precipitation as drivers of Hg accumulation and deposition in coniferous forests from a southwestern European Atlantic region. *Environmental Research* 215: 114223. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114223>
- NAVRÁTIL, T., NOVÁKOVÁ, T., ROLL, M., SHANLEY, J.B., KOPÁČEK, J., ROHOVEC, J., KAŇA, J., CUDLLIN, P., 2019. Decreasing litterfall mercury deposition in central European coniferous forests and effects of bark beetle infestation. *Science of The Total Environment* 682: 213-225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.093>
- NAVRÁTIL, T., ROHOVEC, J., NOVÁKOVÁ, T., ROLL, M., CUDLLIN, P., OULEHLE, F., 2024. Quarter century of mercury litterfall at a coniferous forest responding to climate change. Central Europe. *Environmental Science and Pollution Research* 31: 34936-34952
- OBRIST, D., ROY, E. M., HARRISON, J. L., COMMANE, R., 2021. Previously unaccounted Atmospheric mercury deposition in a midlatitude deciduous forest. *PNAS* 118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2105477118>
- OLLEROVÁ, H., MARUŠKOVÁ, A., KONTRIŠOVÁ, O., PLIEŠTIKOVÁ, Ľ. 2010. Mercury Accumulation in Picea abies (L.) Karst. Needles with Regard to Needle Age. *Polish J. of Environ. Studies* 19, č. 6., s.1401-1404.
- 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.
- SELIN, N.E., 2009. Global biogeochemical cycling of mercury: a review. *Annual Review of Environment and Resources* 34, s. 43-63 (<https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.051308.084314>).
- SHMU, 2022. *Správa o kvalite ovzdušia v Slovenskej republike – 2020*. 72 s.
- SHMU, 2023. *Správa o kvalite ovzdušia v Slovenskej republike – 2021*. 69 s.

- SHMU, 2024. *Správa o kvalite ovzdušia v Slovenskej republike – 2022*. 68 s.  
STN 48 1001: Odber vzoriek asimilačných orgánov na zisťovanie zdravotného stavu lesa  
UN environment programme. *Global Mercury Monitoring*. Dostupné na: <https://www.unep.org/global-mercury-monitoring> [cit. 1. 10. 2024]
- WOHLGEMUTH, L., OSTERWALDER, S., JOSEPH, C., KAHMEN, A., HOCH, G., ALEWELL, C., JISKRA, M., 2020. A bottom-up quantification of foliar mercury uptake fluxes across Europe. *Biogeosciences* 17 6441-6456. <https://doi.org/10.5194/bg-17-6441-202>.
- WOHLGEMUTH, L., RAUTIO, P., AHRENDTS, B., RUSS, A., VESTERDAL, L., WALDNER, P., TIMMERMANN, V., EICKENSCHIEDT, N., FÜRST, A., GREVE, M., ROSKAMS, P., THIMONIER, A., NICOLAS, M., KOWALSKA, A., INGERSLEV, M., MERILÄ, P., BENHAM, S., IACOBAN, C., HOCH, G., ALEWELL, C., JISKRA, M., 2022. Physiological and climate controls on foliar mercury uptake by European tree species. *Biogeosciences* 19: 1335-1353. doi. 10.5194/bg-19-1335-2022
- WON, J. H., PARK, J. Y., LEE T. G., 2007. Mercury emissions from automobiles using gasoline, diesel and LPG. *Atmospheric Environment* 41: 7547-7552.  
[www.shmu.sk](http://www.shmu.sk)
- ZHOU, J., OBRIST, D., DASTOOR, A., JISKRA, M., RYJKOV, A., 2021. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2: 269 – 284.

#### **Adresa autorov:**

Ing. Andrea Zacharová, PhD.

Mgr. Hana Ollerová, PhD.

Ing. Jakub Mišáni

Ing. Miroslav Vanek, PhD.

Katedra environmentálneho inžinierstva

Fakulta ekológie a environmentalistiky

Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

e-mail: [andrea.zacharova@tuzvo.sk](mailto:andrea.zacharova@tuzvo.sk), [ollerova@tuzvo.sk](mailto:ollerova@tuzvo.sk), [misanij@gmail.com](mailto:misanij@gmail.com), [miroslav.vanek@tuzvo.sk](mailto:miroslav.vanek@tuzvo.sk)

#### **Summary**

##### **Assessment of selected factors influencing the rate of mercury accumulation in spruce needles (*Picea abies* (L.) Karst.)**

The rate of mercury accumulation in Norway spruce needles is influenced by precipitation and air temperature, among many other factors. Our results confirm the statistical dependence of the observed variables, but due to the small data set analysed, a precise interpretation of the dependence is not possible. We could not confirm the assumption that Hg evaporation from assimilating organs increases with higher temperature in this primary study. The above hypothesis needs to be tested on a sufficiently large data set presenting the change in Hg accumulation in plant assimilatory organs over time. We recommend Norway spruce as a suitable bioindicator, especially because of its distribution, the existence of Hg accumulation studies conducted in the past, and the possibility of comparing multiple vintages. The use of historical data, as our initial research shows, is somewhat limited by the absence of data on the amount of atmospheric Hg at the time the research was conducted. For this reason, new long-term research studies need to be established.

## HISTORICKÉ BIOKLIMATOLOGICKÉ MERANIA NA ÚZEMÍ ŠLP

Miriám HANZELOVÁ, Jaroslav VIDO, Zuzana GREŠTIK ORAVCOVÁ, Jaroslav ŠKVARENINA

HANZELOVÁ, M., VIDO, J., GREŠTIK ORAVCOVÁ, Z., ŠKVARENINA, J.: Historické bioklimatologické merania na území ŠLP, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

### ABSTRAKT

Príspevok sa zaoberá digitalizáciou historických nameraných bioklimatických dát a z nich vytvorených máp datovaných do obdobia pred päťdesiatimi rokmi na území Školského lesného podniku (ŠLP) v Kremnických vrchoch. Tento proces umožňuje zachovanie unikátnych údajov pre ďalší výskum a porovnanie klimatických a environmentálnych zmien. Štúdia sa zameriava na údaje z bioklimatickej stanice Trnie (z rokov 1958-1974) a ďalších ôsmich doplnkových staníc (od 1966 do 1970) kde sa uskutočňovali rozsiahle merania teploty, zrážok a ďalších klimatických charakteristík. Článok pomocou modifikovaných klimadiagramov prezentuje priemerné mesačné úhrny zrážok a priebeh teploty vzduchu počas roka za vybrané obdobie. Dlhodobé merania ukázali trend otepľovania v regióne a častejší výskyt aridných období voči prevládajúcemu humídnemu charakteru klímy v minulosti. V príspevku prinášame ukážku georeferencovaných historických máp prírodných pomerov na vybranom území ŠLP. Príspevok zdôrazňuje význam historického monitoringu pre súčasný výskum klimatických zmien a vyzýva na obnovenie pôvodnej monitorovacej bioklimatickej siete pre detailné dlhodobé porovnávanie atmosférických veličín a vývojových trendov.

**Kľúčové slová:** bioklimatológia, digitalizácia historických záznamov, Školský lesný podnik (ŠLP), bioklimatický monitoring

### 1. ÚVOD A PROBLEMATIKA

Bioklimatologické merania predstavujú významný nástroj na porozumenie vzťahom medzi klimatickými podmienkami a biologickými systémami. Bioklimatológia, ako interdisciplinárny vedný odbor, vznikla z potreby skúmať ako klimatické faktory (napr. teplota, zrážky, vlhkosť či slnečné žiarenie) ovplyvňujú živé organizmy a celé ekosystémy. Táto oblasť začala nadobúdať na dôležitosť v druhej polovici 19. storočia, keď sa objavili prvé systematické snahy o meranie klimatických premenných v kontexte ekológie a zdravotných dopadov. Dnes využívame historické merania ako základný podklad pre výskum globálnych klimatických zmien a ich dopadov na ekosystémy.





**Obr. 1** Historická snímka mikroklimatickej stanice v poľskej Bialowieži s upravenými búdkami rozmiestnenými v niekoľkých výškových úrovniach. Snímka: Ing. Mottl (KREČMER, 1954).

**Fig. 1** Historical image of a microclimatic station in Bialowieża, Poland, featuring modified meteorological shelters positioned at several height levels. Photo: Ing. Mottl (KREČMER, 1954).

Prvé desaťročia 19. storočia sa v strednej Európe lesnícka meteorológia dlhodobo venovala skúmaniu komplexného vplyvu lesa na klímu, s osobitným zameraním na jeho vplyv na zrážky, avšak bez toho, aby dospela k definitívnym záverom. Počas týchto rokov výskumu však priniesla dôležité poznatky o mikroklimatických efektoch lesov, kde sa ukázala výrazná odlišnosť ovzdušia v lesných porastoch v porovnaní s otvorenými plochami a voľným terénom. Postupne sa preto výskum presúval od skúmania makroklimatických otázok (účinky lesa na okolitú krajinu) k podrobnej analýze klimatických faktorov na lokálnej úrovni (mikroklimatické zmeny na povrchu pôdy, v lesnom poraste a i.). Tento posun v prístupe viedol k zmene celkového konceptu výskumu a k úprave metodiky zameranej na samotný lesný porast. (KREČMER, 1954, TUŽINSKÝ 2002)

V snahe presnejšie charakterizovať mikroklimatické podmienky porastov, než je možné jedným meraním v štandardnej výške, boli prístroje umiestňované v rôznych výškových úrovniach nad pôdnym povrchom (obr. 1). Pri meraniach, ktoré nevyžadovali extrémnu citlivosť boli používané bežné meteorologické prístroje umiestnené v meteorologických búdkach,

zvyčajne prispôbené špecifikám terénu. (KREČMER, 1954).

Na území Slovenska sa už od prvých rokov lesníckeho vzdelávania a s tým spojeného výskumu odzrkadlil význam klímy v lesníctve a začal „aj keď“ v skromných podmienkach, organizovať intenzívny výskum. Mimoriadna pozornosť sa venovala predovšetkým meteorologickým pozorovaniam, aby sa vytvorila dostatočná informačná báza o režime najdôležitejších ekologických prvkov (Škvarenina *et al.* 2007, VIDO *et al.* 2015).

Začiatkom roku 1958 vzniklo ako účelové zariadenie Vysokej školy lesníckej a drevárskej samostatná organizácia pod názvom Fakultné lesné hospodárstvo (FLH). V roku 1961 to bol Školský lesný závod, od roku 1969 zmenil názov na Školský lesný podnik (ŠLP) VŠLD. ŠLP ako prírodné laboratórium školy umožňovalo všetkým pracoviskám školy a jej pedagogickým a výskumným pracovníkom, študentom ale aj iným školským a vedeckovýskumným zariadeniam riešiť vedecko-výskumné úlohy.



Svojou rozmanitosťou prírodných pomerov, charakterizujúcich lesné oblasti Slovenska, dodnes poskytuje široké možnosti na vykonávanie výskumu v oblasti biológie, techniky i ekonomiky (BELLA et al. 1977)

Vlastná prevádzka ŠLP si vyžadovala podrobnejšiu klimatickú charakteristiku. Územie ŠLP v Kremnických vrchoch je klimaticky značne diferencované. Podľa klimatickej klasifikácie sa vyskytuje v troch klimatických oblastiach – v teplej (A), mierne teplej (B) a chladnej (C). Preto v rámci širšie koncipovaného lesníckeho výskumu začal docent Petřík v roku 1958 sledovať makroklimatické i mezoklimatické pomery v obvode ŠLP (obr. 2) (PETRÍK 1977). Na mezoklimatické prípadne mikroklimatické pozorovania bola zriadená stála klimatická stanica v záhrade lesovne v Trní (obr. 3 číslo 9). Svojou polohou najlepšie reprezentovala celé územie ŠLP. Pozorovania sa uskutočňovali každý deň podľa metodiky, ktorá sa bežne používala v celoštátnej klimatickej sieti. Neskôr v roku 1965 boli zriadené aj ďalšie doplnkové stanice (obr. 3 stanice 1-8) ktoré mali zabezpečiť pozorovania v rámci pestrej geografickej členitosti, najmä rozličnej expozície a nadmorskej výšky územia ŠLP.

Výskum bol odborné vedený doc. Petříkom, ktorý pracoval na Katedre pedológie a geológie Vysokiej školy lesníckej a drevárskej vo Zvolene. Počas svojho pôsobenia sa zaslúžil o rozsiahlu vedeckovýskumnú činnosť a rozšíril poznatky z mikroklimy a bioklimy porastov v rôznych typoch lesa a vo vývojových štádiách pralesov (obr. 2). Okrem toho sa venoval aj otázkam premrzania lesných pôd, mikroklimy vo vzťahu k zakladaniu a výchove lesných porastov, prevodom výmladkových lesov a ozeleňovaniu sídlisk.



**Obr. 2** Terénne cvičenia z lesníckej bioklimatológie s docentom Petříkom (Snímka: Škvarenina J., 1988)

**Fig. 2** Field exercises for students in Forest Bioclimatology with Associate Professor Petřík (Photo: Škvarenina J., 1988)

Pri archívnom výskume knižnice Katedry prírodného prostredia boli objavené originálne zápisy historických meraní uvedených bioklimatických staníc. Ide o záznamy 17 ročného bioklimatického merania na stanici Trnie (1958-1974) a takmer ucelený 6 ročný rad meraní pre ďalších 8 doplnkových staníc (1965-1970) a v prípade zrážkových údajov máme dáta až do roku 1974. Docent Petřík ich publikoval ako samostatné ročenky, ale aj ako vedecké práce zamerané na charakteristiku zrážkových pomerov, teploty a vlhkosti ovzdušia územia ŠLP VŠL Zvolen (PETRÍK 1977, 1978). Ide o hodnotný súbor dát získaný z precíznych meraní v rámci dôkladne navrhutej bioklimatickej siete staníc.

Vo výročnej publikácii *20 rokov ŠLP VŠLD vo Zvolene* z roku 1977 bol objavený súbor máp zachytávajúcich prírodné pomery ŠLP VŠLD, vrátane Mapy pôd, Mapy klimatických pomerov, Mapy prehľadu skupín lesných typov a Mapy zastúpenia drevín v ŠLP. Tieto historické mapové podklady predstavujú nenahraditeľný zdroj informácií pre výskum environmentálnych zmien, pretože umožňujú analýzu dlhodobých trendov v pôdnych, klimatických a biotických podmienkach územia. Ich porovnaním so súčasnými údajmi nám napomôže identifikovať dynamiku prírodných procesov a dopady antropogénnych zásahov na ekosystémy.

Predmetom predloženého príspevku nie je podrobná analýza všetkých aspektov historických údajov, ale zameranie sa na nasledujúce ciele: i) záchrana a digitalizácia pôvodných historických záznamov z bioklimatických staníc a vytvorenie modifikovaných klimadiagramov, ii) digitalizácia pôvodných máp, čím získame georeferencovaný výstup starých máp, ktorý bude využiteľný pri ďalšom výskume a environmentálnych analýzach. Článok poskytuje stručný pohľad na zachránené historické podklady a zdôrazňuje význam bioklimatických meraní z minulosti, ktoré predstavujú kľúčové údaje pre dlhodobé štúdie klimatických trendov a environmentálnych zmien.

## **2. MATERIÁL A METÓDY**

### **2.1 Záujmové územie**

Geografická poloha ŠLP, ktorá leží v JV časti Kremnických vrchov má pestré prírodné podmienky, ktoré vytvárajú bohatú mozaiku lesných spoločenstiev, čo sa pri zakladaní výskumu z hľadiska metodiky aj z hľadiska uplatnenia a zovšeobecnienia poznatkov ukázalo ako veľmi vhodné. Na skúmanom území možno rozlíšiť vyšší hornatinný typ reliéfu (600-900 m n. m.) a podhorský typ reliéfu pahorkatinnej povahy (450-500 m n. m.) rozčlenený bočnými dolinami (PETRÍK 1977)

V roku 1958 bola zriadená prvá klimatická stanica Trnie (obr. 3 označenie číslo 9) na území ŠLP v Kremnických vrchov. Nadmorská výška stanice bola 450 m n. m. a svojou polohou najlepšie reprezentovala celé územie ŠLP. Bola vybavená samopisnými aj meracími prístrojmi, so sledovaním meteorologických prvkov ako na stanici prvého stupňa. Pozorovanie sa uskutočňovalo každý deň podľa metodiky bežne používanou v celoštátnej

klimatickej sieti. Teplota a vlhkosť ovzdušia sa merala pomocou termohygrografov v štandardnej meteorologickej búdeke vo výške 2 metrov.

Začiatkom roku 1965 boli zriadené ďalšie doplnkové klimatické stanice, ktorých poloha je znázornená na obr. 3 a v tab. 1 sú uvedené ďalšie charakteristiky pre jednotlivé stanice. Reprezentujú profily s juhovýchodnou, južnou a juhozápadnou expozíciou, s výškovým rozpätím okolo 600m. Doplnkové klimatické stanice zaznamenávali údaje o teplote a vlhkosti vzduchu, výskyt snehovej pokrývky, premrzanie pôdy a úhrn zrážok počas 10-ročného obdobia (1965-74). Na staniciach s denným pozorovaním sa kontrolovali zrážky raz za deň (o 7.00 h). Raz za týždeň sa merali zrážky na odľahlých staniciach, v Bieni - Danielova chata boli umiestnené dva zrážkomery a na Brestovej (obr. 4) bol pre kontrolu pridaný ešte aj totalizátor.



**Obr. 3** Rozloženie klimatických staníc ŠLP VŠLD (1- Brestová - Sielnická Poľana, 2 – Predsuchá, 3 – Sielnica, 4 – Kováčová, 5 - Bienska dolina - Danielova chata, 6 – Budča, 7 - Železná Breznica, 8 - Hronská Dúbrava, 9 – Tŕnie)

**Fig. 3** Distribution of climate station within the territory of ŠLP (1- Brestová - Sielnická Poľana, 2 – Predsuchá, 3 – Sielnica, 4 – Kováčová, 5 - Bienska dolina - Danielova chata, 6 – Budča, 7 - Železná Breznica, 8 - Hronská Dúbrava, 9 – Tŕnie)

**Tab. 1** Zoznam historických bioklimatických staníc a ich základná charakteristika  
**Tab. 1** List of historical bioclimatic stations and their basic characteristics

Ozna- čenie	Názov stanice	Nad. výška (m n. m.)	Umiestnenie stanice	Reprezentatívnosť územia vrámci ŠLP	Expo- zícia
1	Brestová - Sielnická Poľana	885	rovinka v sedle	vrcholové partie	--
2	Predsuchá	545	dolina	svahové partie	JV
3	Sielnica	350	záhrada polesia	údolné, bazálne partie	JV
4	Kováčová	305	záhrada lesovne	údolné, bazálne partie	JV
5	Bienska dolina - Danielova chata	605	lúka v doline	svahové partie	J
6	Budča	290	záhrada polesia	údolné, bazálne partie	J
7	Železná Breznica	468	dolina	svahové partie	JZ
8	Hronská Dúbrava	270	záhrada lesovne	údolné, bazálne partie	JZ
9	Tŕnie	450	záhrada lesovne	svahové partie	J

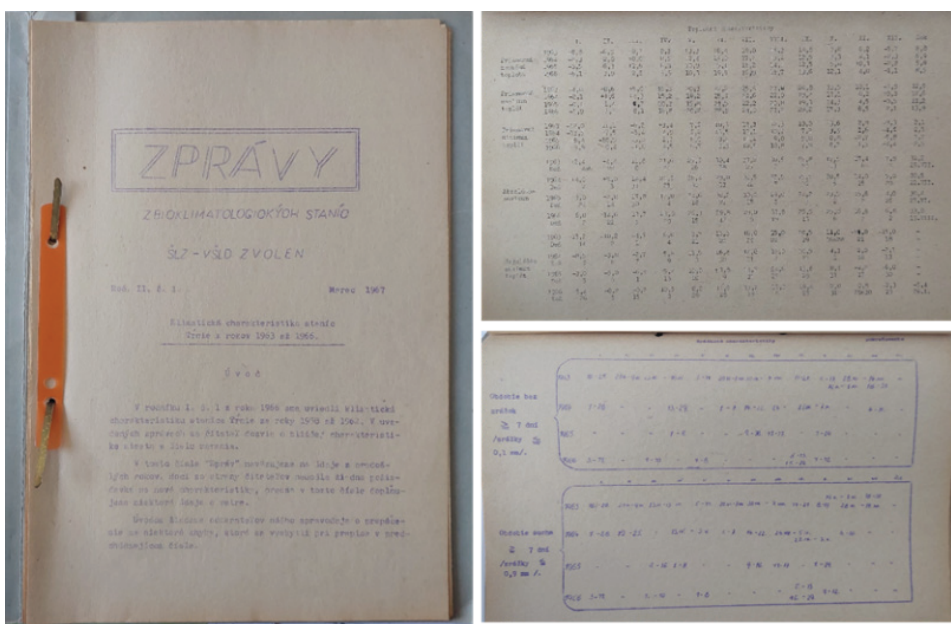


**Obr. 4** Najvyššie položená stanica Brestová: pôvodný bioklimatický monitoring docenta Petrika bol neskôr doplnený o výskum chemizmu zrážok prof. Škvareninom (Snímka: Škvarenina, 1988)

**Fig. 4** The highest situated station Brestová: the original bioclimatological monitoring by Petřík was later supplemented by research on precipitation chemistry conducted by Prof. Škvarenina (Photo: Škvarenina, 1988)

## 2.2 Metódy spracovania

Spracovanie údajov z pôvodných záznamov (obr. 5) prebiehalo formou štandardných postupov v prostredí MS Excel. Transkripciou kompletných historických záznamov z historických ročeniek „Zprávy z bioklimatických staníc ŠLP VŠLD Zvolen“ (PETRÍK 1967, 1971, SLÁVIK 1976) zahŕňajúca údaje z deviatich bioklimatických staníc o parametroch, ako sú teplota vzduchu, množstvo zrážok, relatívna vlhkosť vzduchu a rýchlosť vetra bola vytvorená digitálna databáza údajov.



**Obr. 5** Ukážka historických ročeniek „Zprávy z bioklimatologických staníc ŠLZ VŠLD Zvolen, 1967“

**Fig. 5** Sample of historical yearbooks „Reports from the Bioclimatic Stations of ŠLZ VŠLD Zvolen, 1967

Naskenované historické mapy prírodných pomerov územia ŠLP VŠLD v Kremnických vrchoch sme digitalizovali v prostredí QGIS. Získali sme tak georeferencovaný výstup zo starých máp prírodných pomerov ŠLP VŠLD, ktorý je presne zarovnaný do súčasného geografického systému. Použili S-JTSK / Krovak East North súradnicový systém (EPSG:5514). Georeferencovali sme určením 15 referenčných bodov, ktoré bolo možné jednoznačne identifikovať aj na historických aj na aktuálnych mapách. V procese transformácie máp sme použili polynomickeú funkciu 1. rádu a metódu najbližšieho suseda.



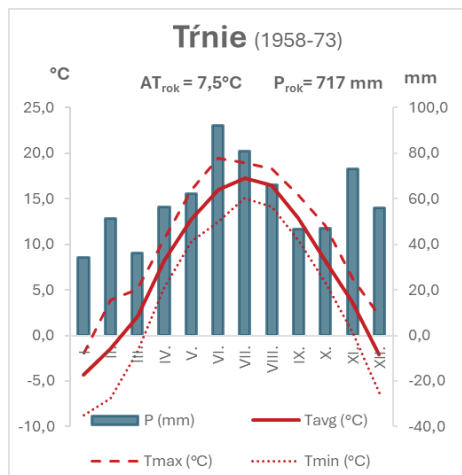
### 3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Prepis historických dát predstavuje významný krok v oblasti ochrany a digitalizácie cenných údajov, ktoré sa pôvodne nachádzali iba v tlačenej forme písanej ešte na písacom stroji. Tento proces umožnil uchovanie a sprístupnenie údajov pre ďalší výskum, čím sa zamedzilo ich potenciálnej strate. Ide o jedinečné záznamy. Hodnota získaných údajov nespočíva len v komplexnosti vykonaných bioklimatických meraní, ale aj v ich schopnosti reprezentovať geografickú rôznorodosť skúmaného územia, čo je výsledkom dôkladne premysleného rozmiestnenia bioklimatických staníc v rámci územia ŠLP VŠLD v Kremnických vrchoch. Týmto spôsobom vznikol ucelený a komplexný súbor údajov, ktorý môže slúžiť ako cenný zdroj pre porovnávanie klimatických a environmentálnych zmien v dlhodobom časovom horizonte.

Pre stanicu Trnec sa nám podarilo skompletizovať 17 ročný rad historický meraní od roku 1958-74, pre doplnkové stanice ide o takmer kompletný 6 ročný rad údajov (1965-1970), dokonca pri úhrnoch zrážok máme k dispozícii dáta až do roku 1974. Záznamy pre doplnkové stanice obsahujú údaje ako priemerná mesačná teplota, absolútne maximum a minimum teplôt vzduchu s prislúchajúcim dňom, priemerná denná amplitúda teploty, absolútne najvyššia amplitúda teploty, počet teplých dní ( $\max \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), počet tropických dní ( $\max \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ), počet ľadových dní ( $\max -0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  a menej), počet dní s mrazom v 2 m (min.  $-0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  a menej), počet dní s priemernou dennou teplotou  $+10,0^\circ\text{C}$  a viac, priemerná relatívna vlhkosť vzduchu v %, úhrn zrážok v mm, priemerná výška celkovej snehovej pokrývky.

V prípade zrážkových charakteristík pre stanicu Trnec máme k dispozícii mesačné úhrny zrážok v mm za obdobie rokov 1958 až 1974. K dispozícii sú tiež ďalšie údaje týkajúce sa zrážok, avšak pri príprave tohto príspevku stále chýbajú záznamy za prvých päť rokov meraní. Ide o nasledujúce zrážkové charakteristiky: počet dní so zrážkami  $\geq 0,0$  mm, počet dní so zrážkami  $\geq 1,0$  mm, počet dní so zrážkami  $\geq 10,0$  mm, počet dní so snehovými zrážkami, počet dní so snehovou pokrývkou  $\geq 1$  cm, priemerná výška celkovej snehovej pokrývky (v cm), maximálna výška snehovej pokrývky (v cm), dátumy prvého a posledného sneženia v roku, dátumy prvého a posledného dňa so snehovou pokrývkou, obdobia bez zrážok  $\geq 7$  dní (zrážky  $\leq 0,1$  mm) a obdobia sucha  $\geq 7$  dní (zrážky  $\leq 0,9$  mm).

Pre uvedenú bioklimatickú stanicu Trnec, ktorá má najreprezentatívnejší charakter pre dané územie a má najdlhší rad meraní, sme z údajov od 1959 až 1973 vytvorili modifikovaný klimadiagram (obr. 6), kde sú vykreslené dáta priemernej mesačnej teploty vzduchu, maximálne a minimálne hodnoty priemerných mesačných teplôt vzduchu a priemerné mesačné úhrny zrážok.



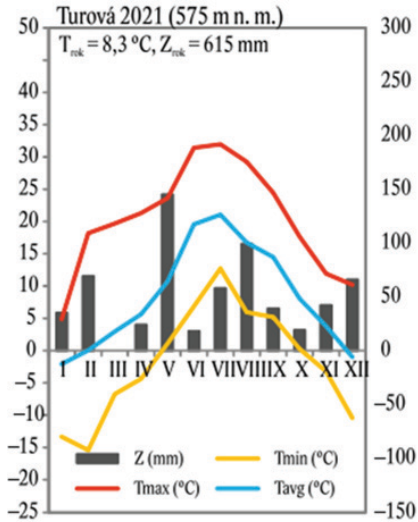
**Obr. 6** Modifikovaný klimadiagram pre bioklimatickú stanicu Tŕnie vytvorený z nameraných dát v rokoch 1959-1973. P (mm) – priemerný mesačný úhrn zrážok, Tavg (°C) – priemerná mesačná teplota vzduchu, Tmax (°C) – maximálne hodnoty priemerných mesačných teplôt, Tmin (°C) – minimálne hodnoty priemerných mesačných teplôt

**Fig. 6** Modified climate diagram for the bioclimatic station Tŕnie created from measured data for the years 1959-1973. P (mm) – average monthly precipitation, Tavg (°C) – average monthly air temperature, Tmax (°C) – maximum values of average monthly temperatures, Tmin (°C) – minimum values of average monthly temperatures

Za sledované 16 ročné obdobie (1958-1973, rok 1974 neuvádzame z dôvodu výskytu viacerých extrémnych hodnôt) na stanici Tŕnie kolísal ročný úhrn zrážok od 494,5 mm (v roku 1973) do 1040,8 mm (v roku 1965). Priemerný ročný úhrn zrážok za toto obdobie bol 717 mm. Z klimadiagramu vidieť, že ročný chod zrážok má dvojruchový charakter. Hlavné maximum zrážok pripadalo na mesiac jún (v priemere 92 mm) a hlavné minimum na január (v priemere 34,4 mm), prípadne marec (v priemere 36 mm). Vedľajšie maximum vychádzalo na november a vedľajšie minimum na september. Čo sa týka teplôt ovzdušia, tak priemerná ročná teplota na danej stanici za sledované obdobie dosahovala 7,5 °C, najteplejším mesiacom v roku bol júl s priemernou teplotou vzduchu 17,2 °C a najchladnejším mesiacom bol január s priemernou teplotou vzduchu -4,3 °C. Absolútne maximum teploty vzduchu za uvedené obdobie bolo 33,8°C namerané 19.8.1966 a absolútne teplotné minimum -25,4°C namerané 11.1.1968. Na základe zobrazenia teplôt vzduchu a úhrnu zrážok v modifikovanom klimadiagrame môžeme konštatovať, že bioklimatická stanica mala celoročne humídny charakter klímy, aj keď mesiace august a september sú už pomerne tesne na hranici humidity a aridity.

V súčasnosti na nachádza v blízkom okolí od umiestnenia historickej stanice Tŕnia novodobá meteorologická stanica Turová, ktorá patrí medzi trvalé monitorovacie plochy Národného lesníckeho centra Lesníckeho výskumného ústavu vo Zvolene (NLC LVÚ

Zvolen) s nadmorskou výškou 575 m n. m. Klimadiagram pre túto stanicu z hodnôt nameraných roku 2021 je uvedený na obr. 7.



**Obr. 7** Ročné a mesačné úhrny zrážok, priemerné, absolútne minimálne a maximálne mesačné teploty vzduchu v roku 2021 na stanici Turová (SITKOVÁ 2022)

**Fig. 7** Annual and monthly total precipitation, average and absolute minimum and maximum monthly air temperatures in 2021 at the station Turová (SITKOVÁ 2022)

porovnaní uvedených staníc môžeme vidieť výrazne odlišný priebeh rozloženia zrážok počas roka oproti vývoju v minulosti (výrazné obdobia sucha na jar a jeseň, veľká dynamika v rozložení úhrnov zrážok v priebehu roka napr. nadpriemerné úhrny zrážok v máji a auguste) (SITKOVÁ 2022). Autori SITKOVÁ, BARKA, PAVLEDNA (2022) uvádzajú, že tendencie vo vývoji zrážok sú regionálne viac diverzifikované avšak pozorujú mierny relatívny pokles zrážok vo vyššie položených horských lokalitách a zmenu v časovom rozložení sezónnych úhrnov zrážok. Pri takomto trende vývoja teploty vzduchu a rozdelenia zrážok v priebehu roka bol charakter klímy stanice Turová v roku 2021 prevažne aridný a vlhový deficit pretrvával až do konca novembra, zatiaľ čo takmer pred 50 rokmi vykazoval pre nižšie položenú stanicu Trnec jednoznačne humídne podmienky.

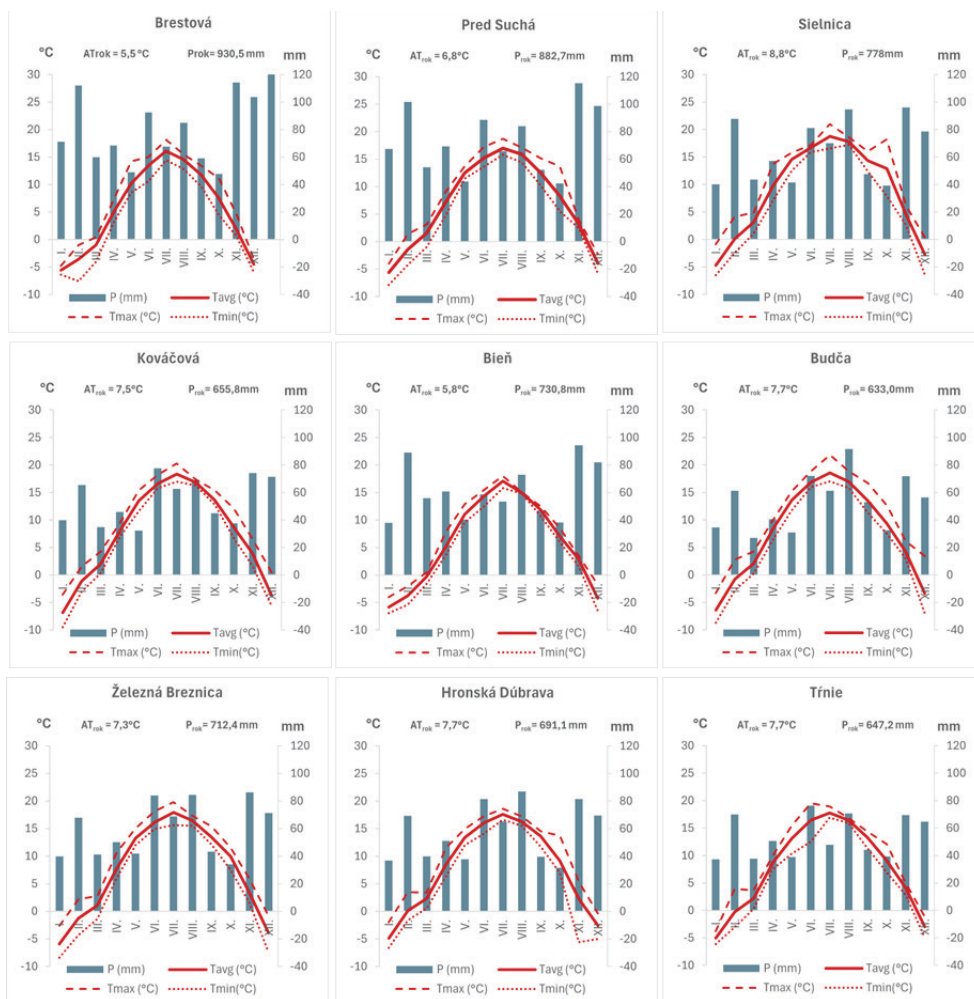
V lesnom prostredí potvrdili SITKOVÁ, BARKA, PAVLEDNA (2022) pokračujúce nežiadúce trendy v súvislosti so zmenou klímy (teplé zimy, nízka vrstva snehu, sucha na jar, opakované vlny horúčav v lete, privalové dažde). Tieto trendy sú v súhlase s výsledkami výskumu ZELENÁKOVÁ *et al.* (2017), či VIDO & NALEVANKOVÁ (2020), ktorí

Pri porovnaní priemerných ročných teplôt staníc Trnec (1959-73) a stanice Turová za rok 2021 vidíme, že teplota v danom regióne zaznamenala nárast, a to napriek vyššej nadmorskej výške stanice Turová (o 125 metrov). Pri normálnom teplotnom výškovom gradiente  $0,6^{\circ}\text{C}$  na 100 výškových metrov by sme pri očakávaných podmienkach predpokladali, že teplota na Turová bude nižšia o približne  $0,75^{\circ}\text{C}$ . Avšak, údaje ukazujú nárast teploty o  $0,8^{\circ}\text{C}$ , čo znamená, že za obdobie medzi rokmi 1973 a 2021 došlo k otepleniu, ktoré je prejavom dlhodobých klimatických zmien a ukazuje, že trend globálneho otepľovania je badateľný aj v takýchto nadmorských výškach. Nárast priemerných ročných teplôt vzduchu porovnaním dvoch dlhodobých normálov 1961-1990 a 1991-2020 pre stanicu Turová potvrdzuje aj SITKOVÁ, BARKA, PAVLEDNA (2022). Ide o nárast o  $1,2^{\circ}\text{C}$  ročnej priemernej teploty vzduchu a o  $1,6^{\circ}\text{C}$  vo vegetačnom období.

Zvýšená dynamika atmosféry vplyva na rozloženie zrážok v priebehu roka. Pri



taktiež zistili arídne trendy najmä v jarnom období. Z obdobných údajov ako pri stanici Trníc ale z kratšieho časového rámca (1966-1970) sme taktiež zostrojili klimadiagramy pre doplnkové stanice (obr. 8).



**Obr. 8** Modifikované klimadiagramy pre bioklimatické stanice za obdobie 1966-70. . P (mm) – priemerný mesačný úhrn zrážok,  $T_{avg}$  (°C) – priemerná mesačná teplota vzduchu,  $T_{max}$  (°C) – maximálne hodnoty priemerných mesačných teplôt,  $T_{min}$  (°C) – minimálne hodnoty priemerných mesačných teplôt

**Fig. 8** Modified climate diagrams for bioclimatological stations for the period 1966-70. P (mm) – average monthly precipitation,  $T_{avg}$  (°C) – average monthly air temperature,  $T_{max}$  (°C) – maximum values of average monthly temperatures,  $T_{min}$  (°C) – minimum values of average monthly temperatures

Celková analýza rozdelenia zrážok docentom Petríkom (1977) potvrdila významnosť geografickej expozície, ktorá vplyva na náveternosť a záveternosť jednotlivých svahov. Taktiež docent Vido potvrdzuje priestorovú variabilitu zrážok ovplyvnenú spomenutým efektom a sleduje odchýlky vo výškovej závislosti úhrnu zrážok (VIDO *et al.* 2015). Na základe hodnotenia celoročného priemeru úhrnu zrážok vzhľadom k expozícií terénu docent PETRÍK (1977) uvádza , že najvýdatnejšie zrážky dostávali stanice umiestnené na juhovýchodnej až východnej expozícií. Najmenej zrážkovej vody dopadlo ročne južným svahom. Zdôvodnil to tvrdením, že bazálne časti južných svahov a údolia pod nimi sú v zrážkovom tieni Javoria, Krupinskej planiny a Štiavnických vrchov a zároveň v závetrí severozápadných vetrov, ktoré tu počas roka prevládajú. Stanice orientované na juhozápad dosahovali úhrny medzi južnou a juhovýchodnou expozíciou. Údolné partie pod juhozápadnými svahmi získavali výdatnejšie zrážky vďaka postupujúcemu prúdeniu údolím Hrona od juhu na juhozápad.

Júnové maximum zrážok odráža vplyv prechodu júnových frontov, čo je charakteristické pre južné oblasti Slovenska a na júlovom maxime sa podieľajú búrkové lejaky, ktoré charakterizujú prevažne kontinentálny ráz krajiny (severné Slovensko) (PETRÍK 1977).

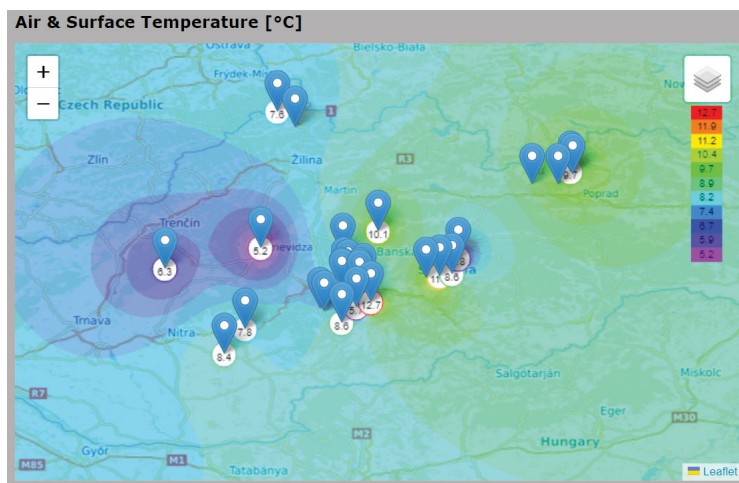
Na tomto mieste je potrebné zvýrazniť, že práve ostatné výskumy už spomenutej ZELENÁKOVEJ *et al.* (2017), ale aj výskumy o búrkových pomeroch v práci VIDO *et al.* (2024) signalizujú, že nastávajú zmeny zrážkového režimu, pravdepodobne vzhľadom k zmenám v regionálnej a nadregionálnej cirkulácii ovzdušia. A práve v kontexte dynamických zmien režimu atmosférických zrážok je apel na novozaloženie staníc v snahe overiť, prípadne prehodnotiť vyššie uvedené zrážkové fenomény o to nahlihavejší.

Výskumom mezoklimatického režimu najmä v závislosti od expozície a nadmorskej výšky, uverejneného v zborníku vedeckých prác od docenta Petrika (1978), sa ukázalo , že absolútne minimá teploty poklesli pod svahmi skúmaného územia až na hranicu  $-31,5^{\circ}\text{C}$  a absolútne maximá vystúpili na  $37^{\circ}\text{C}$ . V hornej časti svahov sa absolútne minimum pohybovalo pri  $-17^{\circ}\text{C}$  a absolútne maximum pri  $30^{\circ}\text{C}$ , čo svedčí o silnej teplotnej inverzii, ktorá môže byť umocnená rôznou expozíciou svahu. Významný efekt inverzného chodu teploty vzduchu v danej oblasti potvrdzuje práca VIDO *et al.* (2015), ktorá vysvetľuje zdanlivo porušený klimatologický gradient teploty vzduchu pre stanicu Sielnica vo vzťahu k ostatným doplnkovým staniciam.

Vegetačná doba sa vo vrcholových partiách v porovnaní s úpäťami svahov skracovala v priemere o 35 dní. Najmenší počet dní s mrazom v roku sa vyskytoval pod východnými svahmi (PETRÍK 1977). Súčasné analýza klimatických indexov naznačujú nárast minimálnych teplôt vzduchu a zníženie počtu mrazových dní, čo má významný ekologický dopad, najmä v súvislosti s vyššou mierou prežitia populácií hmyzích škodcov, ktoré môžu vďaka miernejším zimám prečkať chladné obdobie v pôde, hrabanke alebo pod kôrou stromov (SITKOVÁ, BARKA, PAVLEDNA 2022).

Hoci je nesmierna škoda, že sa monitorovacia sieť navrhnutá docentom Petríkom nezachovala do dnešných dní, v súčasnosti máme k dispozícií dáta získané vrámci

lesníckeho meteorologického monitoringu z bioklimatickej siete staníc (obr. 9), ktoré vznikli kooperáciou Katedry prírodného prostredia z Technickej univerzity vo Zvolene spolu s NLC LVÚ Zvolen. Stanice sa nachádzajú v rôznych orografických celkoch v rámci Slovenska a pokrývajú všetky naše lesné vegetačné stupne. Vďaka automatickým meteorologickým staniciam s online prenosom dát tak poskytujú aktuálne údaje o mikroklimáte porastov a ďalšie odvodené bioklimatologické veličiny (napr. sýtosťný doplnok, potenciálna evapotranspirácia, klimatická vodná bilancia, požiarový index alebo fenofázy podkôrneho hmyzu). Podrobnejšie informácie ako aj konkrétne namerané hodnoty sú dostupné na [www.forestweather.sk](http://www.forestweather.sk) alebo internetovej stránke Technickej univerzity vo Zvolene v časti Biometeorologický monitoring ([www.tuzvo.sk](http://www.tuzvo.sk)). Takáto sieť staníc získava dáta nielen na hodnotenie dlhodobých trendov vývoja zmeny klímy, ale aj na zachytávanie extrémnych meteorologických situácií v lesných porastoch, ktoré pomáhajú pri riešení otázky adaptácií lesných porastov na extrémne a rýchlo sa meniace podmienky prostredia. Podrobné hodnotenie zmeny klímy na regionálnej úrovni má význam aj z hľadiska strategických zámerov pre dosiahnutie uhlíkovej neutrality a pre posudzovanie možností adaptácie a rizík pre záchyty CO<sub>2</sub> v lesoch Slovenska (SITKOVÁ, BARKA, PAVLEDNA 2022).



**Obr. 9** Zobrazenie rozmiestnenia staníc v rámci lesníckeho meteorologického monitoringu s ich momentálnou teplotou vzuchu a povrchu ([forestweather.sk](http://forestweather.sk))

**Fig. 9** Display of station distribution within Forestry Meteorological Monitoring, showing current Air and Surface Temperatures ([forestweather.sk](http://forestweather.sk))

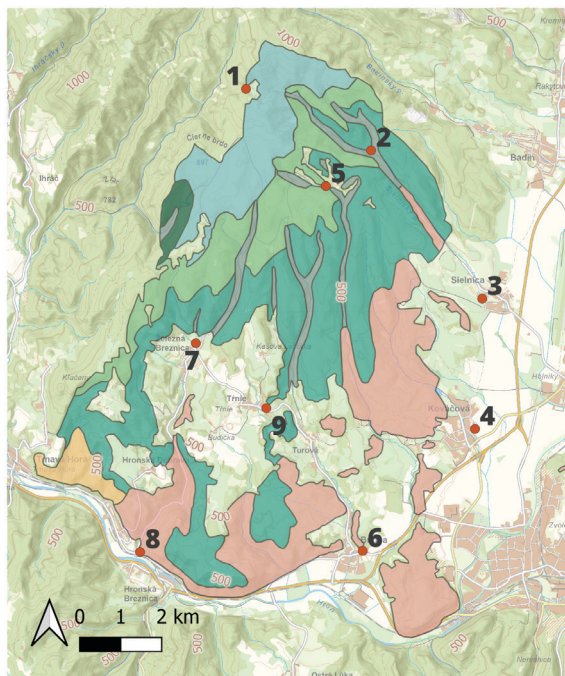
Pri tvorbe LHP na obdobie 1973-1982 slúžili ako podkladové diela výstupy zo špeciálnych prieskumov: typologický prieskum (1961-62), ekonomický prieskum (1971-73), prieskum ochrany lesov (1971-73), poľovnícky prieskum (1972-73), prieskum lesnej

dopravnej siete (1972-73) a prieskum tvorby a ochrany prírodného prostredia (1972-73). Na základe spomenutých prieskumov boli vytvorené podrobné mapové výstupy, ktoré tvoria hodnotné podklady aj pre novodobý výskum zameraný najmä na klimatickú zmenu a jej vplyv na krajinu, (napr. zmenu drevinového zloženia, zmenu socio-ekonomického potenciálu skúmaného územia, ...). V tomto príspevku prezentujeme len niektoré z historických máp, ktoré sme vytvorili zgeoreferencovaním pôvodných mapových výstupov publikovaných v knihe *20 rokov Školského lesného podniku Vysokej školy lesníckej a drevárskej vo Zvolene 1958-1977* (BELLA et al. 1977).

Z klimatickej mapy územia (obr. 10) je zrejmé, že územie ŠLP patrilo v období 1977 do teplej až chladnej oblasti. Bazálne polohy Kremnických vrchov patrili klimaticky do teplého, mierne vlhkého okrsku A6. Nižšie svahy vo výške 400-500 m spadali do okrsku B5 a vyššie polohy prechádzajú do okrsku B8 (mierne teplý, vrchovinový). Výšky okolo 700 m n. m. patrili do chladnej klimatickej oblasti C s dostatkom vlahy.

Klimatické okrsky

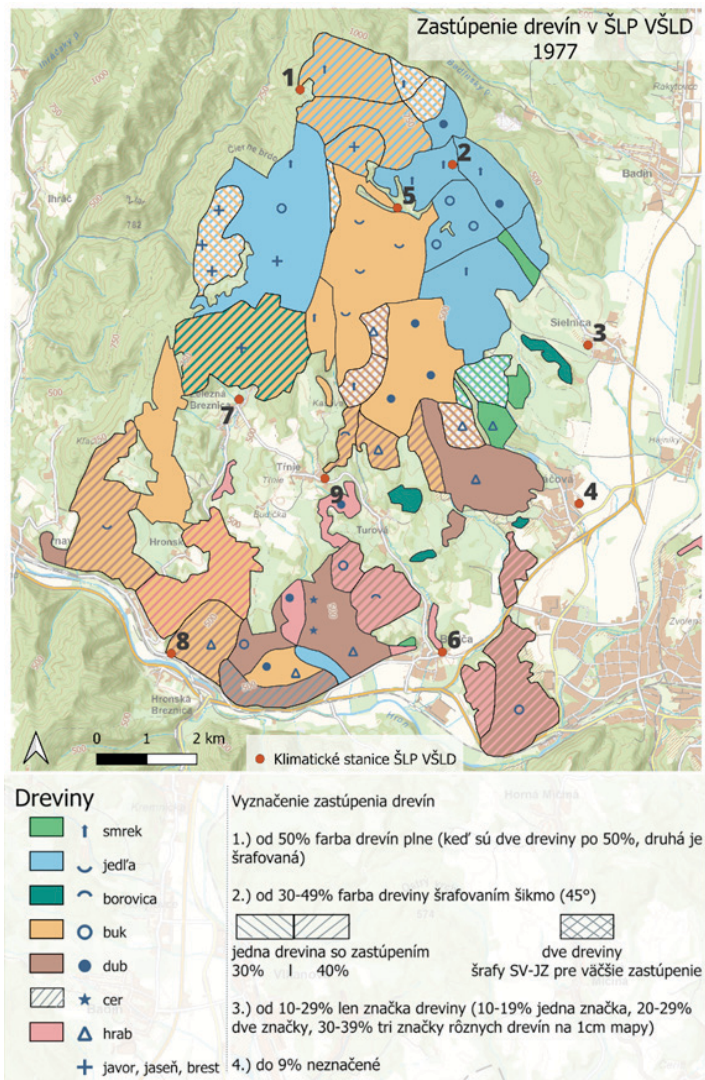
- A5 - teplý, mierne vlhký s miernou zimou (januárová teplota nad -3°C)
- A6 - teplý, mierne vlhký s chladnou zimou (januárová teplota od -3°C do -5°C)
- B5 - mierne teplý, vlhký, vrchovinový
- B7 - mierne teplý, vlhký s chladnou až studenou zimou, údolný
- B8 - mierne teplý, vlhký, vrchovinový
- B10 - mierne teplý, veľmi vlhký, vrchovinový
- C1 - mierne chladný, júlová teplota 12°-16°C
- Mapa Bioklimatických staníc ŠLP 1975



**Obr. 10** Mapa klimatických okrskov ŠLP VŠLD z roku 1977

**Fig. 10** Map of climate districts of ŠLP VŠLD from 1977





**Obr. 11** Mapa zastúpenia drevín ŠLP VŠLD z roku 1977  
**Fig. 11** Map of Tree Species Distribution of ŠLP VŠLD from 1977

Prieskum tvorby a ochrany prírodného prostredia na území ŠLP z rokov 1972-73 sa zaoberal špeciálnym posúdením dôležitosti funkcií lesa v tomto LHC. Prieskum zvažoval konkrétne všetky funkcie lesa. Ako prvoradú zdôrazňoval funkciu lesov ŠLP pre výučbu študentov, pritom však podčiarkoval rovnakú dôležitosť produkcie drevnej hmoty. Ďalej zdôrazňoval pôdochrannú a vodohospodársku funkciu lesa. Vylíčené boli ochranné

pásky pre liečivé zdroje, kúpeľné a rekreačné lesy a v tom čase bolo na pláne vytvorenie rekreačných lesov v bezprostrednom okolí mesta Zvolen. Prieskum zhodnocoval taktiež ekonomické dosahy uplatňovania jednotlivých funkcií lesa.

Hlavnou drevinou na území ŠLP v Kremnických vrchoch bol buk, ktorý mal najvyššie zastúpenie (obr. 11). Na celom území bolo potvrdené hromadné odumieranie jedle.

Predmetom našich ďalších prác bude porovnanie aktuálneho stavu zastúpenia drevín s historickým stavom s dôrazom na zmenu klímy na danom území ŠLP. Taktiež plánujeme systémovým prístupom posúdiť a zhodnotiť ekosystémový funkčný potenciál lesa na území ŠLP a pokúsiť sa tak vyjadriť vývoj v poskytovaných ekosystémových funkciách daného územia (možné straty alebo navýšenie funkčných prvkov).

Podľa SITKOVÁ, BARKA, PAVLEDNA (2022) sa vplyv klimatickej zmeny na lesy líši v závislosti od regionálnych zmien teplôt a zrážkového režimu. Zmeny môžu vytvoriť priaznivejšie podmienky pre teplomilné dreviny, zvýšiť produkciu biomasy a potenciál viazania uhlíka, no zároveň zvyšujú riziko častejších kalamít väčšieho rozsahu. Vyššie teploty predlžujú vegetačné obdobie a miernejšie zimy podporujú prežitie škodcov, urýchľujú ich vývoj a umožňujú viac generácií podkôrneho hmyzu v priebehu roka. Tieto nežiaduce efekty oslabujú vitalitu lesných drevín, destabilizujú ekosystémy a zvyšujú riziko jarných lesných a krajinných požiarov, čo komplikuje obnovu a ochranu lesov (OSTRIHOŇ *et al.* 2024).

## ZÁVER

Uvedený príspevok mal za cieľ pripomenúť historický bioklimatický výskum docenta Petrika, realizovaný s precíznym rozmiestnením meteorologických staníc. Predstavuje príklad cenného monitoringu s kvalitnými meraniami, ktoré sú výnimočné nielen z hľadiska trvania záznamov (pre stanicu Tínie 17 rokov a pre 8 doplnkových staníc takmer 6 rokov), ale aj z pohľadu časovej a fyzickej náročnosti zberu údajov. Predmetom príspevku nebola detailná analýza údajov, ale skôr zvýraznenie významu archívnych údajov, na ktoré by s najväčšou určitosťou skôr či neskôr zabudlo a predstavenie miestnych mikroklimatických podmienok v minulosti. V súčasnosti, keď už väčšinu meraní zabezpečujú automatizované digitálne meteostanice s online prenosom dát, sú tieto historické merania, najmä tie manuálne, o to hodnotnejšie. Je nesmierna škoda, že sa monitoring na uvedených bioklimatických staniach nezachoval do dnešného dňa. Otvára sa tu preto priestor pre opätovné založenie obdobných meraní s cieľom detailného porovnania sledovaných atmosférických veličín a zhodnotenia ich vývoja. Tento typ výskumu zároveň môže inšpirovať ďalšiu generáciu výskumníkov k pokračovaniu, ale aj zakladaniu nových terénnych projektov a zdokonaľovaniu metodiky monitoringu prírodných procesov.

**Pod'akovanie:** Autori ďakujú za podporu projektom Agentúry na podporu výskumu a vývoja (APVV): APVV-21-0224. Taktiež ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) za podporu projektom: VEGA 1/0392/22 a VEGA 1/0443/23.

## LITERATÚRA

- BELLA, V., GAJDOŠOVÁ, V., KORPEL, Š., ..... ŠÁLY, R. 1977. 20 rokov Školského lesného podniku Vysokej školy lesníckej a drevárskej vo Zvolene, Príroda, Bratislava, 131 s.
- BIOMETEOROLOGICKÝ MONITORING NA KATEDRE PRÍRODNÉHO PROSTREDIA Technickej univerzity vo Zvolene. Dostupné na <<http://www.emsbrno.cz/p.axd/sk/Mapa.stan%C3%ADc.aktu%C3%A1lna.teplota.TUZVO.html>>
- KREČMER, V. 1954. Lesnícká meteorologie a klimatologie in Meteorologické Zprávy, Hydrometeorologický ústav, roč. VII, č. 5. 113-117.
- LESNÍCKY METEOROLOGICKÝ MONITORING. Dostupné na <[www.forestweather.sk](http://www.forestweather.sk)>
- OSTRIFOŇ, M., HILLAYOVÁ, M.K., KORÍSTEKOVÁ, 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, 2024, Slovak Academy of Sciences, vol. 72 no. 2, pp. 223-237. <https://doi.org/10.2478/johh-2024-0005>
- PETRIK, M. 1967: Zprávy z bioklimatologických staníc ŠLZ - VŠLD Zvolen - Klimatická charakteristika stanice Trnec z rokov 1963 až 1966, roč. II., č.1
- PETRIK, M. 1971: Správy z bioklimatologických staníc ŠLP-VŠLD Zvolen - Klimatická charakteristika stanice Trnec z rokov 1967 až 1970, roč. III., č.3
- PETRIK, M. 1975: Správy z bioklimatologických staníc ŠLP-VŠLD Zvolen – Klimatická charakteristika jednotlivých staníc ŠLP z rokov 1965 až 1970, roč. IV., č.4
- PETRIK M. 1977. Charakteristika zrážkových pomerov územia školského lesného podniku VŠLD Zvolen. Zborník vedeckých prác XIX (1): 109-128
- PETRIK M. 1978. Charakteristika teploty a vlhkosti ovzdušia na území školského lesného podniku VŠLD vo Zvolene. Zborník vedeckých prác (Acta Facultatis Forestalis Zvolen Czechoslovakia) XX(1):9-22
- SITKOVÁ, Z. 2022: Analýza klímy a priebehu počasia na Slovensku v roku 2021. APOL, 2022, 3, 255–263. Dostupné na <[https://lignosilva.nlesk.org/pdf/apol\\_zbor22\\_3.pdf](https://lignosilva.nlesk.org/pdf/apol_zbor22_3.pdf)>
- SITKOVÁ, Z., BARKA, I., PALENDA, P. 2022. Signály a trendy zemnej klímy na lesných lokalitách Slovenska. Výstupy NLC pre lesnícku prax IV. Národné lesnícke centrum. ISBN 978-80-8093-339-5. 16-29.
- SLÁVIK, D. 1976: Správy z bioklimatologických staníc ŠLP-VŠLD Zvolen – Klimatická charakteristika stanice Trnec z rokov 1971 až 1974, roč. V., č.1
- Škvarenina, J., Matejka, F., STŘELCOVÁ, K., ..., HLÁSNÝ, T. 2007. Bioklimatológia lesa – história, súčasnosť a perspektívy jej vývoja na Slovensku. Bioclimatology and Natural Hazards. ISB 978-80-228-17-60-8.
- TUŽINSKÝ, L. 2002. Bioklimatológia. Technická univerzita vo Zvolene. ISBN 80-228-1150-5. 140 s.
- VIDO, J., NALEVANKOVÁ, P., LEŠTIANSKA, A., ..., ŠKVARENINA, J. 2015. Historické bioklimatologické pozorovania v sieti staníc VŠLP (Vysokoškolského lesníckeho podniku) Technickej univerzity vo Zvolene v období (1966-1970). 22nd International Poster Day, Bratislava, 302-307.
- VIDO J, NALEVANKOVÁ P. 2020. Drought in the Upper Hron Region (Slovakia) between the Years 1984–2014. Water. 2020; 12(10):2887. <https://doi.org/10.3390/w12102887>
- VIDO, J., BORSÁNYI, P., NALEVANKOVÁ, P., ..., ŠKVARENINA, J. . 2024. Thunderstorm climatology of Slovakia between 1984–2023. *Theor Appl Climatol* : 2024, **155**, 8651–8679. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05147-7>
- ZELEŇÁKOVÁ M, VIDO J, PORTELA MM, PURCZ P, BLIŠTÁN P, HLAVATÁ H, HLUŠTIK P. 2017. Precipitation Trends over Slovakia in the Period 1981–2013. Water. 2017; 9(12):922. <https://doi.org/10.3390/w9120922>

**Kontaktné údaje autora:**

Ing. Miriam Hanzelová, PhD.  
Katedra prírodného prostredia  
Lesnícka fakulta  
Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen  
hanzelova@tuzvo.sk

**Historical Bioclimatological Measurements in the Area of the University Forest Enterprise****Summary**

This paper addresses the importance of digitizing historical data and maps collected fifty years ago within the ŠLP (the School Forest Enterprise) in the Kremnické Mountains as part of bioclimatic monitoring. This digitization process facilitates the preservation of unique data for ongoing research and comparison of climatic and environmental changes. The study focuses on data from the Tínie bioclimatic station (spanning 1958-1974) and eight additional supplementary stations (from 1966 to 1970), where extensive measurements of temperature, precipitation, and other climatic characteristics were conducted. Using modified climatograms, the article presents average monthly precipitation sums and air temperature patterns over the year for the selected period. Long-term measurements have demonstrated a warming trend in the region and a higher frequency of arid periods, contrasting with the predominantly humid climate observed in the past. This paper includes examples of georeferenced historical maps illustrating the natural conditions of the selected SFE area. The paper highlights the significance of historical monitoring for current climate change research and calls for the re-establishment of the original bioclimatic monitoring network for detailed long-term comparison of atmospheric variables and developmental trends.

**Keywords** – bioclimatology, digitization of historical records, School Forest Enterprise (SFE), bioclimatic monitoring



## NÁVRH TESTOVANIA NOVÉHO EKOLOGICKY A ENVIRONMENTÁLNE BEZPEČNÉHO PRÍPRAVKU OŠETROVANIA VČELSTIEV PROTI VARROÓZE

Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ<sup>a</sup>, Lubomír KORENÝ<sup>a</sup>, Ján HOLEČY<sup>b</sup>, Jaroslav ŠKVARENINA<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika,

<sup>b</sup> Katedra lesníckej ekonomiky a politiky, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01

*Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V04-00380 a Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaM SR v rámci projektov č. VEGA 1/0443/23 a VEGA 1/0562/24.*

**KORENÁ HILLAYOVÁ, M., KORENÝ, L., HOLEČY, J., ŠKVARENINA, J.:** Návrh testovania nového ekologicky a environmentálne bezpečného prípravku ošetrovania včelstiev proti varroóze, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

### ABSTRACT

The beekeeping industry faces many challenges. One of the biggest is maintaining healthy bee colonies that produce high-quality products without residues of veterinary drugs and with a low impact on the environment. The main factor in the decline of bee colonies worldwide is the proliferation of the ectoparasitic mite *V. destructor*. That is why the successful control of Varroa mites should be a natural part of every beekeeper's activity. Currently, the concept of organic beekeeping without the use of antibiotics and harsh chemicals to treat varroosis is in demand worldwide. The presented contribution proposes a methodological framework for testing a new ecological and low-cost preventive agent for reducing the infestation of bee colonies by the parasite *V. destructor*. The new ecological preparation will be based on extracts from locally growing plants, which can be used even during the honey collection period without unwanted residues. The creation of an effective means to suppress the parasite *V. destructor* in practice can significantly increase the volume as well as the quality of the production of bee products in Slovakia.

**Key words:** *A. mellifera*, *V. destructor*, treatment of varroosis, maximum residue limits, new organic preparation

## 1. Úvod

Pojem "varroóza" je definovaný ako ochorenie hmyzu z rodu *Apis* spôsobené roztočmi rodu *Varroa*, predovšetkým *V. destructor* (Svetová organizácia pre zdravie zvierat, OIE 2019). Varroóza je jednou zo šiestich chorôb včiel uvedených v Kódexe zdravia suchozemských zvierat OIE. Členské krajiny a územia OIE sú povinné hlásiť jeho výskyt (<https://www.oie.int/en/disease/diseases-of-bees/>). Príznaky ochorenia sú veľmi rôznorodé v závislosti od úrovne zamorenia a sekundárnych infekcií. Typickými klinickými príznakmi napadnutia sú dezorientácia včiel, nerovnomerne zakladené plodiskové bunky, včely so zmrzačenými krídlami a bruchom a náhly kolaps celého včelstva. Tento vzorec príznakov sa označuje aj ako syndróm parazitických roztočov (BOECKING A GENERSCH 2008).

Vo všeobecnosti sú včely medonosné klasifikované ako zvieratá určené na výrobu potravín. Preto sa veterinárne lieky, ako sú varokyseliny, musia vedecky hodnotiť podľa požiadaviek na bezpečnosť potravín pre ľudí (napr. Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 470/2009 zo 6. mája 2009 o stanovení postupov Spoločenstva na určenie limitov rezíduí farmakologicky účinných látok v potravinách živočíšneho pôvodu v EÚ alebo osobitné predpisy platné v iných krajinách). Okrem toho sú v platnosti maximálne limity rezíduí (MLR) EÚ pre reziduá farmakologicky účinných látok v mede, ktoré sú uvedené v nariadení Komisie (EÚ) č. 37/2010. V prípade niektorých látok (napr. amitraz a kumafos) bola stanovená MLR, zatiaľ čo v prípade iných látok sa pri hodnotení preukázalo, že na ochranu bezpečnosti potravín sa nevyžaduje žiadna MLR (flumetrín, kyselina šťaveľová a tau-fluvalinát). MRL sa musia dodržiavať pri liečbe varroózy. Výrobky, ktoré neboli vyhodnotené ako bezpečné podľa týchto požiadaviek, nemôžu byť povolené ani inak použité pre zvieratá určené na produkciu potravín (Nariadenie Európskej komisie 37/2010).

Ak sa analýzou rezíduí zistia zakázané látky podľa nariadenia EÚ (príloha k nariadeniu Komisie č. 37/2010, tabuľka II), med alebo iné včelie produkty nie je možné predávať v EÚ bez ohľadu na hladinu rezíduí. Vo väčšine krajín sveta musia byť účinné látky a aplikované prípravky schválené a registrované príslušnými orgánmi predtým, ako sa môžu legálne používať. Je potrebné tiež dodržiavať obmedzenia používania a preventívne opatrenia na udržanie rezíduí pod maximálnymi limitmi rezíduí v produktoch včiel medonosných. Z dôvodu, že EÚ je druhým najväčším producentom medu po Číne platí pre krajiny EÚ nariadenie Komisie (EÚ) č. 37/2010, ktoré musia spĺňať pre vývoz medu.

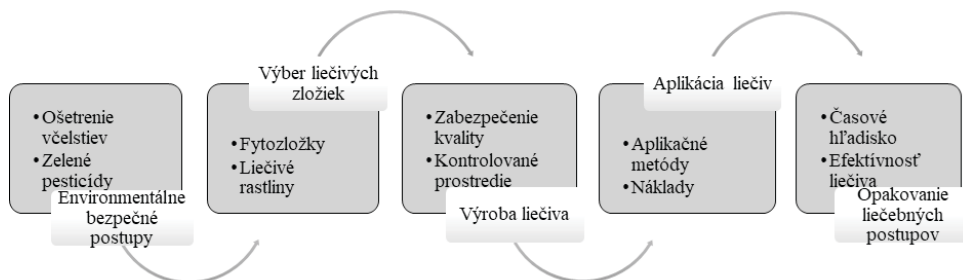
Miticídy, ktoré sa často používajú na liečbu varroózy, ako fluvalinát a kumafos zanechávajú zvyšky vo vosku a mede. Iné chemické kontrolné činidlá, ako je flumetrín, amitraz, cymiazol a brómpropylát, sú tiež spojené s toxickými zvyškami (RIAL-OTERO ET AL. 2007, PERUGINI ET AL. 2018). Vzhľadom na tieto problémy a vývoj rezistencie u populácie roztočov *Varroa* na fluvalinát a kumafos (ELZEN A WESTERVELT 2002), je dôležité vyvinúť nové a bezpečnejšie alternatívy kontroly varroózy. Jedným z explicitných cieľov výskumníkov v integrovanej ochrane proti škodcom *Varroa destructor* je teda znížiť alebo odstrániť závislosť včelárov od syntetických akaricídov. V posledných rokoch vzrástol záujem o hľadanie alternatívnych udržateľných metód kontroly varroózy.

Používanie veterinárnych chemických liekov pri liečbe a prevencii chorôb včiel prešlo v poslednej dobe podstatným znížením z dôvodu vysokého rizika spojeného s kontamináciou včelích produktov (HRISTOV ET AL. 2020). Preto je opodstatnené venovať väčšiu pozornosť významu preventívnej liečby a hľadaniu nových, bezpečnejších metód, ako komplexne predchádzať rozvoju chorôb vo včelstvách. Byliny a bylinné receptúry sa už dlho úspešne používajú v humánnej medicíne. Zároveň sa objavujú nové možnosti ich využitia vo veterinárnej medicíne. Vzhľadom na obsah rôznych biologicky aktívnych látok vykazujú mnohostranné farmakologické účinky a zároveň majú menej vedľajších účinkov. Jedným z ich zdokumentovaných vplyvov je priama alebo nepriama aktivácia mechanizmov vedúcich k zvýšeniu odolnosti organizmu u cicavcov. Množstvo rastlín, aj vďaka svojim povzbudzujúcim, regeneračným a metabolizmus zlepšujúcim vlastnostiam, zvyšuje schopnosť organizmu odolávať infekciám. Doterajšie výskumy týkajúce sa potenciálneho využitia bylinných rastlín vo včelárstve sa zameriavali na pokusy aplikovať ich na kontrolu špecifických chorôb s využitím ich antibakteriálnych, antifungálnych alebo antivírusových vlastností. Okrem iného sa uskutočnili pokusy o kontrolu parazita *V. destructor* pomocou byliniek mäty piepornej, harmančeka, eukalyptu (PASCA ET AL. 2021), ako aj pomocou olejov z mäty, tymiánu, šalvie a borovice (TOPAL ET AL. 2020).

Cieľom výskumu je vytvoriť metodický rámec na testovanie originálneho a inovatívneho prípravku na kontrolu varroózy z lokálne rastúcich rastlín. Využijeme rastlinný potenciál Slovenska, ktorý je známy existenciou viacerých rastlinných druhov obsahujúcich účinné látky s vysokou biologickou aktivitou, vrátane akaricídnej a insekticídnej aktivity, napr. *Lavandula angustifolia*, *Salvia officinalis* L., *Taraxacum officinale* ai. Tieto rastliny boli použité na kontrolu roztočov, kliešťov a iných článkonožcov (COLIN 1990, POHORECKA 2004, NEDIC ET AL. 2015, YAROSHKO ET AL. 2016, AHUMADA ET AL. 2022).

## 2. Materiál a metodika

Postup vytvorenia metodického rámca na testovanie originálneho a inovatívneho prípravku na kontrolu varroózy z lokálne rastúcich rastlín je zobrazený na Obrázku 1.



**Obrázok 1.** Metodický postup testovania nového ekologicky a environmentálne bezpečného prípravku ošetrovania včelstiev proti varroóze

**Figure 1.** Methodological procedure of testing a new ecologically and environmentally safe preparation for the treatment of bee colonies against varroosis

Jednotlivé kroky metodického rámca testovania prípravku na kontrolu varroózy sú založené na dôkladnej rešerši dostupných primárnych a sekundárnych zdrojov ako aj výsledok odbornej diskusie praktických včelárov a ich skúseností s chovom včiel. V nasledovných kapitolách sú jednotlivé kroky opísané s dôrazom na použitie ekologicky a environmentálne bezpečných prostriedkov na liečbu varroózy.

### **3. Výsledky**

#### **3.1 Návrh na použitie environmentálne bezpečných chemických postupov včelárenia**



Environmentálne vhodné preventívne prostriedky proti varroóze sú také, ktoré nezanechávajú nežiadúce rezíduá na včelách a ich produktoch. Ako environmentálne vhodné a nenáročné ošetrovanie včelstiev pred varroózou sa podľa predošlých zistení vedcov z rôznych krajín sveta javí využitie rastlinných extraktov. Medzi včelármi z celého sveta sa čoraz častejšie začína používať pojem "Green Pesticides", tzv. „Zelené pesticídy“. Tento pojem sa vzťahuje na všetky typy prírodne orientovaných a prospešných materiálov na kontrolu škodcov, ktoré môžu prispieť k zníženiu populácie škodcov a zvýšeniu produkcie potravín. Sú bezpečné, ekologické a kompatibilnejšie so zložkami životného prostredia ako syntetické pesticídy (KOUL ET AL. 2008). Preto v posledných rokoch dochádza k návratu používania extraktov rastlín ako zdroja bezpečnejších pesticídov pre životné prostredie a ľudské zdravie.

#### **3.2 Identifikácia a výber lokálne rastúcich rastlín s overeným obsahom organických zlúčenín proti varroóze**



Tradičný liečebný systém založený na používaní bylenných liečiv stále zohráva dôležitú úlohu v systéme zdravotnej starostlivosti o včelstvá, teda pri predchádzaní stratám včelstiev a správnom orientovaní včelárov na prijatie trvalo udržateľného včelárstva. V predloženom príspevku analyzujeme organické zlúčeniny z rastlín a ich vplyv na zamorenie včelstiev, teda na využitie fytotherapie vo včelárstve. U mnohých rastlinných druhov sa uvádza, že majú farmakologické účinky, ktoré možno pripísať ich fytozložkám, ako sú glykozidy, saponíny, flavonoidy, steroidy, taníny, alkaloidy, terpény a podobne. Tieto identifikované fytochemikálie sú považované za pozoruhodné zlúčeniny pri hľadaní účinných a nových liečiv proti varroóze. Väčšina monoterpenov, ako tymol pôsobí ako fumigant.

Ďalším krokom v tomto metodickom postupe je identifikovať a správne vybrať lokálne rastúce rastliny, ktoré obsahujú už preskúmané a overené látky na liečbu varroózy. Rastliny s obsahom éterických olejov, ktoré sú definované ako prchavé aromatické zlúčeniny, najmä terpenoidy, fenylypropanoidy, monoterpény, seskviterpény a alkoholy majú široké spektrum antimikrobiálnej a antioxidačnej aktivity, takže pridanie, napr. klinčekových, eukalyptových, mäťových, rozmarínových, oreganových esenciálnych olejov a škorice môže byť prospešné vo včelíne (POHORECKA 2004, MAGGY ET AL. 2010, DIAZ ET AL. 2018). Slovensko má veľmi bohaté rastlinstvo s mnohými liečivými a farmakologickými vlastnosťami, ktoré by sa mali dôkladne preskúmať. Pre náš výskum sme si vybrali konkrétne rastliny, ktoré obsahujú vybrané a vedcami preskúmané organické zlúčeniny účinné proti varroóze (Tabuľka 1). Túto skutočnosť zistili autori uvedení v poslednom stĺpci Tabuľky 1. Pri zbere lokálne rastúcich liečivých rastlín do liečiva sa prihliadalo aj na ich správne kombinácie, aby nepredstavovali zdravotné riziká pre včely.

**Tabuľka 1.** Vybrané lokálne rastúce rastliny na predchádzanie a ošetrovanie včelstiev proti varroóze  
**Table 1.** Selected locally growing plants for the prevention and treatment of bee colonies against varroosis

Rastlina	Popis a účinky byliny na včely a roztoče Varroa	Literatúra
 Žihľava dvojdomá	<i>Urtica dioica</i> L. (Urticaceae), bežne známa ako žihľava dvojdomá, je bylinná trváca rastlina patriaca do skupiny fytoalimurgickej zeleniny, vrátane divo rastúcich jedlých druhov, ktoré sa všetky používali v minulosti, keď bol nedostatok potravy. Rastlina je všetkým dobre známa pre dermatitídu, ktorú spôsobuje pri dotyku vďaka biochemickým mediátorom, ako je histamín a acetylcholín. Nedávno došlo k znovuoobjaveniu rastliny ako potravinu a liečiva kvôli širokému spektru vykazovaných biologických aktivít, ako sú antireumatické, antiinfekčné, imunomodulačné, antihyperglykemické a alergické. Pridanie štandardizovaného extraktu zo žihľavy do sirupového roztoku pre včely výrazne zlepšilo kondíciu včiel.	POHORECKÁ (2004)
 Klinček voňavý	<i>Syzygium aromaticum</i> (L.) (Myrtaceae) je jedna z najdôležitejších bylín v tradičnej medicíne so širokým spektrom biologickej aktivity. Fytozložky klinčekov pozostávajú z rôznych tried a skupín chemických zlúčenín, ako sú monoterpény, seskviterpény, fenoly a uhlíkovodíkové zlúčeniny. Hlavnými fytochemikáliami, ktoré sa nachádzajú v klinčekovom oleji, je najmä eugenol (70 – 85 %), po ňom nasleduje eugenylacetát (15 %) a $\beta$ -karyofylén (5 – 12 %). Ich deriváty majú biologické výhody, ako sú antibakteriálne, protiplesňové, insekticídne, antioxidačné, antikarcinogénne schopnosti. Toxicita klinčekového oleja proti <i>V. destructor</i> sa líši v závislosti od množstva a doby jeho podávania.	MAGGY ET AL. (2010)

 <p>Lipa veľkolistá, lipa malolistá</p>	<p><i>Tilia platyphyllos</i>, <i>Tilia cordata</i> – Európska lieková agentúra (EMA) (2012) uvádza, že dané druhy líp obsahujú – Éterický olej, slizovité látky, triesloviny, flavonoidy, tilirozid, sacharidy, kyseliny, vitamín C a E. Obsah tanínu a slizu v ich kvetoch produkuje priaznivejšie čaje a extrakty. Kvety obsahujú viac ako trinásť zlúčenín (kyselina oleanolová, kyselina maslinová, apigenín, luteolín, kempferol, kvercetín, kempferol-3- O -glukozid, kvercetín-3- O-glukozid, rutín, tilirozid, kyselina ellagová, kyselina šikimová a kyselina chinová). Obsahujú aj Tymol, ktorý sa používa vo viacerých prírodných liečivách proti varroóze.</p>	<p>EURÓPSKA LIEKOVÁ AGENTÚRA (2012), COLIN (1990)</p>
 <p>Mäta pieporná</p>	<p><i>Mentha piperita</i> (L.) (Lamiaceae) – Je trváčna a silne voňajúca bylina. Obsahuje organické látky (etanol, metanol, etylacetát, chloroform). Výskum odhalil aj prítomnosť alkaloidov, flavonoidov, steroidov, tanínov a fenolov. Zistilo sa, že extrakty z listov hexánu a petroléru majú silnú antibakteriálnu aktivitu proti celému radu patogénnych baktérií. Esenciálne oleje z mäty sa ukázali ako účinné proti <i>V. destructor</i>.</p>	<p>YAROSHKO ET AL. (2016)</p>
 <p>Levanduľa lekárska</p>	<p>Esenciálne oleje a výťažky z <i>L. angustifolia</i> preukázali silnú antibakteriálnu aktivitu proti testovaným baktériám: <i>E. coli</i>, <i>S. aureus</i> a <i>P. aeruginosa</i>, najlepšie známy tým, že je vo veľkej miere zodpovedný za infekcie kožných rán. Esenciálne oleje a výťažky <i>L. angustifolia</i> majú zaujímavý antimikrobiálny účinok a môžu byť novým potenciálnym zdrojom pre prírodné antimikrobiálne činidlo aplikované vo farmaceutickej oblasti a pre vývoj nového produktu na hojenie rán. Výskum odhalil prítomnosť niekoľkých chemických skupín v hydroetanolovom extrakte, ako sú flavonoidy, katechické taníny, steroly, kumaríny, leukoantokyány a slizy</p>	<p>AHUMADA ET AL. (2022)</p>
 <p>Palina pravá</p>	<p>Štandardizovaný extrakt <i>Artemisia absinthium</i> L. po 17 dňoch liečby, významne inhiboval vývoj <i>Nosema apis</i> u prirodzene a umelo infikovaných robotníc. <i>A. absinthium</i> L. obsahuje mnoho biologicky aktívnych zlúčenín: absintín, silice, flavonoidy, organické kyseliny, triesloviny a minerálne soli a dokazujú dezinfekčný, diastolický, stimulujúci sekréciu žalúdočnej šťavy a antiparazitický terapeutický účinok. Podľa nariadenia Rady (EEC) č. 2377/90 je extrakt z <i>A. absinthium</i> L. zaradený do prílohy II so zoznamom látok, ktoré nepodliehajú limitom MRL. Tieto látky sa považujú za bezpečné pri aplikácii na všetky druhy zvierat určených na výrobu potravín.</p>	<p>POHORECKA (2004)</p>

 <p>Šalvia lekárska</p>	<p><i>Salvia officinalis</i> L. obsahuje éterický olej, saponíny, triesloviny, glykozidy, horčiny, živičnaté látky, kyseliny, pentózy, vosky, aminokyseliny, vitamín A, B, C, E a K, karotén, fytoncídny, gáfor, salvín, borneol, meď, železo, horčík, mangán, zinok, selén, draslík, vápnik, vláknu, sacharidy, tuk, bielkoviny, fytoestrogény.. Bolo zistené, že včelstvá ošetrované esenciálnym olejom zo šalvie sa štatisticky nelíšili od včelstiev ošetrovaných amitrazom. Ďalej neboli pozorované žiadne vedľajšie účinky.</p>	<p>COLIN (1990), NEDIC ET AL. (2015)</p>
 <p>Púpava lekárska</p>	<p><i>Taraxacum officinale</i> obsahuje fytochemikálie: karotenoidy; flavonoidy (napr. kvercetín, chrysoeriol, luteolín-7-glukozid); fenolové kyseliny (napr. kyselina kávová, kyselina chlorogenová, kyselina čakanka); polysacharidy (napr. inulín); seskviterpénové laktóny (napr. kyselina taraxínová, taraxakozid, 11p,13-dihydrolaktucín, ixerín D, taraxakolid-O-p-glukopyranozid); steroly (napr. taraxasterol, P-sitosterol, stigmasterol); triterpény (napr. a-amyrín).</p>	<p>DAZ ET AL. (2018)</p>

Poznámka: Obrázky fotoarchív autorov

### 3.3 Identifikácia a výber metódy na výrobu preventívneho prostriedku proti varroóze

Ďalším dôležitým krokom metodického postupu je identifikovať a následne vybrať vhodnú metódu výroby prostriedku proti varroóze. Existuje mnoho faktorov, ktoré ovplyvňujú konečnú kvalitu a množstvo látok extrahovaných z rastliny. Každý z týchto faktorov ovplyvňuje aj bezpečnosť a účinnosť extraktu:

- Botanická odroda rastliny.
- Obdobie zberu rastliny alebo jej častí – napríklad u púpavy lekárskej je dôležité, aby listy a púčiky sa zbierali v marci a apríli, ale koreň púpavy až v septembri a októbri.
- Zloženie pôdy na ktorej rastlina rastie alebo je pestovaná – chemické hnojenie a ošetrovanie.
- Vek rastliny.
- Extrakt je iný ak sa extrahuje celá rastlina, alebo len časť rastliny, napríklad koreň, alebo listy, vňať, alebo kvety.
- Použitý druh a koncentrácia rozpúšťadla – voda, alkohol, CO<sub>2</sub>, alebo iné rozpúšťadlo.
- Doba procesu extrakcie.
- Stupeň rozomletia rastliny pred extrakciou.

Napríklad, iný extrakt, alebo koncentrát z bylinky dostanete, keď namočíte rastlinu vo vode pri teplote 15-20 °C po dobu 6 hodín (macerácia). A iný profil extraktu dostanete pri použití perkolačnej metódy, kde horúca voda tečie cez rastlinný materiál pod vysokým tlakom.



Pre splnenie podmienky jednoduchkej výroby liečebného produktu v manažmente ošetrovania včelstiev sme vybrali metódu výroby emulzie v podobe odvaru, ktorý sa následne jednoducho aplikuje na včelstvá. Odvar je jednou z najvšeobecnejších techník používaných pri galenických prípravkoch, najmä v minulosti, keď sa vo veľkom priemyselne nevyrábali bylinné extrakty. Odvary sa pripravujú macerovaním surovej časti rastliny vriacou vodou (JANČO A ZENTRICH 1994).

### **3.4 Analýza a výber vhodného spôsobu aplikácie preventívneho prípravku proti varroóze**

Existuje množstvo používaných aplikačných ciest na podávanie preventívnych prostriedkov a liečiv na včelstvá, napr. vo forme fumigačných prúžkov (napustených prúžkov účinnou látkou) – odparovaním, dym, aerosólová technika (vyvíjač aeorosólu), aplikácia náterom zaviečkovaného plodu alebo pokvapom medzi rámiky v úli.

V našom metodickom postupe bude použitá účinná, nízko nákladová, vysoko efektívna a zároveň jednoduchá metóda aplikácie preventívneho prostriedku proti varroóze, tzv. aerosólová technika pomocou vyvíjaču aeorosólu. Táto metóda sa používa aj na postrekovanie stromov proti rôznym škodcom.

### **3.5 Frekvencia aplikácie a dávkovanie navrhovaného nového prípravku**

Pre amitrazové, pyretroidné lieky a organické kyseliny je presne stanovený odporúčaný čas, dávkovanie, spôsob použitia a bezpečnostné opatrenia pre včelára. V mnohých prípadoch sú pozorované nežiadúce reakcie; napr. zmena správania včiel, silné rozrušenie včiel, excitácia a knock-down trúdov a čerstvo vyliahnutých včiel ai. Nami navrhnutý odvar sa aplikuje pri každej návšteve včelstiev, bez obmedzenia času a vonkajších podmienok.

Počet aplikácií odvaru postrekom je daný od počtu prehliadok (návštev) včelstiev v danom mesiaci.

Predošlé pozorovanie fenologických fáz rastlín na strednom Slovensku nám pomohlo z hľadiska ich zberu, ktoré sme použili do odvaru v danom mesiaci. Podrobnejšiu štruktúru zmesi rastlín v liečive na ošetrovanie včelstiev uvádza Obrázok 2. Presné pomery neuvádzame z dôvodu ďalšieho testovania a úmyslu chránenia jedinečnej receptúry odvaru.



Rastlina	Časť rastliny	Marec	April	Máj	Jún	Júl	August	September	Október	November
Žihľava dvojdomá	celá rastlina									
Lipa veľkolistá, lipa malolistá	kvety									
Mäta pieporná	listy a stonka									
Klinček	kvety									
Palina pravá	listy									
Levanduľa lekárska	kvety									
Šalvia lekárska	listy									
Púpava lekárska	kvety a stonka									

**Obrázok 2.** Frekvencia aplikácie a dávkovanie nového prípravku  
**Figure 2.** Application frequency and dosage of the new preparation

\* Obrázok zobrazuje obdobie ošetrovania včelstiev počas včelárskej sezóny. Použitie vybraných rastlín v danom mesiaci do emulzie je zobrazené žltou farbou. Sú to mesiace v ktorých daná rastlina rastie na strednom Slovensku, resp. kvitne pri rastlinách z ktorých sa používa kvet (napr. lipový kvet alebo púpava).

#### 4. Diskusia

Cieľom navrhnutého metodického rámca testovania nového prípravku liečenia varroózy je riešiť nedostatok účinných a ekologických metód na kontrolu roztočov Varroa vo včelstvách. Našou snahou je vyvinúť prírodnú alternatívu na báze bylín, ktorá dokáže potlačiť napadnutie Varroa bez toho, aby poškodila včely alebo životné prostredie. Vytvorením novej bylinnej emulzie sa snažíme prispieť k udržateľnejšiemu a ekologickejšiemu prístupu k chovu včiel.

Metodický rámec zahŕňa aplikáciu novej bylinnej emulzie vyrobenej z extraktov lokálne rastúcich rastlín (pozri zoznam navrhovaných rastlín Tabuľka 1). Týmto rastlinám sa darí v rôznych podmienkach, vďaka čomu sú vhodné na použitie v rôznych európskych regiónoch. Vybrali sme rastliny s vedecky dokázanou účinnosťou proti roztočom, ktoré je možné aplikovať kedykoľvek počas aktívnej sezóny na zníženie miery napadnutia. Počas celej včelárskej sezóny budeme používať rôzne bylinné extrakty (uvedené na Obrázku 2), aby sme maximalizovali účinnosť liečby a zabránili parazitickým roztočom Varroa destructor vyvinúť si rezistenciu na naše liečivo. Metóda extrakcie týchto účinných látok je jednoduchá a zároveň účinná: zozbierané rastlinné materiály sa ponoria do vody, nechajú sa povariť a vylúhovať cca 12 hodín. Tento proces je nielen lacný, ale aj ekologický a neprodukuje žiadne toxické vedľajšie produkty. Jednoduchosť tohto prístupu môže vyvolať otázku, prečo takýto produkt ešte nie je dostupný na trhu a či existuje riziko, že ho iní zopakujú, keď uvidia rastliny, ktoré používame. Skutočné duševné vlastníctvo však nespočíva vo výbere rastlín, ale v určení správnych pomerov a koncentrácií účinných látok.

Postrekovanie nového bylinného prípravku je pre včelárov oveľa jednoduchšie ako zapalovanie dymových prúžkov alebo miešanie bylinných kvapiek s cukrovým sirupom na kŕmenie včiel. Predchádzajúce bylinné liečby si vyžadovali kombináciu s inými metódami, ako sú tepelné úpravy alebo organické kyseliny, čo je časovo aj finančne náročné, najmä pri riadení veľkého počtu kolónií, a môže znížiť celkovú účinnosť liečby. Čisto prírodné a ekologické zloženie nášho prípravku poskytuje nielen účinnú liečbu, ale pomáha aj budovať imunitu včiel a potenciálne posilňuje ich odolnosť voči iným chorobám. Na rozdiel od prostriedkov ako je Ecopol, ktoré je možné použiť len za špecifických poveternostných a klimatických podmienok, je možné náš prípravok aplikovať kedykoľvek počas včelárskej sezóny.

Účinnosť nášho nového liečebného produktu sme najprv testovali v laboratórnych podmienkach a od 15. augusta 2024 vykonávame terénne testy na 20 včelstvách v oblasti stredného Slovenska. Okrem toho zabezpečujeme súlad s nariadeniami EÚ týkajúcimi sa organického ošetrovania a biopesticídov, pričom kladieme dôraz na bezpečnosť nášho riešenia pre včely, ľudí a životné prostredie.

Jednou z výziev, ktorým môžeme čeliť pri zavádzaní liečiva do praxe je odpor zo strany včelárov zvyknutých na používanie „tvrdej“ chémie. Na prekonanie týchto prekážok budeme spolupracovať so slovenskými včelárskymi združeniami, aby sme organizovali vzdelávacie workshopy, ktoré zvýšia povedomie včelárskej komunity o výhodách nášho prírodného riešenia. Plánujeme tiež vyvinúť sprievodnú mobilnú aplikáciu, ktorá pomôže včelárom monitorovať úroveň varroózy a dostávať odporúčania, kedy a akú emulziu použiť. To zaistí správne kombinácie liečiva a zabráni roztočom vo vývoji rezistencie (jedna z nevýhod chemického ošetrovania). Na rozdiel od iných chemických produktov, naše liečivo neovplyvňuje kvalitu včelích produktov ako je med, peľ a propolis. Naopak, dlhodobé používanie chemikálií môže časom zhoršiť kvalitu produktu. Okrem toho pomôžeme včelárom znížiť náklady na prevádzku včelnice. V súčasnosti včelári minú ročne cca 80 € na včelstvo pri chemickom ošetrovaní. Náš navrhovaný prípravok umožní tieto náklady znížiť o 40-60%.

## 5. Záver

Varroóza predstavuje veľkú výzvu pre včelárstvo v celosvetovom kontexte. Dôvodom je zvýšená odolnosť tohto roztoča na používané syntetické akaricídy. Okrem toho prítomnosť chemických zvyškov vo vosku a mede ovplyvňuje bezpečnosť a kvalitu včelích produktov, a tak ohrozuje verejné zdravie. Je nanajvýš dôležité posilniť prírodné alternatívne spôsoby liečby, ako je používanie rôznych rastlín vo forme éterických olejov, extraktov, odvarov atď. Tieto produkty vykazujú priaznivé výsledky v terénnych podmienkach z hľadiska úmrtnosti a poklesu roztočov *V. destructor*. Je však potrebné vykonať ďalšie výskumy na hodnotenie účinku každej bioaktívnej zlúčeniny, ako aj optimálnej dávky, aby sa dali použiť ako alternatívy proti *V. destructor*. Esenciálne oleje a ich chemické zložky ponúkajú bezpečnú alternatívu k syntetickým akaricídum na kontrolu tohto roztoča vo včelstvách. V nami navrhnutom metodickom postupe pre

testovanie nového prípravku na liečbu varroózy dbáme, aby jeho výroba a aj aplikácia bola pre včelárov nízko nákladová. Nový ekologický prípravok je založený na výtázkoch z lokálne rastúcich rastlín, ktoré možno bez nežiaducich zvyškov používať aj v období zberu medu. Vytvorenie účinného prostriedku na potlačenie parazita *V. destructor* v praxi môže výrazne zvýšiť objem, ako aj kvalitu včelích produktov.

### Použitá literatúra

1. AHUMADA, M. F., MARCOS, J. L., CADAVID, A., BAÑARES, G. V., SILVA, C. M., OLIVARES, Y. A., & MÜLLER, H. Y. (2022). Evaluation of the efficacy of essential oils of *Lavandula angustifolia* and *Eucalyptus globulus* for the control of *Varroa destructor* in *Apis mellifera*: A randomised field study. *Austral journal of veterinary sciences*, 54(2), 83-87.
2. BOECKING, O., & GENERSCH, E. (2008). Varroosis—the ongoing crisis in bee keeping. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 3, 221-228.
3. COLIN, M. E. (1990). Essential oils of Labiatae for controlling honey bee varroosis. *Journal of Applied Entomology*, 110(1-5), 19-25.
4. DIAZ, K., ESPINOZA, L., MADRID, A., PIZARRO, L., & CHAMY, R. (2018). Isolation and identification of compounds from bioactive extracts of *Taraxacum officinale* Weber ex FH Wigg. (Dandelion) as a potential source of antibacterial agents. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*.
5. ELZEN, P. J., AND D. WESTERVELT. (2002). Detection of coumaphos resistance in *Varroa destructor* in Florida. *Am. Bee J.* 142(4): 291–292.
6. Európska lieková agentúra / European Medicines Agency (EMA) (2012).
7. HRISTOV, P., SHUMKOVA, R., PALOVA, N., & NEOV, B. (2020). Factors associated with honey bee colony losses: A mini-review. *Veterinary Sciences*, 7(4), 166.
8. JANČO, J., & ZENTRICH, J. A. (1994). *Herbář léčivých rostlin* (1 díl). Eminent., 288 s.
9. KOUL, O., WALIA, S., & DHALIWAL, G. S. (2008). Essential oils as green pesticides: potential and constraints. *Biopesticides international*, 4(1), 63-84.
10. MAGGY, M. D., RUFFINENGO, S. R., NEGRI, P., & EGUARAS, M. J. (2010). Resistance phenomena to amitraz from populations of the ectoparasitic mite *Varroa destructor* of Argentina. *Parasitology research*, 107, 1189-1192.
11. Nariadenie Komisie (EÚ) č. 37/2010 z 22. decembra 2009 o farmakologicky účinných látkach a ich klasifikácii, pokiaľ ide o maximálne limity reziduí v potravinách živočíšneho pôvodu.
12. Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 470/2009 zo 6. mája 2009 o stanovení postupov Spoločenstva na určenie limitov reziduí farmakologicky účinných látok v potravinách živočíšneho pôvodu v EÚ.
13. NEDIC, N., KOSTIC, M., MARKOVIC, T., MARKOVIC, M., JEVTIC, G., & ANDJELKOVIC, B. (2015). Insecticidal Activity of Sage (*Salvia Officinalis*) Essential Oil to *Varroa Destructor* (Acari: Varroidae) and *Apis Mellifera* (Hymenoptera: Apidae).
14. PAȘCA, C., MATEI, I. A., DIACONEASA, Z., ROTARU, A., ERLER, S., & DEZMIREAN, D. S. (2021). Biologically active extracts from different medicinal plants tested as potential additives against bee pathogens. *Antibiotics*, 10(8), 960.
15. PERUGINI, M., TULINI, S. M., ZEZZA, D., FENUCCI, S., CONTE, A., & AMORENA, M. (2018). Occurrence of agrochemical residues in beeswax samples collected in Italy during 2013–2015. *Science of the total environment*, 625, 470-476.
16. POHORECKA, K. (2004). Effect of standardized plant herb extracts on general condition of the honey bee. *Bull Vet Inst Pulawy*, 48, 415-9.
17. RIAL-OTERO, R., GASPAS, E. M., MOURA, I., & CAPELO, J. L. (2007). Chromatographic-based methods for pesticide determination in honey: An overview. *Talanta*, 71(2), 503-514.
18. Svetová organizácia pre zdravie zvierat (2019)/ World Organization for Animal Health (2019)
19. TOPAL, E., CIPCIGAN, M. C., TUNCA, R. Í., KÖSOĞLU, M., & MĂRGĂOAN, R. (2020). The Use of medicinal aromatic plants against bee diseases and pests. *Bee Studies*, 12(1), 5-11.
20. YAROSHO, O., SHEPELEVYCH, V., STEPURA, L., HRYTSENKO, L., YAVORSKA, N., SVYATYETSKA, V., ... & ODNOSUM, H. (2017). Antibacterial effect of flower extracts on microorganisms isolated from honeycombs with affected bee brood. *Agricultural Science and Practice*, 4(1), 50-55.

## Summary

### **Proposal for testing a new ecologically and environmentally safe product for the treatment of bee colonies against varroosis**

Michaela Korená Hillayová<sup>a</sup>, Ľubomír Korený<sup>a</sup>, Ján Holécý<sup>b</sup>, Jaroslav Škvarenina<sup>a</sup>,

<sup>a</sup>Department of Natural Environment, Faculty of Forestry, Technical University of Zvolen, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic.

<sup>b</sup>Department of Forest Economics and Policy, Faculty of Forestry, Technical University of Zvolen, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic

*Funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan of the Slovak Republic within the project no. 09I03-03-V04-00380 and the Scientific Grant Agency of The Ministry of Education, Science, Research and Sport in Slovakia by project VEGA 1/0443/23.*

The goal of the proposed methodological framework for testing a new preparation for the treatment of varroosis is to solve the lack of effective and ecological methods for controlling Varroa mites in bee colonies. Our goal is to develop a natural, herbal alternative that can control Varroa infestation without harming the bees or the environment. By creating a new herbal emulsion, we are trying to contribute to a more sustainable and ecological approach to beekeeping.

The procedure will involve the application of a new herbal emulsion made from extracts of locally grown plants (see Table 1 for the list of proposed plants). These plants thrive in a variety of conditions, making them suitable for use in different European regions. We have selected plants with scientifically proven effectiveness against mites that can be applied at any time during the active season to reduce infestation rates. Throughout the beekeeping season, we will use different herbal extracts (shown in Figure 2) to maximize the effectiveness of the treatment and prevent the parasitic mite Varroa destructor from developing resistance to our drug. The method of extracting these active substances is simple and at the same time effective: the collected plant materials are immersed in water, boiled, and infused for about 12 hours. This process is not only cheap but also environmentally friendly and does not produce any toxic by-products. The simplicity of this approach may raise the question of why such a product is not yet available on the market and whether there is a risk that others will replicate it when they see the plants we use. However, real intellectual property does not lie in the selection of plants, but in determining the correct proportions and concentrations of active substances.

Spraying a new herbal preparation is for beekeepers much easier than lighting smoke strips or mixing herbal drops with sugar syrup to feed bees. Previous herbal treatments required a combination with other methods such as heat treatments or organic acids, which is time and money-consuming, especially when managing large numbers of colonies, and

can reduce the overall effectiveness of the treatment. The purely natural and ecological composition of our product not only provides an effective treatment but also helps to build the bees' immunity and potentially strengthens their resistance to other diseases. Unlike products such as Ecolol, which can only be used under specific weather and climate conditions, our preparation can be applied at any time during the beekeeping season.

We first tested the effectiveness of our new medicinal product in laboratory conditions, and from August 15, 2024, we are conducting field tests on 20 bee colonies in the area of central Slovakia. In addition, we ensure compliance with EU regulations regarding organic treatment and biopesticides, emphasizing the safety of our solution for bees, people, and the environment.

One of the challenges we may face when putting the drug into practice is resistance from beekeepers accustomed to using "hard" chemistry. To overcome these barriers, we will work with beekeeping associations across Slovakia to run educational workshops to raise awareness among the beekeeping community about the benefits of our natural solution. We also plan to develop a companion mobile application to help beekeepers monitor the level of varroosis and receive recommendations on when and what emulsion to use. This ensures the correct drug combinations and prevents mites from developing resistance (one of the disadvantages of chemical treatment). Unlike other chemical products, our medicine does not affect the quality of bee products such as honey, pollen, and propolis. On the contrary, the long-term use of chemicals can deteriorate the quality of the product over time. In addition, we will help beekeepers to reduce the costs of operating the apiary. Currently, beekeepers spend about 80€ a year per bee colony on chemical treatment. Our proposed preparation will make it possible to reduce these costs by 40-60%.



## NÁVRH EKOLOGICKÝCH POSTUPOV PREVENČIE A LIEČBY VARROÓZY U VČIEL MEDONOSNÝCH POUŽITEL'NÝCH PRE SLOVENSKÝCH VČELÁROV

Ľubomír KORENÝ<sup>a</sup>, Michaela KORENÁ HILLAYOVÁ<sup>a</sup>, Janka LAFFÉRSOVÁ<sup>b</sup>, Jaroslav ŠKVARENINA<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika

<sup>b</sup> Regionálny úrad verejného zdravotníctva so sídlom v Banskej Bystrici, Odbor lekárskej mikrobiológie, Cesta k nemocnici 25, Banská Bystrica.

*Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09103-03-V04-00380 a Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaM SR v rámci projektu č. VEGA 1/0443/23.*

**KORENÝ Ľ. – KORENÁ HILLAYOVÁ M. – LAFFÉRSOVÁ J. – Škvarenina J.: Návrh ekologických postupov prevencie a liečby varroózy u včiel medonosných použiteľných pre slovenských včelárov.** Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

### ABSTRAKT

The parasitic mite *Varroa destructor* is one of the biggest biological threats to the health of honeybees (*Apis mellifera* L.) worldwide. Beekeepers commonly use “hard” chemistry to reduce the population of this parasite. However, excessive use and poor timing of these treatments carry a high risk of death in entire colonies and lead to widespread resistance in *Varroa* populations. Currently, the ecological and environmentally safe treatment of bees without using “hard” chemistry and antibiotics, which remain in bee products, is in demand worldwide. In the presented paper, we focus on the description and design of the treatment pyramid in terms of ecologically and environmentally sustainable breeding and treatment of bee colonies against varroosis caused by the proliferation of the parasite *V. destructor*. We provide an overview of individual methods of preventing and treating bee colonies with cost-effective ecological treatments that beekeepers can easily use. Methodologically, we propose the use of a combination of chemical (phytotherapy), mechanical (use of varroa board in the hive), and hygienic (disinfection of hives with fire and subsequent application of propolis tincture) methods of varroosis control as the resulting treatment pyramid applicable to Slovak beekeepers. The research results will contribute to expanding knowledge important for sustainable and environmentally safe beekeeping practices in Slovakia.

**Key words:** *Apis mellifera*, *Varroa destructor*, ecological protection, varroosis, treatment pyramid

## 1. Úvod

Varroóza je celosvetovo najničivejšie ochorenie včiel medonosných, ktoré spôsobujú roztoče *Varroa*, *Varroa destructor* (ANDERSON a TRUEMANN 2000). V dôsledku tohto ochorenia včiel dochádza k oveľa vyšším škodám a ekonomickým nákladom ako pri všetkých ostatných známych ochoreniach včiel (BOECKING A GENERSCH 2008). Charakter ochorenia „varroóza“ nie je jednotný, pretože klinické symptómy sú určené primárne rýchlosťou zamorenia a sekundárne (pridruženými) ochoreniami. Roztoč poškodzuje včely vo všetkých vývojových štádiách (larva, kukla a dospelý jedinec) opakovaným parazitovaním a príjmom hemolymfy a tukového tkaniva hostiteľa (ROSENKRANTZ ET AL. 2010).

Aj relatívne nízke hladiny *Varroa* počas jari, na začiatku sezóny rozvoja včelstva, môžu mať významný ekonomický dopad na produkciu medu. Aby sa predišlo významným stratám na včelstvách v jarnom období včelári by mali začať liečiť včelstvá už pri 2% zamorení (2 roztoče na 100 dospelých včiel) (CURRIE A GATIEN 2006). Je dôležité vyhnúť sa dosiahnutiu vysokého zamorenia včelstiev roztočmi hlavne na jar, pretože včelí plod poskytuje ideálne podmienky na ich reprodukciu. To môže viesť ku kolapsu včelstiev už pred jesenným ošetrením (GOODWIN A VAN EATON 2005). Z toho vyplýva, že správny manažment prevencie a liečby včelstiev, najmä na začiatku znáškovej sezóny, je nevyhnutný, aby sa zabránilo exponenciálnemu rastu populácie roztočov koncom leta a začiatkom jesene (LE CONTE ET AL. 2010).

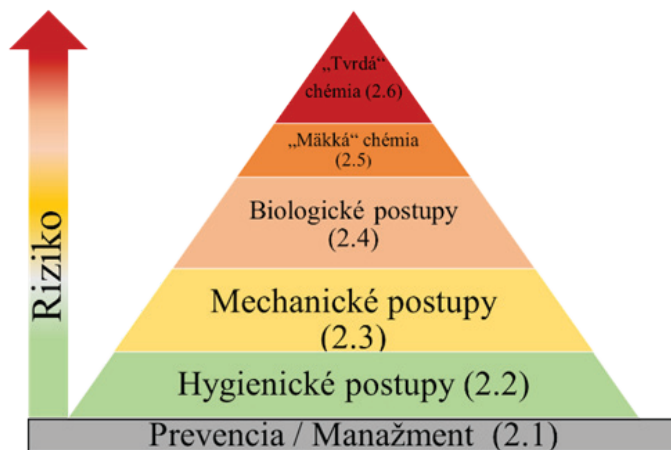
Existuje množstvo spôsobov ošetrovania včelstiev, avšak nie všetky sú environmentálne vhodné a účinnosť liečby nemusí byť rovnaká vo všetkých regiónoch sveta. Preto je dôležité navrhnúť správny manažment znižovania zamorenia včelstiev roztočmi pre jednotlivé oblasti (JACK A ELLIS 2021).

Cieľom predloženého príspevku je poskytnúť pohľad na ekologickú a environmentálne bezpečnú liečbu varroózy a zároveň formulovať ekologicky vhodné postupy pre trvalo udržateľné včelárstvo. V zmysle trvalo udržateľného a ekologického chovu včiel navrhujeme efektívnu liečebnú pyramídu pre podmienky Slovenska.

## 2. Materiál a metodika práce

V metodickej časti výskumu informujeme o možnostiach ekologickej a environmentálne bezpečnej prevencie a liečby varroózy podľa jednotlivých poschodí liečebnej pyramídy uvedených na Obrázku 1.





**Obrázok 1.** Manažment znižovania populácie roztočov varroa - liečebná pyramída.

Zdroj: vlastné spracovanie podľa JACK A ELLIS (2021)

**Figure 1.** Varroa mite population reduction management - treatment pyramid.

Source: own processing according to JACK AND ELLIS (2021)

Liečebná pyramída vyjadruje postup znižovania populácie roztočov ako liečbu varroózy. Včelári by mali najskôr použiť nechémické alebo nízkorizikové kontrolné postupy v spodnej časti pyramídy a podľa potreby prejsť po pyramíde k chemickým vysokorizikovým metódam. V tomto prípade za environmentálne vhodné preventívne a liečebné prostriedky považujeme také, ktoré nezanechávajú nebezpečné reziduá v úli, na včelách a ich produktoch.

Na základe odbornej diskusie s praktickými včelármi a našich dlhoročných skúseností s chovom včiel vyberieme také metódy, ktoré sú jednoducho a účinne použiteľné pre slovenských včelárov. Tieto metódy spĺňajú podmienky ekologicky a environmentálne trvalo udržateľného chovu a ošetrovania včelstiev proti varroóze a navrhujeme tak výslednú liečebnú pyramídu pre podmienky Slovenska.

## 2.1 Prevencia a správny manažment ošetrovania včelstiev proti varroóze

Prevencia sa vzťahuje na zabránenie prenosu roztočov do nových včelstiev. Avšak prevencia je v dnešnej dobe takmer nemožná, keďže Varroa sa vyskytuje už takmer vo všetkých oblastiach sveta. V súčasnosti neexistuje spôsob, ako by včelári mohli prirodzene odstrániť podmienky, ktoré priťahujú Varroa (KORENÝ 2020, KORENÁ HILLAYOVÁ ET AL. 2022).

Manažment sa vzťahuje na kontrolné opatrenia používané po zistení roztoča alebo príznakov zamorenia a zahŕňa vyššie poschodia liečebnej pyramídy, teda hygienické, mechanické, biologické a chemické postupy znižovania zamorenia včelstiev. Prevencia a správny manažment spolu tvoria základ celej liečebnej pyramídy.

Niektoré preventívne opatrenia však môžu zahŕňať zníženie prenosu roztočov do ďalších úľov, ako napr. správny manažment účinnej kontroly včelstiev a reguláciu pohybu včiel medzi rôznymi oblasťami.

## 2.2 Hygienická kontrola varroózy

Správna hygiena celého úľa je pre ochranu zdravia včiel a včelích produktov veľmi dôležitá. Hlavným cieľom používania správnych hygienických postupov včelára v starostlivosti o včelstvá je zmeniť alebo udržať vnútorné prostredie úľa tak, aby bolo menej vhodné pre škodcu alebo chorobu, a zároveň minimálne ovplyvniť včely medonosné. V mnohých prípadoch správne hygienické postupy fungujú ako preventívne opatrenia na minimalizáciu vplyvu škodcov alebo choroby na včelstvo. Príkladom správnych hygienických postupov je chov včiel so zvýšenými čistiacimi schopnosťami (odolné línie ako Ruské včely medonosné) (ODDIE ET AL. 2018). Ďalšou možnosťou je umiestnenie matky do klietky, aby sa prerušilo kladenie vajčiek a tým sa narušila biológia párenia roztočov (GREGORC ET AL. 2017). Včelári by mali sterilizovať vybavenie úľa a tiež vyradiť staré „začerneté“ rámy. Dezinfekcia je veľmi dôležité hygienické opatrenie, ktoré sa vykonáva za účelom prevencie a potlačenia infekčných ochorení včiel a kontaminácie medu a iných včelích produktov škodlivými mikroorganizmami. Postup dezinfekcie je veľmi zložitý a jeho účinnosť závisí od veľkého množstva faktorov. Vo včelárstve, ako aj v iných odvetviach chovu zvierat sa vykonáva preventívna dezinfekcia (KORENÝ 2023).

Pri dezinfekcii treba brať do úvahy nasledovné faktory: spektrum účinku dezinfekčného prostriedku, spôsob aplikácie, koncentrácia dezinfekčného prostriedku, doba pôsobenia, vlastnosti prostredia, ktoré sa má dezinfikovať. Účinné látky dezinfekčných prostriedkov zvyčajne ovplyvňujú metabolizmus mikroorganizmov. Na dezinfekciu vo včelárstve možno použiť: chlóróvé prípravky, jódové prípravky, zásady, kyseliny, kvartérne amóniové zlúčeniny, aldehydy (glutaraldehyd, glyoxal), oxidačné činidlá (peroxid vodíka, kyselina octová). Ideálny dezinfekčný prostriedok neexistuje. Vzhľadom na toxicitu a iné škodlivé účinky dezinfekčných prostriedkov a často ich nedostatočnú účinnosť by sa vždy, keď je to možné, mali uprednostniť fyzikálne metódy dezinfekcie (dezinfekcia úľov ohňom alebo parou). Chemická dezinfekcia často nie je úspešná, najmä ak ide o pôvodcov moru včelieho plodu, ktorý tvorí veľmi odolné spóry. Vtedy je jedinou cestou úle spáliť, aby neboli zdrojom nákazy. Proti spóram *Paenibacillus larvae* sú najúčinnnejšie chemické dezinfekčné prostriedky chlóróvé prípravky, teplý roztok hydroxidu sodného, oxidačné činidlá, preto sa tieto dezinfekčné prostriedky najčastejšie používajú vo včelárstve. Treba však brať do úvahy aj negatívne vlastnosti týchto dezinfekčných prostriedkov (BOJANIĆ RAŠOVIĆ 2021).

## 2.3 Mechanická kontrola varroózy

Mechanická kontrola roztočov znamená, že rozmnožovanie škodcov je kontrolované pomocou fyzikálnych metód alebo mechanických zariadení, ako je vybavenie

úľov varroa dnom, odstránenie trúdieho plodu alebo tepelné ošetrovanie. Tieto nechemické prístupy sa považujú za nevyhnutné pre dlhodobé a udržateľné riešenia kontroly Varroa (ROSENKRANZ ET AL. 2010); avšak tento spôsob nepostačuje ako samostatná liečba. Účinnosť niektorých metód mechanickej kontroly opísaných ďalej je sporná, pretože mnohé štúdie priniesli protichodné výsledky v dôsledku rozdielov v správaní včiel medonosných v rôznych regiónoch.

**Varroa dno** sa používa ako súčasť boja proti varroáze. Súčasťou dna je sieťka s malými okami cez ktorú prechádzajú včely a tak sa zbavujú roztočov, ktoré padajú na dno úľa. Dno sa natiera jedlým olejom, aby nedošlo k opätovnému návratu roztočov k včelám. Výskumníci, ktorí testovali účinnosť takéhoto dna zistili, že skutočne znižuje populácie Varroa vo včelstve (napr. DELAPLANE ET AL. 2005, ELLIS ET AL. 2009, KORENÝ 2023). Je potrebné zdôrazniť, že varroa dno má len mierny vplyv asi 11–14% (DELAPLANE ET AL. 2005) a nemalo by sa používať ako samostatná liečba.

**Metóda odstraňovania trúdieho plodu** na zníženie populácie varroa roztočov v úli je založená na poznatkoch, že *Varroa* prednostne napáda bunky trúdov vyššou rýchlosťou ako bunky robotníc. Odstránenie alebo zničenie buniek trúdov v úli teda môže znížiť výskyt roztočov. Trúdi plod sa dá odstrániť niekoľkými spôsobmi. Včelár môže zo včelstva jednoducho vyrezať alebo odstrániť včelami vytvorené a zaviečkové trúdie bunky, alebo môže umiestniť do úľa rámik, ktorý obsahuje zväčšené bunky. Včelia kráľovná do takýchto buniek nakladie neoplozené (trúdie) vajíčka. Ako náhle si včelár všimne, že sú bunky v takomto rámiiku zaviečkové vyberie rámik z úľa zamrazí ho a vloží naspäť do úľa. Včely takýto rámik vyčistia od mŕtvych trúdov a roztočov. Potom kráľovná nakladie vajíčka do trúdich buniek a proces môže začať znova. Ukázalo sa, že táto metóda je účinná pri znižovaní hladín roztočov až o 50,3 – 93,4% (TRAYNOR ET AL. 2020, KORENÝ 2023). Táto metóda je najúčinnnejšia na jar a začiatkom leta, keď včelstvá aktívne chovajú trúdy. Nevýhodou tejto metódy je náročnosť pre včelára a tiež obetovanie trúdov, ktoré sú potrebné pre oplodnenie včelej matky.

**Hypertermia** je mechanický spôsob znižovania zamorenia včelstiev, pri ktorej sú parazity vystavené trvalo smrteľnej teplote, ktorá nepoškodzuje včely. Metóda je založená na princípe umiestnenia úľov do „termálnych boxov“ (inkubátorov), aby sa zvýšila teplota v úli na prahovú úroveň úmrtnosti roztočov  $\geq 40$  °C, zatiaľ čo krátke vystavenie rovnakým teplotám nemá na včely negatívny vplyv (GORAS ET AL. 2015, TIHELKA 2016)). Nedávno boli vytvorené zariadenia na elektronické tepelné spracovanie plodovej komory (Thermovar, Varroa Terminator, Vatorex, The Victor, Mighty Mite Killer, Silent Future Tec Varroa Kill II). Bohužiaľ, účinnosť len malého počtu z týchto produktov bola publikovaná v recenzovaných výskumných časopisoch. GORAS ET AL. (2015) zistili, že zariadenie Thermovar zabilo > 90% roztočov v úli po 360 až 480 minútach liečby. Zariadenie s názvom Mite-Zapper skombinovalo koncepciu odchyty trúdich plodov s koncepciou hypertermie. Mite-Zapper je trúdi hrebeň s vyhrievacími prvkami, ktorý je možné pripojiť k 12-voltovej batérii na 1–5 minút, vďaka čomu hrebene dosahujú teplotu 43 °C (HUANG 2001). Predbežné výsledky ukázali 100% účinnosť, ale bez dostupných recenzovaných štúdií o produkte. Využitie tepla ako kontroly *Varroa* je sľubné a mnohí včelári

a priemyselní partneri horlivo vytvárajú nové produkty na predaj. Dôležité je však, aby výskumníci preskúmali účinnosť, bezpečnosť a praktickosť mnohých dostupných zariadení na kontrolu varroózy.

## 2.4 Biologická kontrola varroózy

Biologická kontrola včelstiev proti varroóze zahŕňa účelovú manipuláciu so živým organizmom, ktorý zníži stavu škodcov v úli (JACK A ELLIS 2021). Existujú dva druhy biologickej kontroly: klasická – pri ktorej je prirodzený nepriateľ umiestnený do úľa, aby potlačil škodcu a augmentatívna – pri ktorých sa prostriedky biologickej kontroly zvyššia alebo sa uvoľnia do prostredia, kde je ich v súčasnosti príliš málo (OBRYCKI ET AL. 2009).

Výskumníci skúmali myšlienku biologickej kontroly *Varroa* po celé desaťročia, testovali rôzne patogény a predátorov proti roztočom (CHANDLER ET AL. 2001). Úspešná kontrola vyžaduje, aby sa prostriedok biologickej kontroly zameral predovšetkým na roztoče, pričom včelu medonosnú ponechal bez poškodenia. Toto je však veľmi ťažké dosiahnuť, pretože roztoč je chránený vo vnútri úľov včiel a často v bunkách včelieho plodu. Avšak objav biologického kontrolného činidla, ktoré by mohlo účinne znížiť populácie *Varroa* v úli, by bolo prínosom pre všetkých včelárov (ROSENKRANTZ ET AL. 2010).

**Entomopatogénne huby** boli najviac skúmaným činidlom biologickej kontroly *Varroa* a sú považované za huby s najvyšším potenciálom úspechu (viď. prehľad CHANDLER ET AL. 2001). Dva hlavné hodnotené druhy entomopatogénnych húb sú *Metarhizium anisopliae* - Metschnikoff (Hypocreales: Clavicipitaceae) a *Beauveria bassiana* - Balsamo (Hypocreales: Cordycipitaceae) vďaka ich úspechu pri kontrole iných škodcov článkonožcov v poľnohospodárstve. Obidve huby boli rozsiahle testované na biologickú kontrolu *Varroa* (SINIA A GUZMAN-NOVOA 2018). SHAW ET AL. (2002) zistili, že tri izoláty *M. anisopliae* a jeden *B. bassiana* zabili 100% *Varroa* do jedného týždňa po expozícii. SINIA A GUZMAN-NOVOA (2018) pozorovali, že izolát *M. anisopliae* zabil 62% *Varroa*, zatiaľ čo liečba *B. bassiana* zabila 41 – 53% *Varroa*. Zdá sa však, že pri použití entomopatogénnych húb na kontrolu *Varroa* existuje veľa problémov, ktoré sú ešte málo prebádané.

**Baktérie** *Bacillus thuringiensis* (Bt) (Bacillales: Bacillaceae) sú považované za bakteriálny patogén s najväčším potenciálom kontrolovať roztoče *Varroa*. Bt sa považujú za bezpečný patogén na použitie vo včelstvách, pretože sa už používa ako biologická ochrana proti vijačke voštinovej (*Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae)). V laboratórnej štúdiu in vitro sa preukázalo, že kmene Bt sú sľubným prostriedkom proti *Varroa destructor*, pričom zabíjajú viac ako 80% roztočov do 48 hodín. Ďalšie laboratórne experimenty ukázali, že dva z účinných kmeňov Bt boli v podstate neškodné pre dospelé včely a larvy včiel medonosných (ALQUISIRA-RAMÍREZ ET AL. 2017), hoci k testovaniu v teréne ešte nedošlo.

## 2.5 Chemická kontrola varroózy pomocou „mäkkej“ chémie

Chemické ošetrenie rozdeľujeme na tzv. syntetické „tvrdé“ a prírodné „mäkké“. Medzi najviac používané syntetické liečivá patria Amitraz (firnamidín), kumafos

(organofosfát), fluvalinát (pyretroid), a flumetrín (pyretroid). Medzi prírodné ekologické látky, ktorých používanie je povolené na Slovensku zaraďujeme kyseliny (mravčia a šťaveľová), tymol. Označenie „mäkké“ sa vzťahuje na skutočnosť, že tieto aktívne zložky obsahujú chemikálie, ktoré sa nachádzajú v prírode a sú často súčasťou medu. Neznamená to však, že vo všeobecnosti sú bez rizika pre včely medonosné alebo pre včelára, ktorý s nimi pracuje.

**Organické chemikálie.** Existuje viacero prírodných zlúčenín, ktoré sa ukázali ako účinné pri potláčaní parazitov *Varroa*. Patria sem väčšinou organické kyseliny, ako je kyselina mravčia (na trhu ako MAQS, Nassenheider Professional, Varterminator) a kyselina šťaveľová (Api-Bioxal), ale zahŕňajú aj esenciálny olej tymol (Apiguard, Api Life Var, Thymovar). Okrem toho sa chmeľové beta kyseliny (HopGuard) stávajú čoraz populárnejšou liečbou v Severnej Amerike. Organické chemikálie zvyčajne nezanechávajú reziduá v úľoch včiel medonosných (GREGORC A SAMPSON 2019) a aplikujú sa na včelstvá odlišne v dôsledku rôznej povahy chemikálií, použitých foriem a označených obmedzení použitia. Tomu zodpovedá aj použitie a účinnosť prírodných zlúčenín v porovnaní so syntetickými chemikáliami.

**Kyselina mravčia** bola skúmaná ako liečivo varoózy a včelári ju pravidelne používajú už od polovice 80. rokov 20. storočia. Hoci mechanizmus účinku nie je dobre známy, kyselina mravčia pravdepodobne inhibuje transport elektrónov v mitochondriách *Varroa* väzbou cytochróm c oxidázy (viď. prehľad JOHNSON ET AL. 2010). Existuje niekoľko rôznych používaných foriem kyseliny mravčej. Môže byť aplikovaná do včelstiev ako gél (MAQS), tableta (Varterminator) alebo tekutý roztok (Nassenheider Professional). Zdá sa, že účinnosť kyseliny mravčej je o niečo lepšia pri použití v gélovej forme s pomalým uvoľňovaním (PIETROPAOLI A FORMATO 2019) a je to jediný miticíd, ktorý preukázal schopnosť zabíjať tak foretické roztoče, ako aj reprodukčné roztoče obsiahnuté v uzavretých bunkách plodu. Väčšina experimentov, prostredníctvom ktorých sa testovala účinnosť kyseliny mravčej proti *Varroa*, priniesla pozitívne výsledky (PIETROPAOLI A FORMATO 2019) účinnosť proti *Varroa* sa pohybuje v rozmedzí 35–75%. Faktory, ako je teplota okolia, množstvo lietaviek (mladé včely) vo včelstve a vzdialenosť lietaviek od miesta odparovania kyseliny mravčej, môžu ovplyvniť účinnosť liečby. Kyselina mravčia môže viesť k úhynu včelieho plodu a matiek, ak je okolitá teplota príliš vysoká (GIOVENAZZO A DUBREUIL 2011). Tiež negatívne ovplyvňuje negatívne nervovú sústavu včiel medonosných (GASHOUT ET AL. 2020). Kyselina mravčia sa bežne používa v Európe.

**Kyselina šťaveľová** je povolená na použitie vo viacerých európskych krajinách. Táto zlúčenina sa účinne používa už niekoľko desaťročí bez priamych informácií o rezistencii na roztoče. Zatiaľ čo mechanizmus účinku kyseliny šťaveľovej nie je úplne objasnený, zabíja *Varroa* pri kontakte a je tiež účinná pri odstraňovaní roztočov z úľov, pretože zvyšuje hygienické správanie včely medonosnej (SCHNEIDER ET AL. 2012). Včelári bežne ošetrujú svoje včelstvá  $\geq 3\%$  roztokom kyseliny šťaveľovej tak, že  $\sim 35$  g dihydrátu kyseliny šťaveľovej (Api-Bioxal) rozpustia v 1 l roztoku cukor : voda (hmotnosť : objem) v pomere 1:1 a nakvapkajú 50 ml roztoku medzi vrcholy rámkov. Niektorí včelári používajú metódu nastriekania 3–4 ml roztoku priamo na jednu stranu rámika. Iní včelári zase používajú

sublimované kryštály kyseliny šťaveľovej (alebo odparovanie, ak používajú dihydrát kyseliny šťaveľovej) vo vnútri včelstiev počas zimy, takže úle nie je potrebné otvárať.

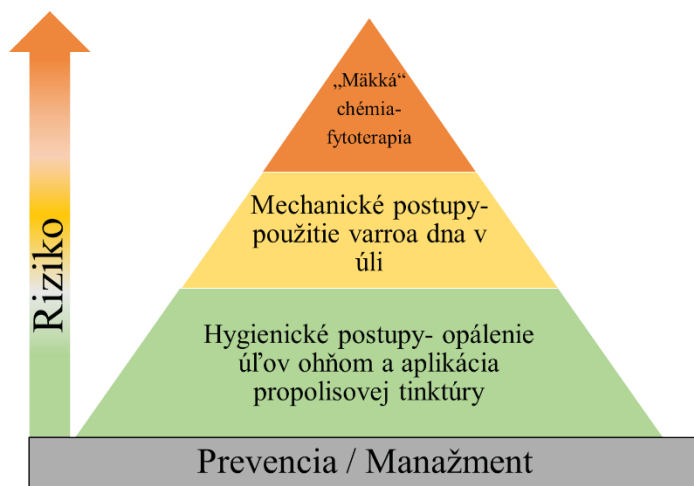
Kyselina šťaveľová je najúčinnějšía v období bez plodov (GREGORC ET AL. 2017), pretože chemikália nezabije roztoče, ktoré sú vo vnútri uzavretých buniek; niektorí včelári však ošetrujú kyselinou šťaveľovou raz týždenne až tri týždne, keď je obdobie znášky (Jack et al. 2021). Nedávne štúdie priniesli protichodné výsledky týkajúce sa toho, ktorý spôsob aplikácie kyseliny šťaveľovej je najúčinnější pri kontrole *Varroa* (GREGORC ET AL. 2016). Všetky aplikačné metódy však preukázali účinnosť, čo často vedie k > 90 % úmrtnosti *Varroa*. Táto účinnosť sa môže zvýšiť na takmer 100%, keď sú včelstvá bez plodu (GREGORC A SAMPSON 2019). Negatívne vplyvy na vývoj, správanie a dlhovekosť včiel boli pozorované pri použití kyseliny šťaveľovej (SCHNEIDER ET AL. 2012).

**Esenciálne oleje.** **Tymol** je najbežnejšie používaným esenciálnym olejom na liečbu *Varroa* a pravdepodobne pôsobí proti *Varroa* väzbou na oktopamínové alebo GABA receptory (viď. prehľad JOHNSON ET AL. 2010). Komerčne dostupné prípravky na ošetrovanie tymolom (Apiguard, Api Life Var, Thymovar) sú vo forme rôznych matric, ako sú gélové balíčky, vermikulitové tablety a celulózové doštičky, aby sa zabezpečilo stabilné a postupné uvoľňovanie prchavých látok (COFFEY A BREEN 2013). Podobne ako kyselina mravčia, účinnosť tymolu závisí od teploty a množstva plodu vo včelstve. Navyše, objem vzduchu nad rámikmi, kde je liečivo umiestnené, môže ovplyvniť celkovú účinnosť tymolu, pričom väčší vzduchový priestor zvyšuje rýchlosť sublimácie, čím sa zvyšuje jeho účinok. Tymol je najúčinnější pri teplote medzi 20 a 30 °C, účinnosť stráca pod 15 °C. Liečivá na báze tymolu vo všeobecnosti zabíjajú 50 – 80% *Varroa*. Tymol však môže byť dosť škodlivý pre včelí plod a včelie matky, ak sa aplikuje v období vysokých teplôt (COFFEY A BREEN 2013). Používanie produktov na báze tymolu je povolené takmer na celom svete.

Existujú stovky ďalších esenciálnych olejov, ktoré boli testované na liečbu varroózy. Hlavnou zložkou väčšiny éterických olejov sú monoterpény a podobne ako tymol, väčšina týchto éterických olejov pôsobí ako fumigant. Napríklad cesnak, klinček a mentol preukázali akaricídne vlastnosti proti *Varroa* (GOSWAMI ET AL. 2013). Účinnosť esenciálnych olejov sa značne líši, pričom veľká väčšina neposkytuje žiadnu alebo len nízku úmrtnosť roztočov. Hlavnou prekážkou na dosiahnutie vysokej úrovne kontroly roztočov, bez ohľadu na miesto alebo klimatické podmienky, je nedostatok účinných metód, ktoré uvoľňujú konštantné dávky olejov (SABAHI ET AL. 2017). Bolo však objavených niekoľko sľubných esenciálnych olejov. V laboratórnych testoch spôsobili mentol, klinčekový a oregánový olej 87, 96 a 100% úmrtnosť roztočov (GASHOUT ET AL. 2020), feniklový olej spôsobil 65% úmrtnosť roztočov (LIN ET AL. 2020). V terénnych skúškach cesnakový olej zabil 73% *Varroa* (Goswami et al. 2013), oregánový olej dodávaný elektrickými odparovačmi zabil 97% (SABAHI ET AL. 2017) a neemový (nimbový) olej zabil 85% (GÓMEZ ET AL. 2016), hoci to malo negatívny vplyv na larvy a včelie kráľovné.

### 3. Návrh výslednej liečebnej pyramídy pre podmienky Slovenska

Cieľom správneho včelárskeho manažmentu je vytvoriť v úli také prostredie, ktoré je nepriaznivé pre vývoj roztoča, ale zároveň nenarušuje prirodzené prostredie včiel. Avšak spoliehať sa len na jeden typ ošetrovania vo všeobecnosti nestačí na udržanie populácie roztočov pod úrovňou ekonomického poškodenia. V predkladanom príspevku preto navrhujeme použitie jednoduchých a účinných opatrení na predchádzanie alebo zníženie populácie roztočov varroa v jednotlivých včelích rodinách priamo v teréne pomocou kombinácie vybraných environmentálne bezpečných preventívnych prostriedkov proti varroóze, teda vysokému zamoreniu včelstiev roztočom Varroa. Zameriavame sa na jednoduché a praktické použitie kombinácie environmentálne vhodných preventívnych prostriedkov na predchádzanie a ošetrovanie včelstiev proti varroóze. V našom prípade sa jedná o použitie kombinácie chemickej, mechanickej a hygienickej metódy kontroly varroózy (Obrázok 2). Mechanická kontrola varroa spočíva v aplikovaní varroa dna v úli. Pre hygienickú kontrolu zamorenia roztočmi je podľa nás účinná metóda dezinfekcie úl'ov ohňom a následná aplikácia propolisovej tinktúry raz ročne a to vždy na začiatku včelárskej sezóny. Ako mäkkú chémiu odporúčame fytoterapiu v podobe kombinácie ekologických prípravkov na liečbu varroózy.



**Obrázok 2.** Výsledná liečebná pyramída proti varroóze, ktorá spĺňa podmienky environmentálne bezpečných postupov včelárenia pre podmienky Slovenska

**Figure 2.** The resulting treatment pyramid against varroa, which meets the conditions of environmentally safe beekeeping procedures for the conditions of Slovakia



### 3.1 Návrh na použitie environmentálne bezpečných hygienických postupov včelárenia

Navrhnutá liečebná pyramída (Obrázok 2) pre podmienky Slovenska obsahuje environmentálne bezpečné hygienické postupy, a to metódu dezinfekcie prázdnych úľov ohňom (Obrázok 3a) a následnej aplikácie propolisovej tinktúry raz ročne a to vždy na začiatku včelárskej sezóny (Obrázok 3b). Práve z dôvodu, že chemické dezinfekčné prostriedky chlórové prípravky, teplý roztok hydroxidu sodného, oxidačné činidlá, ktoré sa najčastejšie využívajú ako dezinfekčné prostriedky vo včelárstve majú množstvo zistených negatívnych vlastností. Preto sme ako chemickú metódu dezinfekcie úľov zvolili metódu postrekovania vnútornej strany úľov propolisovou tinktúrou. Propolis je produktom včiel, ktorý preukázateľne pôsobí proti mikroorganizmom, plesniam, zápalom a podporuje imunitu včiel. Propolis je zložený z látok z rastlín aj včiel, alebo zo surových extraktov z rastlín alebo húb. Polárne extrakty (4%) pri 40 °C ovplyvňujú metabolickú aktivitu roztočov, propolis obsahuje až 10% éterických olejov. Včely bežne touto látkou pokrývajú vnútorné priestory úľov, plásty a vyplňajú trhliny. Pokiaľ sa do úľa dostane škodca, včely ho do propolisu úplne obalia. Vo vlhkom a teplom prostredí úľa sa vďaka nemu nemnožia mikroorganizmy.

Ohňom sterilizujeme a dezinfikujeme vnútorné aj vonkajšie časti úľa. Karbonizovaná vrstva pôsobí ako ochrana dreva, najmä ak je natretá vrstvami včelieho vosku, ktorý poskytuje dodatočnú odolnosť voči poveternostným vplyvom.

Na minimalizáciu vplyvu škodcov alebo iných chorôb teda používame nasledovné hygienické postupy:

- staré a začerneté rámy odstraňujeme z úľa a ďalej nepoužívame,
- vkladáme do úľov nové,
- rámy v úľoch medzi sebou nevymieňame, aby nedošlo ku kontaminácii ďalších úľov,
- na chov včiel používame matky línie Singer so zvýšenými čistiacimi schopnosťami ako sa nám v predchádzajúcom výskume (KORENÁ HILLAYOVÁ ET AL. 2022) podarilo overiť,
- pre dezinfekciu úľov používame fyzickú metódu opálenia ohňom,
- vnútro úľov postrekujeme propolisovou tinktúrou pre jej dezinfekčné účinky.





**Obrázok 3a)** Dezinfekcia nadstavku B10 ohňom, **3b)** Dezinfekcia varroa dna propolisovou tinktúrou

**Figure 3a)** Disinfection of the B10 extension with fire, **3b)** Disinfection of beehive varroa bottom with propolis tincture

### 3.2 Návrh na použitie environmentálne bezpečných mechanických postu pov včelárenia

Ako mechanickú kontrolu varroózy sme vybrali použitie tzv. varroa dna v úli. Celodrevené úľové varroa dno obsahuje stavebnú zábranu, česnový hranol, dvierka s vysúvacím dnom z odľahčeného PVC a nerezové sitko cez ktoré prechádzajú včely pri vstupe do úľa a tak zo svojho tela mechanicky strhávajú roztoče.

### 3.3 Využitie fytotherapie pomocou ekologických veterinárnych liečiv Bisanar a Apidez

Ako liečebný prvok do včelstiev odporúčame aplikovať veterinárny prípravok Bisanar (Obrázok 4a) na prevenciu a liečbu varroózy. Nespôsobuje vznik rezistentných populácií klieštika. Jedná sa o homogénnu tekutinu svetložltej farby, ktorá obsahuje tymol, koriandrový a jedľový olej. Podľa návodu na obale produktu sa 1 ml liečiva rozmieša v 1 l vody (35 - 40 °C). Tento prípravok sa aplikuje postrekom do uličiek medzi rámkami. Odporúčaná vonkajšia teplota pri aplikácii liečiva je min 10 °C. Ďalší ekologický prípravok, ktorý odporúčame využiť pri liečení včiel je Apidez (Obrázok 4b). Prípravok je pre včely netoxický, neukladá sa vo včelích produktoch, nepoškodzuje včelí plod a nespôsobuje rezistentné populácie roztoča. Jedná sa o dyhové pásiky svetložltej farby až hnedej farby s vôňou tymolového a jedľového esenciálneho oleja. Apidez sa vkladá do včelstva v jar-nom a jesennom období, keď je prítomné len minimálne množstvo plodu. Odporúčaná vonkajšia teplota pri aplikácii je do 25°C. Do včelstiev sa vkladajú 2 pásiky na 10-12 B rámkov medzi 3-4 rámik z každej strany. Pásiky sa ponechávajú v úli 3-30 dní v závislosti od množstva zaviečkovaného plodu.



**Obrazok 4a)** Ekologické veterinárne liečivo varroózy Apidez a **4b)** Bisanar  
**Figure 4a)** Ecological veterinary medicine for varroa Apidez and **4b)** Bisanar

## Záver

Varroóza zostáva napriek množstvu výskumov vážnym problémom pre včelárov. Každý praktický včelár by s nami súhlasil, že použitie jedného druhu kontrolného prostriedku na znižovanie zamorenia včelstiev nestačí. Udržať zdravé včelstvá pod prahovou úrovňou zamorenia je možné len vďaka kombinácii viacerých kontrolných prístupov. Ekologický chov včiel v dnešnej dobe je nemožný hlavne pre kočujúcich včelárov, ktorí sú nútení vo veľkej miere využívať „tvrdú“ chémiu na liečenie včelstiev. Nami navrhnutý metodický postup prevencie a liečby varroózy je síce náročnejší na čas ale vysoko účinný. Z dôvodu časovej náročnosti ho odporúčame využívať včelárom, ktorí vlastnia do 30 včelích rodín. Jedná sa hlavne o „hobby“ včelárov, ktorí neuvažujú s vysokým medným výnosom. Ak využijú nami navrhnutú metodiku nepriamo napomôžu aj kočujúcim „profi“ včelárom v tom že sa nebudú neprimerane šíriť choroby od „hobby“ a experimentujúcich včelárov.

## Použitá literatúra

1. ALQUISIRA-RAMÍREZ, E. V., PEÑA-CHORA, G., HERNÁNDEZ-VELÁZQUEZ, V. M., ALVEAR-GARCÍA, A., ARENAS-SOSA, I., & SUAREZ-RODRÍGUEZ, R. (2017). Effects of *Bacillus thuringiensis* strains virulent to *Varroa destructor* on larvae and adults of *Apis mellifera*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 142, 69-78.
2. ANDERSON, D. L., & TRUEMAN, J. W. H. (2000). *Varroa jacobsoni* (Acari: Varroidae) is more than one species. *Experimental & applied acarology*, 24(3), 165-189.
3. BOECKING, O., & GENERSCH, E. (2008). Varroosis—the ongoing crisis in bee keeping. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 3, 221-228.
4. BOJANIĆ RAŠOVIĆ, M. (2021). The most important methods of disinfection in beekeeping. *Agriculture and Forestry*, 67 (3): 167-176
5. COFFEY, M. F., & BREEN, J. (2013). Efficacy of Apilife Var® and Thymovar® against *Varroa destructor* as an autumn treatment in a cool climate. *Journal of Apicultural Research*, 52(5), 210-218.
6. CURRIE, R. W., & GATIEN, P. (2006). Timing acaricide treatments to prevent *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) from causing economic damage to honey bee colonies. *The Canadian Entomologist*, 138(2), 238-252.
7. DELAPLANE, K. S., BERRY, J. A., SKINNER, J. A., PARKMAN, J. P., & HOOD, W. M. (2005). Integrated pest management against *Varroa destructor* reduces colony mite levels and delays treatment threshold. *Journal of Apicultural Research*, 44(4), 157-162.

8. ELLIS, A. M., HAYES, G. W., & ELLIS, J. D. (2009). The efficacy of small cell foundation as a varroa mite (*Varroa destructor*) control. *Experimental and Applied Acarology*, 47(4), 311-316.
9. GASHOUT, H. A., GUZMAN-NOVOA, E., & GOODWIN, P. H. (2020). Synthetic and natural acaricides impair hygienic and foraging behaviors of honey bees. *Apidologie*, 51, 1155-1165.
10. GIOVENAZZO, P., & DUBREUIL, P. (2011). Evaluation of spring organic treatments against *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) in honey bee *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) colonies in eastern Canada. *Experimental and Applied Acarology*, 55, 65-76.
11. GOODWIN, R. M., TAYLOR, M. A., MCBRYDIE, H. M., & COX, H. M. (2005). Base levels of resistance to common control compounds by a New Zealand population of *Varroa destructor*. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 33(4), 347-352.
12. GORAS, G., TANANAKI, C. H., GOUNARI, S., DIMOU, M., LAZARIDOU, E., KARAZAFIRIS, E., ... & THRASYVOULOU, A. (2015). Hyperthermia—a non-chemical control strategy against varroa. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 66(4), 249-256.
13. GOSWAMI, V., KHAN, M., & SRIVASTAVA, P. (2003). Efficacy And Persistence Of Essential Oils And Formic Acid Against Varroa Mite, *Varroa Destructor* In *Apis Mellifera* Linn. Colonies, 3p.
14. GREGORC, A., & SAMPSON, B. (2019). Diagnosis of varroa mite (*Varroa destructor*) and sustainable control in honey bee (*Apis mellifera*) colonies—a review. *Diversity*, 11(12), 243.
15. GREGORC, A., ALBURAKI, M., SAMPSON, B., KNIGHT, P. R., & ADAMCZYK, J. (2018). Toxicity of selected acaricides to honey bees (*Apis mellifera*) and *Varroa* (*Varroa destructor* Anderson and Trueman) and their use in controlling *Varroa* within honey bee colonies. *Insects*, 9(2), 55.
16. GREGORC, A., ALBURAKI, M., WERLE, C., KNIGHT, P. R., & ADAMCZYK, J. (2017). Brood removal or queen caging combined with oxalic acid treatment to control varroa mites (*Varroa destructor*) in honey bee colonies (*Apis mellifera*). *Apidologie*, 48, 821-832.
17. GONZÁLEZ-GÓMEZ, R., OTERO-COLINA, G., VILLANUEVA-JIMÉNEZ, J. A., SANTILLÁN-GALICIA, M. T., PEÑA-VALDIVIA, C. B., & SANTIZO-RINCÓN, J. A. (2016). Effects of neem (*Azadirachta indica*) on honey bee workers and queens, while applied to control *Varroa destructor*. *Journal of Apicultural Research*, 55(5), 413-421.
18. HUANG, Z. (2001). Mite zapper—a new and effective method for *Varroa* mite control. *American Bee Journal*, 141(10), 730-732.
19. CHANDLER, D., SUNDERLAND, K. D., BALL, B. V., & DAVIDSON, G. (2001). Prospective biological control agents of *Varroa destructor* n. sp., an important pest of the European honeybee, *Apis mellifera*. *Biocontrol Science and Technology*, 11(4), 429-448.
20. JACK, C. J., & ELLIS, J. D. (2021). Integrated pest management control of *Varroa destructor* (Acari: Varroidae), the most damaging pest of (*Apis mellifera* L.(Hymenoptera: Apidae)) colonies. *Journal of Insect Science*, 21(5), 6.
21. JOHNSON, R. M., HUANG, Z. Y., & BERENBAUM, M. R. (2010). Role of detoxification in *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) tolerance of the miticide tau-fluvalinate. *International Journal of Acarology*, 36(1), 1-6.
22. 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, 109-104.
23. KORENÝ, L. (2023). Výsledky aplikácie environmentálne bezpečných preventívnych prostriedkov proti varroóze včiel. Diplomová práca. Technická univerzita vo Zvolene. Fakulta ekológie a environmentalistiky, Katedra prírodného prostredia - LF. Školiteľ: prof. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc. Stupeň odbornej kvalifikácie: inžinier, v skratke „Ing.“ Zvolen: TU, 2023. 68 s.
24. LE CONTE, Y., ELLIS, M., & RITTER, W. (2010). *Varroa* mites and honey bee health: can *Varroa* explain part of the colony losses?. *Apidologie*, 41(3), 353-363.
25. OBRZYCKI, J. J., HARWOOD, J. D., KRING, T. J., & O'NEIL, R. J. (2009). Aphidophagy by Coccinellidae: application of biological control in agroecosystems. *Biological control*, 51(2), 244-254.
26. ODDIE, M. A., DAHLE, B., & NEUMANN, P. (2018). Reduced postcapping period in honey bees surviving *Varroa destructor* by means of natural selection. *Insects*, 9(4), 149.
27. PIETROPAOLI, M., & FORMATO, G. (2019). Acaricide efficacy and honey bee toxicity of three new formic acid-based products to control *Varroa destructor*. *Journal of Apicultural Research*, 58(5), 824-830.
28. ROSENKRANTZ, P., AUMEIER, P., & ZIEGELMANN, B. (2010). Biology and control of *Varroa destructor*. *Journal of invertebrate pathology*, 103, S96-S119.

29. SHAW, K. E., DAVIDSON, G., CLARK, S. J., BALL, B. V., PELL, J. K., CHANDLER, D., & SUNDERLAND, K. D. (2002). Laboratory bioassays to assess the pathogenicity of mitosporic fungi to *Varroa destructor* (Acari: Mesostigmata), an ectoparasitic mite of the honeybee, *Apis mellifera*. *Biological Control*, 24(3), 266-276.
30. SCHNEIDER, S., EISENHARDT, D., & RADEMACHER, E. (2012). Sublethal effects of oxalic acid on *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae): changes in behaviour and longevity. *Apidologie*, 43, 218-225.
31. SINIA, A., & GUZMAN-NOVOA, E. (2018). Evaluation of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* GHA and *Metarhizium anisopliae* UAMH 9198 alone or in combination with thymol for the control of *Varroa destructor* in honey bee (*Apis mellifera*) colonies. *Journal of Apicultural Research*, 57(2), 308-316.
32. TIHELKA, E. (2016). History of *Varroa* Heat Treatment in Central Europe (1981-2013). *Bee World*, 93(1), 4-6.
33. TRAYNOR, K. S., MONDET, F., DE MIRANDA, J. R., TECHER, M., KOWALLIK, V., ODDIE, M. A., ... & MCAFEE, A. (2020). *Varroa destructor*: A complex parasite, crippling honey bees worldwide. *Trends in parasitology*, 36(7), 592-606.

## Summary

### **Proposal of ecological procedures for the prevention and treatment of varroosis in honey bees applicable to Slovak beekeepers**

Lubomír Korený<sup>a</sup>, Michaela Korená Hillayová<sup>a</sup>, Janka Lafférsová<sup>b</sup>,  
Jaroslav Škvarenina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Natural Environment, Faculty of Forestry, Technical University of Zvolen, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic

<sup>b</sup>Regional Public Health Authorities in the Slovak Republic, Department of Medical Microbiology, Cesta k nemocnici 25, Banská Bystrica.

*Funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan of the Slovak Republic within the project no. 09I03-03-V04-00380 and the Scientific Grant Agency of The Ministry of Education, Science, Research and Sport in Slovakia by project VEGA 1/0443/23.*

Varroosis is the world most destructive honey bee disease caused by the Varroa mite (*Varroa destructor*). This bee disease causes much higher damage and economic costs than any other known bee disease. The nature of the disease “varroosis” is not uniform, because the clinical symptoms are determined primarily by the rate of infestation and secondarily by (associated) diseases until the total collapse of the entire bee colony.

The goal of proper beekeeping management is to create an environment in the hive that is unfavourable for the development of mites, but at the same time does not disturb the natural environment of bees. However, relying on only one type of treatment is generally not sufficient to keep mite populations below economic damage levels. In the methodological part of the research, we inform about the possibilities of ecological and environmentally safe prevention and treatment of varroosis according to the individual levels of the treatment pyramid. Based on many years of experience with beekeeping, we have selected methods that are simple and effective for Slovak beekeepers. These methods meet the conditions of ecologically and environmentally sustainable breeding and treatment of bee colonies against varroosis, and we will propose the resulting treatment pyramid for the conditions of Slovakia. We focus on the simple and practical use of a combination of environmentally suitable preventive agents for the prevention and treatment of bee colonies against varroosis. In our case, it involves the use of a combination of chemical, mechanical, and hygienic methods of varroosis control. Mechanical varroa control consists of applying a varroa board in the hive. In our opinion, the effective method of disinfecting hives with fire and the subsequent application of propolis tincture once a year, always at the beginning of the beekeeping season, is effective for the hygienic control of mite infestation. As soft chemistry, we recommend phytotherapy in the form of ecological preparations for the treatment of varroosis.

Any practical beekeeper would agree with us that the use of one type of control agent is not enough to reduce the infestation of bee colonies. Keeping healthy bee colonies below the threshold level of infestation is only possible thanks to a combination of several control approaches. Ecological beekeeping nowadays is impossible, especially for itinerant beekeepers, who are forced to use “hard” chemistry to treat bee colonies to a large extent. The methodical procedure for the prevention and treatment of varroosis proposed by us is more time-consuming but highly effective. Due to the time-consuming nature, we recommend using it for beekeepers who own up to 30 bee families. These are mainly “hobby” beekeepers who do not consider a high copper yield. If they use the methodology proposed by us, they will also indirectly help nomadize “professional” beekeepers in that diseases from “hobby” and experimenting beekeepers will not spread disproportionately.

## KUMULÁCIA ORTUTI V HRÍBE SMREKOVOM (*BOLETUS EDULIS* BULL.) V LESNÝCH EKOSYSTÉMOCH STREDNÉHO SLOVENSKA

Hana OLLEROVÁ<sup>1</sup> – Andrea ZACHAROVÁ<sup>1</sup> – Radoslav DUVAČ – Miroslav VANEK<sup>1</sup>

OLLEROVÁ, H., ZACHAROVÁ, A., DUVAČ, R., VANEK, M.: Kumulácia ortuti v hríbe smrekovom (*Boletus edulis* Bull.) v lesných ekosystémoch stredného Slovenska. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

### ABSTRAKT

Práca sa zaoberá kumuláciou ortuti v hríbe smrekovom (*Boletus edulis* Bull.) a v pôde v roku 2020 a 2022 na šiestich lokalitách nachádzajúcich sa v lesných ekosystémoch stredného Slovenska. Lokality boli vybrané podľa stupňa zaťaženia životného prostredia a znečistenia ovzdušia. Odoberaté vzorky húb a pôd boli analyzované pomocou jednocelového atómového spektrofotometra AMA 254. Koncentrácia ortuti sa stanovovala osobitne v hlúbikoch a v klobúkoch vo fáze plnej zrelosti. Na všetkých 6 lokalitách sa v sledovaných rokoch potvrdila vyššia koncentrácia ortuti v klobúkoch ako v hlúbikoch. Priemerná hodnota ortuti sa v klobúkoch pohybovala v roku 2022 v rozpätí od 3,188 (Mútne) do 9,253 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ) a v hlúbikoch od 1,341 (Bacúch) do 4,128 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ). V roku 2020 sme zistili v klobúkoch hodnoty od 1,978 (Zázrivá) do 10,85 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ) a v hlúbikoch hodnoty od 1,103 do 2,889 mg.kg<sup>-1</sup> na rovnakých lokalitách. Ortuť vo všetkých vzorkách húb presiahla limitnú koncentráciu (0,75 mg.kg<sup>-1</sup>) podľa Potravinového kódexu SR. Ortuť vo vzorkách pôd neprekročila limitnú hodnotu (0,5 mg.kg<sup>-1</sup>). Najvyššia koncentrácia ortuti v pôde na lokalite Cígeľ v roku 2022 dosiahla 0,327mg.kg<sup>-1</sup>.

**Kľúčové slová:** ortuť, *Boletus edulis*, kumulácia, pôda, lesný ekosystém

### Úvod

Huby sú pomerne obľúbenou zložkou potravy po celom svete. Sú bohaté na bielkoviny, vlákninu, vitamíny, minerály a nízky obsah tuku. Okrem toho obsahujú antioxidantné zlúčeniny, ako sú polysacharidy, terpenoidy a polyfenoly (Gupta et al., 2019, Heleno et al., 2015).



Z literatúry je známe, že huby počas svojho vývinu (fruktifikácie) vo zvýšenej miere kumulujú ťažké kovy nachádzajúce sa v pôde (Kavčič et al., 2018, Kalac et al., 1996, Falandysz et al., 2015). Dôležitú úlohu v tom zohráva hubové mycélium, ktoré sa rozrastá v pôde a za vhodných podmienok začleňuje kovové ióny do cytoplazmy. Huby kumulujú vyššie koncentrácie ako rastliny, pretože na rozdiel od koreňov sa ich mycélium vyvíja hlavne horizontálne a zvyčajne zaberá najvrchnejšiu časť v pôdnom profile. (Árvay et al., 2022, Allen, 1991). Obsahuje najvyššiu koncentráciu ťažkých kovov (Bernhoft, 2012). Ortuť vstupuje do húb z pôdy prostredníctvom hýf vytvárajúcich mycelium, ktoré svojimi výlučkami rozkladá organickú hmotu nachádzajúcu sa vo vrchnom opadankovom horizonte (Gooday, 1982).

Hlavnými faktormi, ktoré ovplyvňujú bioakumuláciu ťažkých kovov v týchto organizmoch, sú environmentálne faktory, napr. koncentrácia kovov v pôde, pH, množstvo organických látok, obsah ílu, kontaminácia atmosférickou depozíciou a vnútorné faktory druhu - štruktúra, biochemické zloženie, rozkladná aktivita a vývoj mycélia a plodníc (Árvay et al., 2022, Lalotra et al., 2016).

V miere toxicity sa práve ortuť zaraďuje medzi zvlášť nebezpečné prvky. Jej jednotlivé formy vykazujú rôznu biologickú dostupnosť, toxicitu i čas zotrvania v zložkách životného prostredia. Ortuť sa v životnom prostredí nachádza v troch rôznych chemických formách: elementárna/kovová ortuť ( $\text{Hg}^0$ ), anorganická ortuť ( $\text{Hg}$  a  $\text{Hg}^{+2}$ ) a organická ortuť (organokovové zlúčeniny, kde je jeden alebo dva alkyl/arylové substituenty pripojené k atómu ortuti).

Obsah ortuti v pôdach závisí od jej obsahu v materských substrátoch a najmä od antropogénnej kontaminácie (spaľovne, krematóriá, priemyselná činnosť, doprava).

Väčšina autorov považuje za najdôležitejší vstup ortuti do lesnej pôdy opad 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 záchytnú 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).

Ortuť je v pôde viazaná v elementárnej forme alebo vo forme kationových a aniónových komplexov. Medzi ľahko rozpustné a mobilné formy ortuti v pôdach patria ortutnaté soli a hydroxidy ( $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Hg}(\text{OH})\text{Cl}$  a  $\text{Hg}(\text{OH})_2$ ) a jej prchavé formy ( $\text{Hg}^0$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ). Slabo mobilné sú najmä organické komplexy ortuti a sulfidické zlúčeniny ortuti, napr.  $\text{HgS}$ . Mobilita ortuti v pôdach klesá pri  $\text{pH} < 3$  a zároveň pri  $\text{pH} > 12$ , vďaka extrémne vysokej pufrácej kapacite humusu v kyslom aj zásaditom prostredí (Kabata-Pendias & Pendias, 2001, Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007).

Cieľom príspevku je posúdiť kumuláciu ortuti v hříbe smrekovom (*Boletus edulis* Bull.) a v pôde na vybraných lokalitách lesných ekosystémov stredného Slovenska v rokoch 2020 a 2022.



## Materiál a metódy

### Charakteristika druhu

Hríb smrekový (*Boletus edulis* Bull.) je výborná jedlá huba, ktorá rastie od augusta do novembra v smrekových alebo aj listnatých lesoch najmä v podhorských oblastiach Slovenska. Vyskytuje sa pomerne často. Klobúk má v priemere veľkosť 60 – 250 mm. Najprv je polgulovitý, potom plocho rozprestretý. Klobúk mladých jedincov, kým je prikrytý ihličím, býva biely, postupne sa mení na hnedý a v dospelosti až na tmavohnedý (oveľa tmavší ako klobúk hríba dubového), bez žltého pásu na okraji. Je hladký, lesklý, v mladosti trochu plstnatý, čoskoro však holý. Za vlhkého počasia alebo po daždi býva slizký. Hlúbik je 30 - 200 mm dlhý a 15 – 70 mm hrubý. U mladých jedincov je bruchatý, v dospelosti valcovitý. Je zvyčajne biely, ozdobený jemnou sieťkou, ktorá siaha najviac do jednej tretiny alebo do polovice hlúbika. Niekedy býva aj hnedastý, avšak nie tak nápadne ako hlúbik hríba dubového. Dužina je biela alebo belavá, pod pokožkou klobúka s jemným krémovým odtieňom. Na vzduchu nemení farbu. Má príjemnú chuť a vôňu, ale nevoní tak intenzívne ako hríb dubový. Výtrusný prach je olivovohnedý alebo olivový. (<https://www.na-huby.sk/atlas-hub/Boletus-edulis/hrib-smrekovy/hrib-smrkovy/ID136> )

### Lokality

Lokality sa nachádzajú v lesných ekosystémoch stredného Slovenska, mimo urbanizovaného prostredia. Boli vybraté na základe stupňa environmentálneho zaťaženia, čo zhrňa hlavne zastúpenie priemyslu, dopravnú zaťaženosť a z toho vyplývajúce znečistenie ovzdušia. Tri lokality - Mútne, Zázrivá a Bacúch sa nachádzajú v priemyslom neovplyvnených alebo málo ovplyvnených oblastiach, bez významnejších znečisťovateľov ovzdušia a tri lokality - Cígeľ, Slaská a Zvolen, Sekier v antropogénne zaťažených a viac znečistených oblastiach.

**Mútne** – okres Námestovo, CHKO Horná Orava, GPS súradnice 49°28'50.4"N 19°17'08.5"E, nadmorská výška 787 m n. m.

**Zázrivá** – okres Dolný Kubín, ochranné pásmo NP Malá Fatra, GPS súradnice 49°18'05.4"N 19°12'12.4"E, nadmorská výška 600 m n. m.

**Bacúch** – okres Brezno, ochranné pásmo NP Nízke Tatry, GPS súradnice 48°51'16.8"N 19°46'50.1"E, nadmorská výška 605 m n. m.

**Slaská** – okres Žiar nad Hronom, GPS súradnice 48°38'12.4"N 18°51'22.7"E, nadmorská výška 395 m n. m.

**Zvolen, Sekier** – okres Zvolen, GPS súradnice 48°32'41.5"N 19°09'19.3"E, nadmorská výška 300 m n. m.

**Cígeľ** – okres Prievidza, GPS súradnice 48°45'00.1"N 18°38'33.3"E, nadmorská výška 465 m n. m.

## **Odber, úprava a laboratórna analýza vzoriek**

V roku 2020 sme uskutočnili prvotný odber vzoriek na 4 lokalitách (Zázrivá, Bacúch, Slaská a Cígeľ). V roku 2022 sme v auguste a septembri odobrali vzorky na tých istých lokalitách a odber sme rozšírili o lokality Mútne a Zvolen, Sekier. Zbierali sme len zdravé plodnice vo fáze plnej zrelosti (úplne vyvinutého klobúka). Počet jedincov z každej lokality bol 6. Plodnice boli následne očistené, nakrájané a usušené pri laboratórnej teplote, hlúbik a klobúk zvlášť. Pred analýzou boli zhomogenizované na laboratórnom mlynčeku. Odber pôdy sme uskutočnili z každej lokality vo vzdialenosti približne 30 cm od huby z viacerých zákopkov z hĺbky 15 cm (STN 48 1000). Pôdne vzorky boli vysušené tak isto pri laboratórnej teplote a presitované cez sito s veľkosťou oka 2,5 mm.

Analýza vzoriek sa uskutočnila na jed nouúčelovom 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. Navážená hmotnosť vzorky sa pohybovala od 40 do 60 mg. Samotná analýza v AME je rozdelená na tri časti. V prípade húb sa používa 45 s sušenie, 150 s termický rozklad, 45 s ustálenie teplotných pomerov. Pre pôdy sa používa 45 s sušenie, 180 s termický rozklad a 45 s ustálenie teplotných pomerov. Kontrola správnosti výsledkov sa uskutočňuje na začiatku každého merania meraním certifikovaných referenčných materiálov a meraním nulovej hodnoty deionizovanej vody (Altec, 2000).

Hladinu príjmu Hg z pôdy do nadzemných častí sme hodnotili prostredníctvom biokoncentračného faktora (BCF), ktorý sme stanovili podľa vzťahu

$$\text{BCF} = \text{Hg}_h / \text{Hg}_p,$$

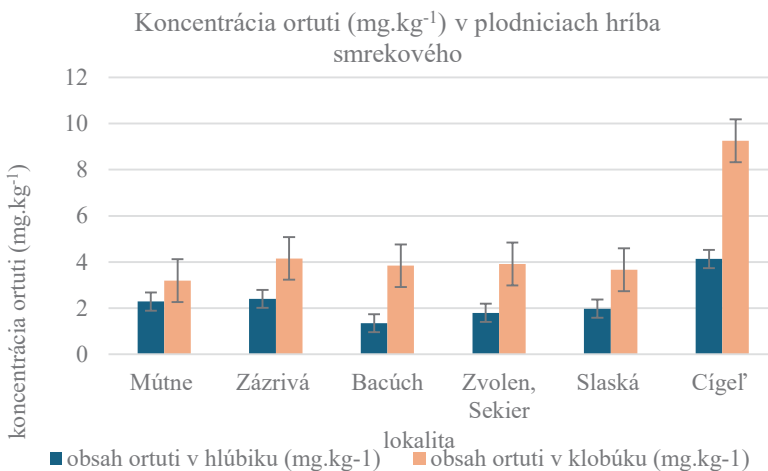
kde:  $\text{Hg}_h$  je celkový obsah Hg vo vzorke huby ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) a  $\text{Hg}_p$  je celkový obsah vo vzorke pôdy ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ).  $\text{BCF} < 1$  indikuje druhy, ktoré neakumulujú Hg,  $\text{BCF} = 1$  stanovuje indikátory a  $\text{BCF} > 1$  indikuje akumulátory Hg (Baker, 1981).

## **Štatistické spracovanie výsledkov**

Výsledky sme spracovali v programe Statistica. Pomocou analýzy variancie a Duncanovho testu sme hodnotili rozdiely v koncentráciách ortuti v hríbe smrekovom na štyroch rôznych lokalitách. Testovali sme aj významnosť rozdielov v priemerných hodnotách ortuti v dvoch častiach plodnice – hlúbiku a klobúku v rokoch 2020 a 2022.

## Výsledky a diskusia

Obsah ortuti v jednotlivých častiach plodníc hříba smrekového znázorňuje obrázok 1. Na všetkých šiestich lokalitách bol obsah ortuti v klobúkoch vyšší ako v hlúbikoch. Tento rozdiel sa pohybuje v intervale od 40 % (Mútne) do 186 % (Bacúch). Nad 100% bol rozdiel na lokalitách Cígeľ (124%) a Zvolen, Sekier (118%). Priemerná koncentrácia v klobúkoch sa pohybuje v intervale od 3,188 (Mútne) do 9,253 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ). Na všetkých lokalitách je koncentrácia ortuti vyrovnaná. V priemyselnej oblasti Hornej Nitry (Cígeľ) je až trojnásobne vyššia. Obsah ortuti stúpa v poradí Mútne < Slaská < Bacúch < Zvolen, Sekier < Zázrivá < Cígeľ. Lokality priemyselne menej zaťažené (Zázrivá, Bacúch) nevykazujú nižšie koncentrácie, ako sme predpokladali. Región Oravy je ovplyvnený cezhraničným prenosom emisií z priemyselnej oblasti v južnom Poľsku. Priemerná koncentrácia ortuti v hlúbikoch dosiahla hodnoty od 1,341 (Bacúch) do 4,128 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ). Hodnoty ortuti stúpajú v poradí Bacúch < Zvolen, Sekier, < Slaská < Mútne < Zázrivá < Cígeľ. Opäť platí, že v pohraničných a vidieckych lokalitách sme zistili vyššie koncentrácie ako v mestských aglomeráciách - Zvolen a Žiar nad Hronom. Okrem cezhraničného prenosu polutantov spôsobujúceho kontamináciu životného prostredia v oblasti Oravy, mohli mierne zvýšenú kontamináciu na Horehroní spôsobiť lokálne zdroje kúrenia. Absolútne najnižšou nameranou hodnotou je koncentrácia 1,29 mg.kg<sup>-1</sup> v hlúbiku na lokalite Bacúch a najvyššou je koncentrácia 9,497 mg.kg<sup>-1</sup> v klobúku na lokalite Cígeľ. Porovnaním nameraných koncentrácií ortuti s limitnou hodnotou v Potravinovom kódexe SR môžeme konštatovať, že hodnota 0,75 mg.kg<sup>-1</sup> je vysoko prekročená vo všetkých vzorkách, vo vzorke z lokality Cígeľ až 12x (to je približne o 1200%).



**Ob. 1** Koncentrácia ortuti v plodniciach hříba smrekového v roku 2022

**Fig. 1** Mercury accumulation in fruiting bodies of *Boletus edulis* in 2022

Väčšia časť ortuti sa kumuluje v klobúku, vo výtrusnej vrstve hymenium. Hymenium je zároveň biologicky najaktívnejšia časť huby v procese tvorby spór (Gooday, 1982). Je to spôsobené tým, že enzýmy vyskytujúce sa v klobúku obsahujú viac síry, ktorá sa ľahko viaže s ortuťou. Pre normálnu funkciu enzýmov je potrebná akumulácia esenciálnych prvkov. Práve ortuť využíva transportné cesty esenciálnych prvkov alebo sa viaže na organické zlúčeniny, ako sú proteíny bohaté na síru alebo selén (Alonso et al., 2000, Kosanić, et al. 2019, Kavčič et al. 2019, Zocher et al., 2018). Toxicita ortuti spočíva v substitúcii esenciálnych kovov v enzýmoch a iných dôležitých biomolekulách, čím môže dochádzať k inhibícii ich životných funkcií.

Priemerná hodnota ortuti v hlúbiku v roku 2022 bola 2,406 a v klobúku 4,698 mg.kg<sup>-1</sup>. Oproti roku 2020 hodnota v hlúbiku narástla (rok 2020 – 2,099 mg.kg<sup>-1</sup>) a v klobúku poklesla (rok 2020 – 5,4 mg.kg<sup>-1</sup>).

Na obsah ortuti v jedlých divorastúcich hubách je zameraných viacero štúdií. Svoboda et al. (2000) analyzovali 23 druhov húb z pestovateľských, ťažobných a spracovateľských oblastí na Slovensku. Najvyšší obsah ortuti zaznamenali v druhu *Boletus reticulatus* – hriב dubový (53,5 mg.kg<sup>-1</sup>). Podobné výsledky publikovali aj Kalač et al. (1996). Analyzovali 34 druhov jedlých húb z dvoch oblastí na Slovensku, kde sa ťažila ortuť a meď. V druhu *Boletus edulis* – hriב smrekový zistili koncentráciu 32,4 mg.kg<sup>-1</sup>. Kautmanová et al. (2021) stanovili ortuť v 39 druhoch húb v oblastiach, kde sa ťažil antimonit (Čučma, Dúbrava, Medzibrod). Najvyšší obsah ortuti zistili tak isto v hribe smrekovom - 3,54 mg.kg<sup>-1</sup>. Kavčič et al. (2019) namerali v klobúkoch dospelých jedincov *Boletus edulis* v Slovinsku v neznečistených lokalitách hodnotu ortuti 5,79 mg.kg<sup>-1</sup> a v mladých jedincoch hodnotu 10 mg.kg<sup>-1</sup>. V oblastiach znečistených ťažkými kovmi zistili v klobúkoch dospelých jedincov koncentráciu 69 mg.kg<sup>-1</sup> a v klobúkoch mladých jedincov až 103 mg.kg<sup>-1</sup>.

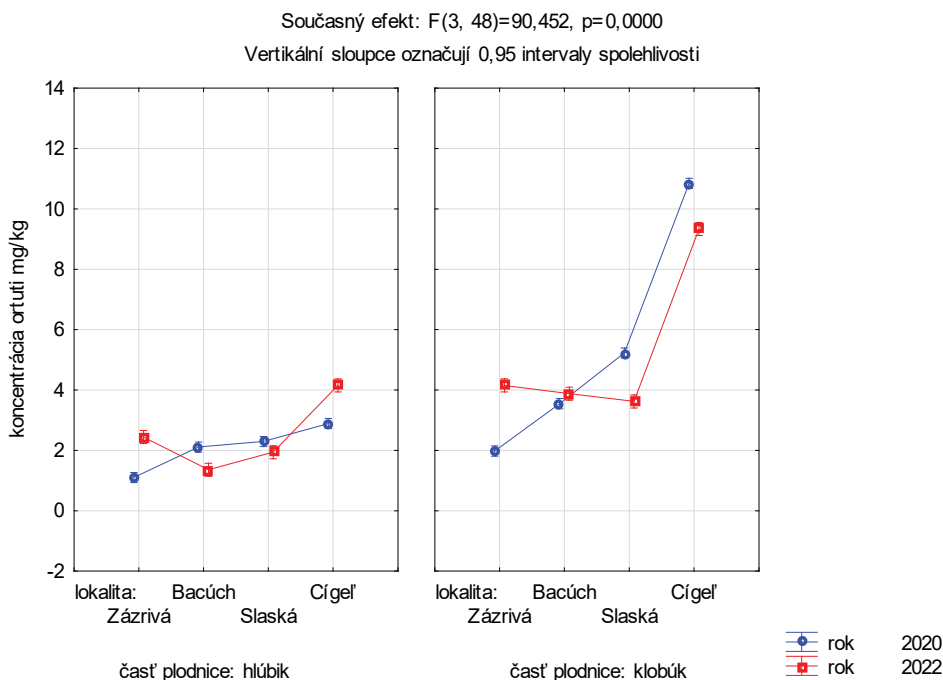
**Tab. 1** Obsah ortuti v pôde rokoch 2020 a 2022

**Tab. 1** Content of mercury in soil in 2020 and 2022

lokalita/rok	obsah ortuti v pôde (mg.kg <sup>-1</sup> )		BCF
	2020	2022	
Zázrivá	0,142	0,095	34,6
Bacúch	0,133	0,131	19,8
Slaská	0,121	0,128	22,1
Cígeľ	0,117	0,327	20,5
Mútne	-	0,131	20,9
Zvolen, Sekier	-	0,085	33,4

(vysvetlivky: BCF – biokoncentračný faktor)

V roku 2022 bol najvyšší obsah ortuti v pôde na lokalite Cígeľ a oproti roku 2020 mierne vzrástol. Na ostatných troch lokalitách nedošlo k výrazným zmenám v sledovaných dvoch rokoch (tab. 1). Všetky hodnoty spĺňajú limit, ktorý je podľa zákona 220/2004 Z. z. v znení neskorších predpisov pri hlinité a piesočnato-hlinité pôdy  $0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Stredný obsah Hg v pôdach Slovenska predstavuje v humusovom horizonte hodnotu  $0,08 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  a v pôdotvornom substráte  $0,05 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  (Ďurža & Khun, 2002).



**Obr. 2** Priemerná koncentrácia ortuti ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) v jednotlivých častiach plodnice *Boletus edulis* v rokoch 2020 a 2022.

**Fig. 2** Average mercury concentration ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) in individual parts of the fruiting body of *Boletus edulis* in 2020 and 2022

Pri porovnávaní koncentrácií ortuti v sledovaných rokoch môžeme povedať, že na lokalite Zázrivá došlo k nárastu koncentrácií v roku 2022 a to v hlúbiku o  $1,293 \text{ mg.kg}^{-1}$  a v klobúku o  $2,175 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Na lokalite Cígeľ došlo v roku 2022 k nárastu v hlúbiku o  $1,239 \text{ mg.kg}^{-1}$ , ale k poklesu v klobúku o  $1,603 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Na lokalite Bacúch sú rozdiely medzi dvoma rokmi v klobúku i v hlúbiku nepatrné. Lokalita Slaská vykazuje v roku 2022 pokles v klobúku o  $1,565 \text{ mg.kg}^{-1}$  a veľmi nepatrný pokles aj v hlúbiku (obr. 2). Hodnoty obsahu ortuti sú na jednotlivých lokalitách v častiach plodníc počas sledovaných rokov variabilné. V priebehu obsahu ortuti nemožno vyjadriť jasný trend (stúpajúci alebo klesajúci) pre časť plodnice na daný rok. Sledované obdobie dvoch rokov je pomerne

krátke na to, aby sme mohli vyvodit' závery o kumulácii ortuti, ktorá závisí od množstva faktorov – pôdne vlastnosti, anatomicko-morfologické, vývinové, fyziologické vlastnosti kumulujúceho druhu i environmentálne faktory.

Kumulácia ortuti v hubách je sledovaná v mnohých štúdiách prostredníctvom biokoncentračného faktora (Árvay et al., 2022, Falandysz et al., 2015). V našej práci sme potvrdili (tab. 1), že hrib smrekový možno klasifikovať ako akumulátor ortuti, ktorý významne indikuje príjem ortuti z pôdy do nadzemnej plodnice. Priemerná hodnota BCF v hríbe smrekovom je  $25,22 \pm 6,85$ . Druhy rodu *Boletus* sa podľa viacerých autorov vyznačujú vysokou bioakumulačnou schopnosťou (Árvay et al., 2022, Melgar et al., 2009, Širić et al., 2016, Alonso et al. 2000). Árvay et al. (2022) stanovili BCF v hríbe zrnitohlúbikovom  $11,4 \pm 7,14$ . Alonso et al. (2000) študovali obsah Hg a biokoncentračný potenciál 28 druhov jedlých divorastúcich húb v Španielsku a zistili, že najvyššie hodnoty BCF dosahujú druhy z rodu *Boletus* (126 - 421). Kalac et al. (1996) považujú za druhy silne kumulujúce ortuť *Calocybe gambosa*, *Lepista nuda*, *Agaricus arvensis*. Vysoké hladiny sú charakteristické aj pre rody *Agaricus*, *Macrolepiota* (5-10 mg.kg<sup>-1</sup>) a *Boletus* (2-5 mg.kg<sup>-1</sup>). Kavčič et al. (2018) uviedli, že druhy rodu *Boletus* obsahujú viac než 1% síry (ostatné druhy húb 0,1 – 0,5%). Pretože väzby medzi sírou a ortuťou sú vysoké, hromadia tieto druhy viac ortuti ako iné druhy húb. Hodnoty BCF sú značne ovplyvnené viacerými faktormi, vrátane pH substrátu, veku mycélia, doby fruktifikácie, obsahu vody a ďalšími.

## Záver

V miere toxicity sa ortuť zaraďuje medzi zvlášť nebezpečné prvky. Je charakterizovaná ako nedegradabilný kontaminant s vysokou bioakumulatívnou schopnosťou. Dlhodobá expozícia ľudského tela voči ortuti vedie k vážnym zdravotným problémom a toxickým účinkom na imunitný, tráviaci, nervový systém, oči, kožu, ďalej k dýchacím, močovým a reprodukčným problémom. Z literatúry je známe, že huby kumulujú ťažké kovy vrátane ortuti. Danú skutočnosť sme potvrdili aj v našej práci. Zistili sme, že namerané koncentrácie v plodniciach *Boletus edulis* vysoko prevyšujú stanovený limit podľa Potravinového kódexu SR (0,75 mg.kg<sup>-1</sup>). Na všetkých šiestich lokalitách v priemyselne zaťažených i menej znečistených regiónoch sme namerali vyššie koncentrácie v klobúčikoch ako v hlúbikoch. Koncentrácia ortuti sa v roku 2022 v hlúbikoch pohybovala v intervale od 1,341 (Bacúch) do 4,128 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ) a v klobúčikoch od 3,188 (Mútne) do 9,253 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ). V pôde nedošlo k prekročeniu limitnej hodnoty podľa zákona 220/2004 Z. z. v znení neskorších predpisov ani na jednej lokalite. Najvyššia hodnota bola zaznamenaná na lokalite Cígeľ v priemyselnom regióne Horná Nitra v roku 2022 – 0,327 mg.kg<sup>-1</sup>.

## Pod'akovanie

Autori ďakujú agentúre VEGA za finančnú podporu pri riešení projektov č. 1/0057/22, 1/0443/23, v rámci ktorých vznikol prezentovaný príspevok.

## Literatúra

- ALLEN, M.F., 1991. The Ecology of Mycorrhizae. Cambridge University Press, 184 pp. ISBN 0-521-33531-0
- ALONSO, J., SALGADO, M.J., GARCIA, M.A., MELGAR, M.J., 2000. Accumulation of mercury in edible macrofungi: influence of some factors. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 38, 158-162. ISSN: 1432-0703. <https://doi.org/10.1007/s002449910020>
- Altec, 2000: Návod k obsluhu AMA 254. ALTEC s r. o., Praha, 97 s.
- Árvay, J., HAUPTVOGL, M., DEMKOVÁ, L., HARANGOZO, L., Šnirc, M., BOBUESKÁ, L., ŠTEFÁNIKOVÁ, J., KOVÁČIK, A., JAKABOVÁ, S., JANČO, I., KUNCA, V., RELIĆ, D., 2022. Mercury in scarletina bolete mushroom (*Neobolus luridiformis*): Intake, spatial distribution in the fruiting body, accumulation ability and health risk assessment. Ecotoxicology and Environmental Safety, 232, 113235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113235>
- BAKER, A.J.M., 1981. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. Journal of Plant Nutrition, 3 (1–4), 643-654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>
- BERNHOF, R.A., 2012. Mercury Toxicity and Treatment: A Review of the Literature. Journal Environmental and Public Health 4096. <https://doi.org/10.1155/2012/460508>
- Ďurža, O. & KHUN, M., 2002. Environmentálna geochemia niektorých ťažkých kovov. Univerzita Komenského, Bratislava, 115 s. ISBN 80-223-1657-1
- FALANDYSZ, J., ZHANG, J., WANG Y., KRASIŇSKA, G., KOJTA, A.K., SABA, M., SHEN, T., LI, T., LIU, H., 2015. Evaluation of the mercury contamination in mushrooms of genus *Leccinum* from two different regions of the world: accumulation, distribution and probable dietary intake Science of Total Environment, 537, 470-478, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.159>
- GOODAY, G.W., 1982. Metabolic Control of Fruitbody Morphogenesis in *Coprinus Cinereus*. Springer, NY, ISBN 978-1-4612-5677 9
- GUPTA, S., SUMMUNA, B., GUPTA, M., ANNEPU, S.K., 2019. Edible Mushrooms: Cultivation, Bioactive Molecules, and Health Benefits. In: MÉRILLON, J.M. and RAMAWAT, K.G. (Eds.) Bioactive Molecules in Food. Springer Nature, Berlin, 1815-1847. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78030-6\\_86](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78030-6_86)
- HELENO, S.A., BARROS, L., MARTINS, A., QUEIROZ, M.J.R.P., MORALES, P., FERNÁNDEZ-RUIZ, V., FERREIRA, I.C.F.R., 2015. Chemical Composition, Antioxidant Activity, and Bioaccessibility Studies in Phenolic Extracts of Two *Hericium* Wild Edible Species. LWT - Food Science and Technology 63, 475 - 481. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.040>
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H., 2001. Trace Elements in Soils and Plants. Florida CRC Press, 3. vydanie, 403 pp.
- KABATA-PENDIAS, A. & MUKHERJEE, A.B., 2007. Trace Elements from Soil to Human. Springer-Verlag, Berlin, 23. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
- KALAC, P., NIZŇANSKA, M., BEVILAQUA, D., STASKOVA, I. 1996. Concentrations of mercury, copper, cadmium and lead in fruiting bodies of edible mushrooms in the vicinity of a mercury smelter and a copper smelter. The Science of the Total Environment, 177, 251-258. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04850-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04850-2)
- KAUTMANOVÁ, I., BRACHTÝR, O., GBÚROVÁ – Štubňová, E., SZABÓOVÁ, D., ŠOTTNIK, P., LALINSKÁ-VOLEKOVÁ, B., 2021. Potentially toxic elements in macromycetes and plants from areas affected by antimony mining. Biologia, 76, 2133-2159. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00788-9>
- KAVČIČ, M. PETRIČ, M., K. VOGEL-MIKUŠ, K., 2018. Chemical speciation using high energy resolution PIXE spectroscopy in the tender X-ray range. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 417, 65-69. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.06.009>
- KAVČIČ, A., MIKUŠ, K., DEBELJAK, M., VAN ELTEREN, J.T., ARČON, I., KODRE, A., KUMP, P., ARYDAS, A.G., MIGLIORI, A., CZYZICKI, M., VOGEL-MIKUŠ, K., 2019. Localization, ligand environment, bioavailability and toxicity of mercury in *Boletus spp.* and *Scutiger pes-caprae* mushrooms. Ecotoxicology and Environmental Safety, 184, 109623. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109623>

- KOSANIĆ, B., RANKOVIĆ, A., RANČIĆ, T., SAN KOJKOVIĆ 2019. Evaluation of metal concentration and antioxidant, antimicrobial, and anticancer potentials of two edible mushrooms *Lactarius deliciosus* and *Macrolepiota procera*. *Journal of food and drug analysis*, 24, 477 - 484.
- LALOTRA, P., GUPTA, D., YANGDOL, R., SHARMA, Y.P., GUPTA, S.K., 2016. Bioaccumulation of Heavy Metals in the Sporocarps of Some Wild Mushrooms. *Current Research in Environmental & Applied Mycology* 6 (3), 159–165. ISSN 2229-2225. <https://doi:10.5943/cream/6/3/2>
- 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:10.2478/johh-2021-0005>
- MELGAR, M.J., ALONSO, J., GARCÍA, M.A., 2009. Mercury in edible mushrooms and underlying soil: bioconcentration factors and toxicological risk. *Science of The Total Environment*, 407, 5328 – 5334. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2009.07.001>
- Potravinový kódex Slovenskej republiky. Dostupné: <https://www.svps.sk/kodex/>
- 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.
- 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., ROLFHUS, 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>
- STN 48 1000. Odber a príprava vzoriek lesných pôd pri zisťovaní zdravotného stavu lesa.
- SVOBODA, L., ZIMMERMANNOVÁ, K., KALAČ, P., 2000. Concentrations of mercury, cadmium, lead and copper in fruiting bodies of edible mushrooms in an emission area of a copper smelter and a mercury smelter. *Science of The Total Environment*, 246, 61-67. [https://doi:10.1016/S0048-9697\(99\)00411-8](https://doi:10.1016/S0048-9697(99)00411-8)
- ŠIRIĆ, I., HUMAR, M., KASAP, A., KOS, I., MIOČ, B., POHLEVEN, F., 2016. Heavy metal bioaccumulation by wild edible saprophytic and ectomycorrhizal mushrooms. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 18239-18252. <https://doi:10.1007/s11356-016-7027-0>
- 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>
- Zákon NR SR č. 220/2004 Z. z. o ochrane a využívaní poľnohospodárskej pôdy v znení neskorších predpisov
- ZOCHER, A.L., KRAEMER, D., MERSCHER, G., BAU, M., 2018. Distribution of major and trace elements in the bolete mushroom *Suillus luteus* and the bioavailability of rare earth elements. *Chemical Geology*, 483, 491-500. <https://doi:10.1016/j.chemgeo.2018.03.019>
- <https://www.na-huby.sk/atlas-hub/Boletus-edulis/hrib-smrekovy/hrib-smrkovy/ID136>

#### Adresa autorov:

Mgr. Hana Olleroová, PhD.

Ing. Andrea Zacharová, PhD.

Ing. Miroslav Vanek, PhD.

Katedra environmentálneho inžinierstva

Fakulta ekológie a environmentalistiky

Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

e-mail: olleroova@tuzvo.sk, andrea.m.zacharova@gmail.com, vanek@tuzvo.sk



## Summary

### **Accumulation of mercury in *Boletus edulis* (Bull.) in forest ecosystem of central Slovakia.**

In terms of toxicity, mercury belongs to hazardous elements. It is characterised as a non-degradable contaminant with a high bioaccumulative capacity. Long-term exposure of the human body to mercury leads to serious health problems and toxic effects on the immune, digestive, nervous systems, eyes, skin, as well as to respiratory, urinary and reproductive problems. It is known from the literature that fungi accumulate heavy metals including mercury. In our work we confirmed this fact and found that the measured concentrations in the fruiting bodies of *Boletus edulis* far exceed the limit set by the Food Codex (0.75 mg.kg<sup>-1</sup>). At all six sites in both industrially polluted and less polluted regions, we measured higher concentrations in caps than in stipes. In 2022, mercury concentrations in stipes ranged from 1.341 (Bacúch) to 4.128 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ) and in caps from 3.188 (Mútne) to 9.253 mg.kg<sup>-1</sup> (Cígeľ). In soil, the limit value according to Act 220/2004 Coll. was not exceeded at any site. The highest value (0.327 mg.kg<sup>-1</sup>) was recorded at the Cígeľ site in the Horná Nitra industrial region in 2022.

**Key words:** mercury, *Boletus edulis*, accumulation, soil, forest ecosystem



# AGGREGATED TRANSFER FACTOR FOR $^{137}\text{CS}$ IN WILD BERRIES SOIL - FRUITS SYSTEM IN RELATION TO SELECTED ENVIRONMENTAL FACTORS

Miroslav VANEK

VANEK, M.: AGGREGATED TRANSFER FACTOR FOR  $^{137}\text{Cs}$  IN WILD BERRIES SOIL - FRUITS SYSTEM IN RELATION TO SELECTED ENVIRONMENTAL FACTORS. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

---

## ABSTRAKT

The environmental persistence of radiocaesium, particularly Cs-137, introduced by nuclear incidents and fallout, presents substantial ecological and health challenges due to its long half-life and capacity for bioaccumulation. Radiocaesium, behaving analogously to potassium, is readily absorbed by plants, including wild berries, which can subsequently serve as vectors of radiocaesium within food webs. This review synthesizes current knowledge on the pathways of soil-to-plant transfer of radiocaesium, with a particular focus on wild berries frequently foraged in contaminated regions. We evaluate soil physicochemical factors, including mineral composition, organic matter content, and ion competition, alongside environmental and physiological determinants such as seasonal uptake variation, phenophase and mycorrhizal interactions that affect the aggregated transfer coefficient (TF<sub>a</sub>) of radiocaesium in different berry species. Understanding these complex transfer mechanisms provides crucial insights for assessing radiocaesium risk in ecological and human food systems and provides foundation to develop strategies for mitigating contamination impact.

**Keywords:** radiocaesium, aggregated transfer factor, soil-to-plant radionuclide uptake, environmental radioactivity

---

## 1. INTRODUCTION

Radiocaesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) contamination in the environment is a significant concern due to its long half-life and potential for bioaccumulation in the food chain. One of the primary pathways through which radiocaesium can enter the human body is via consumption of plants, which absorb it from contaminated soils. The transfer of radiocaesium from soil to plants, quantified as the transfer factor (TF), plays a critical role in understanding the extent of this bioavailability and the subsequent risks posed to both human and ecological health.

The aggregated transfer factor ( $TF_a$ ) is a key parameter in radioecological studies, as it provides an integrated measure of the radiocaesium uptake by plants in relation to soil conditions over time. It accounts for various factors influencing the bioavailability of radiocaesium, including soil type, organic matter content, clay mineral composition, soil pH, and competing ions like potassium ( $K^+$ ). Environmental conditions such as rainfall, temperature, and land-use practices also have profound impacts on the dynamics of radiocaesium transfer within the soil-plant system.

Understanding how these environmental factors affect the aggregated transfer factor is crucial for developing predictive models (ABSALOM et al. 2001; TARSITANO et al. 2011) of radiocaesium movement and for designing effective remediation strategies (Zhu and Smolders 2000).

## 2. Radiocaesium

Radiocaesium contamination in the environment primarily results from nuclear accidents such as the Chernobyl disaster in 1986 and the Fukushima Daiichi nuclear disaster in 2011. Due to its long half-life and high bioavailability in ecosystems,  $^{137}Cs$  is considered a major environmental concern. Wild berries, which grow in many contaminated regions, can accumulate radiocaesium, posing a potential health risk to humans and wildlife that consume them. (Červinková et al. 2017).

### 2.1. Radiocaesium behavior in soil

Radiocaesium mobility and bioavailability in soil are influenced by several physicochemical properties, including soil composition, pH, organic matter content, and the presence of competing ions like potassium.  $^{137}Cs$  behaves similarly to potassium (K), as both are alkali metals, leading to competitive uptake by plant roots (KOMATSU et al. 2017).

**Soil Clay Content:** Cs-137 strongly adsorbs to clay minerals in soil, particularly illite, reducing its mobility. (OKUMURA et al. 2018) High clay content in soil results in lower radiocaesium availability for plant uptake, as the clay particles bind cesium ions more effectively.

**Organic Matter:** Organic matter can either immobilize or enhance radiocaesium bioavailability depending on the composition and decomposition stage. Humic substances in particular may increase mobility through complexation. (RIGOL et al. 2002)

**Soil pH:** Acidic soils tend to increase radiocaesium availability because the lower pH limits cesium adsorption to soil particles. (VAN BERGEIJK et al. 1992) Therefore, radiocaesium is more bioavailable in acidic forest soils where wild berries often thrive.

## 2.2 Radiocaesium uptake by wild berries

Wild berries are typically being harvested by hand picking, or with the aid of manual mechanical harvesters in mountain environment. Traditional areas of their occurrence in Slovakia are for example Low Tatras and High Tatras mountains. Wild berry species, such as bilberry (*Vaccinium myrtillus*), lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea*), and cranberry (*Vaccinium oxycoccos*), in phase fruit ripe for picking (BBCH 87) have shown varying degrees of radiocaesium accumulation, primarily influenced by species-specific physiological traits and environmental conditions. The plant-soil transfer factor ( $TF_a$ ), which expresses the ratio of radionuclide concentration in plant tissues to total radionuclide deposition on soil, is widely used to quantify this transfer. Radiocaesium is taken up by the roots of wild berries through potassium transporters due to its chemical similarity to K. Plants in nutrient-poor soils may enhance radiocaesium uptake because of a greater demand for potassium. (GUPTA et al. 2018) Different wild berry species exhibit varying transfer rates of radiocaesium. For example, bilberries generally show higher accumulation of radiocaesium compared to lingonberries due to differences in root structure and soil interactions. (IAEA 2010)

## 2.3 Factors affecting radiocaesium transfer to wild berries

Several factors contribute to the variation in radiocaesium transfer to wild berries, including:

**Soil Type and Composition:** Sandy soils, with low cation exchange capacity, allow for higher bioavailability of radiocaesium than clay-rich or organic soils. (RIGOL et al. 2002; OKUMURA et al. 2018)

**Potassium Concentration in Soil:** High potassium levels in soil reduce the uptake of radiocaesium due to competitive inhibition at the root absorption sites. Potassium supplementation is often used as a remediation measure to lower radiocaesium uptake in contaminated agricultural systems. (GUPTA et al. 2018)

**Climate and Moisture:** Moisture availability enhances the transport of radiocaesium through soil and uptake by plants, especially in forest ecosystems. (SHALHEVET 1973; ZHU A SMOLDERS 2000) In areas with high rainfall or irrigation, radiocaesium mobility increases, potentially leading to higher concentrations in wild berries.

**Mycorrhizal Associations:** Mycorrhizal fungi associated with plant roots can influence radiocaesium uptake. (DUPRÉ DE BOULOIS et al. 2005; 2008) These symbiotic relationships may either enhance or inhibit radiocaesium accumulation depending on the fungal species and environmental conditions.

**Seasonal Variation:** The radiocaesium content in wild berries fluctuates seasonally, with the highest uptake occurring during active growth periods in spring and early

summer. During this time, potassium demand is high, increasing radiocaesium absorption. Therefore, radiocaesium uptake depends on the phenophase. (GRABOVSKYI et al. 2013)

## 2.4 Health implications and management strategies

Radiocaesium contamination in wild berries presents health risks to humans and wildlife due to the potential for bioaccumulation in food webs. The consumption of contaminated wild berries can lead to internal radiation exposure, particularly in regions where these berries are a dietary staple (Červinková et al. 2017; GWYNN et al. 2013; TURTIAINEN et al. 2014). Several management strategies have been proposed to reduce radiocaesium transfer to wild berries, including:

**Soil Amendments:** The addition of potassium fertilizers can reduce radiocaesium uptake by plants by promoting competitive inhibition (KOMATSU et al. 2017; OHMORI et al. 2014; KATO et al. 2015; KAUNISTO et al. 2002).

**Forest Management:** Limiting the harvesting of wild berries in highly contaminated areas, especially in the years immediately following a nuclear incident, is essential for public health safety (OSANAI et al. 2022; IAEA 2006)

**Monitoring Programs:** Regular monitoring of radiocaesium levels in wild berries and soil, as well as for example wild game (Škrkal et al. 2015; CUI et al. 2020) is crucial in contaminated regions. Such programs help inform public health advisories and manage consumption risks. (ORITA et al. 2016; MERZ et al. 2015; STEINHAUSER 2016)

## 3. Conclusion

The transfer of radiocaesium from soil to wild berries is a complex process influenced by multiple factors, including soil properties, plant physiology, and environmental conditions. Understanding these factors is critical for managing radiocaesium contamination in ecosystems and protecting public health. (KOMATSU et al. 2017) Continued research into radiocaesium transfer mechanisms and the development of effective remediation strategies is essential, particularly in regions affected by nuclear accidents. (KHAN A NOOR 2017)

**Acknowledgement:** This article was funded by the VEGA project 1/0057/22 and 1/0443/23 funded by the Cultural and Educational Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic.

#### 4. References

- ABSALOM, J. P., S. D. YOUNG, N. M. J. CROUT, A. SANCHEZ, S. M. WRIGHT, E. SMOLDERS, A. F. NISBET a A. G. GILLET, 2001. Predicting the transfer of radiocaesium from organic soils to plants using soil characteristics. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2001, roč. 52, č. 1, s. 31–43. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/S0265-931X(00)00098-9
- CUI, Limeng, Makiko ORITA, Yasuyuki TAIRA a Noboru TAKAMURA, 2020. Radiocesium concentrations in wild boars captured within 20 km of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Scientific Reports* [online]. 2020, roč. 10, č. 1, s. 9272. ISSN 2045-2322. Dostupné na: doi:10.1038/s41598-020-66362-6
- ČERVINKOVÁ, Andrea, Michael PÖSCHL a Lubica POSPÍŠILOVÁ, 2017. Radiocaesium transfer from forest soils to wild edible fruits and radiation dose assessment through their ingestions in Czech Republic. *Journal of Forest Research* [online]. 2017, roč. 22, č. 2, s. 91–96. ISSN 1341-6979. Dostupné na: doi:10.1080/13416979.2017.1279705
- DUPRÉ DE BOULOIS, H., E. J. JONER, C. LEYVAL, I. JAKOBSEN, B. D. CHEN, P. ROOS, Y. THIRY, G. RUFYIKIRI, B. DELVAUX a S. DECLERCK, 2008. Role and influence of mycorrhizal fungi on radiocesium accumulation by plants. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2008, roč. 99, č. 5, Results of international research projects Boris (Bioavailability of radionuclides in soils) and MYRRH (use of mycorrhizal fungi for the phytostabilisation of radio-contaminated environments), s. 785–800. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/j.jenvrad.2007.10.008
- DUPRÉ DE BOULOIS, Hervé, Bruno DELVAUX a Stéphane DECLERCK, 2005. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the root uptake and translocation of radiocaesium. *Environmental Pollution* [online]. 2005, roč. 134, č. 3, s. 515–524. ISSN 0269-7491. Dostupné na: doi:10.1016/j.envpol.2004.08.015
- GRABOVSKYI, V. A., O. S. DZENDZELYUK a O. S. KUSHNIR, 2013. Temporal and seasonal variations of radiocaesium content in some plants from the western part of Ukrainian Polesye. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2013, roč. 117, Special Issue on Radioactivity Measurements, s. 2–8. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/j.jenvrad.2012.05.025
- GUPTA, Dharmendra K., Sarita TIWARI, Soumya CHATTERJEE a Clemens WALTHER, 2018. Potassium and its role in cesium transport in plants. *Biologia* [online]. 2018, roč. 73, č. 9, s. 885–896. ISSN 1336-9563. Dostupné na: doi:10.2478/s11756-018-0110-x
- GWYNN, Justin P., Anna NALBANDYAN a Geir RUDOLFSSEN, 2013. 210Po, 210Pb, 40K and 137Cs in edible wild berries and mushrooms and ingestion doses to man from high consumption rates of these wild foods. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2013, roč. 116, s. 34–41. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/j.jenvrad.2012.08.016
- IAEA, 2006. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience* [online]. Text. B.m.: International Atomic Energy Agency [cit. 12.11.2024]. Dostupné na: <https://www.iaea.org/publications/7382/environmental-consequences-of-the-chernobyl-accident-and-their-remediation-twenty-years-of-experience>
- IAEA, 2010. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*. Vienna: Internat. Atomic Energy Agency. Technical reports series, 472. ISBN 978-92-0-113009-9.
- KATO, Naoto, Nobuharu KIHOU, Shigeto FUJIMURA, Masaharu IKEBA, Naruo MIYAZAKI, Yukio SAITO, Tetsuya EGUCHI a Sumio ITOH, 2015. Potassium fertilizer and other materials as countermeasures to reduce radiocesium levels in rice: Results of urgent experiments in 2011 responding to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Soil Science and Plant Nutrition* [online]. 2015, roč. 61, č. 2, s. 179–190. ISSN 0038-0768. Dostupné na: doi:10.1080/00380768.2014.995584
- KAUNISTO, S, L ARO a A RANTAVAARA, 2002. Effect of fertilisation on the potassium and radiocaesium distribution in tree stands (*Pinus sylvestris* L.) and peat on a pine mire. *Environmental Pollution* [online]. 2002, roč. 117, č. 1, s. 111–119. ISSN 0269-7491. Dostupné na: doi:10.1016/S0269-7491(01)00153-1
- KHAN, Aysha Masood a Mehwish Jamil NOOR, 2017. Radiocaesium contaminated sites and possible techniques for remediation. *Geology, Ecology, and Landscapes* [online]. 2017, roč. 1, č. 2, s. 84–94. ISSN null. Dostupné na: doi:10.1080/24749508.2017.1332849
- KOMATSU, Masabumi, Keizo HIRAI, Junko NAGAKURA a Kyotaro NOGUCHI, 2017. Potassium fertilisation reduces radiocesium uptake by Japanese cypress seedlings grown in a stand contaminated by the Fukushima

- Daiichi nuclear accident. *Scientific Reports* [online]. 2017, roč. 7, č. 1, s. 15612. ISSN 2045-2322. Dostupné na: doi:10.1038/s41598-017-15401-w
- MERZ, Stefan, Katsumi SHOZUGAWA a Georg STEINHAUSER, 2015. Analysis of Japanese Radionuclide Monitoring Data of Food Before and After the Fukushima Nuclear Accident. *Environmental Science & Technology* [online]. 2015, roč. 49, č. 5, s. 2875–2885. ISSN 0013-936X. Dostupné na: doi:10.1021/es5057648
- OHMORI, Yoshihiro, Masataka KAJIKAWA, Sho NISHIDA, Nobuhiro TANAKA, Natsuko I. KOBAYASHI, Keitaro TANOI, Jun FURUKAWA a Toru FUJIWARA, 2014. The effect of fertilization on cesium concentration of rice grown in a paddy field in Fukushima Prefecture in 2011 and 2012. *Journal of Plant Research* [online]. 2014, roč. 127, č. 1, s. 67–71. ISSN 1618-0860. Dostupné na: doi:10.1007/s10265-013-0618-7
- OKUMURA, Masahiko, Sebastien KERISIT, Ian C. BOURG, Laura N. LAMMERS, Takashi IKEDA, Michel SASSI, Kevin M. ROSSO a Masahiko MACHIDA, 2018. Radiocesium interaction with clay minerals: Theory and simulation advances Post-Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2018, roč. 189, s. 135–145. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/j.jenvrad.2018.03.011
- ORITA, Makiko, Kanami NAKASHIMA, Naomi HAYASHIDA, Yuuko ENDO, Shunichi YAMASHITA a Noboru TAKAMURA, 2016. Concentrations of Radiocesium in Local Foods Collected in Kawauchi Village after the Accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station. *Scientific Reports* [online]. 2016, roč. 6, č. 1, s. 28470. ISSN 2045-2322. Dostupné na: doi:10.1038/srep28470
- OSANAI, Minoru, Tomuhiro NORO, Shonosuke KIMURA, Kohsei KUDO, Shota HOSOKAWA, Megumi TSUSHIMA, Ryoko TSUCHIYA, Kazuki IWAOKA, Ichiro YAMAGUCHI a Yoko SAITO, 2022. Longitudinal Verification of Post-Nuclear Accident Food Regulations in Japan Focusing on Wild Vegetables. *Foods* [online]. 2022, roč. 11, č. 8, s. 1151. Dostupné na: doi:10.3390/foods11081151
- RIGOL, A, M VIDAL a G RAURET, 2002. An overview of the effect of organic matter on soil–radiocaesium interaction: implications in root uptake. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2002, roč. 58, č. 2, Radionuclides in soil-plant systems, s. 191–216. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/S0265-931X(01)00066-2
- SHALHEVET, Joseph, 1973. Effect of mineral type and soil moisture content on plant uptake of <sup>137</sup>Cs. *Radiation Botany* [online]. 1973, roč. 13, č. 3, s. 165–171. ISSN 0033-7560. Dostupné na: doi:10.1016/S0033-7560(73)80003-1
- STEINHAUSER, Georg, 2016. Assessment of the effectiveness of the post-Fukushima food monitoring campaign in the first year after the nuclear accident: A hypothesis. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2016, roč. 151, s. 136–143. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/j.jenvrad.2015.09.013
- ŠKRKAL, Jan, Petr RULÍK, Karin FANTÍNOVÁ, Ján MIHALÍK a Jana TIMKOVÁ, 2015. Radiocaesium levels in game in the Czech Republic. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2015, roč. 139, s. 18–23. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/j.jenvrad.2014.09.016
- TARSITANO, D., S. D. YOUNG a N. M. J. CROUT, 2011. Evaluating and reducing a model of radiocaesium soil-plant uptake. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2011, roč. 102, č. 3, s. 262–269. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/j.jenvrad.2010.11.017
- TURTIAINEN, Tuukka, Minna BRUNFELDT, Tiina RASILAINEN, Lindis SKIPPERUD, Lene VALLE, Jelena MRDAKOVIC POPIC, Per ROOS, Synnöve SUNDELL-BERGMAN, Klas ROSÉN a Robert WEIMER, 2014. *Doses from natural radioactivity in wild mushrooms and berries to the Nordic population.*
- VAN BERGELJK, K. E., H. NOORDIJK, J. LEMBRECHTS a M. J. FRISSEL, 1992. Influence of pH, soil type and soil organic matter content on soil-to-plant transfer of radiocesium and -strontium as analyzed by a nonparametric method. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 1992, roč. 15, č. 3, s. 265–276. ISSN 0265-931X. Dostupné na: doi:10.1016/0265-931X(92)90062-X
- ZHU, Y-G. a E. SMOLDERS, 2000. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of Experimental Botany* [online]. 2000, roč. 51, č. 351, s. 1635–1645. ISSN 0022-0957. Dostupné na: doi:10.1093/jexbot/51.351.1635



## Summary

### AGREGOVANÝ TRANSFEROVÝ FAKTOR PRE $^{137}\text{CS}$ V SYSTÉME PÔDA - OVOCIE LESNÝCH BOBUĽOVÝCH PLODOV VO VZŤAHU K VYBRANÝM FAKTORMOM ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA

Environmentálna perzistencia rádioaktívneho cézia, najmä Cs-137, spôsobená jadrovými nehodami a spadom, predstavuje značné ekologické a zdravotné problémy vzhľadom na jeho dlhý polčas rozpadu a schopnosť bioakumulácie. Rádiocézium, ktoré sa správa podobne ako draslík, je ľahko absorbovaný rastlinami, vrátane lesných plodov, ktoré môžu následne slúžiť ako nosiče rádioaktívneho cézia v potravinových reťazcoch. Tento prehľad syntetizuje súčasné poznatky o dráhach prenosu rádioaktívneho cézia z pôdy na rastlinu, s osobitným zameraním na lesné plody, ktoré sa často zbierajú v kontaminovaných oblastiach. Uvedené sú pôdne fyzikálno-chemické faktory, vrátane minerálneho zloženia, obsahu organickej hmoty a iónovej konkurencie, spolu s environmentálnymi a fyziologickými determinantmi, ako sú sezónne zmeny príjmu, fenofáza a mykorízne interakcie, ktoré ovplyvňujú agregovaný koeficient prenosu (TFa) rádiocézia v rôznych druhoch bobúľ. Pochopenie týchto zložitých mechanizmov prenosu poskytuje zásadný pohľad na hodnotenie rizika rádioaktívneho cézia v ekologických a ľudských potravinových systémoch a poskytuje základ pre vývoj stratégií na zmiernenie vplyvu kontaminácie.

**Kľúčové slová:** rádiocézium, agregovaný transferový faktor, príjem rádionuklidov z pôdy do rastliny, rádioaktivita v životnom prostredí

#### Kontaktná adresa

Ing. Miroslav Vanek, PhD.  
Katedra environmentálneho inžinierstva  
Fakulta ekológie a environmentalistiky  
Technická univerzita vo Zvolene  
T. G. Masaryka 24  
960 53 Zvolen  
Slovensko  
e-mail: vanek@tuzvo.sk  
tel.: +421 455 206 830