

Acta Facultatis Ecologiae

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

Volume 49
2025

Editorial Board

Editor-in-Chief

Marián Schwarz

Vice-Editor-in-Chief

Dagmar Samešová

Executive Editor

Andrea Diviaková – Ecological Section

Andrea Zacharová – Environmental Section

Technical Editors

Anna Ďuricová, Miroslav Vanek

Members

Magdaléna Bálintová, Barbara Bialecka, Ján Gáper, František Hnilička, László Miklós,

Volodymyr Nykyforov, Branislav Olah, Peter Ondrišík,

Andrej Oriňák, František Petrovič, Magdaléna Pichlerová, Artur Radecki-Pawlik, Tamás

Rétfalvi, Dagmar Samešová, Branko Slobodník, Slavomír Stašiov

List of Reviewers Acta Facultatis Ecologiae 49

Zuzana Greštiak Oravcová, Martin Jančo, Paulína Nalevanková, Jana Škvareninová,

Jaroslav Vido, Jozef Zverko

Vydala (Published by): Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 2117/24, 960 01 Zvolen

Rozsah (Pages) 145 strán

Tlač (Printed by): Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene

Vydanie I. – december 2025

Periodikum s periodicitou dvakrát ročne

EV 6304/25/PT

© Technická univerzita vo Zvolene

ISSN 1336-300X

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

OBSAH / CONTENT

PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÁCE / ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

BRENČIČ M. & HOLÍKOVÁ M.

Potenciál metody SEM/EDX z hlediska analýzy znečišťujících látek na povrchu plodů ovoce z městských aglomerací

Potential of the SEM/EDX method for the analysis of pollutants on the surface of fruit

from urban agglomerations7

DUŠEK, D. & NOVÁK, J.

Dlouhodobá měření podkorunových srážek v dubových porostech

Long-term measurement of throughfall in oak stands15

HORA, P

Měření teploty vzduchu a půdy a vlhkosti vzduchu v lesních porostech v Doksech

Measurement of air and soil temperature and air humidity in forests in Doksy20

KACÁLEK D. & ŠPULÁK O.

Lesnické hydromeliorační okrsky – flexibilní nadstavba lesnické typologie systematicky řešící problematiku vodou ovlivněných stanovišť

Information on forestry hydrological districts supporting water-retention function of forests28

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

Vývoj a validácia bioklimatologického modelu na predikciu vnútornej klímy včelieho úľa

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

of a beehive.32

KURJAK, D., VIDO, J., KURJAKOVÁ, J. & SLIACKA KONÔPKOVÁ, A.

Klimatické extrémy a ekofyziologické limity drevín

Climate extremes and ecophysiological limits of trees37

LEŠTIANSKA A., STŘELCOVÁ K. & ZVERKO J.

Dlhodobý biometeorologický výskum v arboréte borová hora so zameraním na dendrometrické merania

Long-term biometeorological research in the Borová hora Arboretum with a focus

on dendrometer-based monitoring42

LIPINA, P. & ŠUSTKOVÁ, V.

Meteorologická měření a klima v povodí řeky Ostravice

Meteorological measurements and climate in the Ostravice river basin50

LUKASOVÁ, V., ROZKOŠNÝ, J., MREKAJ, I. & ONDERKA, M.

Zmeny klimatických podmienok v lesných vegetačných stupňoch a ich vplyv na fenologické fázy hlavných drevín

Change of climatic conditions in forest vegetation zones and their impact on the phenology

of main tree species59

MALOVCOVÁ L., JANČO M., OSTRIHOŇ, M., NALEVANKOVÁ P., VYSKOT, I., VIDO J. & ŠKVARENINA J.

Vplyv mikroklimy horských smrečín na vlhkosť jemného paliva a riziko lesných požiarov v oblasti Západných Tatier

The impact of the microclimate of mountain spruce forests on the moisture content of fine fuel

and the risk of forest fires in the Western Tatras region67

NALEVANKOVÁ, P., POPADIČ, P., STŘELCOVÁ, K. & VIDO, J. Meniace sa podmienky prostredia a vodný režim smreka a buka: hospodársky vs. prírode blízky zmiešaný les Water Regime of Norway Spruce and European Beech under Changing Environmental Conditions in the Fir–Beech Forest Vegetation Zone: Managed Stand vs. Close-to-Nature Mixed Forest	77
RYBÁR, J., MARČIŠ, P. & SITKOVÁ, Z. Long-term mechanic dendrometer chronologies reveal post-drought growth responses of five common Central European temperate forest species	88
SALAŠ, P., BURGOVÁ, J., ROŽNOVSKÝ, J. & JEŘÁBKOVÁ, J. Může mít druhová skladba dřevin městských parků dopady na zdraví obyvatel? Can the species composition of trees in urban parks impact residents' health?	93
SEDLÁK, J., BÍLEK, T., VÁVRA, A., ROŽNOVSKÝ, J. & SALAŠ, P. Výsadba ovocných dřevin v městské aglomeraci – vliv na omezení negativních dopadů klimatických extrémů Planting fruit trees in an urban agglomeration – influence on limiting the negative impacts of climate extremes	101
SRUBKOVÁ A. & ROŽNOVSKÝ J. Fenologické fáze vybraných lesních dřevin: výsledky dlouhodobého sledování Phenological Phases of Selected Forest Tree Species: Results of Long-Term Monitoring	107
ŠRÁMEK, M., VAVŘÍČEK, D., NOVÁK, J. & MADĚRA, P. Vliv topografické expozice na radiální růstovou dynamiku a odezvu na sucho u smrku ztepilého (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst) Effect of topographic exposure on radial growth dynamics and drought response in Norway spruce (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst)	115
ZOUHAR, V. Role klimatu v typologickém systému lesů ČR: review The role of climate in the czech forest ecosystem classification: review	122
BEDNÁŘ, M., NETOPIL, P. & ŠARAPATKA, B. Soubor map ČR pro navrhování malých vodních ploch jako výsledek multikriteriální analýzy fyzicko-geografických podkladů A Map Collection of the Czech Republic for Designing Small Water Bodies Based on Multicriteria Analysis of Physical-Geographical Datasets	129
HANZELOVÁ M., NALEVANKOVÁ P., VIDO J. & GREŠTIK ORAVCOVÁ Z. Posúdenie mikroklimatického vplyvu čiastočnej zelenej strechy realizovanej na budove TUZVO Assessment of the Microclimatic Effect of a Partial Green Roof on a TUZVO Building	136

Pôvodné vedecké práce
Original scientific articles

POTENCIÁL METODY SEM/EDX Z HLEDISKA ANALÝZY ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK NA POVRCHU PLODŮ OVOCE Z MĚSTSKÝCH AGLOMERACÍ

Martina BREŇČIČ – Markéta HOLÍKOVÁ

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 2578/43, 616 67 Brno, martina.brencic@chmi.cz,
marketa.holikova@chmi.cz

ABSTRACT

Breňčíč M., Holíková M.: Potential of the SEM/EDX method for the analysis of pollutants on the surface of fruit from urban agglomerations

The urban climate, shaped by dense development, limited green spaces, and heat accumulation, contributes to the emergence of the Urban Heat Island (UHI) effect. This phenomenon is associated with altered humidity, disrupted air circulation patterns, and heightened levels of air pollution. Trees, parks, and orchards play a crucial role in mitigating UHI effects by acting as natural microclimatic regulators. They cool the environment, increase humidity, and capture airborne particulate matter, thereby contributing to improved air quality, public health, and human comfort. Furthermore, urban orchard fruit can serve as a valuable nutritional resource and a component of urban climate change adaptation strategies. Assessing the quality of urban fruit can be achieved through surface analysis. Scanning Electron Microscopy combined with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDX) is a suitable method for analyzing airborne pollutants deposited on the fruit surface, as it enables the characterization of both particle morphology and elemental composition. This study evaluates the applicability of the SEM/EDX method for the analysis of airborne particulate matter (PM) deposited on fruit surfaces, with a particular focus on various sample preparation methods. The results demonstrate that, despite certain limitations, SEM/EDX exhibits considerable potential for this type of analysis. Among the tested approaches, the most effective sample preparation method involved transferring particles from the fruit surface onto a polycarbonate filter.

Key words: urban climate, air pollution, importance of greenery, orchards, SEM/EDX

ÚVOD

Město je obec, která splňuje určitá kritéria, zpravidla vymezená v legislativě. První velká města vznikala v úrodných oblastech. Výrazným impulsem pro růst a zakládání nových měst byla průmyslová revoluce. Urbanizace významně ovlivnila nejen velikost měst, ale i strukturu osídlení a společenské vztahy. Urbanizaci lze stručně definovat jako proces koncentrace sociálních a ekonomických aktivit i obyvatelstva do měst a městských aglomerací (TONEV 2020), ve kterých v současné době žije více než polovina světové populace, ve vyspělých státech světa až 75 %. V městském prostředí se formuje specifický typ klimatu související s antropogenní činností a přetvářením životního prostředí z volné krajiny na města. Těmito jevy se zabývá urbánní klimatologie. Má přímé dopady na zdravotní stav obyvatel měst a také na materiální škody způsobené extrémními jevy počasí (DOBROVOLNÝ et al. 2012).

Desítky let výzkumu prokázaly, že města jsou obvykle teplejší než jejich okolí. Tento fenomén je známý pod pojmem městský tepelný ostrov a je jedním z příkladů nezáměrné změny klimatu způsobené lidskou činností. Má mnoho dopadů, což je možné pozorovat například v kvetení rostlin, ke kterému dochází dříve v rozsáhlých urbanizovaných oblastech. Projevuje se v nižších nákladech na vytápění budov, ale i ve vyšších požadavcích na ochlazování budov a prostoru ve městech, což vede ke zvýšené spotřebě vody a energie pro klimatizační systémy. Dále se projevuje i na zvýšeném tepelném stresu na obyvatele měst během letních měsíců a v menší hustotě mlhy a zvýšené míře chemických reakcí, které vedou ke tvorbě oxidačního smogu (OKE et al. 2017).

Klima městské, tedy klima velkých měst a průmyslových aglomerací, se vytváří za spolupůsobení specifického aktivního povrchu měst, antropogenní produkce tepelné energie a průmyslové, dopravní i jiné činnosti ve městech. Aktivní povrch měst je tvořen střechami a stěnami budov, vozovkami s umělým povrchem, malou plochou zeleně a jeho vlastnosti závisí i na typu zástavby, šířce ulic apod. Od klimatu přilehlého venkovského okolí se městské klima zpravidla liší nižší prům. rychlostí větru, vytvářením tepelného ostrova města (projevuje se

vyššími denními i roč. průměry teploty vzduchu), nižší relativní vlhkostí vzduchu, sníženou dohledností a podstatně vyššími emisemi znečišťujících látek, které unikají do atmosféry z různých zdrojů znečištění (tepelné elektrárny, teplárny, továrny, domácí topeniště, spalovací motory aj.). Větší znečištění ovzduší ve městech se projevuje snížením slunečního záření (<http://slovník.cmes.cz/vyklad/cs/k>).

Klimatické poměry všech měst jsou velmi specifické, a tak je důležité používat správné druhy dřevin, které jsou schopny takové klima snést. Zpevněné povrchy odrážejí jen malé procento slunečního záření, akumulují více tepla a výrazně se přehřívají. K celkové tepelné energii absorbované městem je třeba započítat i dodávku tepla z průmyslových a domácích topenišť a snížení odvodu tepla často nedostatečným větrným prouděním. Výsledkem teplejšího klimatu města je časté nahrazování domácích druhů taxony, které jsou introdukovány ze zemí s teplejším klimatem a mají vybudovány určité mechanismy, které jim pomáhají lépe snášet vysoké teploty a nedostatečné zásobení vodou. Kromě nadměrného tepla trpí stromy ve městech často i vodním deficitem, který je způsoben především redukcí kořenového systému a nedostatečným vsakem srážkové vody. Rostliny vytvářejí oproti zpevněným povrchům na vegetační ploše i v jejím bezprostředním okolí odlišné mikroklima. Pro lidské vnímání klimatu ve veřejném prostoru je nejdůležitější vzduchová vrstva do výšky cca 2,5 m, kterou vegetace ovlivňuje významně. Od vegetace se očekává především snížení teploty vzduchu v letním období. Toto snížení spočívá v lepším odrazu slunečního záření od rostlin zpět do atmosféry, v pohlcení části energie při fotosyntéze a odpařování vody a především stíněním, které snižuje podíl slunečního záření dopadajícího na zpevněné plochy. Velká prašnost ve městech způsobuje depozici částic prachu na listech a tím ucpávání průduchů. List se tak nemůže ochlazovat odpařováním vody a dochází k jeho přehřívání. Prach často obsahuje škodliviny. Znečištění atmosféry škodlivými plyny má na dřeviny přímý i nepřímý vliv. Dřeviny mohou negativně ovlivňovat prašnost prostředí i tvorbou pylu nebo ochmýřenými semeny. Pylové částice a chmýří se dostávají do vzduchu a vyvolávají alergie. Danému problému lze opět předejít správným výběrem stromů (KOLAŘÍK 1994).

Myšlenka produkce potravin ve městech se zdá být v nápadném kontrastu s charakterem městského života. Ovocné sady jsou svým charakterem velmi vhodné pro městské zemědělství. Vedle zajišťování produkce ovoce poskytují celou řadu funkcí ekosystémových a kulturních. Ovocné sady rovněž poskytují prostor pro rozmanitý výskyt rostlinných druhů, tím se pozitivně ovlivňuje fungování zdejšího ekosystému a zvyšuje potenciál pro rekreační využití (WINKLER et al. 2023). Představují také důležitou a nedílnou součást kulturní krajiny a historického dědictví. Přestože v dnešní době z venkovské krajiny často mizí, v některých případech zůstávají v úkrytu městské zástavby jako parky či místa odpočinku (JANEČEK et al. 2019). Kvalita ovoce se obvykle posuzuje podle vzhledových znaků, textury a chuti, ale také podle nutriční hodnoty. Vedle senzorkého hodnocení se využívají i chemické a fyzikálně-chemické metody.

Nejčastěji se pro účely analýz plodů ovocných plodin využívá metod hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS) či atomové absorpční spektrometrie (AAS). Ani jedna z uvedených metod není ovšem vzhledem k destruktivní přípravě vzorků vhodná pro analýzu povrchu ovocných plodin. Potenciální variantou by mohla být rentgenová fluorescenční spektrometrie (XRF). Metoda je založená na excitaci atomů ve vzorku pomocí rentgenového záření a následné emisi charakteristického rentgenového záření, jehož energie a intenzita jsou analyzovány za účelem stanovení prvkového složení materiálu. Nicméně primárně kvůli nedostatečnému prostorovému rozlišení není ani tato metoda vhodná pro analýzu povrchu plodů ovoce.

I metoda SEM/EDX využívá k analýze prvkového složení charakteristického rentgenového záření, nicméně hlavním rozdílem oproti XRF je způsob excitace, respektive použitý zdroj záření. V případě SEM/EDX je k tomuto účelu využíváno vysoce zaostřeného elektronového svazku, který umožňuje analýzu velmi malých oblastí vzorku. Ve srovnání se zmíněnými metodami tkví výhoda metody SEM/EDX primárně v tom, že umožňuje vysoké prostorové rozlišení a analýzu jednotlivých částic zachycených na povrchu plodů, čímž kombinuje detailní obraz s chemickým složením. Kombinací údajů o morfologii a prvkovém složení jednotlivých částic lze dospět nejen k informacím o jejich potenciálním zdroji (BORA et al. 2021), ale také lze usuzovat o zdravotních dopadech na lidský organismus. Čím je částice menší, tím hlouběji proniká do dýchacího systému, přičemž částice PM₁ mohou pronikat až do krevního oběhu (PRIOR et al. 2022). Co se týče analýz povrchových vrstev plodů, v souvislosti se slupkami ovoce je v posledních letech zkoumána např. účinnost adsorbce znečišťujících látek na povrchu ovoce z kontaminovaných vod (RAHMAN et al. 2023) nebo vliv fermentace na chemickou, organoleptickou a mikrobiologickou kvalitu povrchu ovoce (UTAMA et al. 2022). V souvislosti s pasivním biomonitorem kvality ovzduší není tato metoda prozatím široce používána, a to primárně z důvodu chybějící metodiky.

Metoda SEM/EDX má ovšem i svá omezení, jako např. sníženou citlivost vůči lehkým prvkům (vodík, lithium, beryllium, bor a uhlík s dusíkem). Zároveň není tato metoda schopna poskytnout informace o struktuře látek. Jisté omezení s sebou přináší i interakční objem – elektrony primárně v závislosti na urychlovacím napětí a atomovém čísle vzorku penetrují od několika set nanometrů až po několik mikrometrů do hloubky analyzovaného materiálu, což může být problémem hlavně u velmi drobných částic (např. saze). Z uvedeného vyplývá, že metoda SEM/EDX není vhodná např. pro identifikaci polyaromatických látek, naopak je vhodná pro analýzu anorganických prvků a suspendovaných částic.

MATERIÁL A METODY

Principem metody SEM/EDX, která byla použita za účelem tvorby metodiky analýzy znečišťujících látek deponovaných z ovzduší na povrchu plodů ovoce, je interakce elektronového svazku (urychlených elektronů) se vzorkem (atomy), přičemž výsledkem této interakce je celá řada signálů, které se dále detekují a převádějí na digitální signály, které se následně počítačově zpracovávají. Primárně jsou detekovány sekundární elektrony (SE), zpětně odražené elektrony (BSE) a charakteristické rentgenové záření. SE poskytují primárně informaci o topografii povrchu, BSE na základě kontrastu (dle atomového čísla) poskytují informaci o materiálovém složení a zachycením charakteristického rentgenového záření EDX detektorem je zjištěno prvkové složení. Výhodou této metody je získání jak obrazových dat (snímků), tak i informací o prvkovém složení. Metoda se řadí mezi kvalitativní a semikvantitativní.

Za účelem tvorby metodiky byly použity plody třešně obecné (lokalita sběru: ul. Emy Destinové, Hradec Králové, okraj městské zástavby, datum sběru 11. 6. 2025) a plody višně obecné (lokalita sběru: ulice Višňová, Hradec Králové, okrajová část města, datum sběru: 19. 6. 2025). V prvním kroku bylo 102,2 g třešní bez stopek umístěno spolu s 250 ml destilované vody do kádinky. Následovalo 5 min promíchávání a následná filtrace. Filtrace probíhala postupně přes tři označené sklovláknité filtry o průměru 47 mm (VWR International s.r.o.), které byly umístěny do skleněných nálevek a následně do kádinek. Postupně bylo přes každý filtr přefiltrováno 50 ml destilované vody, kterou byly plody třešně obecné omývány.

Analogicky probíhal tento krok s plody třešně obecné bez stopek. Filtry byly následně sušeny při teplotě 50 °C v sušárně po dobu 3 hodin. Z filtrů byla vyříznuta kruhová plocha o průměru 12 mm, která byla pomocí vodivého uhlíkového terčiku (Agar Scientific Ltd.) připevněna na držáky vzorků. Takto připravené vzorky byly pro zajištění elektrické vodivosti poprášeny nanovrstvou zlata v naprašovačce (Quorum Technologies Ltd.) po dobu 60 s a následně byly vloženy do komory skenovacího elektronového mikroskopu MIRA3 (TESCAN GROUP, a.s.). Parametry, jako je urychlovací napětí, pracovní vzdálenost a další, byly upraveny nebo nastaveny pro dosažení optimálního zobrazení a analýzy pro každý vzorek. Vzorky byly pozorovány v režimu SE a BSE. Sledována byla v prvním kroku morfologie částic - velikost, tvar, povrchová struktura, tendence k agregaci či aglomeraci aj. Dále byla u několika vybraných částic provedena EDX analýza ke zjištění prvkového složení částic.

Zvolena byla tzv. bodová analýza (PointID), jejíž vyhodnocení probíhalo v softwaru AZtec (Oxford Instruments plc). Principem této analýzy je zasažení vzorku fokusovaným elektronovým svazkem v definovaném bodě. Vzniká charakteristické rentgenové záření, které je specifické pro každý prvek. Detektor EDX toto záření zachytí a software AZtec poté provádí analýzu. Výstupem této analýzy jsou hmotnostní procenta (wt%) vyjadřující, kolik hmotnosti daného prvku tvoří celkovou hmotnost analyzované oblasti. Už na první pohled bylo ovšem patrné, že částice byly v tomto případě vmezeřeny do struktury sklovláknitého filtru, čímž byla ztížena jak jejich identifikace, tak i EDX analýza, viz. Obr. 1. Z tohoto důvodu nebylo možné provést ani tzv. feature (automatickou) analýzu. Ta funguje na principu segmentace obrazu, kde je v prvním kroku pořízen snímek vzorku v režimu BSE, následně software analyzuje histogram jasu obrazu a na základě nastaveného prahu jasu oddělí pixely patřící částicím od pixelů patřících pozadí. Tento typ analýzy poskytuje komplexnější přehled o částicích ve vzorku, a to nejen vizuální, ale také kvantitativní a chemický. Nicméně v tomto případě už při bodové analýze docházelo v některých případech ke vzniku smíšených spekter, jelikož nebylo možné oddělit spolehlivě signál pocházející z vláken filtru od signálu samotných částic. Z tohoto důvodu byla zvolena jiná metoda přípravy vzorků.

Další testovanou metodou přípravy vzorku byla přímá analýza povrchu plodů třešně obecné a višně obecné, tedy slupek (Obr. 2a, b). K testování byly použity neomyté plody. Slupky byly pomocí skalpelu opatrně vypreparovány z ovoce, dále byly sušeny přirozenou cestou na vzduchu za laboratorních podmínek v čistém prostředí a poté byly pomocí uhlíkového terčiku připevněny k držákům vzorků. Následovalo pokovení nanočásticemi zlata pomocí naprašovačky a vložení do komory mikroskopu. Po nastavení vhodných parametrů byly částice deponované na slupce analyzovány z pohledu jejich morfologie a opět následovala bodová analýza vybraných částic. Povrch slupek se pod mikroskopem jevil jako vhodnější a přehlednější pro analýzu částic, nicméně zde hrálo roli technické hledisko, resp. povaha vzorku – pro EDX analýzu suspendovaných částic je běžně používáno vyšší urychlovací napětí (min. 15 kV). Je to kompromis mezi interakčním objemem, potažmo rozlišením obrazu a dostatečnou hodnotou pro excitaci rentgenových čar většiny běžných prvků. Zároveň je to hodnota, při které již dochází k radičnímu poškození organických materiálů. Mezi hlavní mechanismy radičního poškození patří ionizace, která se projevuje např. jako deformace vzorku a jeho zahřívání. V tomto případě byla v souvislosti s radičním poškozením pozorována částečná degradace slupek, dále artefakty a strukturální změny (viz. Obr. 2 a, b). Byla provedena bodová analýza vybraných částic, která byla díky rovnějšímu povrchu slupek ve srovnání se sklovláknitým filtrem a chybějícímu stínění vláken přesnější. Nicméně nebylo možné, stejně jako v případě použití sklovláknitých filtrů, podrobit vzorek feature analýze. Degradace povrchu vzorku totiž částečně vedla ke ztrátě kontrastu a znemožnila by tedy rozlišení morfologických rysů. Bylo tedy přistoupeno k testování třetí metody přípravy vzorků.

V rámci třetí testované metody byly částice deponované na povrchu plodů třešně obecné a višně obecné přeneseny na polykarbonátový filtr (Isopore™, Merck, s.r.o.) prostřednictvím otisku, respektive valivým pohybem plodů ovoce po polykarbonátovém filtru, čímž došlo k mechanickému přenesení částic (Obr. 3a, b). Hlavní

výhodou polykarbonátového filtru je jeho planární povrch, který umožňuje přehledně pozorovat a analyzovat přítomné částice. Další výhodou je jeho chemická odolnost a odolnost vůči deformaci. Z takto připraveného filtru byla opět vyříznuta kruhová plocha o průměru 12 mm, vzorek byl přenesen na uhlíkový terčík a držák vzorku, byl upraven pokovením a přenesen do komory mikroskopu. Už na první pohled bylo patrné, že částice jsou na polykarbonátovém filtru ve srovnání s předešlými dvěma metodami dobře rozlišitelné, jasné viditelné a dostatečně kontrastní. V prvním kroku byly částice opět pozorovány z hlediska jejich morfologických vlastností a následně byla provedena bodová analýza vybraných částic. Bylo zároveň patrné, že další výzvou bude optimalizovat způsob přenosu částic deponovaných na povrch plodů ovoce na polykarbonátový filtr tak, aby byly částice přeneseny co nejvíce rovnoměrně. Ačkoli je možné provést feature analýzu, která je robustní a dokáže poskytnout statistické informace o distribuci velikosti částic, jejich složení, počtu a klasifikaci, i na nerovnoměrně nanesených polykarbonátových filtrech, může tím docházet k výsledné nižší statistické spolehlivosti a přesnosti analýzy. Z důvodu vážné technické poruchy na skenovacím elektronovém mikroskopu, která znemožnila jeho používání, nebylo možné feature analýzu tohoto vzorku provést. Tato skutečnost však nevylučuje proveditelnost této analýzy.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Ve vzorku připraveného z plodů třešně obecné bez stopek bylo pomocí skenovacího elektronového mikroskopu pozorováno, že zde dominují částice nepravidelného tvaru spadající do hrubé frakce (2,5 - 10 μm) (Obr. 1). Obecně mají tyto částice vyskytující se v ovzduší nižší toxicitu, než jemné částice a většinou se zachytí v horních cestách dýchacích, kde přesto zvláště u citlivých jedinců mohou způsobit podráždění sliznic, alergické reakce či záněty. Částečně dochází i k požití těchto částic, tím se tak dostávají do trávicího traktu, kudy jsou dominantně vyloučeny z těla. Některé látky adsorbované na povrchu částic (těžké kovy, polycyklické aromatické uhlovodíky - PAU) mohou být ovšem absorbovány do krevního oběhu.

Kromě sledování morfologických parametrů vybraných částic (rozměr, tvar, povrch) byla provedena bodová EDX analýza vybraných částic. Z té vyplynulo, že některé částice obsahují poměrně vysoké zastoupení prvků křemíku, barya, sodíku, zinku, hliníku, draslíku a hořčíku, viz. Tabulka 1. Jedním z potenciálních zdrojů těchto částic by mohla být vzhledem k uvedené kombinaci prvků v částicích např. nedaleká střelnice, která se nachází asi 300 m od místa sběru plodů třešní. Toto elementární složení bývá typické pro střelivo a zbytky po výstřelu.

Kvůli vysokému počtu vláken filtru nebyl takto připravený vzorek vhodný k podrobení feature analýzy částic, která by vedla k robustnějším informacím o distribuci velikosti přítomných částic, počtu či jejich klasifikaci. Tím nebylo možné statisticky porovnat vzorky připravené z plodů třešní bez stopek s plody třešní se stopkami. Zároveň představuje tento postup přípravy vzorků inherentní omezení, a to primárně z toho důvodu, že nezaručuje 100% zachyt znečišťujících látek. Předpokládáme, že v mikropórech ovoce dochází v určité míře k zachytávání některých částic. Zároveň zde existuje riziko, že některé pevněji vázané částice (spaliny, těžké kovy) či PAU nejsou tímto způsobem z povrchu plodů ovoce zcela uvolněny. Do budoucna tedy plánujeme otestovat efektivitu mechanického ořezu (kartáčem), případně ultrazvukové disperze.



Obr. 1 Snímek skloláknitého filtru – vzorku připraveného z plodů třešně obecné bez stopek pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem za použití detektoru BSE

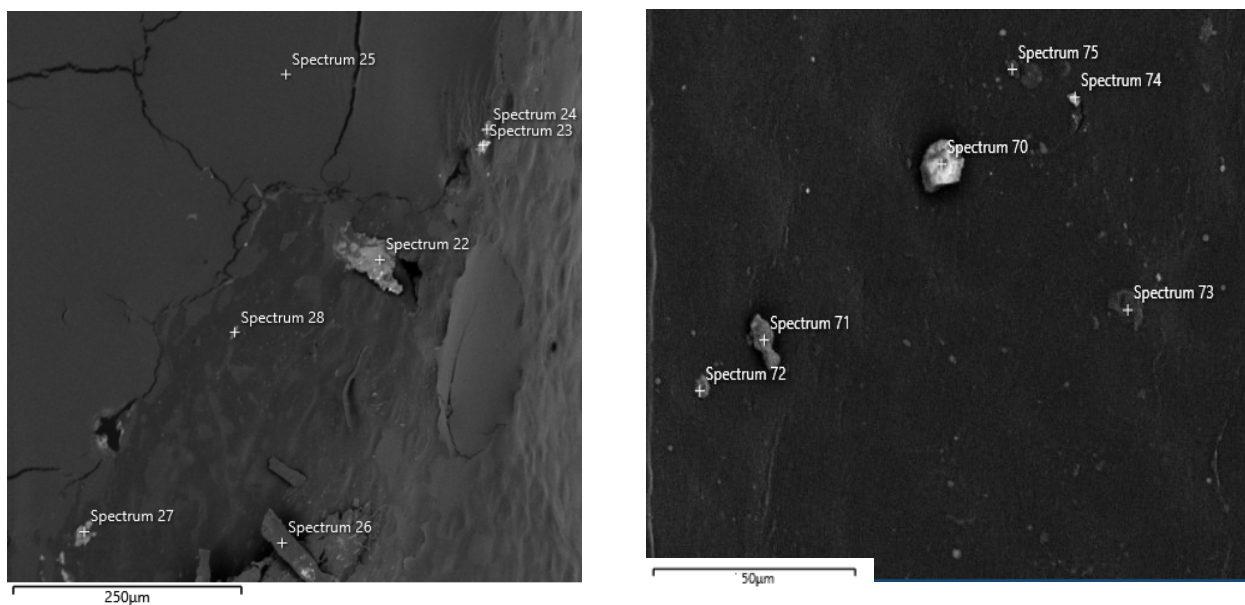
Fig. 1 SEM image of a glass fiber filter – a sample prepared from stalkless sweet cherry (*Prunus avium*) fruits – acquired using a backscattered electron (BSE) detector

Tab. 1 EDX bodová analýza vybraných částic vzorku připraveného z plodů třešně obecné bez stopek
Tab. 1 EDX point analysis of selected particles from a sample prepared from stalkless sweet cherry fruits

	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Zn	Ba
Spectrum 5	41.05	39.04	3.15		2.15	12.82	1.79			
Spectrum 6	5.46	45.79	5.44	0.37	2.81	26.66	2.76	1.09	3.19	6.44

In %Wt

Ve vzorku připraveného preparací slupky z plodů třešně obecné bylo zjištěno, že se v něm ve velké míře vyskytují částice nepravidelného tvaru s ostrými hranami a byly pozorovány i menší částice se zaoblenými hranami (Obr. 2a). Velikost pozorovaných částic se zdála být v širším rozsahu než v předchozím vzorku – vyskytovala se hrubá i jemná frakce. Provedená bodová EDX analýza vybraných částic (Tab. 2) odhalila, že některé částice jsou bohaté na železo a chrom, jiné obsahují poměrně vysoké zastoupení hliníku, křemíku a mědi. Vzhledem ke tvaru a poměru prvků vyskytujících se v těchto částicích by se mohlo jednat o tzv. nevýfukové emise automobilů, v tomto případě o otěrové částice z brzd a brzdového obložení. Už během bodové EDX analýzy bylo pozorováno, že dochází k degradaci povrchu slupky vlivem použitých parametrů mikroskopu, tvořily se bubliny a praskliny. V rámci metodického zdokonalení analýzy vzorků je plánováno otestovat na slupkách ovoce režim nízkého vakua (LV) v elektronovém skenovacím mikroskopu, díky kterému by mělo docházet ke snížení tepelné zátěže vzorku a minimalizaci poškození vzorku zářením.



Obr. 2 Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu za použití detektoru BSE představující částice deponované na povrchu plodů třešně obecné (2a) a višně obecné (2b). V pozadí je patrná struktura slupky včetně její částečné degradace vlivem elektronového svazku

Fig. 2 Scanning electron image acquired using a backscattered electron (BSE) detector, particles deposited on the surface of sweet cherry fruits (2a) and sour cherry (*Prunus cerasus*) fruits (2b). The background shows the skin structure, including signs of partial degradation caused by electron beam irradiation

Tab. 2 EDX bodová analýza vybraných částic vzorku povrchu plodů třešně obecné
Tab. 2 EDX point analysis of selected particles deposited on the surface of sweet cherry fruits)

Spectrum Label	C	O	Al	Si	Cr	Fe	Cu	Ag
Spectrum 22	23.74	6.94	63.28				4.05	1.99
Spectrum 23	12.30	2.44		0.67	8.37	76.22		
Spectrum 24	16.77	4.88	73.56	1.02			3.77	
Spectrum 28	31.74	6.93	57.37	0.92			3.04	

In %Wt

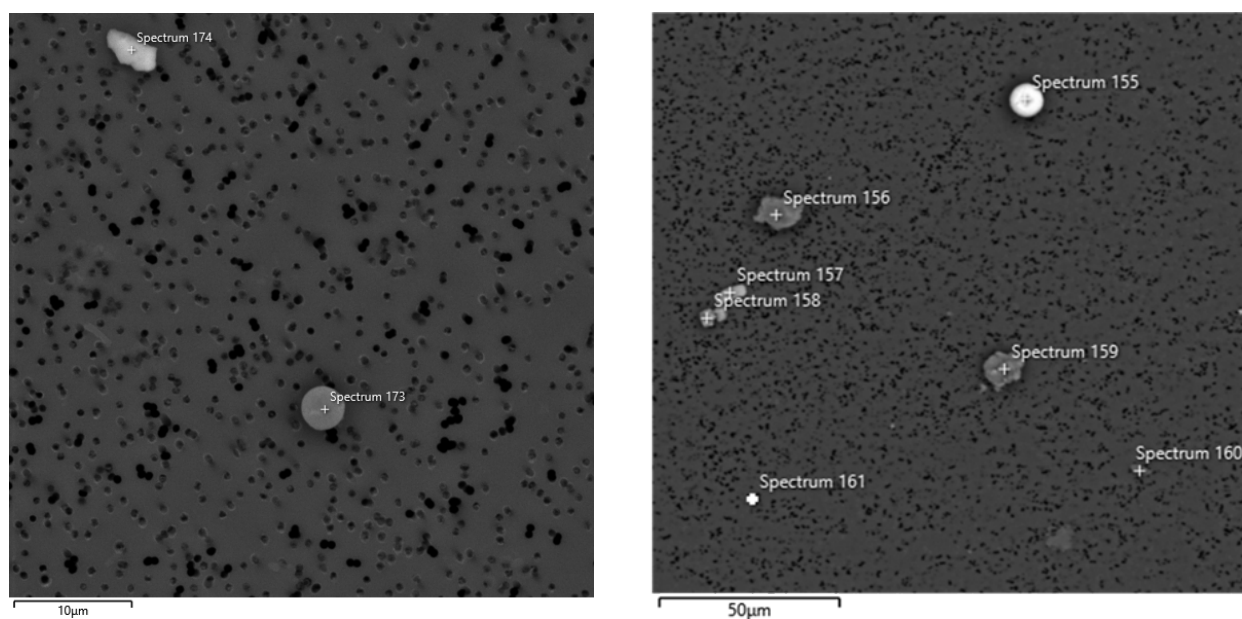
Ve vzorku připraveného preparací slupky z plodů višně obecné byla pozorována poměrně široká škála tvarů i velikosti částic – od velmi drobných sférických částic o velikosti kolem 1 μm po částice nepravidelného tvaru s pórovitým povrchem o velikosti kolem 10 μm (obr. 2b). Bodovou analýzu vybraných částic představuje Tab. 3. Je z ní patrné, že řada částic byla bohatých na železo anebo se přímo jednalo o oxidy železa. Takové částice mohou mít jak antropogenní, tak i přírodní původ. V tomto případě se, vzhledem k absenci dalších prvků jako např. antimonu nebo mědi, jedná spíše o minerální částice. Dále se vyskytovaly částice uhličitanu vápenatého s nepravidelným tvarem a velikostí kolem 10 μm . Takové částice mívají převážně přírodní původ (eroze půdy a hornin), případně může jít např. o emise ze stavebních prací probíhajících v okolí. Vyskytovaly se i částice smíšených hlinitokřemičitanů představující s vysokou pravděpodobností minerální prach.

Tab. 3 EDX bodová analýza vybraných částic vzorku povrchu plodů višně obecné
Tab. 3 EDX point analysis of selected particles on the surface of sour cherry fruits

Spectrum Label	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Spectrum 70	40.40	25.16						34.44
Spectrum 71	32.47	44.82					22.71	
Spectrum 72	52.88	34.24	0.54	3.45	6.42	0.90		1.56
Spectrum 73	77.44	22.07					0.49	
Spectrum 74	24.19	22.84						52.97

In %Wt

Ve vzorku připraveného přenesením částic deponovaných na povrchu plodů třešně obecné na polykarbonátový filtr byly pozorovány jak částice hrubé, tak i jemné frakce, které byly tvarově velmi variabilní. Tab.4 představuje výsledky z bodové analýzy vybraných částic. V případě částice sférického tvaru (Obr. 3a) může vzhledem ke zjištěnému prvkovému složení a morfologii jít např. o částici vzniklou otěrem pneumatik. Tyto částice často mívají vzhledem k otěrům materiálů za vysokých teplot kulovitý tvar a typický je pro ně obsah síry, která se používá při vulkanizaci kaučuku. S jistotou by se ale tento předpoklad dal potvrdit až po doplňující analýze, např. Ramanovou spektroskopií. Částice byly na polykarbonátovém filtru velmi dobře rozeznatelné a měly dostatečný kontrast, což je jeden ze základních předpokladů pro možnost provedení robustnější feature analýzy. Z důvodu technické závady na elektronovém mikroskopu ovšem nemohla být tato analýza provedena a byla proto odložena do doby, než bude závada opravena.



Obr. 3 Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu za použití detektoru BSE představující částice deponované na povrchu plodů třešně obecné (3a) a višně obecné (3b) po přenosu částic na polykarbonátový filtr
Fig. 3 Scanning electron image acquired using a backscattered electron (BSE) detector, particles deposited on the surface of sweet cherry fruits (3a) and sour cherry fruits (3b) after being transferred onto a polycarbonate filter

Tab. 4 EDX bodová analýza vybraných částic vzorku povrchu plodů třešně obecné po přenosu částic na polykarbonátový filtr

Tab. 4 EDX point analysis of selected particles on the surface of sweet cherry fruits after the transfer of particles onto a polycarbonate filter

Spectrum Label	C	O	Al	Si	S	K
Spectrum 173	87.10	11.86			1.04	
Spectrum 174	33.73	42.86	4.55	13.20		5.67

In %Wt

Podobně jako v případě předchozího vzorku, i ve vzorku připraveného přenesením částic deponovaných na povrchu plodů višně obecné byla pozorována široká variabilita částic co se velikosti i tvaru týče (Obr. 3b). Ve vzorku byly pozorovány i sférické částice s velikostí kolem 8 μm , které obsahovaly ve vysoké koncentraci železo a jednalo se tedy pravděpodobně o oxid železa. Vzhledem k velikosti, tvaru a složení je zdrojem těchto částic s vysokou pravděpodobností antropogenní činnost – průmysl nebo doprava (brzdový prach). Ve vzorku se též nacházely částice nepravidelného tvaru hrubé frakce obsahující zároveň molybden a vápník. Vzhledem k tomu, že molybden se využívá spolu s vápníkem jako přísada do motorových olejů nebo jako součást katalyzátorů, naznačuje to v tomto případě spíše antropogenní zdroj, a to pravděpodobně průmysl nebo dopravu. Kromě toho se ve vzorku hojně vyskytovaly částice smíšených hliníkokřemičitanů, jejichž zdrojem je pravděpodobně resuspenze půdy. Fetaure analýza, která by umožnila podrobnější morfologickou charakterizaci a klasifikaci částic, byla kvůli technické závadě na elektronovém mikroskopu dočasně odložena.

Tab. 5 EDX bodová analýza vybraných částic vzorku povrchu plodů višně obecné po přenosu částic na polykarbonátový filtr

Tab. 5 EDX point analysis of selected particles on the surface of sour cherry fruits after the transfer of particles onto a polycarbonate filter

Spectrum Label	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Mo
Spectrum 155	4.25	33.24								62.51	
Spectrum 156	72.58	16.55							9.15		1.72
Spectrum 157	22.38	50.06		1.05	8.71	13.18		2.17		2.46	
Spectrum 159	59.21	27.36	0.32	0.32	1.68	8.28	0.39	0.38	0.18	1.87	
Spectrum 161	67.68	27.52				4.80					

In %Wt

ZÁVĚR

Bylo zjištěno, že metoda SEM/EDX má velký potenciál pro analýzu znečišťujících látek, primárně suspendovaných částic, deponovaných na povrchu plodů ovoce, a to hlavně díky vysokému rozlišení a schopnosti analyzovat morfologii částic spolu s prvkovým složením. Nejvhodnější variantou přípravy vzorků byl otisk povrchu plodů ovoce na polykarbonátový filtr, přestože ještě bude nutné optimalizovat tento způsob tak, aby byly částice na polykarbonátový filtr přeneseny rovnoměrněji. Je nutné brát v potaz i limity této metody, jako např. omezenou detekci lehkých prvků či chybějící informace o struktuře látek a jejich přesné kvantifikaci. Z tohoto hlediska se jako žádoucí jeví synergicky propojit tuto metodu s např. ICP –MS či AAS a získat tak komplexnější obraz o znečišťujících látkách deponovaných na povrchu plodů ovoce v městských aglomeracích. Zároveň bude třeba přistoupit k analýze vysokého počtu vzorků z různých městských lokalit, aby byla zvýšena statistická přesnost a reprezentativnost měření.

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci projektu SS07020449 „Omezení negativních dopadů meteorologických extrémů (teploty, větru a srážek) na veřejné zdraví a životní prostředí ve velkých aglomeracích“.

LITERATURA

- BORA, J. et al. 2021. Morphology and mineralogy of ambient particulate matter over mid-Brahmaputra Valley: Application of SEM–EDX, XRD, and FTIR techniques. *SN Applied Sciences*. 3(137), s. 1–18. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04117-8>.
- ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. 2023. *Elektronický meteorologický slovník (eMS)* [online]. Praha: ČMS. [cit. 2025-08-21]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>.
- DOBROVOLNÝ, P. 2012. *Klima Brna: víceúrovňová analýza městského klimatu*. Brno: Masarykova univerzita. 195 s. ISBN 978-80-210-6029-6.
- HARRISON, R. M. 2020. Airborne particulate matter. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 378(2183), s. 20190319. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0319>.
- JANEČEK, V. et al. 2019. Rural agroforestry artifacts in a city: determinants of spatiotemporally continuous fruit orchards in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*. 41, s. 33–38.
- KOLAŘÍK, J. 1994. *Strom ve městě*. Brno: EDEN.
- OKE, T. R. et al. 2017. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. 546 s. ISBN 978-1-107-42953-6.
- PRYOR, J. T., COWLEY, L. O. a SIMONDS, S. E. 2022. The physiological effects of air pollution: particulate matter, physiology and disease. *Frontiers in public health*. 10, s. 882569. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.882569>.
- RAHMAN, A. et al. 2023. Investigation of efficient adsorption of toxic heavy metals (Chromium, Lead, Cadmium) from aquatic environment using orange peel cellulose as adsorbent. *Sustainability*. 15(5), s. 4470. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su15054470>.
- TONEV, P. 2020. *Co je město? Vývoj měst v historické a současné perspektivě* [online]. Brno: Masarykova univerzita. [cit. 2025-08-02]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/econ/sm/management_rozvoje/media/prezentace/02_co_je_mesto.pdf.
- UTAMA, C. S. et al. 2022. Scanning electron microscope energy dispersive X-Ray, chemical, organoleptic, and microbiological quality of banana peel (*Musa paradisiaca* L.) at different fermentation durations. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 9(3), s. 383–395.
- WINKLER, J. et al. 2023. Urban agriculture – Ecosystem and cultural functions of orchard vegetation. In: *Public recreation and landscape protection: with environment hand in hand?* Brno: Mendel University in Brno, s. 360–363. ISBN 978-80-7509-904-4.

DLOUHODOBÁ MĚŘENÍ PODKORUNOVÝCH SRÁŽEK V DUBOVÝCH POROSTECH

David DUŠEK¹ – Jiří NOVÁK¹

¹Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady. Výzkumná stanice Opočno, Na Olivě 550, 517 73 Opočno, Česká republika, dusek@vulhmop.cz

ABSTRACT

Dušek, D., Novák, J.: Long-term measurement of throughfall in oak stands

The study evaluates the long-term impact of thinning on stand structure and canopy interception in an experimental oak stand established in eastern Bohemia. The experiment was initiated in 2003 in a 17-year-old artificially regenerated stand with an initial density of approximately 10,000 individuals·ha⁻¹. Two treatments were assessed: a control plot without thinning and a thinned plot subjected to a 20% reduction of basal area at age 19 years (2005). Precipitation measurements included throughfall and open-site rainfall during the growing season (May–September) from 2005 to 2022. Results indicate that thinning reduced canopy interception for about eight years after the intervention; subsequently, the effect diminished, and the thinned variant showed higher interception than the control. The overall effect of thinning on the water balance of oak stands appears limited, given the species' deep root system and its occurrence on water-rich soils.

Key words: water cycle, thinning, interception

ÚVOD

Lesní ekosystémy představují integrální složku hydrologického cyklu a hrají zásadní roli v regulaci regionálního i lokálního klimatu. V kontextu probíhající globální změny klimatu, která se projevuje rostoucími extrémními událostmi, jako jsou dlouhodobá sucha a přívalové srážky, se adaptabilní a regulační funkce lesů stávají ještě důležitějšími. Porostní výchova je opatření, který může do značné míry ovlivnit budoucí stabilitu, zdravotní stav a odolnost lesních porostů, mimo jiné také úpravou vodního režimu.

Hlavním a nejvíce zřejmým hydrologickým efektem porostní výchovy v lesních porostech je snížení porostní interceptce. Jak v listnatých, tak v jehličnatých porostech se interceptce různí ve vztahu k hustotě porostu (KOMATSU et al. 2007). Druhá variabilita se týká i hodnot stoku po kmeni (LIMPERT, SIEGERT 2019). Výchovný zásah, který zahrnuje odstranění části stromů, vede ke snížení celkové hustoty porostu a k narušení jeho korunového zápoje. Následkem je snížení indexu listové plochy (LAI) na úrovni celého porostu. Kromě snížení interceptce dochází výchovou také ke změně porostního mikroklimatu. Vzniklé mezery v porostním zápoji umožňují lepší pronikání slunečního záření a proudění vzduchu do spodních vrstev porostu. To ovlivňuje teplotní a vlhkostní režim a následně i koloběh živin prostřednictvím ovlivnění rychlosti rozkladu opadu.

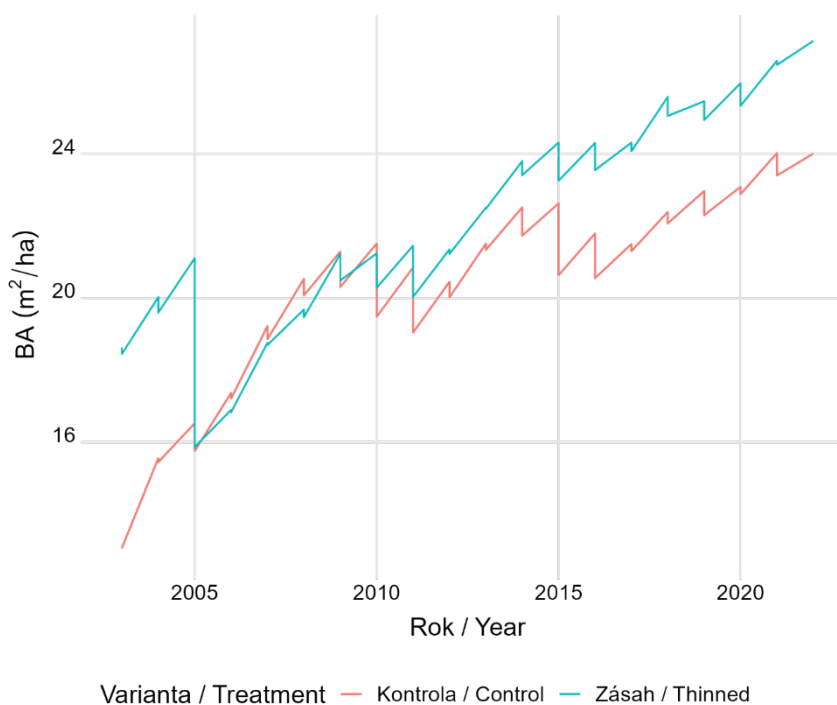
V případě hluboko kořenícího dubu sice nejsou atmosférické srážky tak významným faktorem jako u mělce kořenících dřevin (CHROUST 1997), přesto je poznání závislosti mezi porostní výchovou a vodní bilancí předpokladem k racionálnímu managementu v porostech této dřeviny. V příspěvku jsou vyhodnoceny údaje o podkorunových srážkách ve vychovávaném a nevychovávaném porostu dubu ve věku 19–37 let (roky 2005 až 2022).

MATERIÁL A METODY

Experiment byl založen v roce 2003 v 17letém dubovém porostu (*Quercus* sp.), vzniklém z umělé obnovy s počáteční hustotou přibližně 10 000 jedinců·ha⁻¹. Tři srovnávací plochy o výměře 0,08–0,09 ha se nacházejí na majetku obhospodařovaném Lesy Colloredo-Mansfeld s.r.o. ve východních Čechách v katastrálním území obce

Běstviny (okres Rychnov nad Kněžnou), v lesní přírodní oblasti 26 – Předhoří Orlických hor. Plochy jsou situovány v nadmořské výšce 300 m na rovinatém reliéfu. Stanovištní poměry odpovídají živnému stanovišti lesního typu 2H4 (VIEWEGH 2002), hospodářskému souboru 255 – dubové hospodářství živných stanovišť nižších poloh. Geologický podklad tvoří opuka, půdním typem je luvizem.

Pro účely studie byly hodnoceny dvě plochy: kontrolní (0,08 ha) bez výchovného zásahu a zásahová (0,09 ha), na níž byl v roce 2005 (věk porostu 19 let) realizován výchovný zásah spočívající v redukci výčetní kruhové základny o 20 %. V době založení vykazovala kontrolní plocha vyšší výčetní kruhovou základnu (o cca 5,5 m²·ha⁻¹) než plocha zásahová. Zásah vedl k vyrovnání hodnot mezi variantami; tento stav přetrval do roku 2010 (věk porostu 24 let). Následně se rozdíl mezi variantami zvýšil ve prospěch zásahové plochy a tento trend přetrval až do poslední inventarizace v roce 2022 (věk porostu 37 let) (obr. 1).



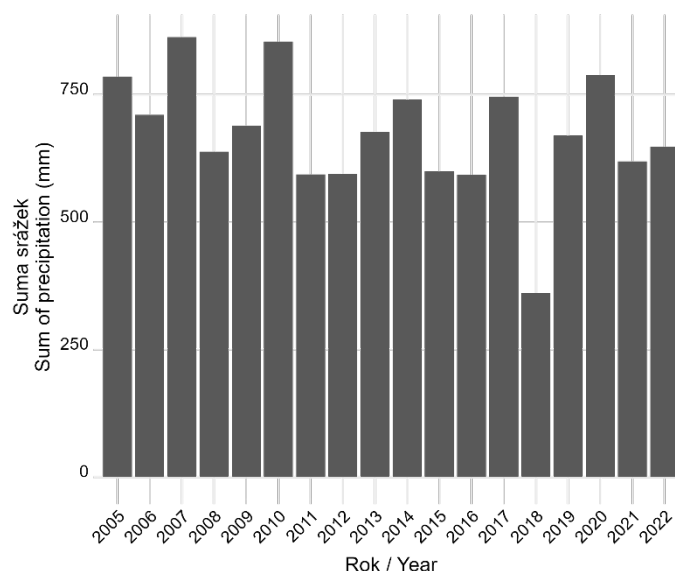
Obr. 1 Vývoj výčetní kruhové základny experimentálního dubového porostu. Výchovný zásah byl realizován v roce 2005 ve věku 19 let.

Fig. 1 Development of basal area in the experimental oak stand. A thinning intervention was implemented in 2005, at stand age 19 years.

Podkorunové srážky byly během vegetačního období (květen–září) zachycovány prostřednictvím zachytných koryt (0,2 × 2,5 m, tj. 0,5 m²), instalovaných v počtu pěti na každé ploše. Současně byly jedním srážkoměrem měřeny srážky na otevřené ploše mimo porost. Odběr byl prováděn v týdenních až měsíčních intervalech. Měření na otevřené ploše probíhalo celoročně, tedy i mimo vegetační období.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Roční srážkové úhrny zaznamenané na otevřené ploše se v letech 2005–2022 pohybovaly od 361 mm (2018) do 863 mm (2007). Průměr činil 676 mm (obr. 2).

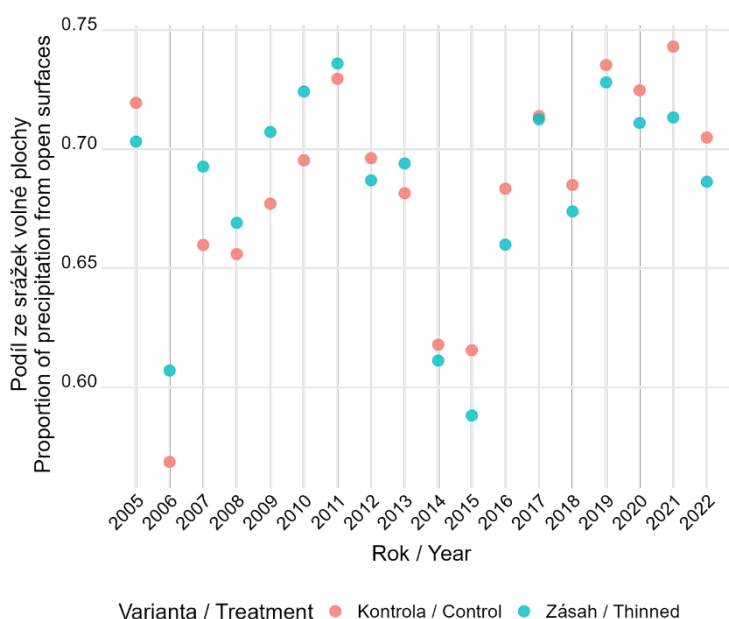


Obr. 2 Roční srážkové úhrny na otevřené ploše v letech 2005–2022.

Fig. 2 Annual precipitation totals recorded in the open site between 2005 and 2022.

Podkorunové srážky během vegetačního období představovaly v hodnoceném období 57–74 % otevřené plochy na kontrolní variantě a 59–74 % na zásahové. Průměr činil 68 % na obou variantách.

Výchovný zásah z roku 2005 způsobil snížení intercepce na zásahové ploše od roku 2006 do roku 2014 (s výjimkou 2013). Od roku 2015 však zásahová plocha vykazuje setrvale nižší podkorunové srážky (vyšší intercepci) než kontrolní varianta, což koresponduje s vývojem výčetní kruhové základny (obr. 3).



Obr. 3 Podíl srážek pod korunovým zápojem během vegetačního období vztažený k srážkám na otevřené ploše – kontrolní a zásahová varianta.

Fig. 3 Proportion of throughfall during the growing season relative to open-area precipitation in the control and thinned variants.

Vlivem výchovných zásahů na vodní bilanci dubových porostů se v podmínkách ČR podrobně věnoval CHROUST (1997). Podle jeho zjištění činí průnik atmosférických srážek korunami v dubových tyčkovinách v období olíšťování dubu (květen) ca 77 % a později klesá až na hodnoty ca 53–56 % v srpnu a září. MITCHERLICH (1971) uvádí pro dubový porost ve věku 17 let 77 % podkorunových srážek ve vegetačním období a MOLČANOV (1952)

76 % srážek pro dubové porosty do 30 let. Ve výši intercepce hraje významnou roli i přítomnost podrostu nebo dalších etází, jak sledovali např. (ABE et al. 2017). V dubovém porostu bez spodní etáže (což je případ i našeho experimentu) zjistili intercepci 54 %.

Při interpretaci výsledků je dále třeba zohlednit, že průnik srážek korunami stromů je značně závislý na charakteru a intenzitě srážek. Značnou variabilitu průniku podkorunových srážek v závislosti na intenzitě srážky zjistili SILVA a OKUMURA (1996) v dospělém 60letém dubovém (*Quercus serrata* Thunb.) nebo SLODIČÁK et al. (2011) v případě 7–22letého borového porostu borovice (*Pinus sylvestris* L.). Potvrzuje to i studie LIU et al. (2025) proběhlá v porostech borovice korejské (*Pinus koraiensis* SIEBOLD et ZUCC.). Velkou roli hraje dále věk a dřevinná skladba (včetně stupně smíšení jehličnanů s listnáči), jak zjistili v porostech borovice a buku v Německu BLUME et al. (2022) nebo v Česku v porostech buku, dubu a lípy NOVOSADOVÁ et al. (2023). Tito autoři spolu s dalšími (např. FATHIZADEH et al. 2021 ve studii pro měření podkorunových srážek v dubových porostech mimo vegetaci) také upozorňují na nezbytnost co nejvyššího počtu odběrných míst v porostech a dostatečnou dobu sledování tak, aby do tvorby modelů koloběhu vody v lesích nevstupovala chybná data.

Naše data neumožňují podrobně vyhodnotit celkovou vodní bilanci porostu, také s ohledem na absenci měření stoku po kmeni, který je významný především v mladých porostech s doposud hladkou kůrou na větvích a kmíncích. Hodnoty stoku po kmeni se mohou také významně lišit, např. v dospělých porostech s dubem (*Quercus serrata* Thunb.) mohou dosahovat ve vztahu k srážkám volné plochy 3–10 % (ABE et al. 2017).

ZÁVĚR

Na základě dlouhodobého měření provedeného v mladých dubových porostech lze konstatovat:

- Roční srážkové úhrny na otevřené ploše se v letech 2005–2022 pohybovaly mezi 361 a 863 mm s průměrem 676 mm.
- Podkorunové srážky během vegetačního období činily 57–74 % srážek z otevřené plochy.
- Výchovný zásah z roku 2005 vedl k redukci intercepce na zásahové ploše po dobu osmi let. Následně tento efekt vymizel a zásahová varianta vykazovala vyšší intercepci než kontrolní.
- Celkový vliv výchovných zásahů na vodní bilanci dubových porostů je omezený, což souvisí s hlubokým kořenovým systémem dubu a jeho výskytem na stanovištích bohatých na vodu.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení grantového projektu NAZV QL24020351 „Aktualizace Lesnicko-typologického klasifikačního systému včetně stanovení předpokládaného vývoje lesních vegetačních stupňů s vyhodnocením vlivu mezo a mikroklimatu s ohledem na probíhající klimatické změny a jejich predikce“ a podpory na rozvoj výzkumné organizace č. MZE-RO0123.

LITERATÚRA

ABE, Y., GOMI, T., NAKAMURA, N., KAGAWA, N. 2017. *Field estimation of interception in a broadleaf forest under multi-layered structure conditions*. Hydrological research letters, 11(4): 181–186. doi: 10.3178/hr.11.181

BLUME, T., SCHNEIDER, L., GÜNTNER, A. 2022. *Comparative analysis of throughfall observations in six different forest stands: influence of seasons, rainfall- and stand characteristics*. Hydrological processes, 36:e14461. doi: 10.1002/hyp.14461

FATHIZADEH, O., SADEGHI, S.M.M., PAZHOUHAN, I., GHANBARI, S., ATTAROD, P., SU, L. 2021. *Spatial variability and optimal number of rain gauges for sampling throughfall under single oak trees during the leafless period*. Forests, 12: 585. <https://doi.org/10.3390/f12050585>

SILVA, I.C., OKUMURA, T. 1996. *Throughfall, stemflow and interception loss in a mixed white oak forest (Quercus serrata Thunb.)*. J. For. Res., 1: 123–129. <https://doi.org/10.1007/bf02348189>

CHROUST, L. 1997. *Ekologie výchovy lesních porostů*. VÚLHM-VS OPOČNO. 277 S.

KOMATSU, H., TANAKA, N., KUME, T. 2007. *Do coniferous forests evaporate more water than broad-leaved forests in Japan?* Journal of hydrology, 336(3–4): 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.009>

LIMPERT, K., SIEGERT, C. 2019. *Interspecific differences in canopy-derived water, carbon, and nitrogen in upland oak-hickory forest*. Forests, 10: 1121. DOI:10.3390/F10121121

LIU, Q., ZHOU, Z., LI, X., HAO, X., CUI, Y., SUN, Z., MA, H., LIN, J., MU, C. 2025. *Effects of the light-felling intensity on hydrological processes in a Korean pine (Pinus koraiensis) forest on changbai mountain in China*. Forests, 16: 1050. <https://doi.org/10.3390/f16071050>

MITSCHERLICH, G. 1971. *Wald, wachstum und umwelt*. Band 2. Frankfurt am Main, J. D. Sauerlanders Verlag. 365 s.

MOLČANOV, A. A. 1952. *Gidrologičeskaja rol' sosnovych lesov na pesčanyh počvach*. Moskva, AN SSSR. 486 s.

- NOVOSADOVÁ, K., KADLEC, J., ŘEHOŘKOVÁ, Š., MATOUŠKOVÁ, M., URBAN, J., POKORNÝ, R. 2023. *Comparison of rainfall partitioning and estimation of the utilisation of available water in a monoculture beech forest and a mixed beech-oak-linden forest*. Water, 5: 285. <https://doi.org/10.3390/w15020285>
- SLODIČÁK, M., NOVÁK, J., DUŠEK, D. 2011. *Canopy reduction as a possible measure or adaptation of young Scots pine stand to insufficient precipitation in Central Europe*. Forest Ecology and Management, 262: 1913–1918.
- VIEWEGH, J. 2002. *Přesné určení SLT výzkumných ploch pro výchovu lesa*. Zpráva FLE ČZU, Praha, 1 CD-ROM.

MĚŘENÍ TEPLOTY VZDUCHU A PŮDY A VLHKOSTI VZDUCHU V LESNÍCH POROSTECH V DOKSECH

Petr HORA

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 43, 616 67 Brno, Česko, petr.hora@chmi.cz

ABSTRACT

Hora P.: Measurement of air and soil temperature and air humidity in forests in Doksy

Forest stands create a specific microclimate that is significantly different from open areas. The reason is primarily the structure of the stand - the crown and herbaceous layer change the height of the active surface on which solar radiation falls. From July 2024 to June 2025, measurements of air temperature and humidity and soil temperature were taken in Doksy in a pine forest, in a clearing in the middle of the forest and at the CHMI station. The average annual air temperature in the forest was lower than outside the forest by only a few tenths of °C. The difference between the forest and the area outside the forest was mainly in temperature fluctuations during the day and year, when air temperatures in the forest fluctuate significantly less. The data on relative air humidity are comparable. On an annual average, humidity in the forest is only slightly higher, but there are larger differences in fluctuations during the day and year, where relative air humidity fluctuates less in the forest. Larger differences between forest and non-forest areas occur in soil temperature. While in the forest the average annual soil temperature is very close to the average annual air temperature, on a short-cut lawn the soil is heated directly by solar radiation and the average annual soil temperature can be up to 2 °C higher than the soil temperature. However, on the higher meadow surface such heating of the soil does not occur and the differences between the situation in the clearing and the forest are no longer so great. In the forest, the fluctuation of soil temperature during the day and year is smaller than outside the forest. In winter, the soil temperature in the forest is higher than outside the forest. At the time of the spring onset of vegetation, soil temperatures in the forest and outside the forest are comparable.

Key words: microclimate, pine forest, clearing, weather station

ÚVOD

Meteorologické stanice běžně monitorují počasí na volné ploše bez větších překážek v okolí, na krátce stržéném travním povrchu. Lesní porosty vytvářejí specifické mikroklima, které se výrazně liší od otevřených ploch. Důvodem je především struktura porostu – korunové a bylinné patro mění výšku aktivního povrchu, na který dopadá sluneční radiace. Tím se modifikuje tok energie v lesním prostředí: přímé sluneční záření je omezeno, rozdíly mezi denními a nočními teplotami jsou menší a intenzita větrání (advekce vzduchu) je značně redukována. Výsledkem je stabilnější teplotní režim, vyšší vlhkost a specifické mikroklimatické podmínky, které ovlivňují nejen rostliny, ale i živočichy a půdní procesy. Největší rozdíly bývají v nejteplejší dny roku (Graham et al., 2020; Renaud and Rebetez, 2009). V lese jsou rovněž nižší teploty půdy (Morecroft et al., 1998).

MATERIÁL A METODY

V rámci projektu Aktualizace Lesnicko-typologického klasifikačního systému včetně stanovení předpokládaného vývoje lesních vegetačních stupňů s vyhodnocením vlivu mezo a mikroklimatu s ohledem na probíhající klimatické změny a jejich predikce probíhá od jara 2024 měření základních meteorologických prvků v lesních porostech i mimo ně na několika místech Česka. Předkládaný příspěvek vychází z měření teploty a vlhkosti vzduchu a teploty půdy od července 2024 do června 2025 v Doksech. Primárním stanovištěm byla oblast uvnitř převážně borových lesních porostů na pískovci, na kopci západně od obce v nadmořské výšce 355 m. Sekundárním stanovištěm byla 400 metrů vzdálená paseka, louka uprostřed lesa. Tato měření pak byla srovnána s klasickým měřením ČHMÚ v obci Doksy, které se nachází zhruba 4 km daleko, v nadmořské výšce 285 m.

Teploty a vlhkosti vzduchu byly měřeny 2 m nad povrchem půdy. Teploty půdy byly měřeny v hloubce 10 a 50 cm. Délka měření jeden rok je minimální, nicméně umožňuje již srovnávat jednotlivé lokality mezi sebou. Srovnání s nelesními lokalitami bohužel není ideální. Stanice ČHMÚ se nachází hlavně v nižších polohách. V rámci projektu lesního měření však byla vybrána místa ve vyšších polohách, tedy v místech se zcela jiným reliéfem a tedy logicky odlišným průběhem meteorologických prvků. Srovnávací měření mimo les se pak nachází na pasece uprostřed lesa. Tato lokalita je tedy stále okolním lesem hodně ovlivněna. Dále se zde nachází specifické mikroklima paseky, tedy malého uzavřeného prostoru. Ideální by bylo mít k dispozici měření ve srovnatelném reliéfu, ale zcela mimo lesní vegetaci, což ale nebylo reálné. Při srovnání naměřených dat je tedy nutné s těmito okolnostmi počítat.

VÝSLEDKY A DISKUSE

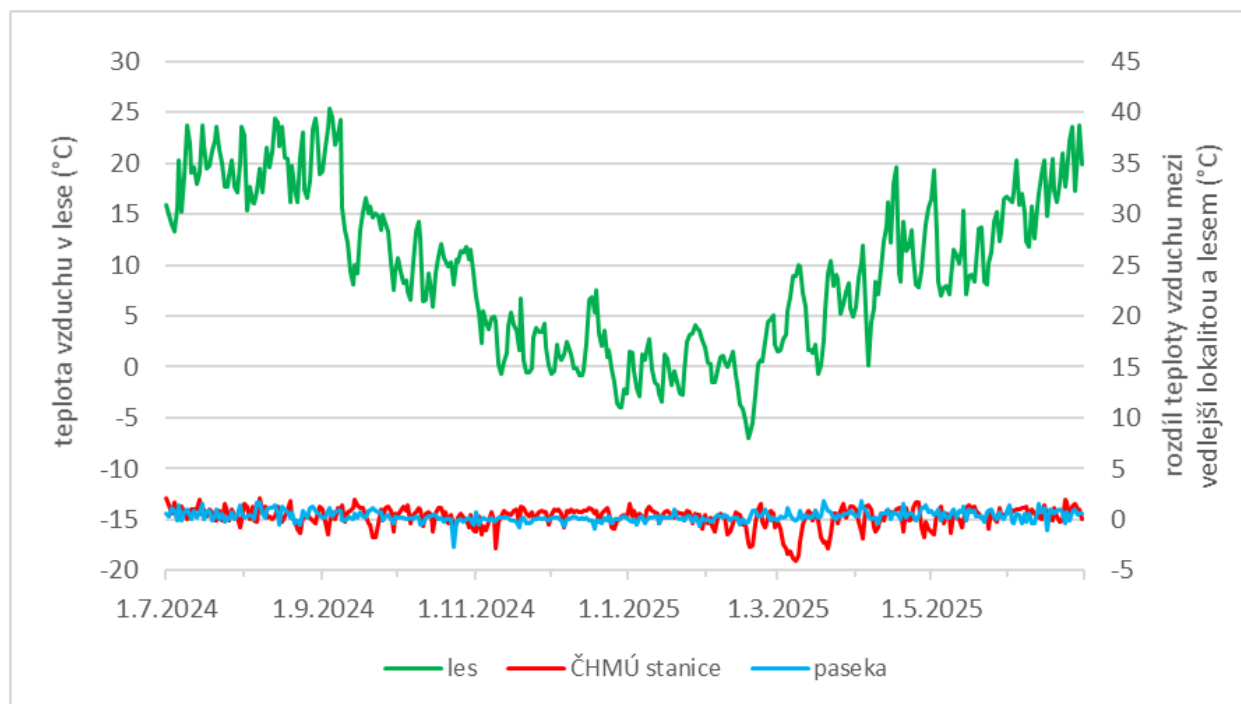
Průměrná teplota vzduchu (obr. 1) byla v červenci 2024 až červnu 2025 v lese 9,5 °C, na pasece 9,8 °C a na stanici ČHMÚ 9,7 °C. Větší rozdíly byly v měsících letního půlroku než zimního. O 0,6 °C, respektive 0,2 °C byla teplota vzduchu v lese nižší než na pasece.

Maximální denní teploty vzduchu (obr. 2) v lese a mimo něj se již liší více. V průměru byly maximální denní teploty vzduchu v lese 13,6 °C, zatímco na pasece 15,7 °C a na stanici ČHMÚ 15,3 °C. V letním půlroce jsou rozdíly opět větší než v zimním půlroce. 2,8 °C v létě a 1,5 °C v zimě jsou průměrné rozdíly mezi pasekou a lesem.

Roční průměr minimálních denních teplot vzduchu (obr. 3) byl v lese 5,9 °C, na pasece 5,3 °C, na stanici ČHMÚ 4,9 °C. V létě byl les o 0,7 °C, v zimě o 0,4 °C teplejší než paseka.

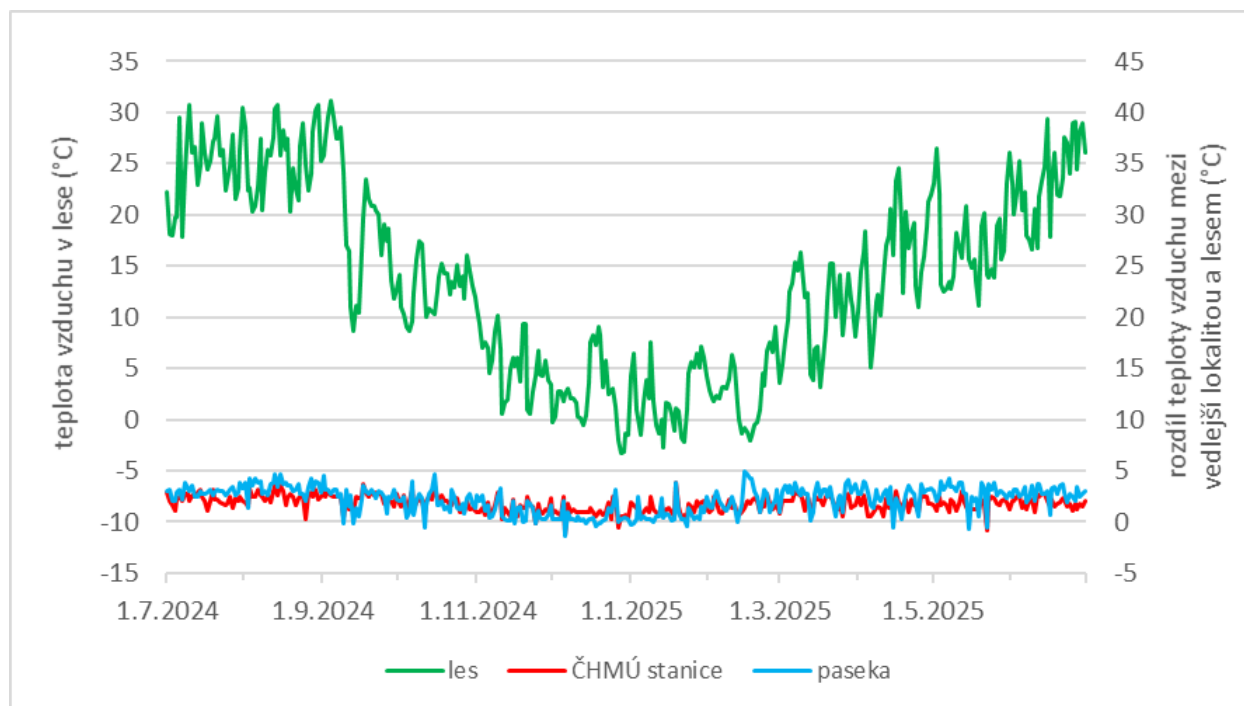
Obr. 4. ukazuje dynamiku teploty vzduchu v jednotlivých lokalitách v slunečném letním dnu, konkrétně 14.6.2025. Stanice ČHMÚ umístěná v údolí má největší dynamiku teploty. Nejmenší dynamiku má naopak les. Paseka disponuje taky určitým mikroklimatem se sníženou rychlostí větru a tomu odpovídajícím přehřívání. Měření na pasece je umístěno tak, že je slunce od západu kryto stromy. Dopolední teploty proto ve slunečných dnech rychle narůstají, ale odpoledne dochází k rychlejšímu ochlazení. Ačkoli tedy průměrné teploty vzduchu jsou na pasece a na stanici ČHMÚ téměř stejné, maximální a minimální teploty vzduchu jsou na pasece mírně vyšší. Je tedy otázka, jestli je vhodnější srovnávat klima v lese s pasekou a nebo se stanicí ČHMÚ. Les i paseka se nachází v podobném reliéfu – na vrcholu kopce. Stanice ČHMÚ v údolí. Občas dochází k inverzi, kdy průměrné a zvláště minimální denní teploty jsou na stanici ČHMÚ výrazněji nižší než hodnoty v lese a na pasece.

Měření prokázalo, že v lese jsou průměrné denní teploty nižší než mimo les. Rozdíly ale nejsou velké, v zimě se skoro stírají. Hlavní rozdíly jsou v případě maximálních teplot ve dnech s výrazným slunečním svitem, kdy je les zřetelně chladnější než okolí. Les má naopak mírně vyšší minimální teploty vzduchu, hlavně v létě.

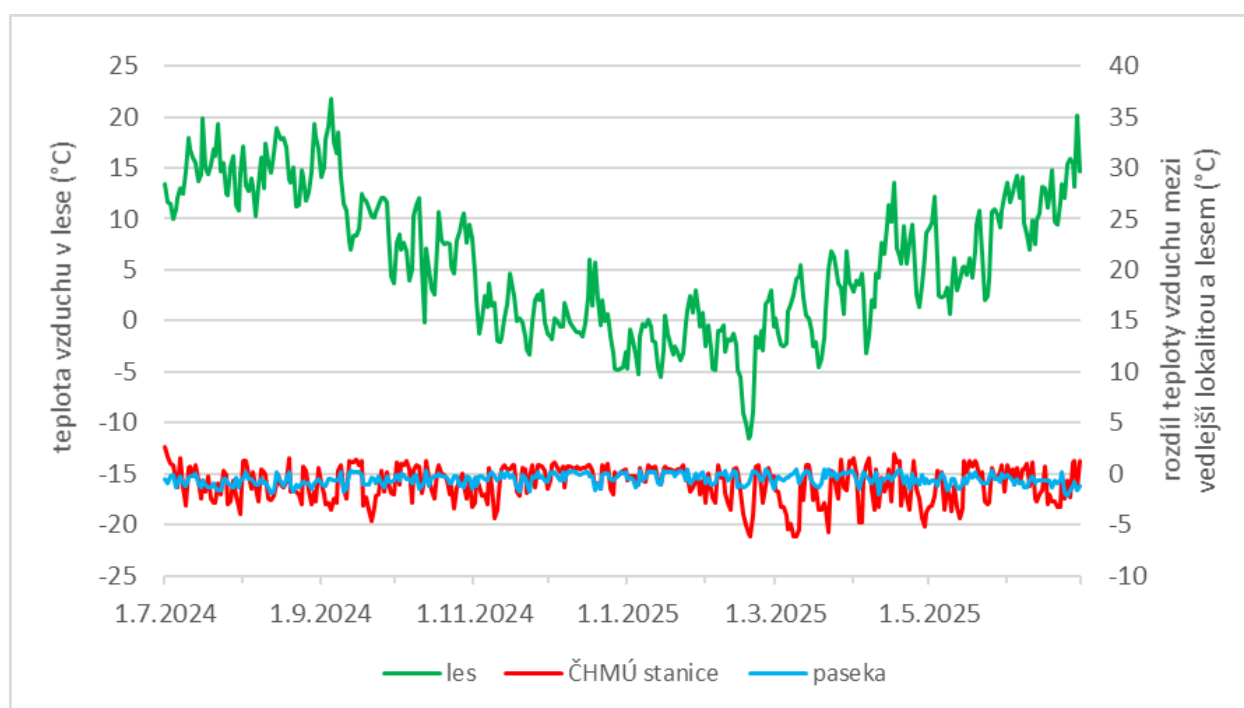


Obr. 1 Průměrné denní teploty vzduchu v lese a rozdíly mezi ČHMÚ stanicí a lesem a pasekou a lesem

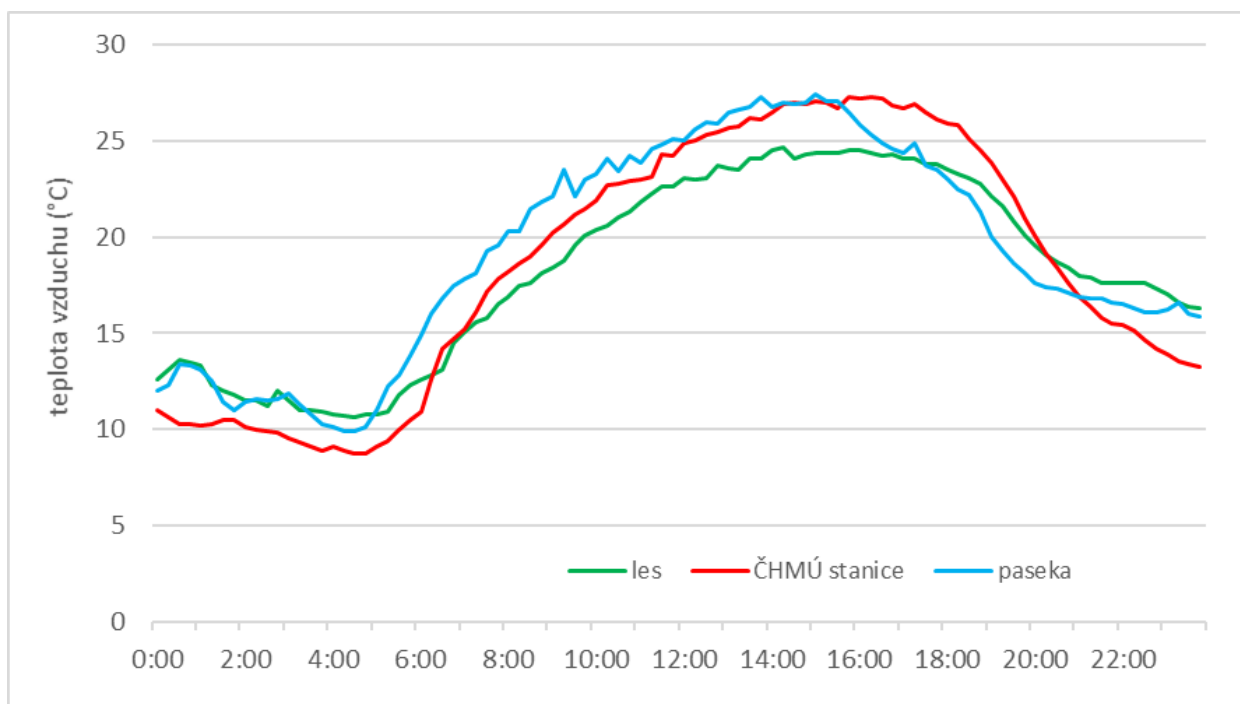
Fig.1 Average daily air temperatures in the forest and differences between the CHMI station and the forest and the clearing and the forest



Obr. 2 Maximální denní teploty vzduchu v lese a rozdíly mezi ČHMÚ stanicí a lesem a pasekou a lesem
 Fig. 2 Maximum daily air temperatures in the forest and differences between the CHMI station and the forest and the clearing and the forest



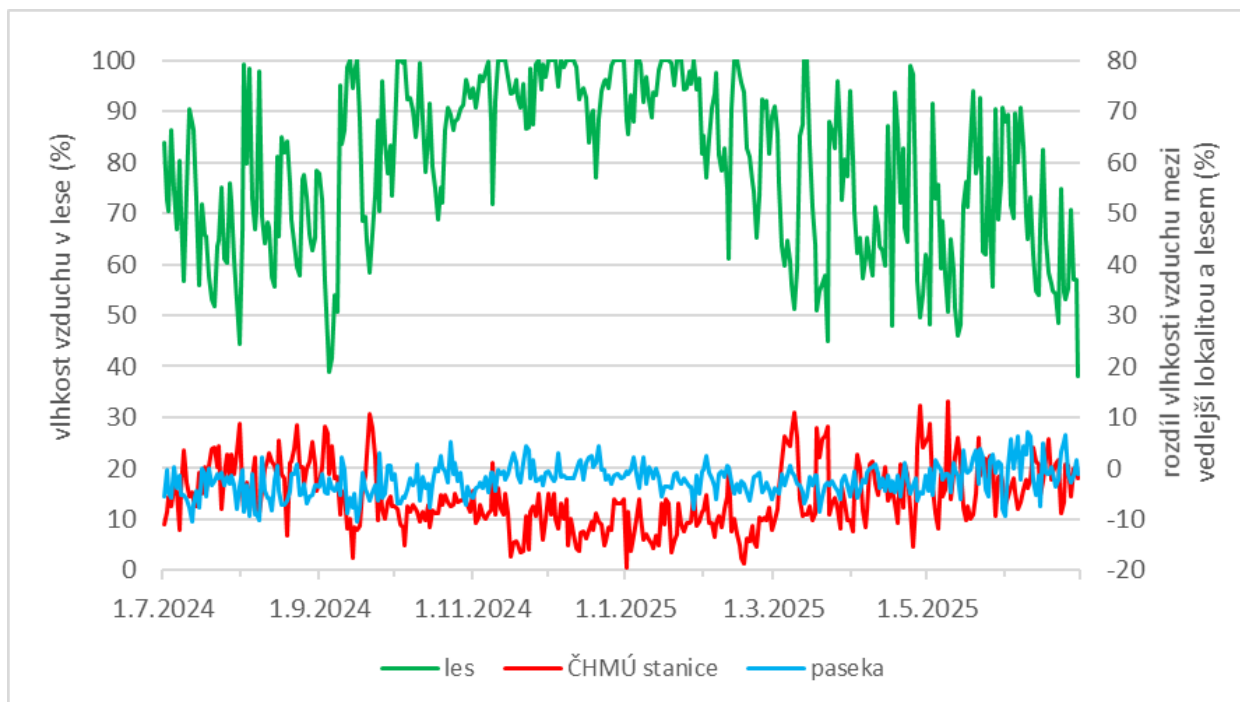
Obr. 3 Minimální denní teploty vzduchu v lese a rozdíly mezi ČHMÚ stanicí a lesem a pasekou a lesem
 Fig. 3 Minimum daily air temperatures in the forest and differences between the CHMI station and the forest and the clearing and the forest



Obr. 4 Teploty vzduchu v lese, na ČHMÚ stanici a na pasece 14.6.2025

Fig. 4 Air temperatures in the forest, at the CHMI station and in the clearing June 14, 2025

Průměrná relativní vlhkost vzduchu (obr. 5) byla v červenci 2024 až červnu 2025 v lese 79,5 %, na pasece 77,2 % a na stanici ČHMÚ 73,9 %. Rozdíly mezi lesem a pasekou jsou v letním a zimním půlroce srovnatelné. To ale platilo v průměru. Ve skutečnosti v letních měsících roku 2024 byla v lese většinou větší vlhkost než na pasece, v letních měsících roku 2025 byl les sušší. Důvod tohoto jevu není známý. Výraznější rozdíly jsou hlavně v zimě vůči měření na stanici ČHMÚ, kde jsou oproti lesu o 8,9 % nižší vlhkosti vzduchu. V létě jsou na stanici ČHMÚ v průměru stejné vlhkosti vzduchu jako na pasece.

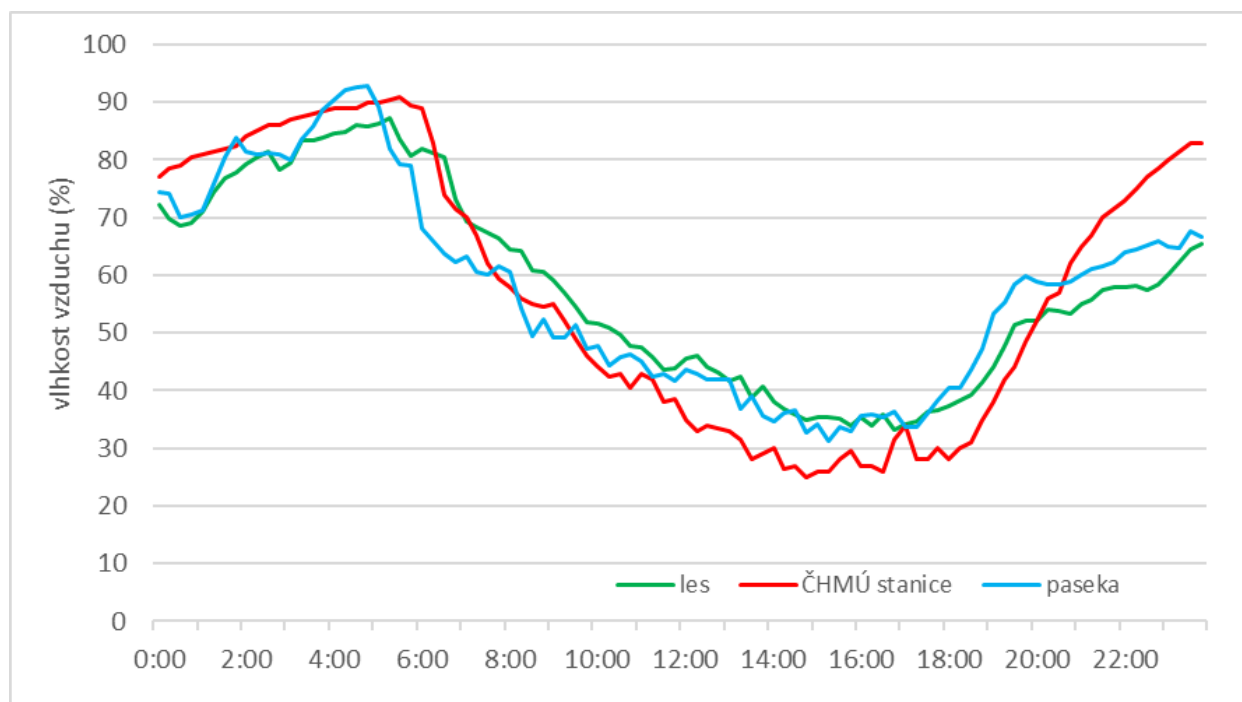


Obr. 5 Relativní vlhkosti vzduchu v lese a rozdíly mezi ČHMÚ stanicí a lesem a pasekou a lesem

Fig. 5 Relative air humidity in the forest and differences between the CHMI station and the forest and the clearing and the forest

Obr. 6. ukazuje dynamiku relativní vlhkosti vzduchu v jednotlivých lokalitách v slunečném letním dnu, konkrétně 14.6.2025. Relativní vlhkost je zde kompatibilní s vývojem teploty vzduchu.

Rozdíly mezi relativní vlhkostí vzduchu mezi lesem a pasekou nejsou velké. Z části odpovídají odlišným teplotám vzduchu. Odlišné, nižší vlhkosti vzduchu se vyskytly pouze u stanice ČHMÚ v zimě. V létě jsou vlhkosti srovnatelné. Oproti očekávání (Hojdová et al., 2005) nebylo naměřeno, že by v létě v lese byly vlhkosti vzduchu zřetelně vyšší než mimo les. Přestože vzduch u země v lese přes den bývá chladnější než na otevřených plochách, většina transpirace probíhá v korunách stromů, kde listy přijímají sluneční záření a mají teplotní podmínky podobné rostlinám na louce. Stromy tak mohou vypařovat vodu intenzivně, a i přes nižší teplotu u země nemusí být vzduch v lese absolutně vlhčí než mimo něj; vyšší relativní vlhkost u země je spíše důsledkem nižší teploty než vyššího obsahu vody ve vzduchu. Voda ze srážek, která se zachytí na listech stromů, se rychle odpaří, zatímco na louce může většina srážkové vody vsáknout do půdy a zůstat tam déle. Díky tomu může být výpar na louce postupnější a déle ovlivňovat vlhkost vzduchu, zatímco v lese se půdní zásoby vody po dešti rychle vyčerpají transpirací stromů, což v létě často vede k obdobně suchému nebo i suššímu vzduchu u země. Rozdílné vlhkosti vzduchu v lokalitách budeme nacházet spíše tam, kde se výrazněji liší schopnost půdy pojmout vodu.



Obr. 6 Relativní vlhkosti vzduchu v lese, na ČHMÚ stanici a na pasece 14.6.2025

Fig. 6 Relative air humidity in the forest, at the CHMI station and in the clearing June 14, 2025

Průměrná teplota půdy v hloubce 10 cm (obr. 7) byla v červenci 2024 až červnu 2025 v lese i na pasece shodně 9,8 °C, zatímco na stanici ČHMÚ byla 11,5 °C. V zimním půlroce byla nejvyšší teplota půdy v lese 6,6 °C. Na pasece bylo v průměru 5,8 °C a na stanici ČHMÚ 5,5 °C. V letním půlroce byl ale les nejchladnější, 12,9 °C. Na pasece bylo 13,8 °C a na stanici ČHMÚ 17,6 °C.

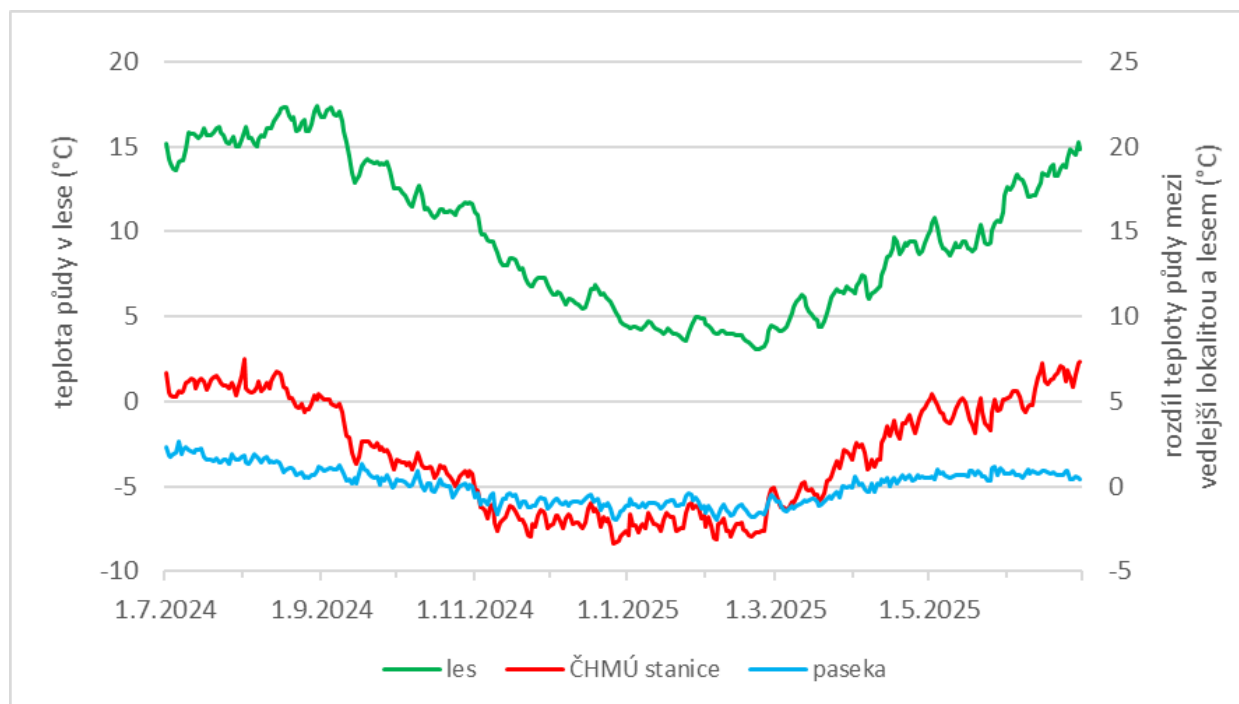
Velmi srovnatelná situace byla u teploty půdy v hloubce 50 cm (obr. 8). Za celý rok byl průměr v lese 9,7 °C, na pasece 9,6 °C, na stanici ČHMÚ 11,7 °C. V zimním půlroce byla teplota půdy v lese 7,1 °C, na pasece 6,4 °C, na stanici ČHMÚ 6,6 °C. V letním půlroce bylo v lese 12,3 °C, na pasece 12,8 °C a na stanici ČHMÚ 16,7 °C.

Obr. 9. ukazuje dynamiku teploty půdy v hloubce 10 cm v jednotlivých lokalitách v slunečném letním dnu, konkrétně 14.6.2025. V lese je rozdíl mezi denním maximem a minimem minimální, na stanici ČHMÚ největší.

Obr. 10. ukazuje dynamiku teploty půdy v hloubce 50 cm v jednotlivých lokalitách pro stejný den, 14.6.2025. V této hloubce je již denní teplotní amplituda minimální na všech lokalitách.

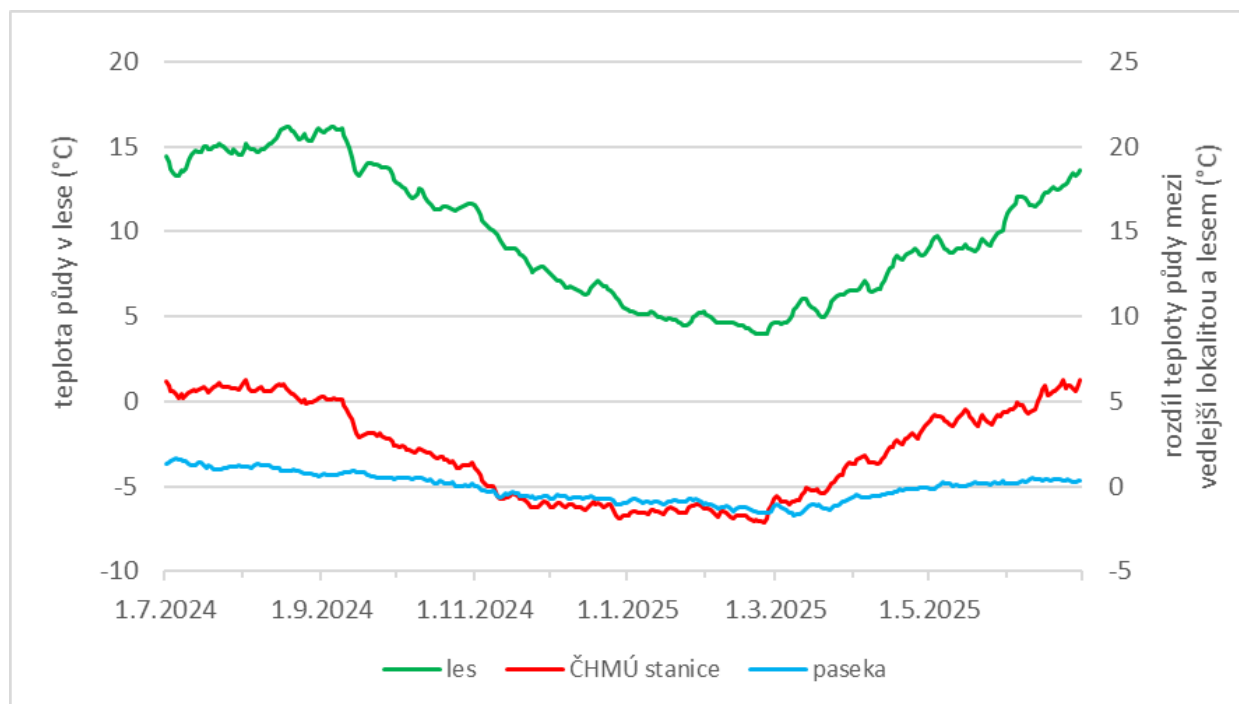
Teplota půdy v lese se velmi liší od měření na stanici ČHMÚ. V lese je průměrná roční teplota půdy 9,8 °C v 10 cm a 9,7 °C v 50 cm velmi srovnatelná s průměrnou roční teplotou vzduchu 9,5 °C. Na stanici ČHMÚ je teplota půdy výrazně teplejší než teplota vzduchu. 11,5 °C v hloubce 10 cm a 11,7 °C v hloubce 50 cm ve srovnání s teplotou vzduchu 9,7 °C. Na stanicích ČHMÚ, kromě pár výjimek, bývá průměrná roční teplota půdy o 1 °C až 2 °C vyšší než teplota vzduchu. Je to dáno patrně tím, že na stanicích ČHMÚ je krátce strážný trávník, sluneční radiace tak dopadá prakticky na povrch půdy a teplota půdy je tak řízena především radiací. V lese ale sluneční radiace sotva kdy dopadne až na povrch půdy. Zde tedy teplota půdy musí být ovlivněna především teplotou vzduchu. Bylo by proti přírodním zákonům, aby zastíněná teplota půdy byla větší než teplota vzduchu. Překvapením

byly hodnoty teploty půdy na pasece (Chen et al., 1993). Zde byla teplota půdy spíš srovnatelná s měřením v lese než na stanici ČHMÚ. Vysvětlením bude parně to, že bylinná vegetace na pasece je mnohem mocnější než na stanicích ČHMÚ. Radiace tedy ani na pasece nedopadá přímo na povrch půdy a nemůže tedy teplotu půdy zvyšovat výrazněji nad teplotu vzduchu.



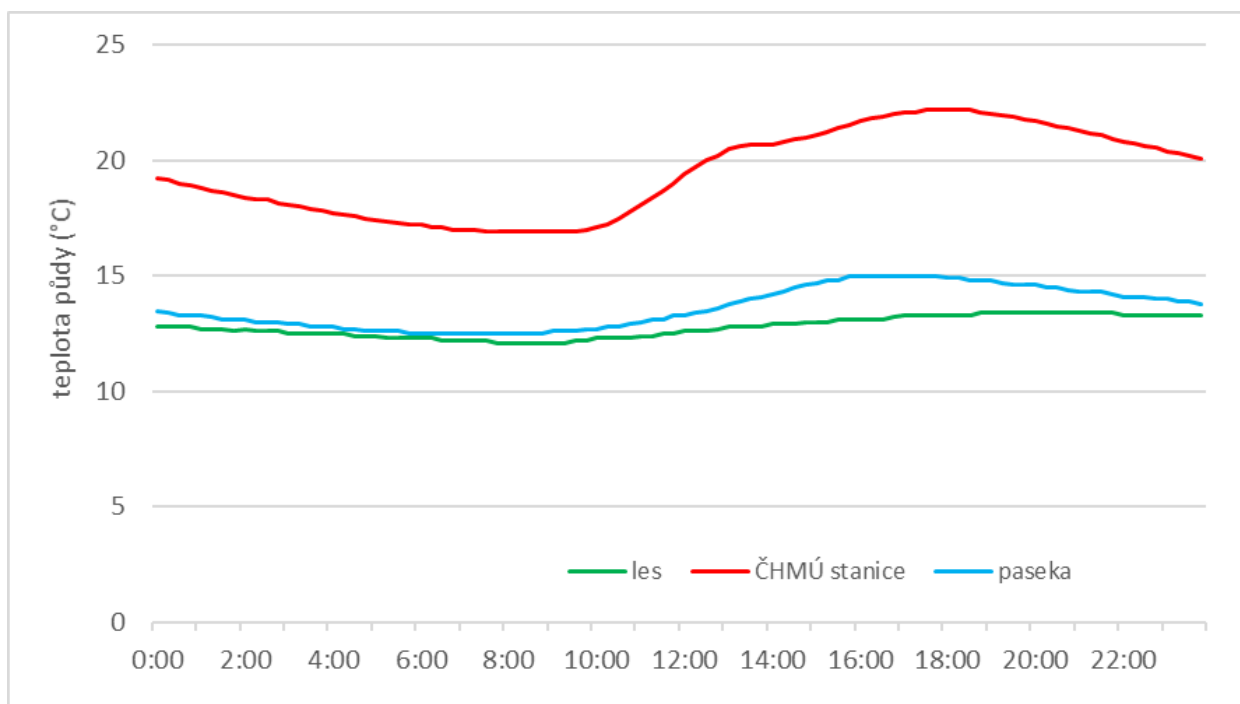
Obr. 7 Teplota půdy v hloubce 10 cm v lese a rozdíly mezi ČHMÚ stanicí a lesem a pasekou a lesem

Fig. 7 Soil temperature at a depth of 10 cm in the forest and differences between the CHMI station and the forest and the clearing and the forest



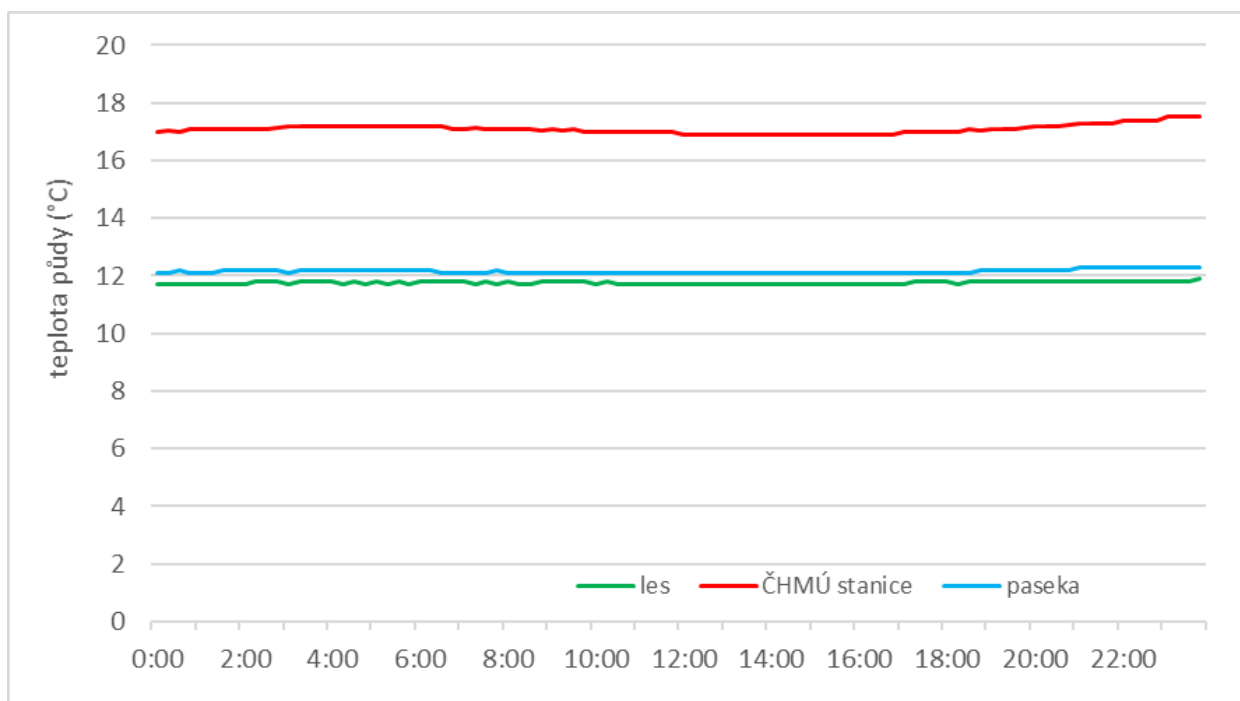
Obr. 8 Teplota půdy v hloubce 50 cm v lese a rozdíly mezi ČHMÚ stanicí a lesem a pasekou a lesem

Fig. 8 Soil temperature at a depth of 50 cm in the forest and differences between the CHMI station and the forest and the clearing and the forest



Obr. 9 Teplota půdy v hloubce 10 cm v lese, na ČHMÚ stanici a na pasece 14.6.2025

Fig. 9 Soil temperature at a depth of 10 cm in the forest, at the CHMI station and in the clearing June 14, 2025



Obr. 10 Teplota půdy v hloubce 50 cm v lese, na ČHMÚ stanici a na pasece 14.6.2025

Fig. 10 Soil temperature at a depth of 50 cm in the forest, at the CHMI station and in the clearing June 14, 2025

V lese jsou tedy teploty půdy v průměru nižší než mimo les. Ale dochází k tomu v letním období. V zimě je naopak půda v lese teplejší. Mimo les začne být půda teplejší mezi koncem března až počátkem května. Teplota půdy by tedy neměla negativně ovlivňovat jarní nástup vegetace v lese.

ZÁVĚR

Měření od července 2024 do června 2025 v borovém lese v Doksech ukázalo, že průměrná roční teplota vzduchu je v lese nižší než mimo les jen o pár desetin °C. Rozdíl mezi lesem a oblastí mimo les je hlavně v kolísání teplot během dne a roku, kdy teploty vzduchu v lese kolísají výrazně méně. Srovnatelné jsou údaje o relativní vlhkosti vzduchu. V ročním průměru je vlhkost v lese jen mírně vyšší, větší rozdíly jsou v kolísání během dne a roku, kdy v lese kolísají relativní vlhkosti vzduchu méně. Větší rozdíly mezi lesem a bezlesem se vyskytují u teploty půdy. Zatímco v lese je průměrná roční teplota půdy velmi blízká průměrné roční teplotě vzduchu, na krátce stržném trávníku dochází k zahřívání půdy přímo sluneční radiací a průměrná roční teplota půdy může být až o 2 °C vyšší než teplota půdy. Na vyšším lučním povrchu ale již k takovému prohřívání půdy nedochází a rozdíly mezi situací na pasece a lesem už nejsou tak velké. V lese je kolísání teploty půdy během dne a roku menší než mimo les. V zimě je teplota půdy v lese vyšší než mimo les. V době jarního nástupu vegetace jsou teploty půdy v lese i mimo les srovnatelné.

Poděkování

Autor děkuje Ministerstvu zemědělství České republiky za finanční podporu při řešení projektu QL24020351, Aktualizace Lesnicko-typologického klasifikačního systému včetně stanovení předpokládaného vývoje lesních vegetačních stupňů s vyhodnocením vlivu mezo a mikroklimatu s ohledem na probíhající klimatické změny a jejich predikce, v rámci kterého vznikl prezentovaný příspěvek.

LITERATURA

- CHEN, J., FRANKLIN, J. F., SPIES, T. 1993. *Contrasting microclimates among clearcut, edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest*. Agricultural and Forest Meteorology, 63. s. 219 – 237. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90061-L](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90061-L)
- GRAHAM, E. A., HANSEN, M., KAISER, W. J., LAM, Y., YUEN, E., RUNDEL, P. W. 2020. *Dynamic microclimate boundaries across a sharp tropical rainforest-clearing edge*. Remote Sensing, 13(9), s. 1646. <https://doi.org/10.3390/rs13091646>
- HOJDOVÁ, M., HAIS, M., POKORNÝ, J. 2005. *Microclimate of a peat bog and of the forest in different states of damage in the Šumava National Park*. Silva Gabreta, 11(1), s. 13 – 24.
- MORECROFT, M. D., TAYLOR, M. E., OLIVER, H. R. 1998. *Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site*. Agricultural and Forest Meteorology, 90. s. 141 – 156. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00070-1)
- RENAUD, V., REBETEZ, M. 2003. *Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003*. Agricultural and Forest Meteorology, 149. s. 873 – 880. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.11.006>

LESNICKÉ HYDROMELIORAČNÍ OKRSKY – FLEXIBILNÍ NADSTAVBA LESNICKÉ TYPOLOGIE SYSTEMATICKY ŘEŠÍCÍ PROBLEMATIKU VODOU OVLIVNĚNÝCH STANOVIŠŤ

Dušan KACÁLEK – Ondřej ŠPULÁK

¹Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Strnady, Výzkumná stanice Opočno, Na Olivě 550, 517 73
Opočno, Česká republika

ABSTRACT

Kacálek D., Špulák O.: Information on forestry hydrological districts supporting water-retention function of forests

Forested areas, where management is affected by soil water conditions, are called forestry hydrological districts in the Czech Republic. This article presents a new approach to unify, evaluate and rank the districts to get information about their status. The management measures are to be applied to get forest ecosystem services demanded by society. The principal steps are: (i) a gathering of all available information in the office from special databases and using GIS analyses, (ii) a verification and an update of the information in the field, (iii) an inspection/supervision and (iv) a proposal of the measures, which is intended to be consulted with local forestry practitioners.

Key words: soil water, drainage, forestry hydrology

ÚVOD

V průběhu 2. poloviny 20. století bylo v České republice ca 220 tisíc hektarů lesní půdy odvodněno prostřednictvím sítí melioračních příkopů. Adjektivum „meliorační“ znamenalo, že tato technická opatření cílila na zlepšení růstových podmínek na vodou ovlivněných stanovištích (PAAVILAINEN, PÄIVÄNEN 1995; SIKSTRÖM, HÖKKÄ 2016) a obecně, nicméně ne vždy s úspěchem, na zvýšení růstu porostu (LAURÉN et al. 2021). Pozitivní růstová reakce nastává v důsledku snížení hladiny podzemní vody, které vede ke zvýšení počtu a kapacity vzdušných pórů v půdě, čímž je zároveň zvětšena schopnost půdy zadržet vodu – retence (HELLIWELL 1993).

Vodou ovlivněná stanoviště v lese představují lokality, od kterých se očekává významné plnění hydrických funkcí lesa, zvláště právě funkce retenční. Potenciální retenční kapacita těchto území je dána celkovým stavem lesního prostředí, tj. daného stanoviště (které může být ovlivněno realizovanými technickými melioracemi) i lesního porostu. Jednotné hodnocení potenciální retence vodou ovlivněných lokalit a jejich ohrožení přináší možnosti účinného směřování a vyvážení lesnického managementu. Na základě této potřeby vznikl metodický postup, jak jednotně vymezit, hodnotit a kategorizovat tato území vymezená jako lesnické hydromeliorační okrsky (dále LHMO) tak, aby byly vytvořeny podklady pro hospodářská opatření zaměřená na hydrické funkce lesů (ŠPULÁK et al. 2023). Postup vznikl jako rozpracování předchozí metodiky využívané Národním lesnickým institutem – NLI, dříve Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů – ÚHÚL (NAVRÁTIL et al. 2012) a jeho základním kamenem je lesnicko-typologické šetření. Postup je v současné době pilotně aplikován a adaptován na NLI pro následné využití při zpracování podkladů v rámci šetření oblastních plánů rozvoje lesů (OPRL).

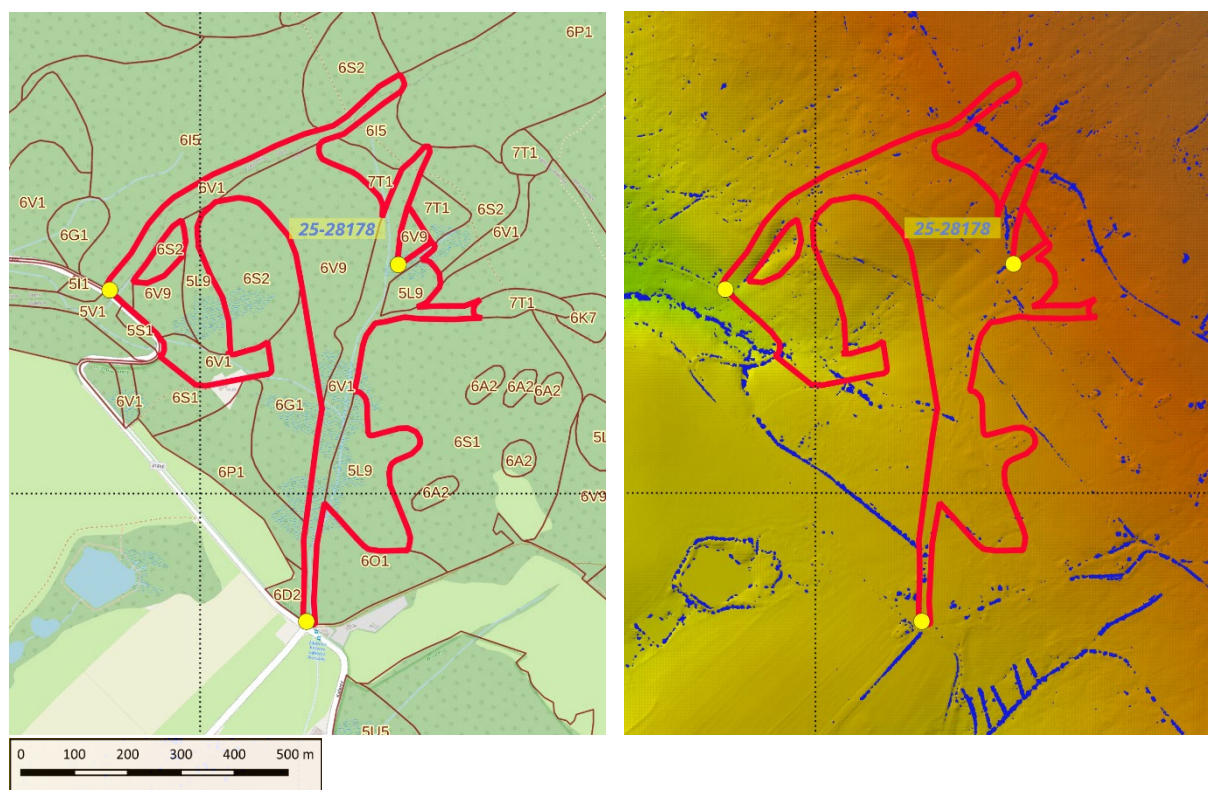
METODIKA KATEGORIZACE LHMO

Základem přístupu rozlišujícím LHMO jsou agregované stanovištní podmínky vycházející rámcově z lesnicko-typologického klasifikačního systému lesů ČR. Výsledný kód hydrické jednotky se skládá z římské číslice vyjadřující vertikální stupňovitost nižších (I.), středních (II.), vyšších (III.) a horských (IV.) poloh a z označení hydrické řady informující o režimu půdní vody, tedy střídavé zamokření (HrP – edafické kategorie O, P, Q), stagnující voda (HrG – edafické kategorie G, T), proudící svahová voda (HrV – edafické kategorie V, U), rašeliny (HrR – edafická kategorie R) a luhy (HrL – edafická kategorie L).

Hodnocení LHMO probíhá ve čtyřech základních krocích: kancelářské práce využívající nástrojů GIS (obr. 1), venkovní šetření, metodická kontrola standardizace postupů vylišení LHMO a projednání doporučení pro posílení retenční funkce LHMO, navržených na základě vyhodnocení stavu území, s místním lesnickým personálem. První dva kroky definují a verifikují položky podkladové – popisné databáze. Kromě vymezení LHMO na základě již zmíněných stanovištních podmínek jsou území rozdělena podle tvaru na plošné nebo liniové a malé (do 5 ha) a velké. Informace o plošných a velkých LHMO budou v terénu ověřovány specialisty NLI prioritně.

Popis LHMO sestává z dvou skupin parametrů. První zohledňuje podmínky pro potenciální retenci a akumulaci vody, jako jsou: vodní bilance, retence, výskyt mikrodepresí příznivých pro infiltraci, přítomnost a funkčnost technických meliorací a pestrost smíšení dřevin v lesních porostech. Druhá skupina parametrů vyjadřuje rizika pro plnění retenční a akumulační funkce, tj. odchylka od cílové druhové skladby, výskyt holosečí, výskyt stromů se zhoršeným zdravotním stavem, poškození technických meliorací, poškození LHMO lesní dopravní sítě a aktuálně realizovaná technická infiltrační a akumulační opatření.

Venkovní šetření LHMO sestává z (1) identifikace závěrného profilu LHMO, tedy místa, kde voda opouští jeho území, (2) posouzení stavu hydromelioračních zařízení a jejich funkčnosti ve vztahu k plnění retenční a akumulační funkce, (3) pochůzkou proti směru toku odtoku podél hlavníku, vodního toku či v kanceláři stanoveného transektu a hodnocení míry poškození objektů technických meliorací a poškození retenční a akumulační funkce LHMO vlivem lesní dopravní sítě, (4) ověření výskytu mikrodepresí, (5) hodnocení zdravotního stavu lesa, podílu holosečí, poškození pramenišť a koryt vodních toků, eroze, nezdravé obnovy po zamokření půdy, zhoršené stability mladých porostů, škod soustředěným tokem vod z jiných LHMO, nedostatečného zpřístupnění porostů a potenciálu k doplnění akumulačních prostor, (6) vyhodnocení vlivu nedávno realizovaných technických infiltračních a akumulačních opatření. Na základě výše uvedených kroků specialista (7) vyhodnotí potenciál retence a akumulace vody v LHMO a riziko plnění těchto funkcí a (8) navrhne základní a podrobný typ managementu. U velkých majetků budou (9) po dokončení šetření návrhy managementu konzultovány s OLH nebo přímo s vlastníkem lesa.



Obr. 1: Ukázka mapy lesnické typologie s vymezením LHMO (červené hraniční linie; vlevo) a vrstvou detekce hydromelioračních zařízení (vpravo). Žluté body značí závěrný profil

Fig. 1: An example of a forest-site map representing forestry hydrological districts (red boundary lines; left) and the layer showing detected ditches (right). Yellow dots represent outlet points of the forestry districts

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Společenská poptávka po ekosystémových lesnických službách narůstá v souvislosti s nutnou adaptací lesů na probíhající klimatickou změnu. Od lesních porostů očekáváme schopnost průběžně, dočasně zadržet vodu ze srážek (zpomalením, transformací odtoku vody) a dále umožnit její výpar, infiltraci, ovlivnit rozložení povodňových vln a stabilizovat základní odtok (Špulák et al. 2023). Vedle toho výpar, tj. evapotranspirace je složkou vodní bilance pozitivně ovlivňující efektivitu klimatické funkce lesa (Pokorný 2019); pokud jde o hlavní opatření udržení schopnosti lesa ochlazovat své okolí, nejde o nic jiného, než o udržení vitální stromové vegetace lesních ekosystémů i v měnících se podmínkách prostředí.

Zpracovatelem dané problematiky podle předložené metodiky a správcem monitoringu LHMO bude Národní lesnický institut, který na základě metodiky vypracovává podrobné pracovní postupy a připravuje další automatizaci rutinních analýz zvláště mapových podkladů.

Celý postup je připravován tak, aby umožňoval operativní obnovu map a návazné primární databáze při změně – aktualizaci podkladových vrstev. Mezi tyto vrstvy kromě mapy lesnické typologie patří např. digitální model reliéfu, ochranná pásma vodních zdrojů, vrstvy kategorie lesů zvláštního určení atd. Po začlenění tohoto nového melioračního průzkumu do OPRL se předpokládají následující přínosy:

1. Získání základního přehledu o stavu LHMO, včetně posouzení rizik a následných doporučení podle předem jednotně nastavených pravidel pro celou ČR.

2. Výsledky melioračního šetření v OPRL umožní v delším časovém úseku sledovat trendy (přírozeného) vodního režimu na LHMO.

3. Zvolený koncept je založen na ekologickém základu, protože pro volbu adaptačních opatření jsou rozhodující stanovištní podmínky, předpokládaný vývoj klimatu a stanovištně vhodná dřevinná skladba s vysokým zastoupením melioračních a zpevňujících dřevin.

4. Metodika definuje základní typy managementu a jejich možné kombinace (propojení technických a biologických postupů).

5. Doporučení respektují poptávku po lesnických ekosystémových službách a zohledňují kompetence a aktivity dalších subjektů působících v lesnickém sektoru.

6. Významné je také zhodnocení prostředků vynaložených na monitoring lesních ekosystémů (OPRL, Národní inventarizace lesů, dálkového průzkumu lesů, databáze lesních hospodářských plánů a osnov atd.).

Dlouhodobým cílem je zpřístupnit výsledky melioračního průzkumu včetně stěžejních položek databáze uživatelům z řad odborné veřejnosti, pro které se mohou stát podstatným informačním zdrojem pro podrobné plánování i jednání s institucemi státní správy, prostřednictvím webové mapové aplikace.

V příspěvku představovaná „Metodika postupu rozlišení a využití lesnických hydromelioračních okrsků pro zvýšení retenční funkce lesa“ je k dispozici ke stažení na stránkách Lesnického průvodce vydávaného VÚLHM (<https://www.vulhm.cz/lesnicky-pruvodce>).

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci projektu QL24020351 „Aktualizace Lesnicko-typologického klasifikačního systému včetně stanovení předpokládaného vývoje lesních vegetačních stupňů s vyhodnocením vlivu mezo a mikroklimatu s ohledem na probíhající klimatické změny a jejich predikce“ a podpory na rozvoj výzkumné organizace č. MZE-RO0123.

LITERATURA

HELLIWELL D.R. 1993. *Water tables and trees*. *Arboriculture Research Note*, 110: 5 s.

LAURÉN A., PALVIAINEN M., LAUNIAINEN S., LEPPÄ K., STENBERG L., URZAINKI I., NIEMINEN M., LAIHO R., HÖKKÄ H. 2021. *Drainage and stand growth response in peatland forests — description, testing, and application of mechanistic peatland simulator SUSI*. *FORESTS*, 12: 293.

NAVRÁTIL P., MANSFELD V., ČERNOHOUS J. 2012. *Metodika mapování hydromelioračních okrsků*. Verze 05. Brandýs nad Labem, ÚHÚL: 22 S.

PAAVILAINEN E., PÄIVÄNEN J. 1995. *Forest drainage*. In: *Peatland Forestry. Ecological Studies*, vol. 111. Berlin, Heidelberg, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03125-4_4

POKORNÝ J. 2019. *Opomíjená úloha vegetace v distribuci sluneční energie a utváření klimatu*. Akademie věd ČR v Praze 1: Mimořádná přednáška Učené společnosti České republiky 9. 4. 2019. [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=AEtepYuvwyk>

SIKSTRÖM U., HÖKKÄ H. 2016. *Interactions between soil water conditions and forest stands in boreal forests with implications for ditch network maintenance*. *Silva Fennica*, 50, 1: 1416.

ŠPULÁK O., MANSFELD V., HRUBAN R., KACÁLEK D., TAUBR K., ČERNOHOUS V. 2023. *Metodika postupu rozlišení a využití lesnických hydromelioračních okrsků pro zvýšení retenční funkce lesa*. Certifikovaná metodika. Strnady, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 96 s. Lesnický průvodce 5/2023. – ISBN 978-80-7417-258-8

VÝVOJ A VALIDÁCIA BIOKLIMATOLOGICKÉHO MODELU NA PREDIKCIU VNÚTORNEJ KLÍMY VČELIEHO ÚĽA

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

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

ABSTRACT

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

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

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

ÚVOD

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

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

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

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

MATERIÁL A METÓDY

Charakteristika experimentálneho územia

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

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

Zber dát vo vnútri úľov

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

Zber meteorologických dát

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

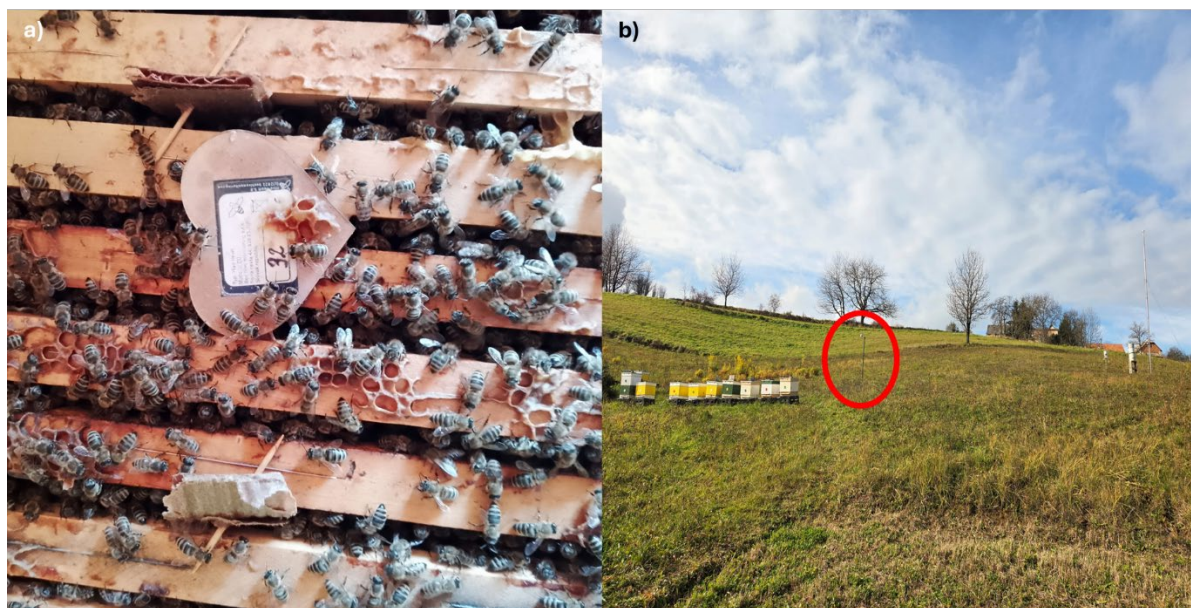
Návrh a validácia predikčného modelu

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

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

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

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



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

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na základe zozbieraných bioklimatologických dát z dvoch včelích úľov a jednej meteorologickej stanice bola vykonaná deskriptívna štatistická analýza. Celkový dátový súbor obsahoval 36 378 jednotlivých meraní (6063 meraní teploty a 6063 meraní vlhkosti pre každý úľ a meteorologickú stanicu), ktoré boli zozbierané počas aktívnej sezóny včelstiev. Priemerná vonkajšia teplota počas sledovaného obdobia bola 10.53 °C, s výraznými výkyvmi od minima -5.85 °C po maximum 27.46 °C. Priemerná vonkajšia vlhkosť dosahovala 75.43 %, s extrémnym rozsahom od minima 18.91 % po maximum 100 %. Naopak, vnútorné prostredie úľov si udržiavalo stabilnejšiu teplotu, pričom priemerná hodnota pre Úľ₁ bola 20.81 °C a pre Úľ₂ 20.84 °C. Vnútorná teplota v Úľi 1 sa pohybovala od minima 5 °C po maximum 41.2 °C, zatiaľ čo pre Úľ₂ to bolo od 5.7 °C po 40.3 °C. Priemerná vnútorná vlhkosť pre Úľ₁ bola 43.91 % a pre Úľ₂ 46.39 %, s rozsahom od 19.6 % do 61.2 % v Úľ₁ a od 19.2 % do 64.3 % v Úľ₂. Použili sme Durbin-Watsonov test, ktorý potvrdil, že autokorelácia reziduí je nevýznamná/v prijateľnom rozsahu (DW=1.95, p>0.05).

Predikčný model pre vnútornú teplotu

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

$$\text{Model pre } \dot{U}l_1: Y_{pred} = 16.60 + 0.14 \cdot T_{vonkajšia} - 0.006 \cdot V_{vonkajšia} \quad (2)$$

$$\text{Model pre } \dot{U}l_2: Y_{pred} = 17.21 + 0.137 \cdot T_{vonkajšia} - 0.005 \cdot V_{vonkajšia} \quad (3)$$

Hodnota koeficientu determinácie (R^2) dosiahla pre Úľ 1 = 0.220 a pre Úľ 2 = 0.205, čo znamená, že približne 20-22 % variability vnútornej teploty je vysvetlených vonkajšími faktormi. Zvyšná variabilita je pravdepodobne spôsobená komplexnými vnútornými faktormi, ako je aktivita včelstva alebo množstvo plodu. Presnosť modelov bola overená na validačnej sade a dosiahla pre Úľ₁ strednú absolútnu chybu (MAE) 1.2 °C a pre Úľ₂ MAE = 1.22 °C, čo svedčí o dobrej predikčnej schopnosti napriek nízkym hodnotám R^2 .

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

Predikčný model pre vnútornú vlhkosť

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

$$\text{Model pre } \dot{U}l_1: Y_{pred} = 25.17 + 0.78 \cdot T_{vonkajšia} + 0.14 \cdot V_{vonkajšia} \quad (4)$$

$$\text{Model pre } \dot{U}_2: Y_{\text{pred}} = 24.31 + 0.84 \cdot T_{\text{vonkajšia}} + 0.16 \cdot V_{\text{vonkajšia}} \quad (5)$$

Hodnota koeficientu determinácie (R^2) dosiahla pre $\dot{U}_1 = 0.323$ a pre $\dot{U}_2 = 0.328$, čo je výrazne vyššie ako v prípade modelov pre teplotu. To naznačuje, že vonkajšie faktory majú väčší vplyv na variabilitu vnútornej vlhkosti než teploty. Presnosť modelov bola overená na validačnej sade, kde MAE pre $\dot{U}_1$ bolo 20.08 % a pre $\dot{U}_2 = 23.37$ %. Hoci je MAE v absolútnych číslach vysoké, modely sú silnejšie vo vysvetľovaní celkovej variability.

Koeficienty pre vonkajšiu teplotu (0.78 pre $\dot{U}_1$ a 0.84 pre $\dot{U}_2$) a vonkajšiu vlhkosť (0.14 a 0.16) sú v oboch prípadoch pozitívne a konzistentné, čo poukazuje na silný a priamy vzťah medzi vonkajšími a vnútornými vlhkosťnými podmienkami.

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

ZÁVER

Vo výskumnej práci sme sa venovali modelovaniu vnútornej teploty a vlhkosti v dvoch včelích úľoch ($\dot{U}_1$ a $\dot{U}_2$) pomocou viacnásobnej lineárnej regresie. Modely boli postavené na základe vonkajšej teploty a vonkajšej vlhkosti. Napriek tomu, že oba modely pre teplotu boli štatisticky vysoko významné a ich koeficienty konzistentné, zistili sme, že sú schopné vysvetliť len 20-22 % variability vnútornej teploty. Naopak, modely pre vnútornú vlhkosť dosiahli vyššiu hodnotu R^2 (≈ 0.32 - 0.33), čo naznačuje, že vonkajšie podmienky majú na vnútornú vlhkosť úľa výraznejší vplyv než na teplotu. Táto relatívne nízka hodnota R^2 pre teplotu a mierne nárasty chybovosti (MAE a RMSE) potvrdzujú, že vnútorné termoregulačné a vlhkosťné procesy včelstva sú ovplyvnené aj inými, vnútornými faktormi, ktoré neboli v tejto štúdii zohľadnené.

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

Podakovanie

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

LITERATÚRA

- ABOU-SHAARA, H. F., OWAYSS, A. A., IBRAHIM, Y. Y., & BASUNY, N. K. (2017). A review of impacts of temperature and relative humidity on various activities of honey bees. *Insectes sociaux*, 64(4), 455-463. <https://doi.org/10.1007/s00040-017-0573-8>
- DAR, S. A., SAAD, M., HASAN, W., DEVI, Y. K., RIDOUANE, F. L., ALYAMMAHI, K., ... & EL-SAMAD, L. M. (2025). Solitary Bees as Vital Bioindicators: A Comprehensive Review of the Diversity, Decline, and Conservation Imperatives of the Halictidae Family. *Entomological Research*, 55(6), e70047. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.70047>
- DAWSON, T. P., JACKSON, S. T., HOUSE, J. I., PRENTICE, I. C., & MACE, G. M. (2011). Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *science*, 332(6025), 53-58. DOI: [10.1126/science.1200303](https://doi.org/10.1126/science.1200303)
- CHIOU, C. R., HSIEH, T. Y., & CHIEN, C. C. (2015). Plant bioclimatic models in climate change research. *Botanical studies*, 56(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40529-015-0104-8>
- JARIMI, H., TAPIA-BRITO, E., & RIFFAT, S. (2020). A Review on Thermoregulation Techniques in Honey Bees (Apis Mellifera) Beehive Microclimate and Its Similarities to the Heating and Cooling Management in Buildings. *Future Cities & Environment*, 6. <https://doi.org/10.5334/fce.81>
- JONES, J. C., MYERSCOUGH, M. R., GRAHAM, S., & OLDROYD, B. P. (2004). Honey bee nest thermoregulation: diversity promotes stability. *Science*, 305(5682), 402-404. DOI: [10.1126/science.1096340](https://doi.org/10.1126/science.1096340)
- KORENÁ HILLAYOVÁ, M., KORENÝ, E., & ŠKVARENINA, J. (2022). The local environmental factors impact the infestation of bee colonies by mite Varroa destructor. *Ecological Indicators*, 141, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109104>
- KORENÝ, E. (2021). Vplyv teploty a vlhkosti vzduchu na spád klieštika včelieho (Varroa destructor). Bakalárska práca. Zvolen: TU Z, 2021.
- MAAROUF, A. R., & MUNN, R. E. (2005). Bioclimatology. In *Encyclopedia of world climatology* (pp. 158-165). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_29

- MORI, A. S., LERTZMAN, K. P., & GUSTAFSSON, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12-27. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- OCKO, S. A., & MAHADEVAN, L. (2014). Collective thermoregulation in bee clusters. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(91), 20131033. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.1033>
- PINCEBOURDE, S., MURDOCK, C. C., VICKERS, M., & SEARS, M. W. (2016). Fine-scale microclimatic variation can shape the responses of organisms to global change in both natural and urban environments. *Integrative and Comparative Biology*, 56(1), 45-61. <https://doi.org/10.1093/icb/icw016>
- POTTER, K. A., ARTHUR WOODS, H., & PINCEBOURDE, S. (2013). Microclimatic challenges in global change biology. *Global change biology*, 19(10), 2932-2939. <https://doi.org/10.1111/gcb.12257>
- ROBUSTILLO, M. C., PÉREZ, C. J., & PARRA, M. I. (2022). Predicting internal conditions of beehives using precision beekeeping. *biosystems engineering*, 221, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.006>
- RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, S., BEJAR, A. A. G., ROMO-CHACÓN, A., GARCÍA-HERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ-RÍOS, H., & OROZCO-AVITIA, J. A. (2024). Hive temperature regulation by honeybees in response to extreme conditions. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i3.3082>
- SHARIF, M. Z., DI, N., & LIU, F. (2022). Monitoring honeybees (*Apis* spp.)(Hymenoptera: Apidae) in climate-smart agriculture: A review. *Applied Entomology and Zoology*, 57(4), 289-303. <https://doi.org/10.1007/s13355-021-00765-3>
- STABENTHEINER, A., KOVAC, H., & BRODSCHNEIDER, R. (2010). Honeybee colony thermoregulation—regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. *PLoS one*, 5(1), e8967. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008967>

KLIMATICKÉ EXTRÉMY A EKOFYZIOLOGICKÉ LIMITY DREVÍN

Daniel KURJAK¹ – Jaroslav VIDO^{1,2} – Jana KURJAKOVÁ¹ – Ilja VYSKOT³ – Alena SLIACKA KONÔPKOVÁ¹

¹Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, Masarykova 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, kurjak@tuzvo.sk

²Ústav lesníckej botaniky, dendrologie a geobiocenologie, Lesnícká a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1665/1, 61300 Brno, Česká republika

³Ústav environmentalistiky a přírodních zdrojů, Fakulta regionálního rozvoje a mezinárodních studií, Mendelova univerzita v Brně, tř. Generála Píky 7, 61300 Brno

ABSTRACT

Kurjak, D., Vido, J., Kurjaková, J., Sliacka Konôpková, A.: Climate extremes and ecophysiological limits of trees

This review summarises current knowledge on the physiological mechanisms that determine tree responses to drought, focusing on the balance between hydraulic safety, carbon economy, and thermal regulation. We highlight how traits such as stomatal control, xylem vulnerability, and cuticular conductance interact under combined stress to shape species- and provenance-specific drought resilience. By integrating knowledge from provenance trials, field monitoring, and controlled experiments, the paper aims to identify the key ecophysiological thresholds beyond which tree survival is jeopardised, and to outline perspectives for adaptive forest management in a warming and drying Europe.

Key words: drought stress, heat stress, stomatal regulation, hydraulic failure, cuticular conductance

ÚVOD

Modely klimatickej zmeny predpovedajú do konca 21. storočia nárast priemernej ročnej teploty v Európe o 4–7 °C (podľa scenára SSP5-8.5) v porovnaní s predindustriálnym obdobím, pričom Slovensko patrí medzi regióny s očakávaným najvyšším zvýšením (IPCC, 2023). Tieto projekcie sa už dnes premietajú do zásadných ekologických zmien, najmä v lesných ekosystémoch. Satelitné snímky ukazujú, že za ostatných tridsať rokov sa odumieranie korún v temperátnych lesoch Európy takmer zdvojnásobilo, pričom mortalita stúpla v priemere o 2,4 % ročne. Slovensko pritom zaznamenalo jedny z najvyšších hodnôt úhynu drevín spomedzi siedmich krajín porovnávaných v štúdií SENF et al. (2018).

Výskyt extrémnych rokov v poslednom období potvrdzuje rastúcu frekvenciu suchých epizód: rok 2003 (v tom čase označený za najsuchší v Európe za posledných 500 rokov), 2018 a napokon 2022, ktorý prekonal všetky doterajšie extrémny (ORTH et al., 2016; TRIPATHY & MISHRA, 2023). Náhle zmeny v dynamike a intenzite sucha a vln horúčav vytvárajú silný evolučný tlak, ktorý ohrozuje vitalitu, rast a prežitie mnohých druhov drevín a predstavuje vážne riziko pre ekologickú stabilitu a produkčné i mimoprodukčné funkcie európskych lesov (TESKEY et al., 2015; SCHULDT et al., 2020; FUCHS et al., 2024).

Otázka ohľadne budúcnosti lesov a toho, ako jednotlivé druhy dokážu reagovať na prehlbujúcu sa aridifikáciu klímy, je preto mimoriadne aktuálna. Odpovede však nie sú jednoduché – zovšeobecnenie poznatkov naráža na vysokú medzidruhovú aj vnútrodruhovú variabilitu a na kumulatívne účinky opakujúcich sa extrémov. Navyše, dreviny sú špecifické svojou dlhovekosťou a pomalou generačnou obmenou. Hoci vysoký vzrast poskytuje stromom konkurenčnú výhodu v boji o svetlo, zároveň zvyšuje ich náchylnosť na poškodenie suchom, keďže vyššie nároky na vodu a živiny sú spojené s väčšou dĺžkou transportných dráh a vyšším rizikom ich poškodenia.

Je zrejmé, že prežívanie drevín budú v budúcnosti určovať viaceré environmentálne faktory (zrážky, teplota, vlhkosť vzduchu, koncentrácia CO₂, žiarenie či typ pôdy) spolu s biologickými vlastnosťami, ako sú plocha

a ochlpenie listov, hĺbka koreňov, zásoba vody v kmeni alebo hustota porastov. Menej pozornosti sa však venuje detailným mikroskopickým štruktúram a metabolickým procesom, ktoré v konečnom dôsledku často rozhodujú o tom, či strom prežije, alebo odumrie. Práve pochopenie týchto procesov (od regulácie prieduchov až po termostabilitu fotosystémov listov) predstavuje kľúč k predikcii budúcej stability a odolnosti lesných ekosystémov v meniacich sa podmienkach.

KEÚČOVÉ FYZIOLOGICKÉ PROCESY V PODMIENKACH SUCHA

Sucho a iné stresové faktory ovplyvňujú široké spektrum fyziologických procesov, no z hľadiska prežívania stromov sú najvýznamnejšie tri, ktoré nie je možné hodnotiť vizuálnym posúdením: vodný potenciál, prieduchová vodivosť a transport vody cez vodivé pletivá.

Vodný potenciál (Ψ) je základným ukazovateľom schopnosti rastliny prijímať vodu z pôdy. Definuje sa ako rozdiel chemického potenciálu vody v rastlinnom pletive a v čistej destilovanej vode, ktorej $\Psi = 0$ MPa. Keďže voda v pletivách je viazaná, jej potenciál nadobúda záporné hodnoty. Voda sa pohybuje pozdĺž gradientu z miest s menej záporným potenciálom do miest s viac záporným Ψ , čo podmieňuje celý tok vody v systéme pôda – rastlina – atmosféra. Zníženie chemického potenciálu vody môže byť spôsobené stratou vody z pletív, ako aj zvýšením koncentrácie osmoticky aktívnych látok v bunkách (DITMAROVÁ et al., 2010; JAMNICKÁ et al., 2019). Pri poklese dostupnej vody sa hodnota vodného potenciálu stáva čoraz negatívnejšou, čo má zásadný vplyv na otvorenosť prieduchov – mikroskopických otvorov na povrchu listov.

Na postupné znižovanie množstva dostupnej vody reagujú rastliny **uzatváraním prieduchov**, ktoré riadia výmenu CO_2 a vodných pár medzi rastlinami a atmosférou. Tento mechanizmus umožňuje redukovať straty vody, no zároveň obmedzuje prísun CO_2 , a tým aj fotosyntézu. Denná spotreba vody dospelým stromom sa v optimálnych podmienkach môže pohybovať rádovo až v stovkách litrov, avšak počas epizód sucha sa môže znížiť na zlomok týchto hodnôt (KURJAK et al., 2012). Obmedzená transpirácia zároveň znižuje schopnosť rastliny ochladzovať sa, čo vedie k prehriatiu listov – ich teplota môže presiahnuť 40 °C (SCHULDT et al., 2020). Uzavretie prieduchov preto spúšťa kaskádu ďalších reakcií: zvýšenú fotorespiráciu, tvorbu reaktívnych foriem kyslíka, poškodenie membrán chloroplastov a zníženie fotosyntetickej efektivity (KURJAK et al., 2019).

Strata vody v obmedzenej miere pokračuje aj po uzatvorení prieduchov a ak vodný potenciál vo vodivých pletivách klesne pod kritickú hranicu, dochádza k nasatiu vzduchových bublín do ciev xylému (proces kavitácie). Tieto bubliny blokujú transport vody a spôsobujú **embolizáciu** vodivých dráh. Vo všeobecnosti platí, že najohrozenejšie sú časti koruny najvzdialenejšie od koreňov, kde musí voda prekonávať väčší odpor gravitácie. S rastúcou výškou stromu tak riziko hydraulického zlyhania narastá, ak nie je úspešne kompenzované napr. väčšou hĺbkou prekorenenia. Kým mierna embolizácia nepredstavuje pre strom vážne ohrozenie, pri prekročení istého limitu dochádza k zlyhaniu transportu vody. Za kritické sa považuje približne 50%-ná strata vodivosti u ihličnanov a 88 %-ná u listnatých drevín (SCHULDT et al., 2020). Tieto hodnoty sú však len orientačné – niektoré stromy prežijú aj vyšší stupeň poškodenia, kým iné odumierajú už pri menšom, ak sa stres kumuluje.

Odolnosť cievneho systému voči embolizácii sa medzi druhmi výrazne líši. Napr. smrek, ktorý sú tradične považované za „citlivé“ voči suchu, vykazujú paradoxne vyššiu odolnosť xylému voči kavitáciám než buk či borovica. Buk aj borovica však majú výhodu v odlišnom koreňovom systéme, ktorý im umožňuje čerpať vodu aj z väčších hĺbok. Dub sa z tohto hľadiska javí ako najodolnejší – spája vysokú odolnosť ciev voči embolizácii s hlbokým koreňovým systémom. Napriek tomu sa ani jemu nevyhýbajú poškodenia, často zhoršené biotickými činiteľmi (KUBOV et al., 2020). Na opačnom konci spektra sa vyznačujú extrémnou citlivosťou napr. orech a jelša, ktorých cievny systém kolabuje už pri miernej dehydratácii.

Aj keď sú prieduchy úplne uzavreté, voda sa môže naďalej strácať cez drobné netesnosti v prieduchových štrbinách, cez vrstvu kutikuly listov alebo cez iné pletivá (ROCKWELL & SAGE, 2022), čo môže pri dlhšie trvajúcom suchu viesť k nezvratnému poškodeniu. Najnovšie zistenia sú obzvlášť znepokojujúce, pretože naznačujú, že pri kombinácii sucha s extrémnymi teplotami dochádza k rýchlemu nárastu vodivosti kutikuly pre vodnú paru, a to najmä u listnatých drevín (WANG et al., 2024). To znamená, že ochranné mechanizmy rastlín pre konzerváciu vody môžu byť pri súbežnom pôsobení viacerých stresových faktorov výrazne oslabené. To môže mať v niektorých oblastiach fatálne dôsledky. Presné odhadnutie rozsahu týchto rizík je však stále náročné vzhľadom na obmedzené množstvo dostupných údajov.

MORTALITA ALEBO ADAPTÁCIA NA SUCHO?

Pri suchu sú popísané dva hlavné fyziologické mechanizmy odumierania drevín (SEVANTO et al., 2014). Prvým je zlyhanie hydraulického systému, teda prerušenie transportu vody v xyléme. Druhým je vyčerpanie zásobných látok, keď dlhodobo uzavreté prieduchy obmedzujú príjem CO_2 a asimiláciu. Krátkodobé, no extrémne sucho vedie často k funkčnému kolapsu vodivých pletív, zatiaľ čo zásoby neštrukturálnych karbohydrátov sa môžu

postupne vyčerpať pri dlho trvajúcom suchu, čo spôsobuje postupné chradnutie stromu. V reálnych podmienkach sa však tieto procesy často prekrývajú a navzájom zosilňujú negatívny efekt. Poškodenie vodivých pletív môžu stromy do istej miery kompenzovať tvorbou nového xylému, avšak tento proces vyžaduje značné množstvo energie, čo následne oslabuje napr. schopnosť stromu udržať osmotickú rovnováhu. Znížená hladina zásobných látok navyše obmedzuje jeho obranné reakcie, čím sa zvyšuje riziko napadnutia patogénmi alebo hmyzom.

Jednou z najnápadnejších reakcií na silný vodný stres je predčasné opadávanie listov. Tento mechanizmus pomáha znížiť transpiráciu na minimum, ale zároveň skracaie obdobie, počas ktorého strom dokáže asimilovať uhlík. Opadavé druhy tak môžu mať určitú výhodu, keďže aktívne znižujú odparovaciu plochu, no cena za túto obranu nie je malá – strata schopnosti fotosyntetizovať počas časti vegetačnej sezóny je o to citeľnejšia, že zo zásobných látok musí byť nanovo vytvorený asimilačný aparát začiatkom nasledujúcej vegetačnej sezóny. Strata listov môže nastať v dôsledku zlyhania vodivosti xylému v stopke (HOCHBERG et al., 2017), alebo prehriatím a poškodením pletív oxidačným stresom (JUVANY et al., 2013). Nie je však úplne jasné, či ide o adaptívnu stratégiu, ktorá bráni šíreniu kavitácií, alebo o sekundárny prejav už prebiehajúceho hydraulického kolapsu.

Podľa SCHULDTA et al. (2020) mali listy buka, ktoré boli počas suchého leta 2018 depigmentované a opadli už začiatkom augusta, rovnaký obsah dusíka ako bežný jesenný opad. To naznačuje, že išlo o regulovaný fyziologický proces, nie o náhle zlyhanie. Napriek tomu autori pozorovali aj výrazné poškodenie cievneho systému. Stromy sa v takýchto extrémnych rokoch nachádzajú na hranici prežitia a keď dôjde k defoliácii neskoro, nestačia už ochrániť vodivé pletivá pred dehydratáciou. Povzbudzujúce však je, že väčšina týchto jedincov po roku aspoň čiastočne zregenerovala a mortalita nepresiahla 1,3 %. Na druhej strane, často sa objavuje aj „odložený“ negatívny efekt, ktorý je následkom predchádzajúceho poškodenia a fyziologického oslabenia.

Otvorenou otázkou zostáva, do akej miery dokážu stromy zregenerovať embolizované cievy. Presné meranie prietoku vody bez porušenia štruktúry je technicky náročné a názory odborníkov sa líšia. Podľa niektorých štúdií (KLEIN et al., 2018) môže kavitácia v cievach vzniknúť aj počas bežného dňa a v noci sa xylém zregeneruje vytlačením vzduchovej bubliny. Iné práce však uvádzajú, že poškodené cievy sa už neobnovia a ich funkciu preberajú novo vytvorené bunky xylému.

Ešte donedávna aj významní odborníci v oblasti porúch vodivých pletív volili veľmi zdržanlivé formulácie, ako napríklad: „Katastrofické dôsledky embolizácie vodivých pletív sa dostavia vtedy, ak cievy ostanú zablokované aj po nasýtení pôdneho profilu vodou.“ (SCHULDT et al., 2020). V iných prácach sa však objavujú aj jednoznačnejšie tvrdenia: „Zrážky po perióde sucha umožňujú stromom, ktoré neutrpeli fatálne zlyhanie xylémového transportu, nahradiť suchom poškodený xylém vytvorením nových pletív“ (BRODRIBB et al., 2020). Novšie výskumy naozaj ukazujú, že po extrémne suchom lete 2018 sa funkčnosť poškodených ciev do roku 2019 neobnovila a stromy reagovali redukciami listovej plochy, aby znížili transpiračné nároky (AREND et al., 2022). Úplná obnova transportu vody teda môže trvať mesiace až roky a každé ďalšie sucho zvyšuje riziko úhynu.

Napriek týmto nepriaznivým trendom existujú aj pozitívne správy. Bukové populácie vykazujú výraznú genetickú rozmanitosť v odolnosti voči kavitáciám (WORTEMANN et al., 2011; HAJEK et al., 2016), čo otvára možnosti pre výber a pestovanie odolnejších proveniencií. Prenos sadbového materiálu z oblastí, kde sa suchá vyskytujú častejšie, môže byť jedným z adaptačných opatrení na zmiernenie dopadov klimatickej zmeny. Zároveň sa ukazuje, že stromy sú schopné aj krátkodobej fyziologickej aklimácie. Napríklad približne 20-ročné buky rovnakého genetického pôvodu vykazovali pri raste na suchších lokalitách vyššiu odolnosť primárnej fázy fotosyntézy voči vysokým teplotám (KURJAK et al., 2019). Populácie sa líšili aj v hustote a veľkosti prieduchov (PETRÍK et al., 2020) a pri buku sa preukázala aj reakcia na priebeh počasia v predchádzajúcej sezóne (PETRÍK et al., 2022). Tieto výsledky poukazujú na to, že dreviny disponujú výraznou fenotypovou plasticitou, ktorá môže do určitej miery zlepšiť ich schopnosť adaptácie na meniace sa klimatické podmienky. Otvorenou otázkou však zostáva, či rýchlosť týchto adaptačných procesov dokáže držať krok s tempom prebiehajúcej klimatickej zmeny.

ZÁVER

V súčasnosti už nie je hlavnou otázkou, či sa lesy Európy uchovávajú také, aké ich poznali a obdivovali predchádzajúce generácie. Otázkou zostáva kde, ako rýchlo a do akej miery sa zmeny prejavajú. Je nevyhnutné usilovať sa o čo najhlbšie pochopenie komplexnosti problému a nečakať rýchle ani jednoduché riešenia. Odumieranie stromov neznamena zánik lesa – je súčasťou jeho dynamiky, ktorá prináša zánik starého, ale aj vznik nového. Z pohľadu fyziológie bude v nasledujúcich rokoch mimoriadne dôležité čo najpresnejšie odhadnúť regeneračný potenciál jednotlivých druhov, ako aj zodpovedne zhodnotiť možnosti využitia nepôvodných populácií či dokonca introdukovaných druhov v konkrétnych regiónoch. K správne, na dátach založenému rozhodovaniu by mali prispieť aj nové poznatky ekofyziologického výskumu: kvantifikácia minimálnych strát vody pri zatvorených prieduchoch v rôznych teplotných podmienkach, sledovanie regenerácie po extrémnych udalostiach, presnejšie určenie miery krátkodobej aklimácie a dlhodobej adaptácie na úrovni druhu i proveniencie, ako aj porovnanie reakcií drevín rôzneho veku a vzhľadu.

Podakovanie

Práca vznikla s finančnou podporou projektov APVV-21-0270, APVV-21-0224 a VEGA 1/0392/22.

LITERATÚRA

- AREND, M., LINK, R. M., ZAHND, C., HOCH, G., SCHULDT, B., KAHMEN, A. 2022. Lack of hydraulic recovery as a cause of post-drought foliage reduction and canopy decline in European beech. *New Phytologist*, 234: 1195–1205.
- BRODRIBB, T., POWERS, J., COCHARD, H., CHOAT, B. 2020. Hanging by a thread? Forests and drought. *Science*, 368: 261–266.
- DITMAROVÁ, L., KURJAK, D., PALMROTH, S., KMEŤ, J., STŘELCOVÁ, K. 2010. Physiological responses of Norway spruce (*Picea abies*) seedlings to drought stress. *Tree Physiology*, 30: 205–213.
- FUCHS, J. M., HUSMANN, K., SCHICK, J., ALBERT, M., LINTUNEN, J., & PAUL, C. et al. 2024. Severe and frequent extreme weather events undermine economic adaptation gains of tree-species diversification. *Scientific Reports*, 14: 2140.
- HAJEK, P., KURJAK, D., VON WÜHLISCH, G., DELZON, S., SCHULDT, B. 2016. Intraspecific variation in wood anatomical, hydraulic, and foliar traits in ten European beech provenances differing in growth yield. *Frontiers in Plant Science*, 7.
- HOCHBERG, U., WINDT, C. W., PONOMARENKO, A., ZHANG, Y. J., GERSONY, J., ROCKWELL, F. E., HOLBROOK, N. M. 2017. Stomatal closure, basal leaf embolism, and shedding protect the hydraulic integrity of grape stems. *Plant Physiology*, 174: 764–775.
- IPCC. 2023. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team H. Lee, J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC, pp. 1–34
- JAMNICKÁ, G., FLEISCHER, P., KONÔPKOVÁ, A., PIŠOVÁ, E., KUČEROVÁ, J., KURJAK, D., ŽIVČÁK, M., DITMAROVÁ, L. 2019. Norway spruce (*Picea abies* L.) provenances use different physiological strategies to cope with water deficit. *Forests*, 10: 651.
- JUVANY, M., MÜLLER, M., MUNNÉ-BOSCH, S. 2013. Photo-oxidative stress in emerging and senescing leaves: a mirror image? *Journal of Experimental Botany*, 64: 3087–3098.
- KLEIN, T., ZEPPEL, M. J. B., ANDEREGG, W. R. L., BLOEMEN, J., DE KAUWE, M. G., HUDSON, P., RUEHR, N. K., POWELL, T. L., VON ARX, G., NARDINI, A. 2018. Xylem embolism refilling and resilience against drought-induced mortality in woody plants. *Ecological Research*, 33: 839–855.
- KUBOV, M., FLEISCHER, P., ROŽKOŠNÝ, J., KURJAK, D., KONÔPKOVÁ, A., GALKO, J., HÚDOKOVÁ, H., LALIK, M., RELL, S., PITNER, J., FLEISCHER, P. 2020. Drought or severe drought? Hemiparasitic yellow mistletoe (*Loranthus europaeus*) amplifies drought stress in sessile oak trees (*Quercus petraea*) by altering water status and physiological responses. *Water*, 12: 2955.
- KURJAK, D., KMEŤ, J., MACKOVÁ, M., FRÝDL, J., ŽIVČÁK, M., PALMROTH, S., DITMAROVÁ, L., GÖMÖRY, D. 2019. Variation in performance and thermostability of photosystem II in European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances is influenced more by acclimation than by adaptation. *European Journal of Forest Research*, 138: 79–92.
- KURJAK, D., STŘELCOVÁ, K., DITMAROVÁ, L., PRIWITZER, T., KMEŤ, J., HOMOLÁK, M., PICHLER, V. 2012. Physiological responses of irrigated and non-irrigated Norway spruce trees as a consequence of drought in field conditions. *European Journal of Forest Research*, 131: 1737–1746.
- ORTH, R., VOGEL, M. M., LUTERBACHER, J., PFISTER, C., SENEVIRATNE, S. I. 2016. Did European temperatures in 1540 exceed present-day records? *Environmental Research Letters*, 11: 114021.
- PETRÍK, P., PETEK, A., KONÔPKOVÁ, A., BOSELA, M., FLEISCHER, P., FRÝDL, J., KURJAK, D. 2020. Stomatal and leaf morphology response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances transferred to contrasting climatic conditions. *Forests*, 11: 1359.
- PETRÍK, P., PETEK-PETRÍK, A., KURJAK, D., MUKARRAM, M., KLEIN, T., GÖMÖRY, D., STŘELCOVÁ, K., FRÝDL, J., KONÔPKOVÁ, A. 2022. Internal adjustments in stomatal and leaf morphological traits of European beech (*Fagus sylvatica* L.) demonstrate its climate change adaptation. *Plant Biology*.
- ROCKWELL, F. E., SAGE, R. F. 2022. The functional significance of leaf venation patterns in C₃ and C₄ plants. *Annals of Botany*, 130: i–viii.
- SCHULDT, B., BURAS, A., AREND, M., VITASSE, Y., BEIERKUHNLEIN, C., DAMM, A., GHARUN, M., KAHMEN, A., et al. 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 45: 86–103.
- SENF, C., PFLUGMACHER, D., ZHIQIANG, Y., SEBALD, J., KNORN, J., NEUMANN, M., HOSTERT, P., SEIDL, R. 2018. Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. *Nature Communications*, 9: 4978.
- SEVANTO, S., MCDOWELL, N. G., DICKMAN, L. T., PANGLE, R. E., POCKMAN, W. T. 2014. How do trees die? A test of the hydraulic failure and carbon starvation hypotheses. *Plant, Cell & Environment*, 37: 153–161.
- TESKEY, R. O. 2015. Transpiration and respiration of trees in a changing environment. *Plant, Cell & Environment*, 38: 1699–1712.

TRIPATHY, R., MISHRA, V. 2023. Increasing compound heatwave–drought events in India under global warming. *Geophysical Research Letters*, 50: e2023GL105453.

WANG, Y., et al. 2024. Hydraulic adjustments mediate drought resilience in subtropical trees. *Tree Physiology*, 44(4): tpae027.

WORTEMANN, R., HERBETTE, S., BARIGAH, T. S., FUMANAL, B., ALIA, R., DUCOUSSO, A., GOMORY, D., ROECKEL-DREVET, P., COCHARD, H. 2011. Genotypic variability among European beech provenances in hydraulic traits underlying resistance to drought. *Tree Physiology*, 31: 1175–1185.

DLHODOBÝ BIOMETEOROLOGICKÝ VÝSKUM V ARBORÉTE BOROVÁ HORA SO ZAMERANÍM NA DENDROMETRICKÉ MERANIA

Adriana LEŠTIANSKA – Katarína STŘELCOVÁ – Jozef ZVERKO

Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovensko, [*adriana.lestianska@tuzvo.sk](mailto:adriana.lestianska@tuzvo.sk)

ABSTRACT

Leštianska A., Střelcová K., Zverko J.: Long-term biometeorological research in the Borová hora Arboretum with a focus on dendrometer-based monitoring

The increased frequency of extreme weather events poses a serious risk to the physiological and growth processes of forest tree species, directly affecting the overall functionality and stability of forest ecosystems. A fundamental question remains: how will forest tree species cope with site-specific conditions in the context of changing environmental climatic conditions? The Borová Hora Arboretum (350 m a. s. l.) represents a unique research site serving as a natural bioclimatological laboratory for studying the adaptation of forest trees to climate change. Within long-term biometeorological monitoring, regular measurements are collected from an automatic meteorological station, which is part of the Technical University in Zvolen (TUZVO) and National Forest Centre (NFC) network (www.forestweather.sk). Continuous monitoring of stem circumference dynamics is conducted using automatic dendrometers DRL26 (EMS Brno, CZ) installed on mature individuals of selected tree species (*Picea abies*, *Abies alba*, *Pinus sylvestris*, *Larix decidua*) and their provenances. These measurements provide detailed insights into both short-term and long-term growth responses, tree water balance, and interactions within the soil–plant–atmosphere system. Results indicate species- and provenance-specific physiological responses to climatic factors, showing strong correlations with local environmental conditions. Such findings may support the identification of tree species and provenances resilient to climate change and contribute to the development of more sustainable forest management strategies.

Key words: biometeorological network, dendrometer, stem circumference, tree water balance, provenance

ÚVOD

Klimatická zmena predstavuje jednu z najvýznamnejších environmentálnych výziev súčasnosti. Klimatické faktory sú kľúčovými faktormi riadiacimi fyziologické procesy stromov a významne ovplyvňujú stabilitu lesných ekosystémov. Zvyšovanie globálnej teploty, meniaci sa charakter zrážok a nárast extrémnych poveternostných udalostí zásadne ovplyvňujú fungovanie ekosystémov, poľnohospodárskej krajiny a najmä lesných porastov (IPCC 2021; LINDNER et al. 2010). Klimatické scenáre naznačujú zvýšenie frekvencie a závažnosti klimatických extrémov (SENEVIRATNE et al. 2021), čo môže ovplyvniť rozšírenie druhov, funkčnosť a stabilitu ekosystémov. Tolerancia stromov voči extrémnym podmienkam je podmienená kombináciou fyziologických, anatomických a morfológických adaptácií (LINDNER et al. 2010). Zatiaľ čo rast drevín vo vysokých nadmorských výškach je primárne ovplyvnený teplotou (FRANK a ESPER 2005; ROZENBERG et al. 2020), v nižších polohách zohráva rozhodujúcu úlohu dostupnosť vody (MÄKINEN et al. 2002). Rastúce teploty spojené s výskytom letného sucha tu majú často negatívny vplyv na rast stromov (ROZENBERG et al. 2020). Pre pochopenie týchto procesov je nevyhnutné dlhodobé a systematické monitorovanie, ktoré umožňuje identifikovať trendy a predikovať budúci vývoj. Dlhodobé klimatické rady dopĺňané údajmi o fenologických a rastových ukazovateľoch patria medzi základné zdroje informácií o reakciách ekosystémov na klimatické zmeny. V kontexte lesných ekosystémov je rast stromov citlivým indikátorom environmentálnych zmien.

Dynamika zmien obvodu kmeňa poskytuje detailné informácie o fyziologických reakciách drevín na klimatické stresory, ako sú suchá, horúčavy či zmeny vodného režimu (OBERHUBER et al. 2015; ZWEIFEL et al. 2021). Významným prínosom v tejto oblasti je využitie dendrometrov, ktoré umožňujú kontinuálne a presné monitorovanie zmien obvodu kmeňa stromov v krátkych časových intervaloch. Tieto prístroje poskytujú údaje

nielen o ročných prírastkoch, ale aj o krátkodobých fluktuáciách súvisiacich s dennými a sezónnymi zmenami klímy (ZWEIFEL et al. 2006; DESLAURIERS et al. 2007). Vďaka tomu je možné zachytiť okamžité reakcie stromov na aktuálne klimatické podmienky a zároveň analyzovať dlhodobé trendy vo vzťahu k prebiehajúcim zmenám prostredia. Denné zmeny obvodu kmeňa sú výsledkom tvorby nových xylémových buniek, a tiež reverzibilných elastických zmien kmeňových tkanív spôsobených kolísaním obsahu vody (DAUDET et al. 2005; DE SWAEF et al. 2015). Zmršťovanie kmeňa je druhovo špecifické a závisí od vlastností dreva (ZWEIFEL et al. 2014), pričom načasovanie týchto zmien úzko súvisí s transpiráciou a tokom miazgy (PERÄMÄKI et al. 2001; ZWEIFEL et al. 2006). Výber vhodných metód pre posúdenie vplyvu súčasných a budúcich klimatických faktorov na lesné porasty zostáva stále otvorenou otázkou. Charakteristické založené na vodnom stave stromov sú často spoľahlivejšie ako údaje o obsahu vody v prostredí. Nedeštruktívne kontinuálne merania dendrometrami poskytujú jedinečný pohľad na dynamiku zásob vody v strome aj na samotný rast (OBERHUBER et al. 2015; LEŠTIANSKA et al. 2020a,b; 2023; ZWEIFEL et al. 2021). Viaceré štúdie (napr. OBERHUBER et al. 2015; ZWEIFEL 2016; LEŠTIANSKA et al. 2020b) preukázali vhodnosť využitia parametrov vodného stavu stromov (napr. vodný deficit kmeňa a maximálne denné zmrštenie), odvodených zo záznamov zmien obvodov kmeňov prostredníctvom dendrometrov (podľa metodiky EHRENBERGER et al. 2012), pre porovnanie vodného stavu rôznych druhov stromov. Dlhodobé merania sú nevyhnutné pre zachytenie medziročnej variability a identifikáciu posunov v rastovej dynamike drevín (DOBBERTIN 2005).

Cieľom príspevku je prezentovať desaťročné výsledky monitorovania klimatických podmienok ako aj zmien obvodu kmeňov stromov na území arboréta Borová hora. Posúdenie druhovo špecifickej fyziologickej reakcie na klímu je náročné, pretože na určenie výlučného vplyvu klímy si vyžaduje homogénne podmienky stanovišťa a porastu. Arborétum predstavuje unikátne výskumné prostredie, ktoré umožňuje sledovať a porovnávať rastové reakcie viacerých ekonomicky významných druhov drevín a ich proveniencií rastúcich na rovnakom stanovišti, charakterizovanom odlišnými (prevažne teplejšími a suchšími) podmienkami oproti ich prirodzeným biotopom. Porovnávanie zmien obvodu kmeňa medzi druhmi rastúcimi na rovnakom stanovišti umožňuje presnejšie izolovať vplyv klímy a určiť druhovo špecifické reakcie. Takéto prostredie poskytuje jedinečnú príležitosť skúmať reakcie stromov aj v kontexte očakávaných budúcich klimatických scenárov.

Práca syntetizuje a sumarizuje hlavné poznatky z realizovaných meraní a publikovaných výsledkov, poukazuje na časové zmeny v rastovej dynamike vybraných drevín a analyzuje ich vzťah k aktuálnym klimatickým faktorom. Osobitná pozornosť je venovaná druhovo špecifickým reakciám na meniace sa podmienky prostredia a ich významu pre dlhodobé hodnotenie vplyvu klimatických zmien na rast stromov. Monitorovacie obdobie od roku 2015 do roku 2023 zároveň poskytuje dostatočne dlhý interval na identifikáciu klimatických extrémov.

VÝSKUNNÁ LOKALITA, MATERIÁL A METÓDY

Proveniencie skúmaných ihličnatých druhov drevín (smrek obyčajný, jedľa biela, smrekovec opadavý, borovica lesná) boli vysadené na 9 výskumných plochách v rámci areálu Arborétum Borová hora (48°35' s. š., 19°07' v. d., Zvolenská kotlina, 353 m n. m.) a podľa klasifikácie Zlatníka (1976) reprezentuje 2. lesný vegetačný stupeň (bukovo-dubový). Arborétum je orientované na pôvodnú karpatskú dendroflóru ex situ so špeciálnym zameraním na dendroflóru Slovenska v celej šírke jej premenlivosti. Cieľom je zachovať a archivovať genofond prírodných ekosystémov (LUKÁČIK et al. 2025). Z klimatického hľadiska je región je teplý, mierne vlhký, s chladnou zimou s priemernou ročnou teplotou vzduchu 8,2 °C a ročným úhrnom zrážok 651 mm. Počas vegetačného obdobia (apríl–september) dosahuje dlhodobá priemerná teplota vzduchu 14,7 °C a úhrn zrážok je 377 mm. Klimatické údaje reprezentujú dlhodobý priemer pre obdobie referenčnej klímy 1961–1990 a boli odvodené na základe dát z blízkej meteorologickej stanice Sliač (313 m n. m.), ktoré poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ). Hlavným pôdotvorným substrátom sú svahoviny tufické pôdy. Dominantným pôdnym typom je kambizem (nasýtené typické hnedé lesné pôdy) a pseudoglejová luvizem (<https://geo.enviroportal.sk/atlassr>).

Každá výskumná plocha reprezentuje jeden druh dreviny v rámci jednej proveniencie. Výskum je zameraný na štyri druhy ihličnatých drevín: smrek obyčajný (*Picea abies* (L.) Karst.), jedľa biela (*Abies alba* Mill.), borovica lesná (*Pinus sylvestris* L.) a smrekovec opadavý (*Larix decidua* Mill.) (Tab. 1). V tabuľke 1 je uvedený rok výsadby 3-ročných sadeníc jednotlivých skúmaných proveniencií na území arboréta. Na každej ploche bolo vybraných minimálne päť stromov, na ktoré boli vo výške 2,0–2,5 m nainštalované digitálne páskové dendrometre s automatickým záznamom údajov (model DRL 26, EMS Brno, CZ, presnosť ±0,01 mm). Obvody kmeňov sú merané v 20-minútových a hodinových intervaloch.

Meteorologické údaje: globálne žiarenie (GR, kWh.m⁻²), teplota vzduchu (AT, °C), relatívna vlhkosť vzduchu (RH, %) a zrážky (P, mm) sú kontinuálne zaznamenávané pomocou automatickej stanice umiestnenej na otvorenom priestranstve v blízkosti (od 80 do 150 m) výskumných plôch. Globálne žiarenie, teplota a vlhkosť vzduchu je meraná vo výške 2 m a zrážky 1 m nad povrchom. Meteorologické údaje sú zaznamenávané v intervale každých 10 minút. Od roku 2007 ju prevádzkuje Technická univerzita vo Zvolene a patrí do siete lesníckeho meteorologického monitoringu na Slovensku (www.forestweather.sk). Z meraných meteorologických údajov sú

odvodené ďalšie údaje ako napr. vodný sýtosťný deficit (VPD, Pa), potenciálna evapotranspirácia (PET, mm), požiarň index (AI) a i. (www.forestweather.sk). Na každej výskumnej ploche pod lesných porastom je meraný pôdny vodný potenciál (SWP, bar) v troch hĺbkach 15, 30 a 50 cm pomocou sadrových bločkov a datalogera MicroLog SP3 (EMS Brno, CZ). Merané údaje sú automaticky kontinuálne zaznamenávané v 20 minútových alebo hodinových intervaloch.

Tab. 1 Arborétum Borová hora a pôvodná lokalita skúmaných druhov drevín (proveniencia) – charakteristika
Tab 1 Borová hora Arboretum and the original location of the studied tree species (provenance) – characteristics

		Proveniencia	Orografická jednotka	Nadmorská výška [m n. m.]	Rok výsadby (3-ročné sadenice) v arboréte
Pôvodná lokalita skúmaných druhov drevín	Jedľa biela (<i>Abies alba</i>)	slovenská	Kremnické vrchy	950	1972
	Smrekovec opadavý (<i>Larix decidua</i>)	slovenská	Spišsko-gemerský kras	900	1968
	Borovica lesná (<i>Pinus sylvestris</i>)	ruská ukrajinská	Sumajska, Kurskaja, Vladimírskaja, Černigovskaja oblasť	108–250	1965
		slovenská	Spišsko-gemerský kras	950	1984
	Smrek obyčajný (<i>Picea abies</i>)	ruská ukrajinská	Archangel'skaja, Volgogradska oblasť	33–117	1965
		slovenská	Podtatranská kotlina	800	1969
			Volovské vrchy	500	1989
				750	1990
				1100	1990
Arborétum Borová hora			Zvolenská kotlina	350	-

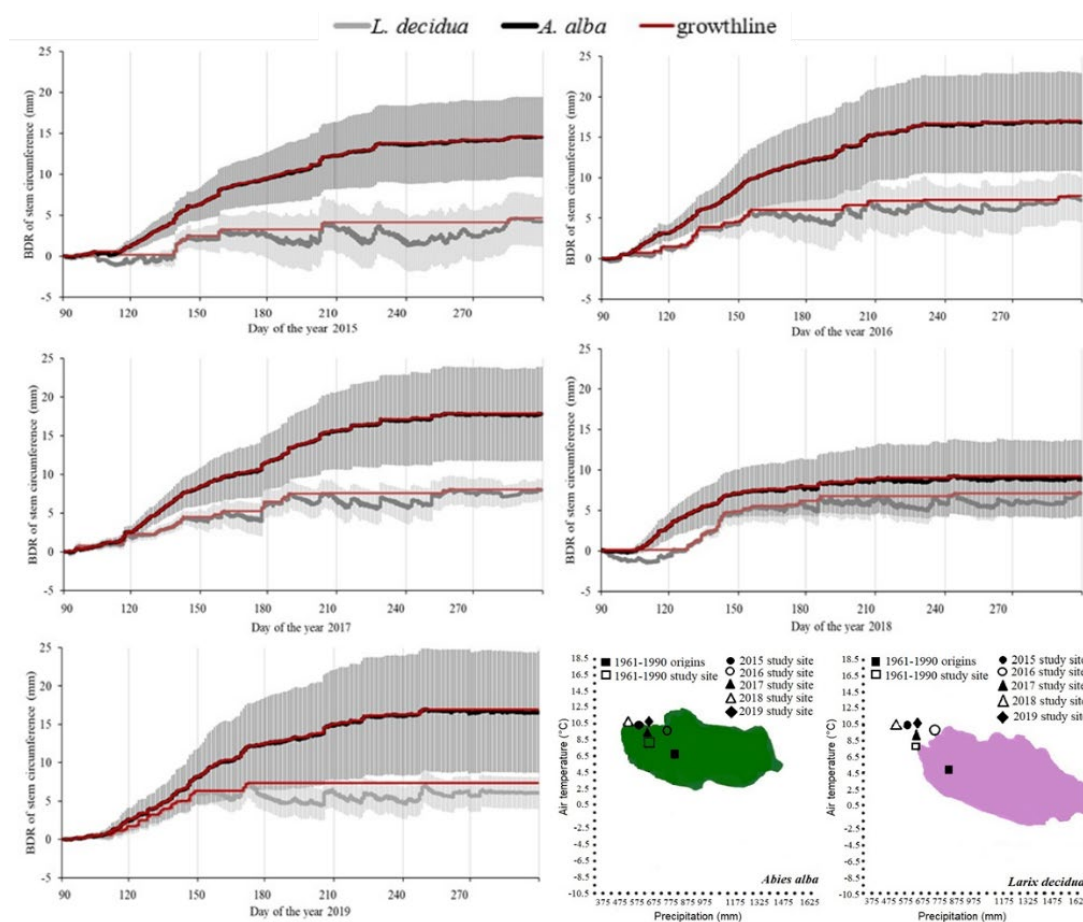
VÝSLEDKY A DISKUSIA

Dlhodobý biometeorologický výskum v arboréte Borová hora umožnil detailne charakterizovať rastové a fyziologické prejavy viacerých hospodársky významných druhov lesných drevín so zameraním na ihličnaté dreviny ako smrek obyčajný (*Picea abies*), jedľa biela (*Abies alba*), borovica lesná (*Pinus sylvestris*) a smrekovec opadavý (*Larix decidua*) a ich rôzne proveniencie v podmienkach teplejšej a v prevažnej miere aj suchšej klímy v porovnaní s klímou ich prirodzených biotopov (Tab. 1). Arborétum svojou polohou a širokou vnútroduhovou variabilitou drevín predstavuje jedinečné biometeorologické laboratórium pre výskum dopadov meniacich sa klimatických podmienok na lesné dreviny a poskytuje priestor pre dlhodobé skúmanie ich odolnosti a adaptačného potenciálu v podmienkach očakávanej klimatickej zmeny.

Klimatické faktory počas sledovaného desaťročia (2015–2023) vykazovali výrazné medziročné odlišnosti, ktoré sa odzrkadlili na fyziologických a rastových reakciách sledovaných drevín. Výsledky meraní pomocou dendrometrov odhalili výrazné druhovo špecifické reakcie na meniace sa klimatické podmienky. V štúdií LEŠTIANSKA et al. (2020a) boli analyzované zmeny obvodu kmeňov v priebehu vegetačných sezón 2015–2019 dvoch druhov drevín *Abies alba* a *Larix decidua* rastúce v arboréte, ktoré je klimaticky charakteristické teplejšími a suchšími podmienkami v porovnaní s ich prirodzenými biotopmi (Obr. 3). Výsledky štúdie potvrdili, že druhovo špecifické ekofyziologické a morfológické znaky *Abies alba* a *Larix decidua* viedli k významným rozdielom vo vzťahoch medzi meteorologickými charakteristikami a rastom a vodnej bilancie stromu. Počas vegetačných období, ktoré sa vyznačovali vysoko nadnormálnou teplotou a nerovnomerným rozložením zrážok boli u *Larix decidua* pozorované výraznejšie zmeny dennej dehydratácie. Anisohydrická stratégia *Larix decidua* prejavujúca sa oneskorenou reguláciou prieduchovej aktivity, spôsobila, že bol viac ovplyvnený dlhšími obdobiami bez zrážok a vysokou evapotranspiráciou. Hoci *Abies alba* mala väčšie sezónne radiálne prírastky, v roku 2018 s extrémne nadnormálnou teplotou a podnormálnymi zrážkami aj tento druh významne znížil svoj prírastok. V prípade *Larix decidua* nebol vplyv obmedzených vlhkostných podmienok taký priamočiary, pretože najnižší prírastok bol pozorovaný v roku 2015, zatiaľ čo najhoršie podmienky pôdnej vody charakterizované najväčším deficitom vody v kmeni boli pozorované v roku 2019. To mohlo byť spôsobené dlhšími obdobiami bez dažďa, ktoré sa vyskytli v týchto dvoch rokoch, zatiaľ čo v roku 2018 boli dažďové udalosti pravidelnejšie, hoci s nižšou intenzitou (Obr. 3) (LEŠTIANSKA et al. 2020a).

Na analýzu vnútroročných zmien obvodu kmeňa štyroch druhov ihličnatých stromov (*Larix decidua*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris* a *Abies alba*) so zameraním na klimaticky extrémny rok 2015 je zameraná práca LEŠTIANSKA et al. (2025). Priemerná teplota v analyzovanom vegetačnom období roku 2015 prekročila dlhodobú hodnotu (1961–1990) a meteorologické sucho bolo identifikované ako jedno z najzávažnejších období sucha od leta 2003, ktoré postihlo veľkú časť Európy vrátane Slovenska. *L. decidua* vykazovala najnižší kumulatívny rast pravdepodobne v dôsledku nepriaznivých klimatických podmienok, ako aj zhoršenia vodného stavu stromov súvisiaceho s jej anizohydrickou stratégiou. Skutočnosť, že *P. sylvestris* bol citlivejším druhom ako *A. alba* alebo *P. abies*, bola prekvapivá. Výsledky sú však v súlade s rastúcim počtom regionálnych štúdií, ktoré uvádzajú výraznejšiu citlivosť *P. sylvestris* na zvýšené teploty a sucho. Zo všetkých analyzovaných druhov iba *A. alba* vykazovala rast v dôsledku významných pozitívnych korelácií radiálneho prírastku a deficitu vody v stromoch s teplotou a globálnym žiarením, a to aj napriek obmedzeniam vody v prostredí. Na základe odvodených 30 premenných opisujúcich charakteristiky radiálneho rastu a stavu vody boli identifikované samostatné druhovo špecifické skupiny a veľká medzidruhovú variabilita. Charakteristiky sa najviac líšili medzi *A. alba* a *L. decidua*, zatiaľ čo správanie *P. abies* a *A. alba* bolo podobné (LEŠTIANSKA et al. 2025).

V štúdií LEŠTIANSKA et al. (2020b) bola taktiež hodnotená sezónna dynamika stavu vody v kmeňoch štyroch druhov ihličnanov: *Abies alba*, *Larix decidua*, *Picea abies* a *Pinus sylvestris*, avšak v priebehu dvoch klimaticky kontrastných vegetačných období rokov 2017 a 2018. Sezónny prírastok obvodu kmeňa všetkých druhov stromov bol v roku 2017 vyšší ako v suchšom a teplejšom roku 2018. *Larix decidua* a *Picea abies* reagovali väčšími výkyvmi denného vodného deficitu kmeňov a nižšími ročnými prírastkami, najmä počas epizód sucha.

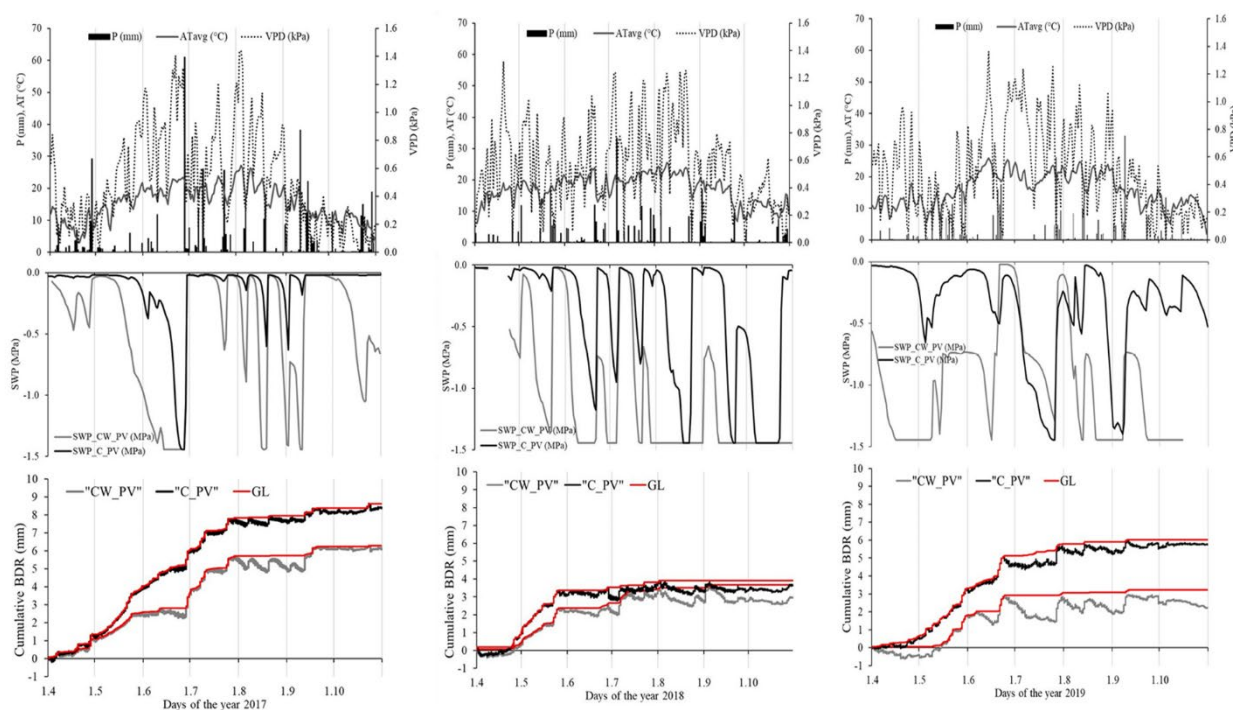


Obr. 3 Sezónny priebeh zmien obvodu kmeňov (BDR [mm]) skúmaných drevín *Larix decidua* a *Abies alba* a rastová krivka (growth line) v rokoch 2015 až 2019. Každá krivka reprezentuje priemer z piatich jedincov každého druhu. Šedé stĺpce reprezentujú smerodajnú odchýlku BDR ($n = 5$). Druhovo špecifická distribúcia vzhľadom na dlhodobé hodnoty teploty vzduchu (Air temperature [°C]) a zrážok (Precipitation [mm]) pôvodnej lokality (1961–1990 origins) v porovnaní s lokálnymi dlhodobými hodnotami (1961–1990 study site) a hodnotami reprezentujúcimi roky 2015 až 2019 (2015–2019 study site) (vpravo dole) (LEŠTIANSKA et al. 2020a)

Fig. 3 Seasonal courses of stem circumference changes (BDR [mm]) of the studied *Larix decidua* and *Abies alba* trees and growth line in the years 2015–2019. Each line represents an average from five individuals of the same species. Grey bars represent the standard deviations of BDR ($n = 5$). Species-specific distribution with regard to annual long-term values of air temperature (Air temperature [°C]) and precipitation (Precipitation [mm]) of the original habitats (1961–1990 origins) compared to local long-term values (1961–1990 study site) and local values representing the years 2015–2019 (2015–2019 study site) (bottom right) (LEŠTIANSKA et al. 2020a)

Naopak, *Abies alba* vykazovala plynulejší radiálny rast a menšie výkyvy vodného stavu, čo súvisí s jej schopnosťou regulovať transpiráciu a čerpať vodu z hlbších pôdných vrstiev. Avšak, počas sucha v roku 2018 *Pinus sylvestris* predbehla *Abies alba* v radiálnom raste, čo naznačuje, že hoci *Abies alba* znesie mierne zvýšenie teploty, stáva sa menej odolnou ako *Pinus sylvestris*, ak je vyššia teplota spojená s nedostatkom vody (LEŠTIANSKA et al. 2020b).

Výsledky štúdie LEŠTIANSKA et al. (2023a) ukazujú, že pôvod hrá kľúčovú úlohu v reakcii stromov na nové environmentálne podmienky (Obr. 4). Práca odhalila odlišný charakter rastu dvoch proveniencií *Picea abies*, ktoré oba pochádzajú z chladnejších podmienok a jeden aj z vlhších podmienok ako ich súčasná lokalita. V prípade proveniencie C_PV sa vlhkostné podmienky na súčasnej lokalite podobali podmienkam na mieste jej pôvodu. Ročné radiálne prírastky proveniencie z chladnejších a vlhších podmienok (CW_PV) boli nižšie ako u C_PV vo všetkých skúmaných rokoch (2017–2019), zatiaľ čo kolísanie prírastku medzi rokmi bolo mierne väčšie pre provenienciu z chladnejších podmienok (Obr. 4). Nižšie radiálne prírastky CW_PV naznačujú, že táto proveniencia sa adaptovala na menej priaznivé vlhkostné podmienky v porovnaní s lokalitou svojho pôvodu a použila stratégiu šetrenia vodou, ktorá zahŕňa skoré uzavretie prieduchov, aby sa znížila jej spotreba vody, a následne nižšia produkcia. Proveniencia z chladnejších podmienok (C_PV) sa teda nestretla s dlhodobým vodným stresom a jej rast mohol byť intenzívnejší. Pre vysvetlenie vzťahov medzi charakteristikami stavu vody v stromoch (W, MDS) a environmentálnymi podmienkami boli použité rôzne metódy strojového učenia. Aplikácia štyroch metód strojového učenia potvrdila silný vplyv pôdneho vodného potenciálu a klimatickej vodnej bilancie na deficit vody stromu LEŠTIANSKA et al. (2023a).



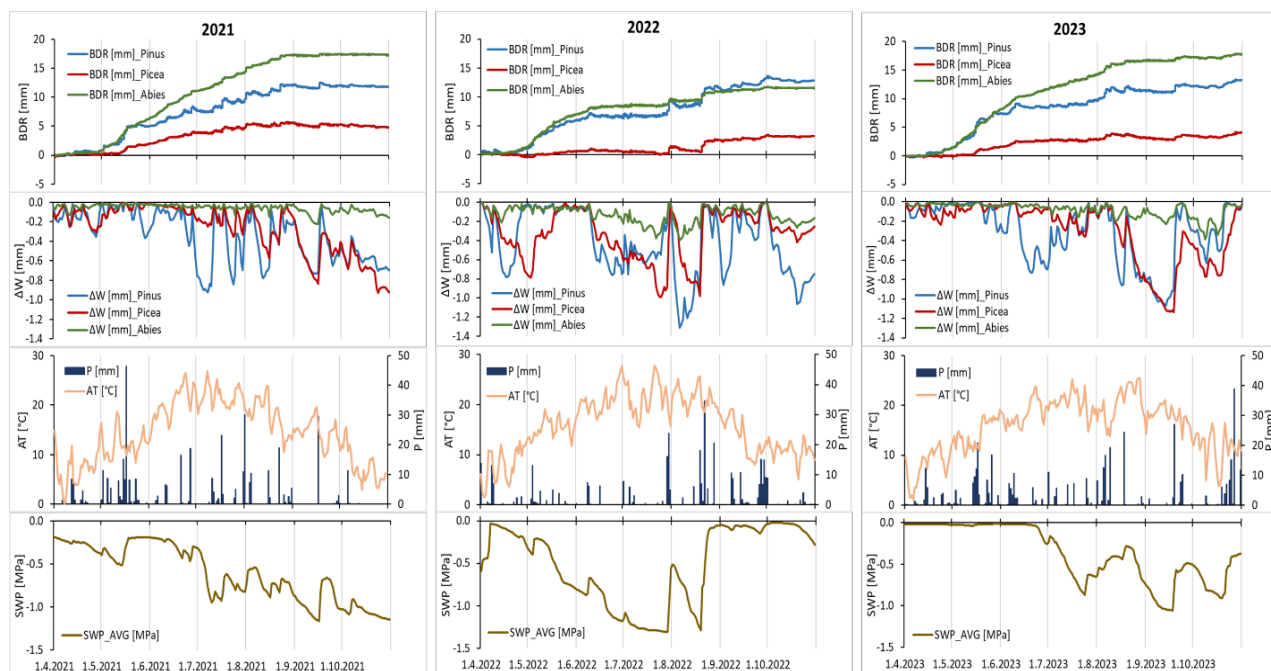
Obr. 4 Denné klimatologické charakteristiky: zrážky (P [mm]), teplota vzduchu (ATavg [°C]), vodný sýtosťný deficit (VPD [kPa]) a pôdny vodný potenciál (SWP [MPa]) a sezónny priebeh kumulatívnych zmien obvodu kmeňov (BDR [mm]) dvoch proveniencií smreka obyčajného (*Picea abies*) - z chladnejších a vlhkejších podmienok (CW_PV) a z chladnejších podmienok (C_PV) a ich rastové krivky (GL) počas vegetačnej sezóny (apríl–október) rokov 2017–2019 (LEŠTIANSKA et al. 2023a)

Fig. 4 Daily climatological characteristics: precipitation (P [mm]), air temperature (ATavg [°C]), vapour pressure deficit (VPD [kPa]) and soil water potential (SWP [MPa]) and seasonal daily course of cumulative band dendrometer records (BDR [mm]) of stem circumference of the provenance from cooler and wetter conditions (CW_PV) and the provenance from cooler conditions (C_PV) of *P. abies* and their growth lines (GL) in the study period (April–October) of the individual years 2017–2019 (LEŠTIANSKA et al. 2023a)

Práca LEŠTIANSKA et al. (2023b) je zameraná na analýzu vodnej bilancie v systéme pôda-rastlina-atmosféra na základe hodnotenia vzťahu medzi atmosférickými a pôdnymi faktormi prostredia a bilancie vody stromu. V štúdií sú porovnávané zmeny obvodu kmeňov a vodného stavu kmeňov dvoch druhov drevín *Abies alba* a *Picea abies* vo vzťahu k faktorom prostredia v priebehu klimaticky odlišných až kontrastných rokov 2020 a 2022. Priemerná

teplota vzduchu v obidvoch rokoch prevyšovala dlhodobý priemer (1961–1990), pričom v roku 2022 odchýlka teploty vzduchu dosiahla hodnotu nad $+2^{\circ}\text{C}$. Rok 2020 bol zrážkovo nadnormálny, keď po suchej jari nasledovalo mimoriadne vlhké leto s viacerými intenzívnymi zrážkovými epizódami. Tento rok sa ukázal ako vlhkostne kontrastný k roku 2022, ktorý bol jedným z klimaticky najextrémnejších monitorovacieho obdobia 2015–2023. V lete 2022 bolo zaznamenaných až 34 tropických dní s teplotou nad 30°C , pričom zrážkový úhrn dosiahol len 83 % dlhodobého priemeru. V období od mája do júla spadlo len 34 % zrážok oproti dlhodobému normálu, čo sa prejavilo aj v extrémne nízkych hodnotách pôdneho vodného potenciálu. V priaznivejšom roku 2020 *Picea abies* aj *Abies alba* dosiahli vyšší prírastok, pričom *Abies alba* si aj v suchšom roku 2022 zachovala schopnosť pokračovať v raste. Naopak, *Picea abies* preukázal stagnáciu rastu a vyššiu citlivosť na deficit pôdnej vody, čo súvisí s jeho plytkým koreňovým systémom (LEŠTIANSKA et al. 2023b).

Štúdia LEŠTIANSKA et al. (2024) bola zrealizovaná na základe meraní v rokoch 2021–2023. Teplota stanovišťa arboréta Borová hora prekročila teplotu v porovnaní s prirodzenými biotopmi drevín *Abies alba*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris* o 2°C alebo viac a ročný úhrn zrážok bol o 100 mm nižší ako v ich pôvodných biotopoch (dlhodobá priemerná ročná teplota vzduchu a dlhodobý priemerný ročný úhrn zrážok reprezentujú obdobie rokov 1961–1990). Sezónny nárast obvodov všetkých druhov bol v rokoch 2021 a 2023 vyšší ako v suchšom a teplejšom roku 2022 (Obr. 5). *Abies alba* vykazovala počas vegetačného obdobia plynulý radiálny rast. *Picea abies* bol citlivejším druhom na podmienky prostredia ako *Abies alba* a *Pinus sylvestris*. Počas sucha v roku 2022 však *Pinus sylvestris* predbehla *Abies alba* v radiálnom raste, čo potvrdzuje predchádzajúce zistenia prezentované v práci LEŠTIANSKA et al. (2020b). Hoci *Abies alba* znesie zvýšenie teploty, stáva sa menej odolnou ako *Pinus sylvestris*, ak sa vyššia teplota kombinuje s nedostatkom vody. Hodnoty deficitu vody stromov (ΔW) odvodené zo záznamov zmien obvodu kmeňa boli druhovo špecifické a silne korelovali s faktormi prostredia v rámci jednotlivých druhov. Prepojenie ΔW s atmosférickými podmienkami naznačuje, že zvyšujúca sa teplota môže negatívne ovplyvniť rast. Vysoké teploty stimulujú rýchlosť odparovania, čo spôsobuje obmedzenia v dostupnosti vody, čo sa vyznačuje nízkym vodným potenciálom pôdy (SWP). Pokles hodnôt SWP počas bezzrážkových období vysvetľuje „plošiny“ v sezónnych priebehoch zmien obvodu (Obr. 5).



Obr. 5 Zmeny obvodu kmeňov (BDR [mm]), vodný deficit kmeňov (ΔW [mm]) skúmaných druhov drevín: *Picea abies* (*Picea*), *Pinus sylvestris* (*Pinus*) and *Abies alba* (*Abies*). Priebeh priemernej dennej teploty vzduchu (AT [$^{\circ}\text{C}$]), denný úhrn zrážok (P [mm]) a pôdny vodný potenciál (SWP [MPa]) zaznamenané počas vegetačnej sezóny (apríl–október) rokov 2021, 2022 and 2023 (LEŠTIANSKA et al. 2024)

Fig. 5 Band dendrometer records (BDR [mm]) of stem circumference, mean daily stem water deficit (ΔW [mm]) for the studied tree species: *Picea abies* (*Picea*), *Pinus sylvestris* (*Pinus*) and *Abies alba* (*Abies*). Course of daily mean air temperature (AT [$^{\circ}\text{C}$]), daily precipitation totals (P [mm]) and soil water potential (SWP [MPa]) recorded during the study periods (April–October) in 2021, 2022 and 2023 (LEŠTIANSKA et al. 2024)

ZÁVER

Na základe desaťročného monitorovania fyziologických reakcií vybraných druhov ihličnatých drevín v arboréte Borová hora možno konštatovať, že klimatické extrémny, najmä zvýšené teploty a premenlivý zrážkový režim, významne ovplyvňujú rastovú dynamiku a vodný stav stromov. Výsledky ukazujú výraznú druhovo a provenienčne špecifickú variabilitu v reakciách na klimatické stresory, pričom *Abies alba* preukázala najvyššiu odolnosť voči suchu vďaka schopnosti čerpať vodu z hlbších pôdných vrstiev a regulovať transpiráciu. Naopak, *Picea abies* sa ukázal ako druh s vyššou citlivosťou na deficit pôdnej vody, čo sa prejavilo stagnáciou rastu počas suchých období.

Dlhodobé a kontinuálne merania pomocou dendrometrov umožnili detailne analyzovať interakcie v systéme pôda–rastlina–atmosféra, identifikovať citlivé obdobia vegetačného rastu a posúdiť adaptačný potenciál jednotlivých druhov a proveniencií. Výsledky výskumu majú významný potenciál pre aplikáciu v lesníckej praxi, najmä pri výbere druhov a proveniencií vhodných pre výsadbu v klimaticky ohrozených oblastiach. Arborétum Borová hora tak predstavuje jedinečnú výskumnú lokalitu, ktorá umožňuje testovanie odolnosti drevín v reálnych podmienkach a prispieva k rozvoju udržateľného hospodárenia v lesoch.

Pod'akovanie

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

LITERATÚRA

- 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. *Journal of Experimental Botany* 56 (409), s. 135–144. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri026>
- DE SWAEF, T., DE SCHEPPER, V., VANDEGEHUCHTE, M.W., STEPPE, K. 2015. Stem diameter variations as a versatile research tool in ecophysiology. *Tree Physiology* 35 (10), s. 1047–1061. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv080>
- DESLAURIERS, A., ROSSI, S., ANFODILLO, T., SARACINO, A. 2007. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology* 27 (6), s. 765–773. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.6.863>
- DOBBERTIN, M. 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research* 124, s. 319–333. <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0085-3>
- 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. *Functional Plant Biology* 39, s. 297–305. <https://doi.org/10.1071/FP11206>
- IPCC 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- FRANK D., ESPER J. 2005. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. *Dendrochronologia* 22, s. 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.02.004>
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR, MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER, P., STŘELCOVÁ, K. 2020a. Influence of warmer and drier environmental conditions on species-specific stem circumference dynamics and water status of conifers in submontane zone of Central Slovakia. *Water* 12 (10), 2945. <https://doi.org/10.3390/w12102945>
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR, MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER, P., STŘELCOVÁ, K. 2020b. Interspecific variation in growth and tree water status of conifers under water-limited conditions. *Journal of hydrology and hydromechanics* 68 (4), s. 368–381. <https://doi.org/10.2478/johh-2020-0028>
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR, MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER, P. SR, STŘELCOVÁ, K. 2025. Intra-annual dynamics of stem circumference variation and water status of four coniferous tree species (*Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Larix decidua* and *Abies alba*) under warmer and water-limited conditions. *Biologia* 80, s. 1125–1142. <https://doi.org/10.1007/s11756-024-01693-7>
- LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER, P. JR, MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER, P., NALEVANKOVÁ, P., STŘELCOVÁ, K. 2023a. Effect of provenance and environmental factors on tree growth and tree water status of Norway spruce. *Forests* 14 (1), 156. <https://doi.org/10.3390/f14010156>
- LEŠTIANSKA, A., STŘELCOVÁ, K., FLEISCHER, P. 2023b. Hodnotenie bilancie vody v systéme pôda–rastlina–atmosféra na základe monitoringu zmien obvodu kmeňov. In: *Hydrologie malého povodí 2023*, s. 100–108. ISBN 978-80-87117-22-4. dostupné z: https://www.ih.cas.cz/wp-content/uploads/2023/02/HMP2023_Sbornik.pdf.

- LEŠTIANSKA, A., STŘELCOVÁ, K., FLEISCHER, P. 2024. Dynamics of stem circumference changes as a new perspective on the water balance in the soil-plant-atmosphere system. In: 19th Biennial conference ERB 2024: Hydrological investigations in human- and climate change-impacted small catchments. [Palma]: [University of the Balearic Islands], 2024, s. 61–62.
- LINDNER, M., MAROSCHEK, M., NETHERER, S., KREMER, A., BARBATI, A., GARCIA-GONZALO, J., et al. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259 (4), s. 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- LUKÁČIK, I. 2025. Význam a úloha Arboréta Borová hora Technickej univerzity vo Zvolene v ochrane diverzity drevín vo výchovno-vzdelávacom procese a vedeckom výskume. In: SARVAŠOVÁ I., LUKÁČIK, I. (eds.). Úlohy a trendy rozvoja arborét a botanických záhrad v ochrane diverzity rastlín, výskume a vzdelávaní. Arborétum Borová hora, Technická univerzita vo Zvolene, Zborník pôvodných vedeckých prác pri príležitosti 60. výročia založenia Arboréta Borová hora, 125 s.
- MÄKINEN, H., NÖJD, P., KAHLE, H.P., NEUMANN, U., TVEITE, B., MIELIKÄINEN, K., RÖHLE, H., SPIECKER, H. 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest and Ecology Management* 171, s. 243–259. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00786-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00786-1)
- OBERHUBER, W., HAMMERLE, A., KOFLER, W. 2015. Tree water status and growth of saplings and mature Norway spruce (*Picea abies*) at a dry distribution limit. *Frontiers Plant Science* 6, 703. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00703>
- PERÄMÄKI, M., NIKINMAA, E., SEVANTO, S., ILVESNIEMI, H., SIIVOLA, E., HARI, P., VESALAET, T. 2001. Tree stem diameter variations and transpiration in Scots pine: an analysis using a dynamic sap flow model. *Tree Physiology* 21 (12–13), s. 889–897. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.12-13.889>
- ROZENBERG, P., CHAUVIN, T., ESCOBAR-SANDOVAL, M., HUARD, F., SHISHOV, V., CHARPENTIER, J., SERGENT, A., VARGAS-HERNANDEZ, J.J., MARTINEZ MEIER, A., PÂQUES, L. 2020. Climate warming differently affects *Larix decidua* ring formation at each end of a French Alps elevational gradient. *Annals for Science* 77, 54. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00958-w>
- SENEVIRANTE, S. I., ZHANG, X., ADNAN, M., et al. 2021. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate (Chapter 11). In: IPCC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press:1513–1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- ZLATNÍK, A. 1976. Lesnícka fytoecológia. SZN, Praha, 495 s.**
- ZWEIFEL, R., DREW, D. M., SCHWEINGRUBER, F., DOWNES, G. M. 2014. Xylem as the main origin of stem radius changes in Eucalyptus. *Functional Plant Biology* 41, s. 520–615. <https://doi.org/10.1071/FP13240>
- ZWEIFEL, R., HAENI, M., BUCHMANN, N., EUGSTER, W. 2016. Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytology* 211, s. 839–849. <https://doi.org/10.1111/nph.13995>
- ZWEIFEL, R., STERCK, F., BRAUN, S., BUCHMANN, N., EUGSTER, W., GESSLER, A. et al. 2021. Why trees grow in the dark. *New Phytology* 231, 21742185. <https://doi.org/10.1111/nph.17552>
- ZWEIFEL, R., ZIMMERMANN, L., ZEUGIN, F., NEWBERY, D.M. 2006. Intra-annual radial growth and water relations of trees: implication towards a growth mechanism. *Journal of Experimental Botany* 57, s. 1445–1459. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj125>

METEOROLOGICKÁ MĚŘENÍ A KLIMA V POVODÍ ŘEKY OSTRAVICE

Pavel LIPINA – Veronika ŠUSTKOVÁ

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava, K Myslivně 3/2182, 708 00 Ostrava-Poruba, pavel.lipina@chmi.cz, veronika.sustkova@chmi.cz

ABSTRACT

Lipina, P., Šustková, V.: Meteorological measurements and climate in the Ostravice river basin

The Ostravice River Basin is an interesting area in the northeastern part of the Moravian-Silesian Region. It stretches approximately 55 km from north to south. In the southern and southeastern mountainous parts, it borders Slovakia, and in the north, it ends in Ostrava. The highest point of the basin is the peak of Lysá hora with an altitude of 1,323 m above sea level. The Ostravice River is formed by the confluence of the Bílá and Černá Ostravice rivers near Staré Hamry, with a total length of 65.1 km and a catchment area of 826.8 km². It flows into the Odra River in Ostrava-Hrušov.

The warmest area is in the northern part of the basin. The locality of Ostrava, Přívoz (210 m above sea level) has an average annual air temperature of 9,7 °C for the period 1991–2020. The coldest area of the basin is the peak of Lysá hora (1322 m above sea level) with 3,7 °C. The average annual precipitation totals for the period 1991–2020 in the Ostravice river basin are 100 to 200 mm lower than those reported in the study (Soukal, Čermák 1945) for the period 1901–1930. The measured locations, or technical series of annual precipitation totals for the period 1991–2020, are 718 mm in Slezská Ostrava, 807 mm in Lučina, 1191 mm in Čeladná, 1183 mm in Ostravice, 1144 mm in Staré Hamry, and 1459 mm on Lysá hora.

Key words: meteorological measurements, climate, the Ostravice river basin, temperature, precipitation

ÚVOD

Povodí řeky Ostravice je zajímavou oblastí v severovýchodní části Moravskoslezského kraje. V téměř severojižním směru má vzdušnou délku okolo 55 km. V jižní a jihovýchodní hornaté části sousedí se Slovenskem a na severu končí v Ostravě. Nejvyšším bodem povodí je vrchol Lysé hory s nadmořskou výškou 1323 m n. m.

Řeka Ostravice vzniká soutokem Bílé a Černé Ostravice u Starých Hamrů v nadmořské výšce 521 m n. m., celková délka toku činí 65,1 km, povodí má plochu 826,8 km². Ústí zprava do Odry v Ostravě-Hrušově v nadmořské výšce 204 m n. m., průměrný průtok u ústí činí 14,25 m³.s⁻¹.

Historie meteorologických měření v tomto povodí se datuje od února roku 1867, kdy bylo zahájeno měření v Ostravě-Přívoze. V Beskydech naši předci začali měřit a sledovat počasí např. v Ostravici v roce 1872 a bohatá tradice měření pokračuje do současnosti.

V této oblasti probíhají také krátkodobé či dlouhodobé výzkumy s umístěním experimentálních pracovišť mající vztah k počasí a podnebí. Např. experimentální povodí Červíku ve Starých Hamrech, či pracoviště Akademie věd na Bílém Kříži (CzechGlobe).

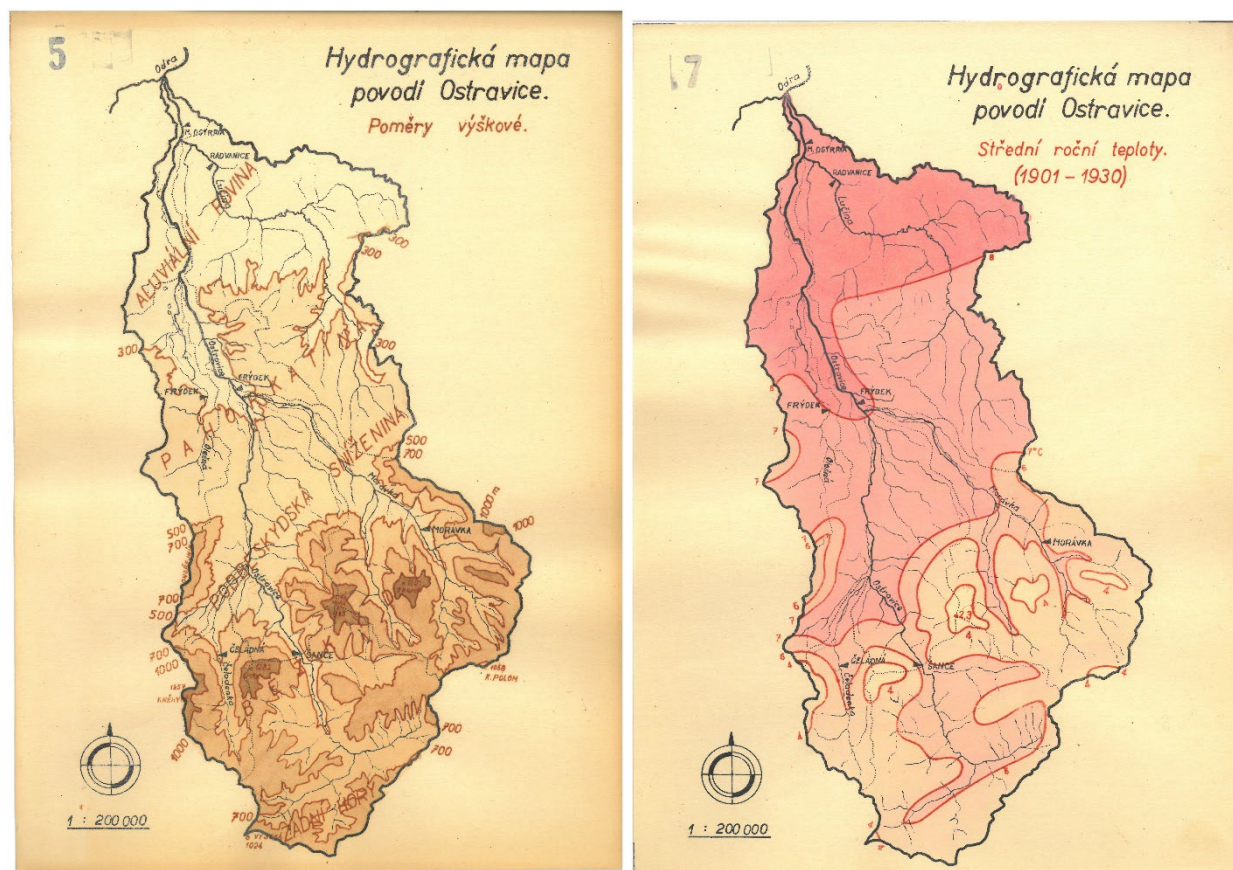
MATERIAL A METODY

Řeka Ostravice vzniká soutokem Bílé a Černé Ostravice u Starých Hamrů v nadmořské výšce 521 m n. m., přičemž hydrologicky se za pramennou se považuje ta prvně ze jmenovaných, Bílá Ostravice. Pramení v lokalitě Bílá-Hlavatá na moravsko-slovenském pomezí přibližně v nadmořské výšce 720 m n. m. v sedle mezi Vysokou a Kladnatou, jak uvádí (Soukal, Čermák, 1945) s přítoky Sviňarky a Smradlavy pod hraničním pásmem mezi Čartákem, Bumbálkou, Masarykovou chatou a Kmínkem. Odtud odtéká severovýchodním směrem a po 9,7 km se stéká s Černou Ostravicí, která do ní ústí zprava. Černá Ostravice pramení pod Bílým Křížem v nadmořské výšce 887 m n. m., kde je u hotelu Sulov uměle upravený pramen. Od soutoku Bílé a Černé Ostravice se nazývá Ostravice, její trasa se láme a obrací k severu, a po 54,2 km ústí do řeky Odry v Ostravě, Hrušově přibližně na kótě 201 m n. m.

Z uvedené délky okolo 6 km tvoří zátapa přehrady Šance (km 45,8–51,7), celý tok Ostravice od pramene až po ústí je ve správě státního podniku Povodí Odry (Povodí Odry 2016).

Nad zátopou Šance má tok vysloveně bystrinný charakter s podélným sklonem dna pohybujícím se řádově v procentech. Pod nádrží sklon klesá odshora od 9 ‰ nad Frýdlantem nad Ostravicí po 1,5 ‰ u ústí. Západní, delší strana rozvodnice v severní části odděluje povodí horního toku vlastní Odry. Celá jižní strana tvoří evropský předěl mezi Černým a Baltickým mořem (povodí Dunaje a Odry). Severní a východní strana rozvodnice odděluje povodí Ostravice od povodí Olše. Celková délka rozvodnice měří 161 km (Soukal, Čermák, 1945).

Před výstavbou přehrad v povodí patřila Ostravice průtokově k nejrozkolísanějším tokům na území ČR a její vysoké kulminační průtoky spolu s vysokým podélným sklonem a tak s vysokou reliéfovou energií byly příčinou katastrofálních průběhů povodní. Přímou do koryta Ostravice ústí toky víceméně obdobného charakteru: Morávka, Olešná a Lučina. Mimo to do Ostravice je zaústěna ještě řada dalších toků menších, mezi nimiž ty, které mají plochu povodí větší než 10 km², je nutno jmenovat Velký potok a Řečici, ústící do zátopy vodního díla Šance, a dále Smradlavu, Ondřejnici, Čeladenku, Bystrý potok, Baštici a Datyňku.



Obr. 1 (vlevo) Výškové poměry pro povodí Ostravice (Soukal, Čermák, 1945).

Fig. 1 (left) Elevation conditions for the Ostravice River basin (Soukal, Čermák, 1945).

Obr. 2 (vpravo) Průměrná roční teplota vzduchu za normálové období 1901–1930 pro povodí Ostravice (Soukal, Čermák, 1945).

Fig. 2 (right) Average annual air temperature for the normal period 1901–1930 for the Ostravice river basin (Soukal, Čermák, 1945).

Akumulací vody velkého významu na řece Ostravici je od 70. let min. století údolní nádrž Šance. Ta leží v centrální části Moravskoslezských Beskyd a svou polohou je situována zhruba na dolním konci horní třetiny řeky Ostravice s umístěním přehradní hráze v km 45,8. Hlavní funkcí nádrže je zásobování pitnou vodou. Nádrž Šance se retenční částí svého objemu významně podílí, jak již bylo uvedeno, i na povodňové ochraně území podél celého níže ležícího úseku Ostravice až po město Ostravu. Plocha povodí nádrže Šance k přehradnímu profilu činí 146,3 km² a celkový objem 57,16 mil. m³.

Ostravice se přímo dotýká Chráněná krajinná oblast (CHKO) Beskydy, do níž spadá řeka horní tratí nad silničním mostem v obci Ostravice (km 41,6) směrem proti proudu. Do CHKO rovněž připadá i celý prostor zátopy vodního díla (VD) Šance, CHKO je územně i hranicí totožná s Chráněnou oblastí přirozené akumulace vod (CHOPAV) (Povodí Odry 2016).

Horní část povodí Ostravice leží v členitém hornatém reliéfu Moravskoslezských Beskyd, tvořeném flyšovým souvrstvím jílovců, pískovců a slepenců. V erozně denudačním reliéfu se vyskytují sečné plošiny, tvrdoše,

strukturní terasy, mrazové sruby, balvanové proudy a sesuvy. Převládajícím půdním typem jsou silně kyselé typické kambizemě. Ve vyšších polohách převládají rezivé podzoly kambizemní, označované též jako kryptopodzoly. Půdy jsou silně ohrožené erozí, intenzita potenciální eroze půdy proudící vodou leží v intervalu 1,01–5,00 mm za rok. Střední část povodí náleží do Podbeskydské pahorkatiny. Nejprve protéká Ostravice Lysohorským podhůřím, úpatní pahorkatinou, tvořenou flyšovými horninami s kvartérními překryvy a náplavovými kužely řek, posléze přechází do ploché Frýdecké pahorkatiny s převážně akumulacním reliéfem a s pokryvem sprašových hlín. Mozaika půdních typů je determinována geologickým podložím a hydrologickými podmínkami. V nivě se střídají fluvizemě a fluvizemě glejové, na sprašových hlínách luvizemě pseudoglejové a pseudogleje luvizemní, na flyšovém podloží převládají kambizemě typické a kambizemě pseudoglejové. Na dolním toku přechází Ostravice do Ostravské pánve. Protéká rovinou Ostravské nivy, tvořenou souvrstvím pleistocenních šterkopísků a holocenních písčitohlinitých nánosů, na nichž vznikly typické a glejové fluvizemě.

V horní části, po nádrži Šance (km 54,210–52,0) protéká Ostravice zaříznutým údolím, kde příbřežní pásmo tvoří kontaktní skupiny typů geobiocénů bázi přilehlých svahů, náležejících do 4. bukového vegetačního stupně Ostravice a v nivě se střídají jasanové olšiny vyššího stupně (*Fraxini-alneti superiora*) a relativně sušší javorové jasanové olšiny vyššího stupně (*Fraxini-alneti aceris superiora*). Pod nádrží Šance přecházejí biocenózy do 3. dubobukového vegetačního stupně. V příbřežní zóně Ostravice se střídají javoro-jasanové olšiny nižšího stupně (*Fraxini-alneti aceris inferiora*) a vlhčí jasanové olšiny vyššího stupně (*Fraxini-alneti inferiora*), dosti velké plochy náleží vývojovým stádiím vrbin vrby křehké nižšího stupně (*Saliceta fragilis inferiora*) na šterkových náplavech. Ve Frýdku-Místku, pod soutokem s Morávkou na km 25,00 dochází k plynulému přechodu nivních společenstev do skupin typů geobiocénů širokých říčních niv. Převažují relativně nejsušší habrojilmové jaseniny vyššího stupně (*Ulm-fraxineta carpinii superiora*), dosti velké plochy náleží do topolojilmových jasenin vyššího stupně (*Ulm-fraxineta populi superiora*), v některých úsecích zaujímají větší plochy i vlhčí dubové jaseniny vyššího stupně (*Quercus robur-fraxineta superiora*), převážně pouze ostrůvkovitě se vyskytují vývojová stadia vrbin vrby křehké nižšího stupně (*Saliceta fragilis inferiora*) na šterkových náplavech. (POD 2005).

Výškové pásmo nad 500 m n. m. zaujímá téměř 42,5 % plochy povodí a je rozhodující pro vývoj srážkových a odtokových poměrů (Soukal, Čermák, 1945). Centrum obce Ostravice nadmořskou výškou 410 m n. m., koruna hráze přehrady Šance 510 m n. m., centrum Starých Hamer 525 m n. m., centrum obce Bílá 540 m n. m. a koruna hráze VD Morávka 520 m n. m.

Tab. 1 Povodí Ostravice – výšková pásma (Soukal, Čermák, 1945).

Tab. 1 Ostravice River Basin – Altitude Zones (Soukal, Čermák, 1945).

výškové pásmo [m n. m.]	plocha povodí [km ²]	procento plochy povodí
nad 1000	19	2,4
700,1–1000	167	20,7
500,1–700	156	19,3
300–500	259	32,1
pod 300	207	25,6
celkem	808	100,0

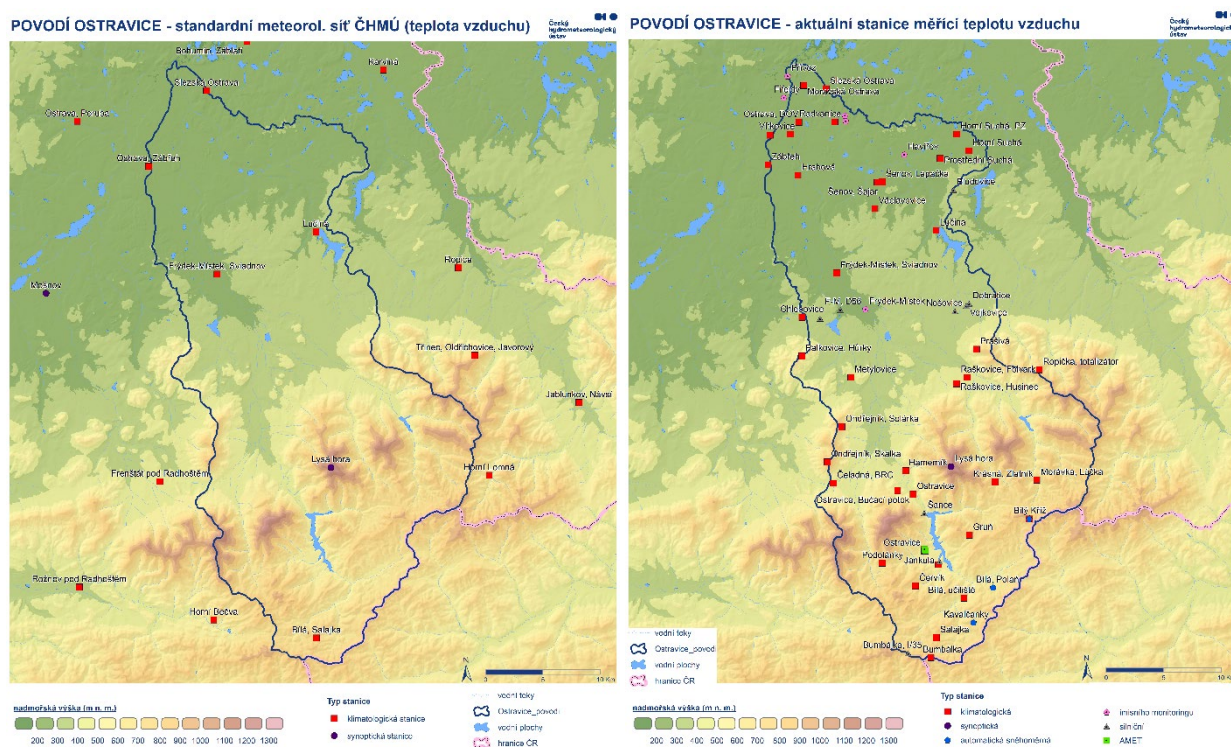
Hydrologická studie Ostravice z roku 1945 autorů Jana Soukala a Miroslava Čermáka z hydrografického oddělení ZNV v Brně přinesla na 47 stranách a 32 grafických přílohách nástin klimatických, geologických a hydrologických poměrů povodí a toku. Autoři zde uceleně uvedli výše uvedené charakteristiky. Na osmi stranách charakterizovali teplotní poměry povodí podle normálového období 1901–1930 s ročním chodem, počty charakteristických dnů a extrémy pro jednotlivé části povodí (Lysá hora, Frýdek a Ostrava). Srážkové charakteristiky pro povodí byly uvedeny pro období 1876–1925 (roční chod, přírůstek srážek s výškou, charakteristické dny, suchá období a také sněhové charakteristiky. Studie se dále zabývala hydrologickými charakteristikami a povodněmi v tomto povodí. Ze studie byly čerpány obrázky 1 a 2 a také hodnoty z tabulky č. 1. Zveřejněné informace ve studii jsme využili ve vyhodnocení trendů teploty vzduchu a úhrnu srážek a také pro doplnění zpracovávaných charakteristik území.

Staniční síť v povodí Ostravice

Staniční síť srážkoměrných a klimatologických stanic má nejen v povodí řeky Ostravice, ale v celé republice zajímavý a relativně dlouhý vývoj. První stanice vznikly pod vedením observatoře v pražském Klementinu v první polovině 19. století. Některé z těchto stanic byly převzaty do sítě Centrálního úřadu pro meteorologii a zemský magnetismus (později pro geodynamiku), který byl založen ve Vídni v roce 1851. Další stanice vznikaly díky aktivitě a péči různých spolků. V roce 1875 byla zřízena Hydrografická komise pro Království české. Její ombrometrickou sekci řídil profesor Studnička. Péči této sekce bylo zřízeno velké množství srážkoměrných stanic. O další rozvoj srážkoměrné sítě se zasloužil Emanuel Purkyně, který rozvíjel síť lesnických stanic. Pro Moravu a Slezsko měl zásadní vliv Přírodopisný spolek v Brně, který provozoval síť meteorologických stanic v letech

1879–1911. Ústřední hydrografická kancelář ve Vídni roku 1895 zřídila svá Hydrografická oddělení v Brně a v Opavě a tím došlo k masivnímu nárůstu počtu různých typů meteorologických stanic. V roce 1919 vznikl Státní ústav meteorologický a spolu se Státním ústavem hydrologickým převzali rakousko-Uherskou meteorologickou a srážkoměrnou staniční síť a dále ji rozvíjeli. V roce 1954 vznikl Hydrometeorologický ústav, ze kterého po rozdělení Československa vzniknul Český hydrometeorologický ústav. Ten je pověřen provozováním státní meteorologické sítě v současné době (Krška, Šamaj 2001).

V Povodí řeky Ostravice má Český hydrometeorologický ústav v srpnu 2025 šest standardních automatizovaných klimatologických stanic s měřením teploty vzduchu a dalších meteorologických prvků (Slezská Ostrava, Ostrava-Zábřeh, Lučina, Frýdek-Místek, Sviadnov, Bílá-Salajka a Lysá hora). V okolí (tj. do 15 km od hranice povodí) se nachází dalších 11 stanic. Za více než 150 let bylo nebo je na tomto území více než 115 lokalit s měřením teploty vzduchu. Dříve to byly manuální klimatologické stanice různého řádu, později byly některé stanice automatizovány a některé zanikly. Mimo standardních klimatologických stanic to byly nebo jsou stanice automatizovaného imisního monitoringu, silniční stanice, sněhoměrné stanice, meteorologický stožár a doplňkové automatické stanice ČHMÚ nebo cizích vlastníků (obr. 3 a 4).



Obr. 3 (vlevo) Povodí Ostravice a nejbližší okolí – aktuálně měřící standardní meteorologické stanice ČHMÚ s měřením teploty vzduchu.

Fig. 3 (left) The Ostravice River Basin and its immediate surroundings – currently measured by standard meteorological stations of the Czech Hydrometeorological Institute (ČHMÚ) with air temperature measurements.

Obr. 4 (vpravo) Povodí Ostravice – aktuálně měřící meteorologické stanice (ČHMÚ a doplňkové stanice) s měřením teploty vzduchu.

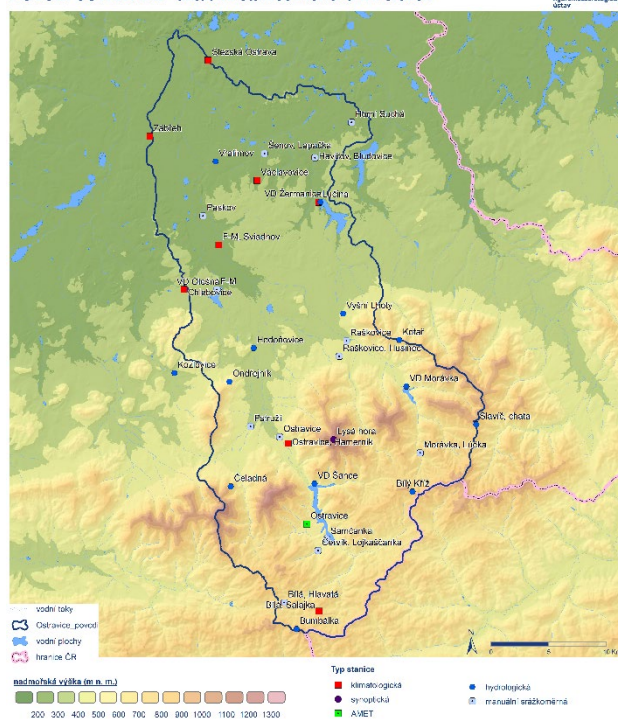
Fig. 4 (right) Ostravice River Basin – current meteorological stations (CHMI and supplementary stations) measuring air temperature.

U meteorologických stanic měřících úhrn srážek byla vždy situace lepší, co se týče pokrytí území povodí, a v současné době to platí také. Úhrn srážek v povodí měří aktuálně 6 klimatologických stanic, 12 manuálních srážkoměrných stanic ČHMÚ, 14 automatických srážkoměrů podniku Povodí Odry a 5 doplňkových manuálních či automatizovaných stanic. K tomuto počtu by bylo potřeba přičíst řádově desítky automatických srážkoměrů, které byly v posledních 15 letech instalovány v rámci protipovodňové ochrany lokálních výstražných systémů jednotlivých obcí. Data z těchto srážkoměrů by měla být k dispozici v systému POVIS. Údaje z těchto srážkoměrů standardně nevyužíváme, protože nevíme jaká je jejich kvalita a stav péče vlastníků o tato zařízení. Historicky se v povodí Ostravice měřily úhrny srážek na více než 130 lokalitách, které máme k dispozici v klimatologické databázi ČHMÚ CLIDATA (obr. 5 a 6).

Nad daty teploty vzduchu, úhrnu srážek a dalších meteorologických prvků od roku 1961 do současnosti proběhly řady kontrol kvality a bylo opraveno mnoho chyb. Nad staršími daty před rokem 1961 kontroly zatím probíhají. Důležité jsou také správné geografické informace o stanicích. Musíme vědět, kde stanice byly umístěny,

v jaké nadmořské výšce a ideálně kdo v jaké době měřil či pozoroval. Historicky byly souřadnice stanic uváděny pouze na stupně a minuty, což je z dnešního pohledu naprosto nedostatečné, zejména v horském terénu. Tyto informace se také snažíme zpřesňovat, což se zejména v povodí Ostravice daří.

POVODÍ OSTRAVICE - aktuální stanice měřící úhrn srážek



POVODÍ OSTRAVICE - všechny lokality s měřením úhrnu srážek



Obr. 5 (vlevo) Povodí Ostravice – aktuálně měřící meteorologické stanice ČHMÚ s měřením úhrnu srážek.

Fig. 5 (left) Ostravice River Basin – current CHMI meteorological stations measuring total precipitation.

Obr. 6 (vpravo) Povodí Ostravice – historické i aktuálně měřící meteorologické stanice s měřením úhrnu srážek.

Fig. 6 (right) Ostravice River Basin – historical and current meteorological stations measuring total precipitation.

VÝSLEDKY A DISKUSE

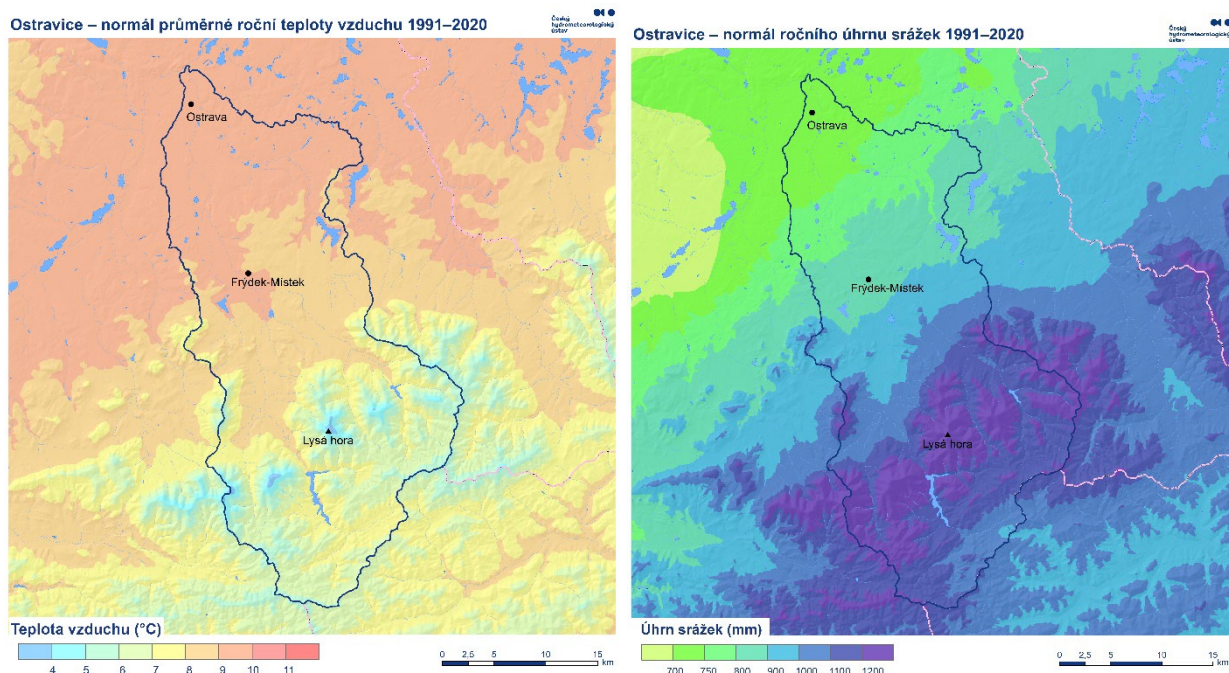
Teplota vzduchu

Klima tohoto povodí je velmi rozmanité. Nejteplejší oblast (obr. 7) je v severní části povodí. Lokalita Ostrava, Přívoz (210 m n. m.) má průměrnou roční teplotu vzduchu za období let 1991–2020 9,7 °C, centrum Ostravy, Zábřeh (230 m n. m.) má 9,5 °C, východní část povodí charakterizovaná stanicí Lučina u Žermanické přehrady (300 m n. m.) 9,0 °C, ve Sviadnově (severovýchodní část Frýdku-Místku, 273 m n. m.) 9,3 °C, ve Frýdku-Místku (335 m n. m.) 9,0 °C, v Ostravici (435 m n. m.) 8,4 °C, Morávka (přehrada, 541 m n. m.) 7,7 °C, Staré Hamry (Samčanka, 535 m n. m.) 7,2 °C, Bílá (Konečná, od 2023 Salajka, 725 m n. m.) 7,0 °C, Bílý Kříž (900 m n. m.) 5,9 °C a Lysá hora (1322 m n. m.) 3,7 °C (CLIDATA 2025).

Zajímavé je srovnání klimatu povodí s údaji Hydrologické studie povodí Ostravice zpracované a vydané v Brně roku 1945 Janem Soukalem a Miroslavem Čermákem (obr. 1 a 2). Musíme ocenit precizní mapové zpracování, které muselo být velmi pracné nakreslit. Podle publikovaných dat roční průměrné teploty vzduchu za období 1901–1930 ve studii měla Ostrava pro nadmořskou výšku 219 m n. m. teplotu 8,9 °C, Frýdek-Místek (290 m n. m.) 8,2 °C a Lysá hora 2,3 °C. Ostravská stanice v Moravské Ostravě pozorující v letech 1881–1955, 212 m n. m. měla za období 1901–1930 průměrnou roční teplotu vzduchu 8,8 °C. Stejná lokalita vypočtená technickou řadou má průměr za období 1991–2020 9,7 °C. Frýdek-Místek, Sviadnov (273 m n. m.) za období let 1991–2020 má roční teplotu 9,3 °C. Ostravice měla 7,3 °C (1901–1930) a nyní má roční průměr 8,4 °C (1991–2020), Bílá, Salajka 5,9 °C (1901–1930) a nyní má roční průměr 7,0 °C (Konečná 1991–2020) a Lysá hora 2,3 °C (1901–1930) a nyní má roční průměr 3,7 °C (1991–2020).

Nepříznivý teplotní trend v současnosti pokračuje, jak je vidět na hodnotách průměrné teploty vzduchu roku 2024. Průměrná roční teplota vzduchu za rok 2024 v povodí Ostravice: Ostrava, Přívoz 11,7 °C, Ostrava, Zábřeh 11,6 °C, Lučina 11,2 °C, Sviadnov 11,8 °C, Frýdek-Místek 10,5 °C, Ostravice 9,9 °C, Morávka, přehrada 9,1 °C, Staré Hamry, Samčanka 8,8 °C, Bílá, Salajka 8,7 °C, Bílý Kříž 7,8 °C a Lysá hora 5,9 °C. Zvyšující se hodnoty

teploty vzduchu nepříznivě působí na většinu oblastí lidského života, zvlášť patrné je to v lesních porostech, jako jedna z příčin sucha a kůrovcových kalamit, pochopitelně to má zásadní vliv na sněhovou pokrývku.



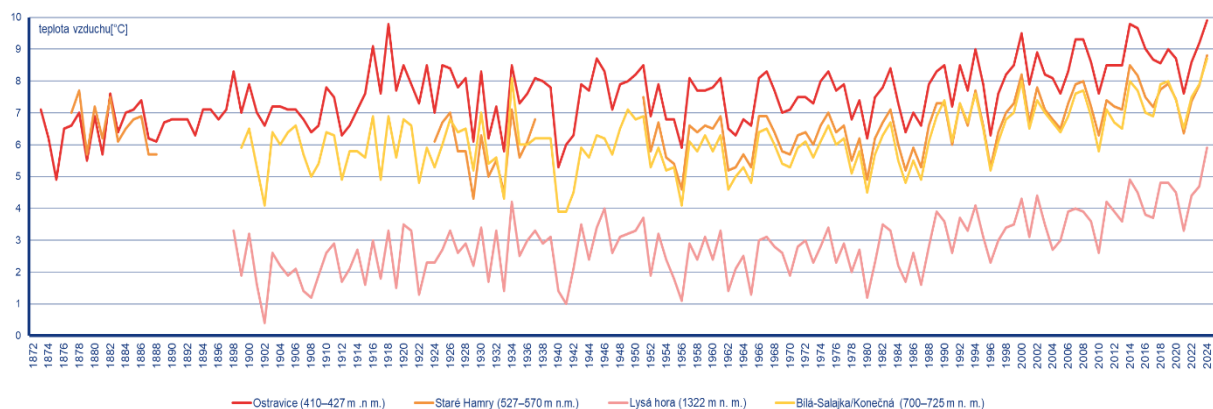
Obr. 7 (vlevo) Průměrná roční teplota vzduchu za normálové období 1991–2020 pro povodí Ostravice.

Fig. 7 (left) Average annual air temperature for the normal period 1991–2020 for the Ostravice river basin.

Obr. 8 (vpravo) Průměrný roční úhrn srážek za normálové období 1991–2020 pro povodí Ostravice.

Fig. 8 (right) Average annual precipitation for the normal period 1991–2020 for the Ostravice river basin.

Mapové zpracování bylo vytvořeno na základě všech dostupných klimatologických dat v klimatologické databázi ČHMÚ (CLIDATA), které podléhají pravidelným kontrolám za normálové období 1991–2020. Obdobné je to i v textu. Pokud jsme vypočtené hodnoty srovnávali s jiným normálovým obdobím, tak to je vždy uvedeno přímo u dat.



Obr. 9 Průměrná roční teplota vzduchu ze stanic v horské části povodí Ostravice.

Fig. 9 Average annual air temperature from stations in the mountainous part of the Ostravice river basin.

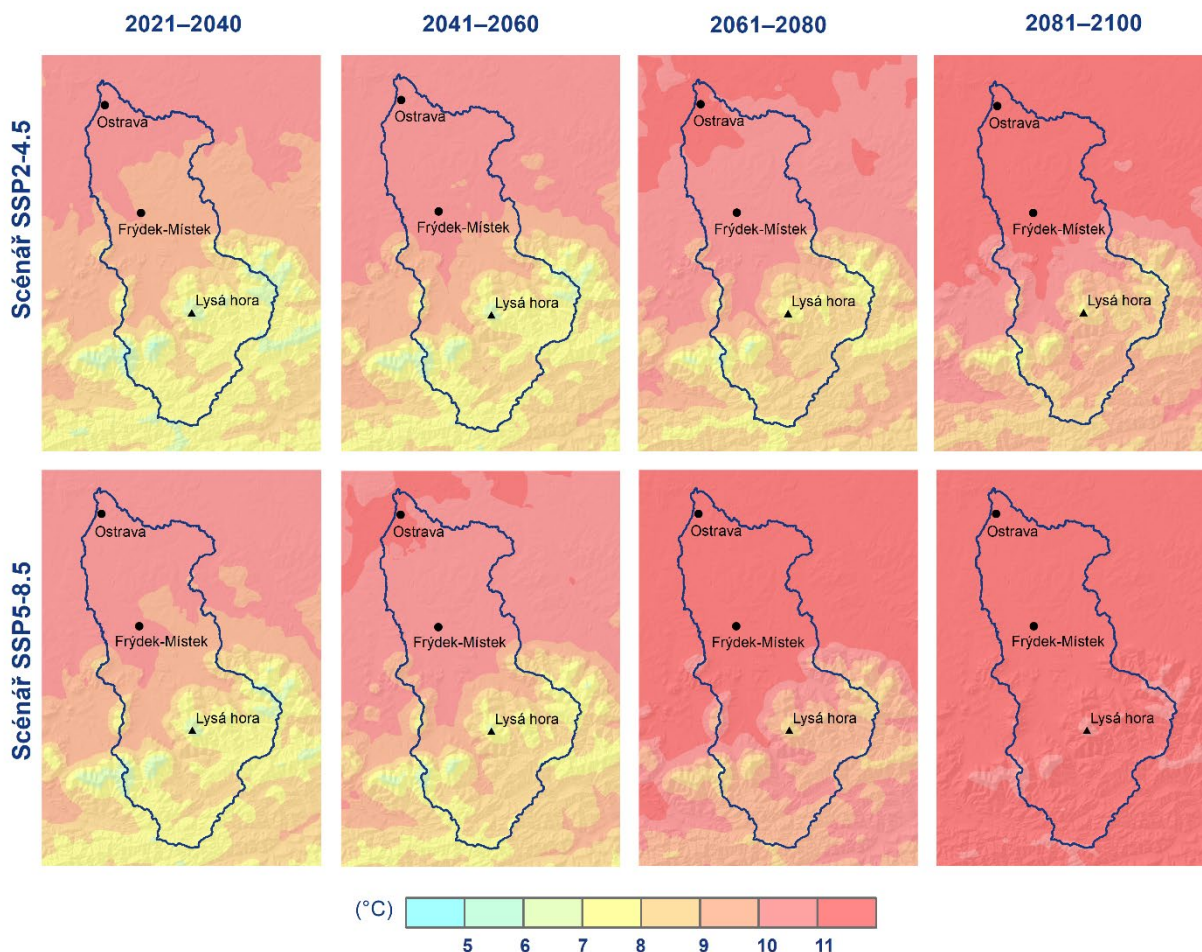
Obrázek 9 přináší přehled průměrné roční teploty vzduchu pro lokality Ostravice, Staré Hamry, Lysá hora a Bílá, Salajka. Žádná z těchto řad není kompletní a každá lokalita se vícekrát přesunovala v rámci obce, často se měnila i nadmořská výška stanic. Chybějící období byly na úrovni měsíčních dat dopočteny metodou lineární regrese podle nadmořské výšky a dat okolních stanic (Stříž 2008). Z grafu je vidět kolísání průměrné roční teploty a také trendy v jednotlivých obdobích.

V rámci projektu PERUN byly vytvořeny již tři scénáře potenciálního vývoje klimatu na území České republiky vycházející ze socioekonomických scénářů SSP (angl. zkratka Shared Socioeconomic Pathways). Projekt

PERUN (TAČR SS02030040 - PERUN (Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku) je zaměřen na výzkum klimatických extrémů, sucha a důsledků jeho prohlubování v České republice (PERUN 2022). Ke studiu potenciálního vývoje klimatu na území České republiky byly vybrány socioekonomické scénáře SSP5-8.5 a SSP2-4.5. První z nich (zároveň i nejextrémnější a nejpesimističtější) vychází z předpokladu rychlého a neomezeného růstu ekonomické produkce a spotřeby energie, s tím související intenzivní využívání fosilních paliv a další rychlý růst emisí skleníkových plynů s malými investicemi do mitigačních technologií. Scénář SSP2-4.5, někdy nazývaný jako střední emisní scénář, počítá s investicemi do udržitelného rozvoje a snižováním intenzity využívání fosilních paliv (obr. 10). Tyto změny jsou však pomalé a i přes malá zlepšení stále dochází k degradaci přirozených ekosystémů. Více informací k charakteristice použitých scénářů naleznete v příspěvku (Tolasz, Valík, Šustková, Dvoretska 2024).

Ostravice – průměrná roční teplota vzduchu 2021–2100

Český
hydrometeorologický
ústav



Obr. 10 Povodí Ostravice – průměrná roční teplota vzduchu 2021–2100 podle výsledků projektu PERUN.

Fig. 10 Ostravice River Basin – average annual air temperature 2021–2100 according to the results of the PERUN project.

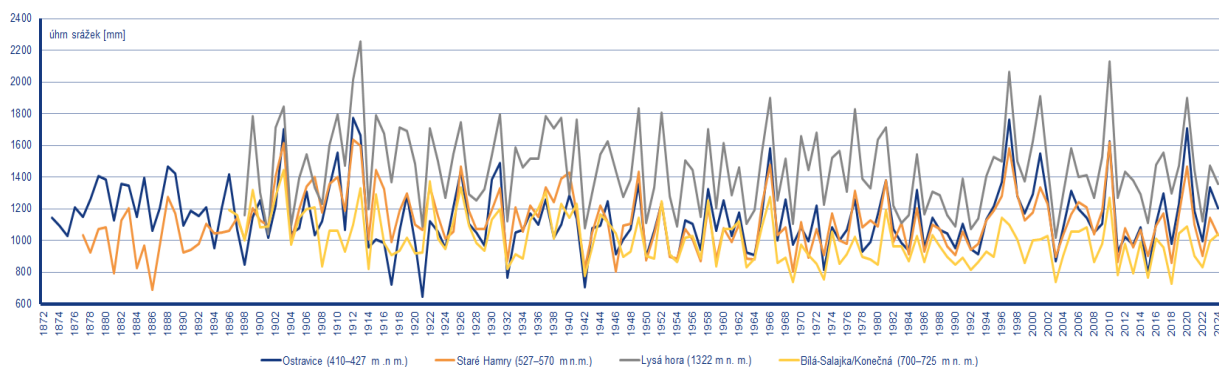
Úhrn srážek

Podle Hydrologické studie (Soukal, Čermák 1945) je povodí Ostravice velmi bohaté na srážky. Roční srážkové úhrny velmi vydatně přibývají směrem od severu k úpatí a severnímu svahu Beskyd. Severní svahy Beskyd tvoří typickou návětrnou stranu, místa hluboko v horách jsou v závětrí a v dešťovém stínu. Mapa č. 8, této studie, se zobrazením srážkových úhrnů za období 1876–1925 bohužel ve studii chybí. Z publikovaných dat v textu studie je patrné, že nejvíce naprší v letních měsících, hlavně v červenci, nejméně v únoru. Zimní srážky se podílejí na ročním úhrnu 13,7 až 21,4 %. Jarní srážky jsou rozděleny stejnoměrněji 20,8 až 23,9 % ročního úhrnu. Letní srážky činí ve vyšších polohách 32,4 % ročního úhrnu, v nižších 40,9 %. Kolísání je tedy značnější. Podzimní srážky jsou ve výši 21,7 % v nižších a 23,2 % ve vyšších polohách. Severní část povodí Ostravice má tedy zimní srážky relativně nižší než letní, příčinou je vydatné a časté sněžení v horách.

Přírůstek srážek s přibývajícím nadmořskou výškou je v povodí Ostravice značně větší než kdekoli jinde v povodí Odry nebo Moravy. Zvlášť vysoký gradient 220 mm na výškový přírůstek 100 m jeví se až k výraznému

horskému úpatí Beskyd. Odtud směrem do hor je již gradient značně nižší a činil jen 37 mm na 100 m výšky. Střední hodnota gradientu pro celé povodí Ostravice 140 mm na 100 m je značně vyšší než v povodí celé Odry, kde činí jen 85 mm, v povodí Moravy 63 mm a v povodí Dyje dokonce jen 23 mm.

Nejnižší průměrný srážkový úhrn 819 mm (1901–1930) je v severní části povodí v Ostravě. Nejvyšší průměrné roční úhrny srážek dosahují v jižní třetině povodí. Na Lysé hoře 1536 mm (1901–1930). Přes 1500 mm srážek ročně se vyskytuje při východním okraji povodí ve výškách přes 1000 m n. m. V nejjihnější části povodí, v pramenné oblasti vlastní Ostravice, dosahují srážkové roční úhrny 1100–1200 mm. Střední roční úhrn srážek celého povodí (1901–1930) činí 1077 mm (Soukal, Čermák 1945).



Obr. 11 Roční úhrny srážek z vybraných stanic v horské části povodí Ostravice.

Fig. 11 Annual precipitation totals from selected stations in the mountainous part of the Ostravice river basin.

Průměrné roční srážkové úhrny (obr. 8) za období 1991–2020 v povodí Ostravice jsou o 100 až 200 mm nižší než uvádí studie (Soukal, Čermák 1945). Měřené lokality, popř. technické řady ročních úhrnů srážek za období 1991–2020: Slezská Ostrava 718 mm, Paskov/Řepiště 808 mm, Lučina 807 mm, Frýdek-Místek, Olešná 844 mm, Lubno (Frýdlant nad Ostravicí) 995 mm, Raškovice 1085 mm, Morávka, přehrada 1215 mm, Čeladná 1191 mm, Ostravice 1183 mm, Staré Hamry 1144 mm, Bílá, Salajka/Konečná 954 mm, Lysá hora 1459 mm, Bumbálka 1137 mm, Bílý Kříž 1249 mm (CLIDATA 2025). Roční chod úhrnu srážek vybraných stanic v povodí Ostravice uvádí obr. 11.

ZÁVĚR

Povodí řeky Ostravice je zajímavou oblastí v severovýchodní části Moravskoslezského kraje. V téměř severojižním směru má vzdušnou délku okolo 55 km. V jižní a jihovýchodní hornaté části sousedí se Slovenskem a na severu končí v Ostravě. Nejvyšším bodem povodí je vrchol Lysé hory s nadmořskou výškou 1323 m n. m.

Řeka Ostravice vzniká soutokem Bílé a Černé Ostravice u Starých Hamrů, celková délka toku činí 65,1 km, povodí má plochu 826,8 km². Ústí v Ostravě-Hrušově v nadmořské výšce 204 m n. m. Nejteplejší oblast je v severní části povodí. Lokalita Ostrava, Přívoz (210 m n. m.) má průměrnou roční teplotu vzduchu za období let 1991–2020 9,7 °C. Nejchladnější oblast povodí je vrchol Lysé hory (1322 m n. m.) 3,7 °C.

Průměrné roční srážkové úhrny za období 1991–2020 v povodí Ostravice jsou o 100 až 200 mm nižší než za období 1901–1930. Např. roční úhrny srážek za období 1991–2020 jsou ve Slezské Ostravě 718 mm, na Lučině 807 mm, na Čeladné 1191 mm, v Ostravici 1183 mm, ve Starých Hamrech 1144 mm a na Lysé hoře 1459 mm.

Přehledem současných meteorologických stanic jsme chtěli poukázat na to, že území povodí řeky Ostravice bylo historicky dobře pokryto standardními meteorologickými stanicemi Českého hydrometeorologického ústavu, popř. dalších organizací, jak v teplotě vzduchu, úhrnu srážek, tak i v dalších meteorologických prvcích. Díky dlouhé řadě pozorování na mnoha lokalitách je možné tvořit dlouhodobé měsíční a roční přehledy počasí z jednotlivých lokalit, které jsou potřeba pro vlastní klimatologické charakteristiky jednotlivých lokalit, ale také pro sledování variability jednotlivých meteorologických prvků a trendů. Bohužel tyto standardní stanice obvykle nejsou vhodné pro využití ve speciálních výzkumech, např. pro výzkum změn ve vegetační stupňovitosti. Pro tyto potřeby je potřeba zřizovat doplňkové stanice, kterých je v povodí Ostravice velké množství. Tyto stanice umožňují lépe popsat požadované mezo či mikroklimatické podmínky zkoumaných lokalit. Věříme, že díky velkému množství jak historických, tak současných lokalit měření, bude tato oblast i v budoucnu využívána pro vědecké výzkumy různého zaměření.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

LITERATURA

CLIDATA, 2025. CLIDATA – Climate Database Management System [interní databáze]. Praha: ČHMÚ [cit. 21. 8. 2025]. Dostupné z: ČHMÚ.

KRŠKA, K., ŠAMAJ, F., 2001. Dějiny meteorologie v českých zemích a na Slovensku. 1 vyd. Praha: Univerzita Karlova v Praze. Nakladatelství Karolinum. 568 s. ISBN 80-7184-951-0.

PERUN, 2022. Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku [online]. [cit. 2. 8. 2025]. Dostupné z: <https://www.perun-klima.cz/>.

POD, 2005. Ostravice, říční kilometr: 0,000 – 54,210. [online]. [cit. 20. 8. 2025]. Dostupné z: https://www.pod.cz/projekty/flora_a_fauna/Viteze/ostavice_cela.html.

Povodí Odry, 2016. Atlas hlavních toků povodí Odry. [online]. [cit. 20. 8. 2025]. Dostupné z: https://www.pod.cz/atlas_toku/ostavice.html.

SOUKAL J., ČERMÁK, M., 1945. Ostravice. Nástin klimatických, geologických a hydrologických poměrů povodí a toku. Hydrografické oddělení ZNV v Brně. 47 stran a 32 příloh. Sestavili Ing. Dr. Jan Soukal a Ing. Dr. Mir. Čermák. Přehled geologických, geomorfologických a klimatických poměrů dle un. Pro. Dr. Fr. Vitáska.

STŘÍŽ, M., 2008. Popis metod CLIDATA-GIS [online]. [cit. 20. 8. 2025]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/fil/1295510217.pdf>.

TOLASZ, R., VALÍK, A., ŠUSTKOVÁ, V. DVORETSKA, I., 2024. Scénáře budoucího vývoje klimatu v Jeseníkách podle modelu ALADIN-CLIMATE/CZ. Mimořádné projevy počasí v Jeseníkách. Meteorologické zprávy, roč. 77, č. 5, s. 164–172. ISSN 0026–1173, ISSN 2788-3140 (on-line).

ZMENY KLIMATICKÝCH PODMIENOK V LESNÝCH VEGETAČNÝCH STUPŇOCH A ICH VPLYV NA FENOLOGICKÉ FÁZY HLAVNÝCH DREVÍN

Veronika Lukasová¹ – Jozef Rozkošný² – Ivan Mrekaj³ – Milan Onderka²

¹ Ústav vied o Zemi, Slovenská akadémia vied, Dúbravská cesta 9, 84005 Bratislava, geofluka@savba.sk

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 83315 Bratislava, jozef.rozkosny@shmu.sk,
milan.underka@shmu.sk

³ Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 96001 Zvolen
xmrekaj@is.tuzvo.sk

ABSTRACT

Lukasová, V., Rozkošný, J., Mrekaj, I., Onderka, M.: Change of climatic conditions in forest vegetation zones and their impact on the phenology of main tree species

The forests that are currently mature started growing before the onset of recent climate change, and they respond to its effects by shifting the timing of their phenological phases. In this study, we focused on analysing changes in climatic conditions across forest vegetation zones (FVZ) in the Western Carpathians and adjacent lowlands since the time of Zlatník's classification in 1976. The main climax tree species were examined (oaks, European beech, Silver fir, Norway spruce, and Dwarf pine), which dominate individual FVZ 1 to 8. For alluvial forests, we defined a separate vegetation zone, FVZ 0. The climatic characteristics were derived from data measured at 71 meteorological stations within the network of the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI) over two normal periods, 1961–1990 and 1991–2020. Phenological data were obtained from the phenological database of SHMI. The evaluated phenological phases included first leaf unfolding (BBCH11) and general leaf yellowing (BBCH94) for deciduous species, and the onset of new shoot growth (BBCH10) for evergreen conifers. The results of partial correlation confirmed that temperature is the main factor influencing shifts in the onset of phenological phases. The most pronounced shifts toward earlier occurrence of BBCH10 and BBCH11 were observed in higher vegetation zones. In addition, it was found that deciduous species growing in lower and warmer vegetation zones respond sensitively to drought, as reflected in an earlier onset of the BBCH94 phase due to low values of precipitation parameters. The presented results will contribute to a better understanding of the mechanisms controlling the timing of tree phenological phases in individual FVZ. They will improve the prediction of the impact of changing environmental conditions on forest ecosystems.

Key words: climate change, forest tree species, trends, correlation, phenology

ÚVOD

Klasifikácia lesných ekosystémov na Slovensku vychádza z princípov geobiocenológie, ktoré v roku 1948 vypracoval profesor Zlatník (BOŠELA 2010). ZLATNÍK (1960, 1976) navrhol originálnu klasifikáciu lesných vegetačných stupňov (lvs) ako klimaxové spoločenstvá, podmienené makroklimou a mezoklimou v podmienkach meniacej sa nadmorskej výšky (RANDUŠKA et al. 1986). Stupnica definuje osem lesných vegetačných stupňov, ktoré sú charakterizované dominantnými druhmi drevín: dub, buk, jedľa, smrek a kosodrevina. Od konca 80. rokov sa však klimatické podmienky významne zmenili v dôsledku zmeny klímy (REID et al. 2016). V súčasnosti dospelé lesy začali svoj rast ešte pred nástupom súčasnej zmeny klímy. Reakciou na jej prejavy sú posuny načasovania fenologických fáz, ktoré sa všeobecne považujú za biologický ukazovateľ dopadov klimatickej zmeny (MEIER et al. 2021). Fenologické fázy drevín, ako je pučanie listových púčikov, jarné výhonky či žltnutie listov, sú ovplyvňované predovšetkým poveternostnými podmienkami a dĺžkou fotoperiód (MENZEL 2003). U vegetácie mierneho pásma je pre nástup jarných fenofáz významným faktorom teplota (RICHARDSON et al. 2018). V reakcii na nárast teploty vzduchu sa jarné fenofázy posúvajú do skorších termínov (CHMIELEWSKI & RÖTZER 2001; FU et al. 2014; MEIER et al. 2021; BUCHA et al. 2023), zatiaľ čo jesenné fenofázy sa oneskorujú (LUKASOVÁ et al. 2020; MEIER et al. 2021).

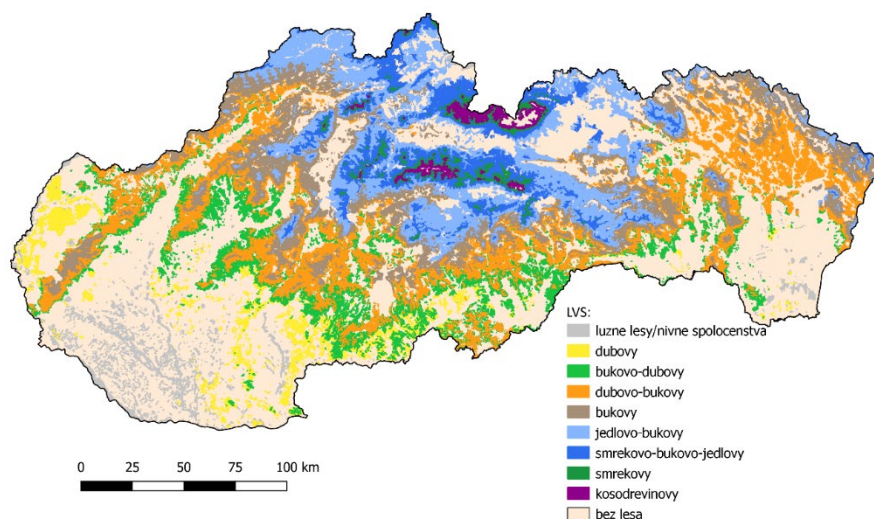
Hoci nástup jesenných fenologických fáz ovplyvňuje hlavne teplota vzduchu, nedávne štúdie poukazujú aj na značný vplyv sucha (XIE et al. 2018; BIGLER & VITASSE 2021). Kombinácia poklesu atmosférických zrážok a zvyšujúcej sa evapotranspirácie v dôsledku rastúcich teplôt vzduchu v letných mesiacoch vedú k poklesu množstva vody dostupnej pre ekosystémy, čo u niektorých druhov môže viesť ku skoršiemu (vynútenému) ukončeniu vegetačného obdobia (LUKASOVÁ et al. 2020). Narušenie asimilačných procesov spôsobené suchom však nemusí vždy viesť k viditeľnému skoršiemu žltnutiu listov (DIDION-GENCY et al. 2023). Čo sa týka vplyvu reliéfu na fenologické fázy, dôležitým faktorom ovplyvňujúcim načasovanie nástupu je nadmorská výška (LUKASOVÁ et al. 2019). V európskych lesoch sa nástup zalisťovania so stúpajúcou nadmorskou výškou oneskoruje od 1 do 3,9 dňa na každých 100 metrov v závislosti od druhu dreviny, typu klímy, lokality a dĺžky analyzovaného obdobia (VITASSE et al. 2009; ČUFAR et al. 2012; LUKASOVÁ et al. 2019). Variabilita nástupu jesenných fenofáz je vyššia ako jarných, pričom aj korelačný vzťah s nadmorskou výškou je slabší (ČUFAR et al. 2012; LUKASOVÁ et al. 2019), čo sťažuje jeho modelovanie a predikcie (PIAO et al. 2019).

V tejto štúdii sme sa zamerali na analýzu zmeny klimatických podmienok v jednotlivých lvs v Západných Karpatoch a priľahlých nížinách medzi poslednými normálovými obdobiami a porovnali s údajmi uvedenými v klasifikácii lvs (ZLATNÍK 1960, 1976). Sledované obdobie zahŕňa relatívne stabilné normálové obdobie 1961–1990 ako aj normálové obdobie zachytávajúce oteplenie po roku 1991. Pre obdobia klimatických normálov sme vypočítali priemerné úhrny atmosférických zrážok, klimatickú vodnú bilanciáciu a priemernú teplotu vzduchu pre každý lvs samostatne. Následne sme analyzovali fenologickú odozvu stromových alebo krovitých edifikátorov klimaxových spoločenstiev jednotlivých lvs na klimatické podmienky. Výsledky našej práce môžu prispieť k plánovaniu hospodárskych opatrení v lesných porastoch, predovšetkým pri zakladaní porastov s vyššou odolnosťou voči zmenám klímy.

MATERIÁL A METÓDY

Hodnotené územie

Študované územie sa nachádza v lesných oblastiach Západných Karpát a na severných okrajoch Panónskej panvy, v stredných zemepisných šírkach (stredná Európa, Slovensko: 47°44'–49°37' s.š. a 16°50'–22°34' v.d.). Podnebie je charakteristické pravidelným striedaním štyroch ročných období a premenlivým počasím, ktoré ovplyvňujú tlakové centrá - Azorská výš a Islandská níz. Atmosférické zrážky väčšinou prichádzajú počas cyklonálnych situácií zo západu a severozápadu z Atlantického oceánu, menej často počas cyklonálnych situácií z oblasti Stredozemného mora alebo Čierneho mora (MÉSZÁROS et al. 2022). Na miestnu klímu má najväčší vplyv nadmorská výška. Priemerná ročná teplota vzduchu je najvyššia v oblasti Podunajskej nížiny (viac ako 10 °C) a so stúpajúcou nadmorskou výškou klesá. Priemerný ročný úhrn atmosférických zrážok sa výrazne líši - od menej ako 500 mm na území západnej Podunajskej nížiny až po viac ako 2 000 mm vo Vysokých Tatrách (Zbojnícka chata, 2 130 mm, SHMÚ 2015).



Obr. 1. Mapa lesných vegetačných stupňov podľa Zlatníka
Fig. 1 Map of forest vegetation zones according to Zlatník

Druhy drevín analyzované v tejto štúdii zodpovedajú prevládajúcim stromovým alebo krovitým edifikátorom klimaxových spoločenstiev podľa ZLATNÍKA (1960; 1976): duby (*Quercus* spp.), buk lesný (*Fagus sylvatica* L.), jedľa biela (*Abies alba* Mill.), smrek obyčajný (*Picea abies* [L.] Karst.) a kosodrevina (*Pinus mugo*

Turra). Tieto druhy majú široké prirodzené rozšírenie po celej Európe a rastú od najnižších až po najvyššie nadmorské výšky skúmaného územia. Podľa Zlatníkovej klasifikácie bolo skúmané územie rozdelené na 8 výškových lvs, pričom v rámci 1. lvs sme vyčlenili lužné lesy ako 0. lvs (Obr. 1).

Klimatické údaje

Údaje o teplote vzduchu a atmosférických zrážkach, ktoré pokrývali obdobia klimatických normálov 1961–1990 a 1991–2020 boli získané zo 71 meteorologických staníc z databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ). Stanice boli zatriedené do lvs, aby sme získali priemerné hodnoty za každý vegetačný stupeň. Odvodili sme klimatické charakteristiky, ako sú priemerné mesačné teploty vzduchu (T), mesačné úhrny zrážok (Z), štandardizovaný zrážkový index (SPI) a klimatická vodná bilancia (KVB) pre rôzne dlhé obdobia pred nástupom fenologických fáz, ako potenciálne faktory vplývajúce na fenofázy.

SPI sme vypočítali pomocou aplikácie National Drought Mitigation Center – UNL – SPI Generator na základe mesačných údajov o zrážkach z rokov 1961–2020. Výstup bol nastavený na mesačnú, dvojmesačnú, trojmesačnú a štvormesačnú časovú škálu. Mesačné priemery T a sumy Z sme použili na výpočet potenciálnej evapotranspirácie (PET). PET bola stanovená metódou podľa Thornthwaite (THORNTHWAITE 1948), implementovanou v balíku R ‘SPEI’ verzia 1.7 (VICENTE-SERRANO et al. 2010). Klimatická vodná bilancia (KVB) bola následne vypočítaná ako rozdiel medzi pozorovanými zrážkami a potenciálnou evapotranspiráciou ($KVB = Z - PET$) pre jednotlivé mesiace. Z týchto údajov sme odvodili normálové hodnoty pre mesačné T, Z a KVB v jednotlivých lvs pre obdobie 1961–1990 a 1991–2020, a porovnali.

Fenologické údaje

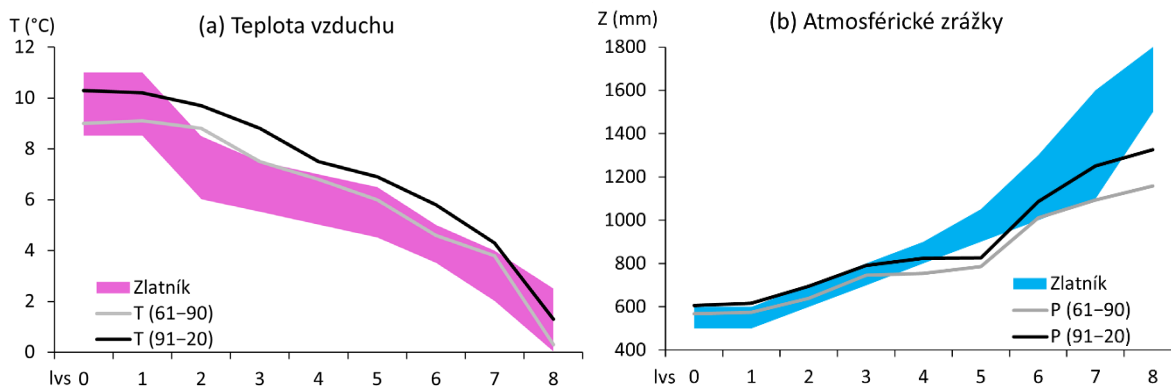
Na analýzu vplyvu zmenených klimatických podmienok na vegetáciu sme použili údaje z fenologického monitoringu SHMÚ. Do analýz sme zaradili iba tie časové rady fenologických údajov, ktoré mali aspoň 70 %-nú úplnosť pozorovaní na tých istých staniciach v oboch obdobiach klimatických normálov 1961–1990 a 1991–2020. Po tejto selekcii zostalo: 25 staníc pre duby, 25 pre buk lesný, 11 pre jedľu, 15 pre smrek a 3 pre kosodrevinu. Fenologické fázy na týchto staniciach boli sledované vizuálne podľa metodiky BRASLAVSKÁ & KAMENKÝ (1996) a boli im priradené príslušné kódy BBCH (MEIER 2001) a to májové výhonky - BBCH10, prvé listy - BBCH11 a všeobecné žltnutie listov - BBCH94. Fenologické stanice boli zatriedené do lvs na základe polohy sledovaných skupín stromov, pričom sme vychádzali z popisu porastov v Pláne starostlivosti o les. Dni nástupu fenologických fáz boli zaznamenávané ako deň v roku (DOY). Následne bol pre každý rok vypočítaný medián dní nástupu fenologických fáz v rámci každého lvs za jednotlivé roky a za normálové obdobia. Trendy v nástupe fenofáz sme vypočítali pomocou neparametrického Kendallovho trendového testu a ako ukazovateľ posunu sme použili Senovu smernicu (SEN 1968). Vplyv základných klimatických premenných opísaných v časti 2.2 na nástup jarých fenofáz (BBCH10, BBCH11) a jesennej fenofázy (BBCH94) sme testovali pomocou parciálnej korelácie. Hladina štatistickej významnosti bola stanovená na $p < 0,05$.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Zmeny klimatických podmienok v lesných vegetačných stupňoch medzi normálovými obdobiami

Obrázok 2 zobrazuje priemerné ročné hodnoty teploty vzduchu a atmosférických zrážok pre obdobia klimatických normálov 1961–1990 a 1991–2020 vypočítané z údajov z meteorologických staníc použitých v tejto štúdii, a zároveň aj hodnoty definované ZLATNÍKOM (1960; 1976) pre jednotlivé lvs. Zrážkové charakteristiky klimatického normálu 1991–2020 zhruba zodpovedajú rozpätiam určeným pre jednotlivé lvs podľa Zlatníka. Mierne nižšie zrážky sme zaznamenali v 5. lvs, pre ktorý Zlatník stanovil rozpätie 900–1050 mm, pričom v tomto lvs boli v období 1961–1990 rozdiely v zrážkach ešte výraznejšie. Okrem tohto lvs, nespádali do stanoveného intervalu zrážky v 8. lvs, a to ani v jednom z normálových období. V porovnaní so zrážkami, teploty v normálovom období stúpili výraznejšie nad hodnoty definované Zlatníkom pre jednotlivé lvs, predovšetkým od 2. po 7. lvs. V niektorých lvs presahovali ročné teploty hornú hranicu o približne 1,5 °C.

Zmeny v teplotných a zrážkových režimoch neboli rovnaké počas roka, ale líšili sa v jednotlivých mesiacoch a aj počas vegetačného obdobia a mimo neho (Obr. 3a). V normálovom období 1991–2020 bol nárast teplôt vo vegetačnom období vyšší v porovnaní s ročnými priermi, a to o 0,1–0,3 °C. Najvýraznejšie oteplenie oproti normálu 1961–1990 bolo zaznamenané v letných mesiacoch jún, júl, august vo všetkých lesných vegetačných stupňoch, a to v rozpätí 1–2 °C, ojedinele až 2–3 °C (Obr. 3a).

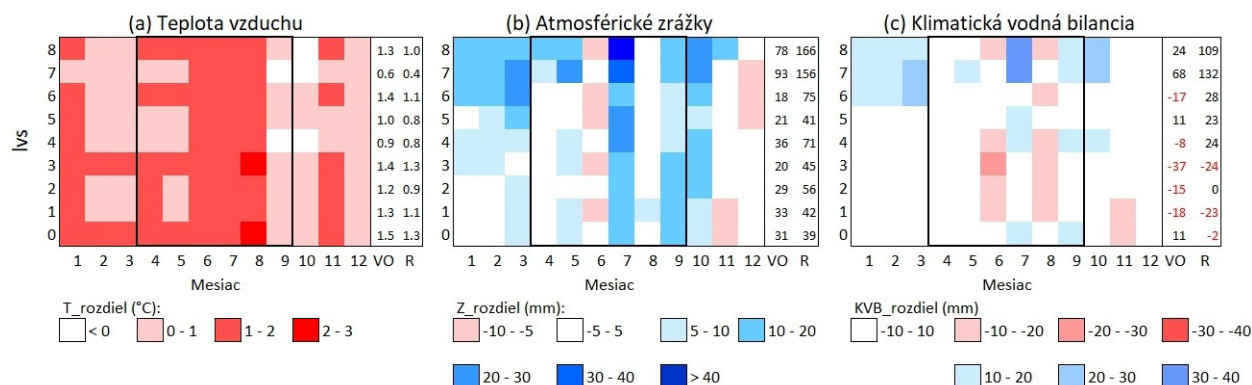


Obr. 2. Priemerné ročné hodnoty (a) teploty vzduchu a (b) atmosférických zrážok pre obdobia klimatických normálov 1961–1990 a 1991–2020, a hodnoty definované Zlatníkom pre jednotlivé lesné vegetačné stupne (lvs)

Fig. 2. Mean annual values of (a) air temperature and (b) atmospheric precipitation for the climatological normal periods 1961–1990 and 1991–2020, as well as the values defined by Zlatník for individual forest vegetation zones (FVZ)

Medzi klimatickým normálom 1961–1990 a 1991–2020 bol zaznamenaný aj nárast ročných úhrnov atmosférických zrážok. Vzťah medzi narastajúcim množstvom zrážok a lvs bol zreteľný, pričom najvýraznejší nárast bol pozorovaný vo vyšších lvs predovšetkým v júli, ale aj v mesiacoch január, február a marec. Naopak v niektorých mesiacoch došlo k poklesu zrážok medzi normálmi a to v novembri, decembri a júni. V 0. až 6. lvs sa nárast pohyboval v rozmedzí od 18 do 36 mm počas vegetačného obdobia a od 39 do 75 mm za celý rok. V 7. a 8. lvs bol tento nárast 2–3-krát vyšší oproti nižším lvs (Obr. 3b).

Zmeny teplôt vzduchu a zrážok počas roka spôsobili zmenu režimu potenciálnej evapotranspirácie, čo sa prejavilo na klimatickej vodnej bilancii (KVB) jednotlivých lvs. Napriek zvýšeniu zrážok došlo k poklesu KVB, predovšetkým počas vegetačného obdobia. Kým ročné sumy KVB boli záporné len v 0. a 1. lvs, sumy za vegetačné obdobie a letné mesiace vykazovali záporné hodnoty v 0. až 3. lvs v oboch normálových obdobiach. Najvýraznejšia zmena KVB sa prejavila v 3. lvs, kde rozdiel medzi normálmi počas vegetačného obdobia dosiahol –37 mm (Obr. 3c). K najväčším poklesom KVB medzi normálovými obdobiami došlo vplyvom poklesu zrážok a zároveň narastajúcej teploty v letných mesiacoch jún a august a v 0. a 1. lvs aj v novembri.



Obr. 3. Zmeny (a) teploty vzduchu, (b) atmosférických zrážok a (c) klimatickej vodnej bilancie v jednotlivých mesiacoch, vo vegetačnom období (VO) a v rámci roka (R) medzi klimatickými normálovými obdobiami 1961–1990 a 1991–2020

Fig. 3. Changes in (a) air temperature, (b) atmospheric precipitation, and (c) climatic water balance in individual months, during the growing season (GS), and over the entire year (Y) between the climatological normal periods 1961–1990 and 1991–2020

Fenologické pomery lesných vegetačných stupňov

Posuny v nástupe fenofáz

Lvs 0. a 1. Naše výsledky ukazujú, že priemerná dĺžka vegetačného obdobia (DVO) u dubov dosahovala v období 1961–1990 180 dní, čo súhlasilo s údajom uvedeným v Zlatníkovej klasifikácii pre 1. lvs, avšak v období 1991–2020 to bolo už len 176 dní. Tento pokles súvisel predovšetkým so skorším nástupom BBCH94. U buka lesného všetky fenologické stanice v 1. lvs boli situované v lužných lesoch (0. lvs) a to 173 dní v období 1991–2020, pričom podľa analýzy trendov sa v období 1991–2020 významne predlžovalo ($p < 0,05$). U smreka

sme zistili významný trend skoršieho BBCH10 v 0. lvs, kde nástup nastal o deň neskôr ako v 1. lvs. Skorší nástup BBCH10 v 0. lvs ako v 1. lvs v druhom normálovom období sme pozorovali aj u jedle, pričom trend nebol ani v jednom lvs štatisticky významný.

Lvs 2. DVO u dubov sa medzi normálovými obdobiami predĺžila zo 163 na 168 dní. Trend predĺženia DVO v lvs 2 bol štatisticky významný a súvisel so skorším nástupom BBCH11. Priemerný nástup jarných fenofáz v období 1991–2020 bol u dubov v DOY 116, u smreka DOY 120. U buka nastúpili prvé listy o týždeň skôr čo spôsobilo, že DVO u tohto druhu bolo dlhšie ako u dubov a dosiahlo 175 dní. DVO oboch drevín sa v období 1991–2020 nachádzalo v rozpätí hodnôt uvádzaných Zlatníkom (165–180 dní). U jedle sa jarné fenofázy štatisticky významne neposunuli a začínali najneskôr (DOY 128 v 1991–2020).

Lvs 3. DVO u dubov aj buka dosahovala hornú hranicu rozsah 150–165 dní definovaný Zlatníkom v období 1991–2020. Kým u dubov neboli trendy významné, u buka sa DVO štatisticky významne predlžovala, pričom aj nástup jarných fenofáz bol najskorší u buka (DOY 113). Nasledovali ho duby (DOY 118), pričom ihličnany zaostávali (DOY 126 u smreka aj jedle).

Lvs 4. V období 1991–2020 bola DVO podobná u buka (161 dní) a dubov (160 dní), pričom dosahovala hornú hranicu rozsah rozsahu uvádzaného Zlatníkom (130–160 dní). Kým fenofázy určujúce DVO u buka sa v podmienkach otepľovania výrazne nezmenili, u dubov došlo k významne skoršiemu nástupu BBCH11 z DOY 131 na 123 medzi normálovými obdobiami. Podobný posun jarných fenofáz sme pozorovali aj na stanicach so smrekom (z DOY 136 na 130) a jedľou (z DOY 136 na 131) v 4. lvs.

Lvs 5. DVO u buka v období 1990–2020 trvala 152 dní a tým výrazne presiahla rozsah uvádzaný Zlatníkom (110–130 dní). Medzi normálovými obdobiami sa DVO významne nezmenila, keďže BBCH11 aj BBCH94 sa posunuli do skorších termínov. Otepľovanie v období 1991–2020 v tomto lvs využil hlavne smrek, u ktorého sa nástup BBCH10 významne posunul do skorších termínov (z DOY 142 na DOY 134) a tým začínal približne rovnako ako u jedle, ktorej BBCH10 sa posunulo o 4 dni (z DOY 138 na DOY 134). BBCH10 u kosodrevina v tomto lvs mierne zaostávala a pričom nastupovala okolo DOY 140.

Lvs 6. Vegetačné obdobie u buka trvalo v období 1991–2020 okolo 140 dní a presiahlo rozsah stanovený Zlatníkom (90–120 dní) o 20 dní. Buk podobne ako jedľa a smrek posúval svoje jarné fenofázy v období 1991–2020 v dôsledku otepľovania klímy do skorších termínov. V období 1991–2020 začínal buk BBCH11 v DOY 127, o niečo neskôr začínali BBCH10 jedľa a smrek v ten istý deň okolo DOY 135.

Lvs 7. V tomto lvs boli sledované len dva druhy – smrek a kosodrevina. V období 1991–2020 kosodrevina mierne posúvala BBCH10 do skoršieho termínu (bez významného trendu), zatiaľ čo smrek významne posúval nástup BBCH10 do neskorších termínov.

Korelácie

Výsledky parciálnej korelácie indikovali, že vyššie teploty vzduchu v zime a na jar štatisticky významne ($p < 0,05$) urýchľujú nástup BBCH11 u dubov, a to najmä v 2. a 4. lvs. V 1. lvs (nížiny juhozápadného a južného Slovenska) sa však paradoxne prejavil významný trend k neskoršiemu nástupu BBCH11, a to napriek pozitívnemu vplyvu vyšších teplôt. Predpokladáme, že tento oneskorený trend ($\sim 0,15$ dňa ročne) by mohol súvisieť s nízkou vlhkosťou pôdy, ktorá však v tejto štúdii nebola hodnotená a zaslúžila by si ďalší výskum. Na rozdiel od BBCH11 bol nástup BBCH94 významne ovplyvnený tak teplotnými, ako aj zrážkovými charakteristikami. Zatiaľ čo vyššie teploty vzduchu v mesiacoch pred BBCH94 prispievalo k oneskoreniu nástupu v 0. až 3. lvs, nízke úhrny zrážok a KVB viedli k skoršiemu nástupu v 0., 1. a 2. lvs. V týchto nižších lvs sa sucho najviac prejavuje v letných mesiacoch (Obr. 3c). Duby vykazovali významnú koreláciu so suchom napriek xerotermickej stavbe listov a koreňovej sústave, ktorá umožňuje prispôsobiť sa nedostatku vody (ŠKVARENINOVÁ et al. 2017; ČEHULIČ et al. 2019; CICEU et al. 2020).

V našej štúdii skorší nástup BBCH11 u buka lesného štatisticky významne koreloval ($p < 0,05$) s vyššími teplotami pred nástupom jarných fenofáz vo vyšších lvs (5. a 6.), zatiaľ čo trendy v nižších lvs (0. až 4.) boli štatisticky nevýznamné. V 6. lvs s dostatkom atmosférických zrážok významná korelácia s SPI poukázala na oneskorený nástup BBCH11, keď zrážky prekročili normálne hodnoty. To môže súvisieť s citlivosťou buka na zamokrenie pôdy, ktoré môže obmedziť príjem živín a rast (GEBLER et al. 2007). Tento negatívny vplyv nadpriemerných zrážok na BBCH11 v 6. lvs si vyžaduje ďalší výskum. Na rozdiel od BBCH11 bol neskorší nástup BBCH94 u buka ovplyvnený kombináciou vyšších teplôt vzduchu a vyšších zrážok, kým skorší nástup spôsobili nižšie hodnoty Z, SPI a KVB počas leta. Výsledky parciálnych korelácií poukazujú na to, že buk v stredných až vyšších nadmorských výškach momentálne profituje z meniacich sa klimatických podmienok, zatiaľ čo v nižších polohách a suchších (xerických) oblastiach (2. a 3. lvs) je naopak citlivý na suchu. Naše výsledky potvrdzujú predchádzajúce zistenia, že predčasné žltnutie listov môže byť zapríčinené silným suchom (MÁTYÁS et al. 2010; LUKASOVÁ et al. 2020; BIGLER & VITASSE 2021; RUKH et al. 2023). Napriek vplyvu sucha sme v 0. a 3. lvs zistili významné trendy k neskoršiemu BBCH94. Naopak, v 5. lvs sa BBCH94 posunul k skoršiemu nástupu. Podobné správanie bolo pozorované aj vo Švajčiarskych Alpách, kde vo výškach nad 560 m n. m. zaznamenali trend k skoršiemu žltnutiu listov v porovnaní s nížinami, kde naopak žltnutie nastávalo neskôr (MEIER et al. 2021).

Skorší nástup BBCH11 u smreka obyčajného v 0. až 6. lvs štatisticky významne koreloval so zvyšujúcimi sa teplotami vzduchu ($p < 0,05$), čo potvrdzuje dôležitosť tejto meteorologickej charakteristiky pre jarné fenofázy u smreka, ako uvádzali predchádzajúce štúdie (SVYSTUN et al. 2021). Skorší nástup vegetatívnych fenofáz medzi

155 a 860 m n. m. uvádzali tiež HÁJKOVÁ et al. (2012). Napriek tomu, že sa vegetačné obdobie u smreka posúva do skorších termínov, aktuálne klimatické podmienky v strednej Európe nie sú priaznivé pre jeho rast v nižších a stredných nadmorských výškach, kde intenzívne a dlhotrvajúce suché periódny znižujú jeho ročný hrúbkový prírastok (KREJZA et al. 2021) ako aj jeho odolnosť voči škodlivým činiteľom (MEZEI et al. 2017). Zaujímavé je, že vo vysokých horských polohách v 7. lvs sme v súvislosti s otepľovaním zistili opačný trend – BBCH10 sa významne oneskoroval. V tomto lvs neskorší nástup BBCH10 významne koreloval ($p < 0,05$) s vyššími minimálnymi teplotami vzduchu vo februári a v zimno-jarnom období (január až apríl). Fenologické stanice v 7. lvs zahrnuté do štúdie sa nachádzajú vo Vysokých Tatrách: Dolný Smokovec (1 400 m n. m.) a Štrbské pleso (1 340 m n. m.). Po veternej kalamite v roku 2004 sa zdravotný stav týchto smrekových lesov výrazne zhoršil a stali sa tak náchylnými na rôzne disturbancie (MEZEI et al. 2017). Zistený negatívny trend u BBCH10 môže súvisieť práve s poklesom vitality a zhoršeným zdravotným stavom smrekových porastov.

BBCH10 u **jedle bielej** sa štatisticky významne ($p < 0,05$) posunul do skorších termínov v 4., 5. a 6. lvs, a to vďaka významnému vplyvu vyšších teplôt vzduchu ($p < 0,05$), ktorý bol zistený len v týchto vyšších lvs. Vplyv zrážkových charakteristík bol štatisticky významný len v 4. lvs, kde nižšia KVB viedla k oneskorenému nástupu BBCH10 a naopak. Adaptácia jedle na zvyšujúcu sa intenzitu suchých epizód v letných mesiacoch súvisí s pomalším rastom, ktorý sa prejavuje hlavne na lokalitách mimo optimálnych podmienok pre rast jedle (CSILLÉRY et al. 2020; MIHAI et al. 2021). Celkovo však jedľa vykazuje spomedzi ihličnanov najvyššiu odolnosť voči suchu najmä vo vyšších polohách a modely predpovedajú jej vysoký adaptačný potenciál (MÁTYÁS et al. 2021).

Nástup BBCH10 u **kosodreviny** štatisticky významne ovplyvnili len teploty vzduchu. Vyššie teploty v máji urýchlili nástup, zatiaľ čo vyššie februárové teploty ho oneskorovali ($p < 0,05$). V 5. a 7. lvs sa priemerné februárové teploty pohybujú medzi -5 a 0 °C (Obr. 2), avšak počas nadpriemerne teplých zím alebo vplyvom krátkodobých intenzívnych oteplení môžu byť aj vyššie. LUKASOVÁ et al. (2021) uvádza, že zatiaľ čo teplejšie zimy zvyšujú vitalitu kosodreviny, krátke epizódy otepľovania počas chladných zím ju znižujú. Zamrznutá pôda v zime bráni príjmu vody, a následne nízky vodný potenciál v kombinácii s cyklami mrazu a otepľovania zvyšujú teplotný stres a zhoršujú regeneráciu (MAYR et al. 2019). Preto môže byť nástup nových výhonkov na jar ovplyvnený fyziologickým stavom po zime. Na rozdiel od teploty, zrážky nemali významný vplyv na nástup BBCH10 u tohto druhu, keďže fenologické stanice sa nachádzajú v lvs s dostatočnými zrážkovými úhrnmi (nad 800 mm ročne, Obr. 3b) a s pozitívnou KVB (Obr. 3c).

ZÁVER

V prezentovanej práci boli zmeny klimatických podmienok v lesných vegetačných stupňoch Západných Karpát počas dvoch posledných klimatických normálov 1961–1990 a 1991–2020 skúmané v súvislosti s fenologickou odozvou klimaxových drevín. Trendové analýzy ukázali, že najvýraznejšie posuny k skoršiemu nástupu jarných fenofáz sa vyskytli v 0. a vo vyšších lvs, teda na hornej hranici vertikálneho rozšírenia sledovaných druhov, kde boli začiatky fenofáz v období 1961–1990 výrazne neskoršie. Jedinou výnimkou boli smrekové porasty v 7. lvs, kde trend naznačil posun k neskoršiemu nástupu BBCH10. Výsledky parciálnych korelácií potvrdili, že hlavným faktorom ovplyvňujúcim posuny v nástupe jarných fenologických fáz je teplota vzduchu. Vplyvom stúpajúcej teploty predovšetkým v jarnom období sa fenofázy posúvajú do skorších termínov u všetkých hodnotených druhov. Nástup jesennej fenofázy BBCH94 u listnatých druhov bol podobne ako u jarných fenologických fáz závislý od teploty vzduchu, pričom so stúpajúcou teplotou sa BBCH94 posúvala do neskorších termínov. Avšak zároveň v nižších a teplejších vegetačných stupňoch duby aj buk citlivo reagovali na suchu, čo sa prejavilo skorším nástupom fázy BBCH94 vplyvom nízkych hodnôt zrážkových charakteristík.

Následný výskum bude zameraný na analýzu možných zmien nástupu fenofáz pri rôznych scenároch klimatickej zmeny s využitím regionálnych klimatických modelov v kombinácii s prezentovanými výsledkami. Podľa niektorých prác napríklad buk lesný a smrek obyčajný stratí v budúcnosti veľkú časť svojho areálu rozšírenia a budú nahradené teplomilnejšími druhmi. Naše výsledky môžu pomôcť aj pri plánovaní provenienčných pokusov s genotypmi pochádzajúcimi zo suchších oblastí v lvs, v ktorých sme identifikovali najvýraznejší vplyv sucha na priebeh vegetačných období.

PodĎakovanie: Táto práca bola finančne podporená projektami VEGA 2/0048/25 a VEGA 2/0115/25.

LITERATÚRA

- BIGLER, C., VITASSE, Y., 2021. *Premature leaf discoloration of European deciduous trees is caused by drought and heat in late spring and cold spells in early fall*. Agricultural and Forest Meteorology, 307:108492.
- BOŠELA, M., 2010. *Climatic and soil characteristics of the altitudinal vegetation zones and edaphic-trophic units*. Central European Forestry Journal, 56:215–234.

- BRASLAVSKÁ, O., KAMENSKÝ, L., 1996. *Fenologické pozorovanie lesných rastlín*. Metodický predpis. Bratislava, SHMÚ, 22 p.
- BUCHA, T., KOREN, M., SITKOVÁ, Z., PAVLEDOVÁ, H., SNOPOKOVÁ, Z., 2023. *Trends and driving forces of spring phenology of oak and beech stands in the Western Carpathians from MODIS times series 2000–2021*. iForest – Biogeosciences and Forestry, 16:334–344.
- CICEU, A., POPA, I., LECA, S., PITAR, D., CHIVULESCU, S., BADEA, O., 2020. *Climate change effects on tree growth from Romanian forest monitoring Level II plots*. Science of the Total Environment, 698:134129.
- 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, 13:2357–2376.
- ČEHULÍČ, I., SEVER, K., KATIČIĆ BOGDAN, I., JAZBEC, A., ŠKVORC, Ž., BOGDAN, S., 2019. *Drought Impact on Leaf Phenology and Spring Frost Susceptibility in a Quercus robur L. Provenance Trial*. Forests, 10:50.
- ČUFAR, K., LUIS, M. D., SAZ, M. A., ČREPINŠEK, Z., KAJFEŽ-BOGATAJ, L., 2012. *Temporal shifts in leaf phenology of beech (Fagus sylvatica) depend on elevation*. Trees, 26:1091–1100.
- DIDION-GENCY, M., VITASSE, Y., BUCHMANN, N., GESSLER, A., GISLER, J., SCHAUB, M. et al., 2023. *Chronic warming and dry soils limit carbon uptake and growth despite a longer growing season in beech and oak*. Plant Physiology, 194: 741–757.
- FU, Y. H., PIAO, S., CONG, N., ZHAO, H., ZHANG, Y., MENZEL, A. et al., 2014. *Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations*. Global Ecology and Biogeography, 23:1255–1263.
- GEßLER, A., KEITEL, C., KREUZWIESER, J., MATYSSEK, R., SEILER, W., RENNENBERG, H., 2007. *Potential risks for European beech (Fagus sylvatica L.) in a changing climate*. Trees, 21:1–11.
- HÁJKOVÁ, L., KOŽNAROVÁ, V., SULOVSÁ, S., RICHTEROVÁ D., 2012. *The temporal and spatial variability of phenological phases of the Norway spruce (Picea abies [L.] Karsten) in the Czech Republic*. Folia Oecologica, 39:10–20.
- CHMIELEWSKI, F. M., RÖTZER, T., 2001. *Response of tree phenology to climate change across Europe*. Agriculture and Forest Meteorology, 108:101–112.
- KREJZA, J., CIENCIALA, E., SVĚTLÍK, J., BELLAN, M., NOYER, E., HORÁČEK, P. et al., 2021. *Evidence of climate-induced stress of Norway spruce along elevation gradient preceding the current dieback in Central Europe*. Trees, 35:103–119.
- LUKASOVÁ, V., BUCHA, T., MAREKOVÁ, L., BUCHHOLCEROVÁ, A., BIČÁROVÁ, S., 2021. *Changes in the greenness of mountain pine (Pinus mugo Turra) in the subalpine zone related to the winter climate*. Remote Sensing, 13:1788.
- LUKASOVÁ, V., BUCHA, T., ŠKVARENINOVÁ, J., ŠKVARENINA, J., 2019. *Validation and application of European beech phenological metrics derived from MODIS data along an altitudinal gradient*. Forests, 10:60.
- LUKASOVÁ, V., VIDO, J., ŠKVARENINOVÁ, J., BIČÁROVÁ, S., HLAVATÁ, H., BORSÁNYI, P. et al., 2020. *Autumn phenological response of European beech to summer drought and heat*. Water, 12:2610.
- MÁTYÁS, C., BERAN, F., DOSTÁL, J., ČÁP, J., FULÍN, M., VEJPUŠTKOVÁ, M. et al., 2021. *Surprising Drought Tolerance of Fir (Abies) Species between Past Climatic Adaptation and Future Projections Reveals New Chances for Adaptive Forest Management*. Forests, 12:821.
- MÁTYÁS, C., BERKI, I., CZÚCZ, B., GÁLOS, B., MÓRICZ, N., RASTOVITS, E., 2010. *Future of Beech in Southeast Europe from the Perspective of Evolutionary Ecology*. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 6:91–110.
- MAYR, S., SCHMID, P., ROSNER, S., 2019. *Winter Embolism and Recovery in the Conifer Shrub Pinus mugo L.* Forests, 10:941.
- MEIER, M., VITASSE, Y., BUGMANN, H., BIGLER, C., 2021. *Phenological shifts induced by climate change amplify drought for broad-leaved trees at low elevations in Switzerland*. Agricultural and Forest Meteorology, 307:108485.
- MEIER, U., 2001. *Growth Stages of Mono and Dicotyledonous Plants*. BBCH Monograph. Bonn, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. Available at <https://www.politicheagricole.it/flex/AppData/WebLive/Agrometeo/MIEPFY800/BBCHengl2001.pdf>.
- MENZEL, A., 2003. *Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO*. Climate Change, 57:243–263.
- MÉSZÁROS, J., HALAJ, M., POLČÁK, N., ONDERKA, M., 2022. *Mean annual totals of precipitation during the period 1991–2015 with respect to cyclonic situations in Slovakia*. Időjárás – Quarterly journal of the Hungarian meteorological service, 126:267–284.
- MEZEI, P., JAKUŠ, R., PENNERSTORFER, J., HAVAŠOVÁ, M., ŠKVARENINA, J., FERENČÍK, J. et al., 2017. *Storms, temperature maxima and the Eurasian spruce bark beetle Ips typographus – an infernal trio in Norway spruce forests of the Central European High Tatra Mountains*. Agricultural and Forest Meteorology, 242:85–95.
- MIHAI, G., ALEXANDRU, A. M., STOICA, E., BIRSAN, M. V., 2021. *Intraspecific Growth Response to Drought of Abies alba in the Southeastern Carpathians*. Forests, 12:387.

- PIAO, S. L., LIU, Q., CHEN, A. P., JANSSENS, I. A., FU, Y., DAI, J. et al., 2019. *Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges*. *Global Change Biology*, 25:1922–1940.
- RANDUŠKA, D., VOREL, J., PLÍVA, K., 1986. *Fytocenológia a lesnícka typológia*. Príroda.
- REID, P. C., HARI, R. E., BEAUGRAND, G., LIVINGSTONE, D. M., MARTY, CH., STRAILEET, D. et al., 2016. *Global impacts of the 1980s regime shift*. *Global Change Biology*, 22:682–703.
- RICHARDSON, A. D., HUFKENS, K., MILLIMAN, T., AUBRECHT, D. M., CHEN, M., GRAY, J. M. et al., 2018. *Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery*. *Scientific Data*, 5:180028.
- RUKH, S., SANDERS, T. G., KRÜGER, I., SCHAD, T., BOLTE, A., 2023. *Distinct Responses of European Beech (Fagus sylvatica L.) to Drought Intensity and Length—A Review of the Impacts of the 2003 and 2018–2019 Drought Events in Central Europe*. *Forests*, 14:248.
- SEN, P.K. 1968 *Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau*. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379–1389.
- SHMÚ, 2015. *Klimatický atlas Slovenska*. Bratislava, Slovenský hydrometeorologický ústav, 132 s. ISBN 978-80-88907-90-9
- SVYSTUN, T., LUNDSTRÖMER, J., BERLIN, M., WESTIN, J., JÖNSSON, A. M., 2021. *Model analysis of temperature impact on the Norway spruce provenance specific bud burst and associated risk of frost damage*. *Forest Ecology and Management*, 493:119252.
- THORNTHWAITTE, C. W., 1948. *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical Review*, 38:55–94.
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010. *A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI*. *Journal of Climate*, 23:1696.
- VITASSE, Y., DELZON, S., DUFRENE, E., PONTILLER, J. Y., LOUVET, J. M., KREMER, A. et al., 2009. *Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses?* *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:735–744.
- XIE, Y. Y., WANG, X. J., WILSON, A. M., SILANDER, J. A., 2018. *Predicting autumn phenology: how deciduous tree species respond to weather stressors*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250:127–137.
- ZLATNÍK, A., 1960. *Waldtypengruppen der Slowakei*. Brno: Wiss. Laboratorium, 195 s.
- ZLATNÍK, A., 1976. *Přehled skupin typů geobiocénů původně lesních a křovinných ČSSR*. *Zprávy Geografického ústavu České akademie věd*, 13/3-4:55–64.

VPLYV MIKROKLÍMY HORSKÝCH SMREČÍN NA VLHKOSŤ JEMNÉHO PALIVA A RIZIKO LESNÝCH POŽIAROV V OBLASTI ZÁPADNÝCH TATIER

Lenka MALOVCOVÁ¹ – Martin JANČO² – Milan Ostrihoň¹ – Paulína NALEVANKOVÁ¹ –
Ilja VYSKOT³ - Jaroslav VIDO^{1,4} - Jaroslav ŠKVARENINA¹

¹ Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická Univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24 960 01 Zvolen, Slovensko, *email: xmalovcova@is.tuzvo.sk

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

³ Ústav environmentalistiky a prírodných zdrojů, Fakulta regionálního rozvoje a mezinárodních studií, Mendelova univerzita v Brně, tř. Generála Píky 7, 61300 Brno, Česká republika

⁴ Ústav lesnické botaniky, dendrologie a geobiocenologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1665/1, 61300 Brno, Česká republika

ABSTRACT

Malovcová L., Jančo M., Ostrihoň, M., Nalevanková P., Vyskot, I., Vido J., Škvarenina J.: The impact of the microclimate of mountain spruce forests on the moisture content of fine fuel and the risk of forest fires in the Western Tatras region

Microclimate plays key role in soil – air – plant environment because provide us information about meteorological and physiological variabilities. The aim of the research is comparing meteorological parameters, moisture content of fine fuel and calculating Angström index and determine fire danger classes for open area and living spruce forest from 12.8. to 14.8. 2024. We found that on the open area was the great difference in air temperature and their amplitudes compared to living spruce forest. The relative air humidity was high in open area and living spruce forest. The drought grass (*Calamagrostis arundinacea*) and lichen (*Pseudovernia furfuracea*) had more moisture content than spruce litter. On the open area was the higher wildfire risk than living spruce forest, where was lower wildfire risk. Important role is creating appropriate adaptive and management measures, procedures and controls due to the wildfire risk in mountain areas where are growing especially Norway spruce (*Picea abies*) which is susceptible on different abiotic and biotic harmful factors (for example wildfires, wind and bark beetle calamities, fungi pathogens and other). And therefore we should interest about health conditions of mountain ecosystems and rising their resistance and immunity towards the forest fires.

Key words: microclimate, mountain spruces, wildfires, Angström index, fire danger classes

ÚVOD

Mikroklímu definujeme ako klímu malého priestoru, ktorá vytvára vhodné podmienky pre organizmy a ekosystémy. Mikroklíma terestriálnych ekosystémov je klíma, ktorá je odlišná od makroklímy vonkajšieho okolia. Závisí predovšetkým od topografie, vegetácie, pôdneho krytu, od teploty vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu, zrážok, slnečnej radiácie, oblakov, veterných a evapotranspiračných podmienok. Extrémne teploty sú viac tlmené lesnými porastami v porovnaní s voľnou plochou. Vo vnútri lesného porastu maximálne denné teploty klesajú a nočné teploty narastajú. Porastová štruktúra je kľúčovým faktorom lesnej mikroklímy a je daná od korunového zápoja, hustoty, výšky drevín, kruhovej základne alebo od nižšej vegetácie a kríkovej vrstvy (PETRÍK et al. 1986; DE FRENNE et al. 2021; MÁLIŠ et al. 2023; BRŮNA et al. 2024; KEMPPINEN et al. 2024). Podľa prognóz sa extrémne klimatické udalosti ako napr. sucha, vlny horúčav, búrky a silný vietor budú v Európe vyskytovať častejšie a môžu byť hlavnou príčinou degradácie lesa. Takéto javy môžu spôsobiť posun lesných ekosystémov, zmenu drevinového zloženia alebo migráciu mnohých druhov, čo by mohlo viesť k potrebnej obnove lesných ekosystémov (TUDORAN

a ZOTTA 2020). Horské smrekové porasty, ktoré boli doteraz nedotknuté ľudskými aktivitami odumierajú hlavne následkom klimatickej zmeny a poškodenia abiotickými a biotickými škodlivými činiteľmi (napr. sucho, požiare, vietor, poškodenie hubovými patogénmi a poškodenie lykožrútom) (MALOVCOVÁ et al. 2023; 2024).

Požiare definujeme ako staroveký fenomén. Mnohé rastliny sa adaptovali na vlastnosti ohňa, čo im pomohlo prežiť a poskytnúť schopnosť rozmnožovať sa v požiarom období. Lesné požiare sú súčasťou mnohých ekosystémov na Zemi, ale tiež ich považujeme za prírodné nebezpečenstvo (natural disaster) pre ľudskú spoločnosť. Vznik lesných požiarov zahŕňa tieto štyri faktory: zapálenie, palivo, sucho a meteorologické podmienky (vietor, vysoké teploty a nízka relatívnu vlhkosť vzduchu) (FERNANDEZ-ANEZ et al. 2021; PAUSAS a KEELEY, 2021). Najrozsiahlšie lesné požiare sa šíria najmä v krajinách stredozemného mora, USA, Kanade, Austrálii, Rusku a pod. kde spôsobujú nevyčísliteľné škody. Lesné požiare vznikajú veľmi často v dôsledku globálnej zmeny klímy, zmien vo využívaní krajiny a ľudských aktivít v blízkosti lesov a z tohto hľadiska sú príčinou sociálneho, ekonomického a ekologického poškodenia. Zásadne ovplyvňujú sukcesiu lesných ekosystémov a štruktúru rastlinných spoločenstiev. Následkom zmeny klímy môžeme predpokladať frekventovanejší výskyt požiarov, nárast rizika požiarov, dlhšie požiarne obdobia a zmeny v správaní sa požiarov (WASTL et al. 2012; JÚNIOR et al. 2022; ZHANG et al. 2025).

Protipožiarny systém (Fire Danger Rating System) sa široko využíva na monitorovanie lesných požiarov prostredníctvom meteorologických prvkov ako sú napr. teplota, relatívna vlhkosť vzduchu, zrážky, vietor a prípadne pôdna vlhkosť. Medzi najpoužívané protipožiarne systémy a požiarne indexy patrí: protipožiarny národný systém v USA (NFDRS), McArthurov požiar index využívaný vo východnej Austrálii a v západnej časti Austrálie sa používa tzv. The Forest Fire Behavior Tables (FFBT). Nesterov index sa používa v Rusku a v Kanade sa používa kanadský protipožiarny systém (Canadian Forest Fire Danger Rating System) (JÚNIOR et al. 2022). Medzi nekumulatívne požiarne indexy patrí: Angström index, Fosberg index a Sharples index (OSTRIHOŇ et al. 2024).

Štúdia je zameraná na mikroklimu horských smrečín a na riziko lesných požiarov Západných Tatier, pričom ciele môžeme definovať nasledovne:

- 1) určiť rozdiel v meteorologických prvkoch medzi otvorenou plochou a živým smrekovým lesom od 12.8. do 14.8. 2024,
- 2) určiť a porovnať vlhkosť v jemnom palive na otvorenej ploche a v živom smrekovom lese,
- 3) vypočítať Angström index a určiť stupeň požiarneho nebezpečenstva pre posudzované plochy.

Hlavné hypotézy sú:

- H1: Na voľnej ploche bude väčší rozdiel v meteorologických prvkoch ako v živom smrekovom lese.
- H2: Vysoký obsah vlhkosti má tráva a lišajník oproti smrekovému opadu.
- H3: Vysoké riziko vzniku požiaru je na otvorenej ploche než v živom smrekovom lese.

MATERIÁL A METÓDY

Charakteristika územia

Výskumná oblasť Červenec sa nachádza v Jaloveckej doline v blízkosti chaty Pod Náružím v nadmorskej výške 1420 m n. m. v časti Sivý vrch, ktorý je súčasťou Západných Tatier. Táto oblasť spadá do 7. vegetačného stupňa a skupín lesných typov: *Sorbetto-Piceetum* (60 %) a *Acereto Piceetum* (40 %). V tejto horskej oblasti je priemerná teplota vzduchu 3,0 °C a dlhodobý úhrn zrážok je 1450 mm. Oblasť Západných Tatier sa vyznačuje mierne chladnou horskou klímou (C1). Merania meteorologických prvkov vykonávame na 2 porovnávacích plochách (voľná plocha a živý smrekový les (obr.1). Táto výskumná oblasť je orientovaná na severovýchodnú expozíciu a sklon je 65 %. Pôdnym typom územia je podzol kambizemný, rankre a litozeme a z geologického významu sa tu nachádzajú metamorfované ruly, granodiority a kryštaliniká. Dominantnou drevinou experimentálneho územia je *Picea abies*. Ďalšími dôležitými drevinami, ktoré rastú na tomto území sú: *Pinus mugo*, *Pinus cembra*, *Sorbus aucuparia*, *Larix decidua*. Na otvorenom priestranstve sa nachádzajú trávy napr. *Calamagrostis arundinacea* alebo *Luzula sylvatica* a kríkovité porasty *Vaccinium myrthillus* a *Rubus idaeus* (BARTÍK et al. 2014; BARTÍK et al. 2019; DANÁČOVÁ et al. 2019; JANČO et al. 2021; MALOVCOVÁ et al. 2023; 2024).



Obr. 1 Otvorená nezalesnená plocha (vľavo) a živý smrekový les (vpravo) (Malovcová, 2024)

Fig. 1 Open area (left) and living spruce forest (in right) (Malovcová, 2024)

Zber meteorologických dát a merania Wiltronics ME 2000

Na meranie meteorologických prvkov sme použili zariadenie Minikin RTHi/QTHi (EMS Brno, CZ). Je to prístroj, ktorý sa používa na meranie teploty vzduchu s presnosťou $\pm 0,15$ °C, relatívnej vlhkosti vzduchu ± 2 % v troch výškach a to v 5 cm, 50 cm a 200 cm nad zemským povrchom. Minikin definujeme aj ako malý dataloger so zabudovanými senzormi pre snímanie meteorologických prvkov (teplota vzduchu v rozmedzí -40 do 60 °C a relatívnu vlhkosť vzduchu v rozmedzí od 0 do 100 %), s vysokou presnosťou merania, infračerveným bezdrôtovým prístupom k údajom, s dlhodobou výdržou batérii, s radiačným štítom a s vodotesnou konštrukciou (https://www.emsbrno.cz/p.axd/en/Minikin.RTHi_v_QTHi.html). Meteorologické prvky (teplotu vzduchu a relatívnu vlhkosť vzduchu) sme merali počas 48 hodín od 12.8. do 14.8. 2024 v 10 minútovom intervale, pričom ďalej sme ich spracovali v hodinových intervaloch. Teplota a relatívna vlhkosť vzduchu sa ukladajú do datalogera a prostredníctvom softvéru Mini32 a IRDA kábla sa sťahujú do terénneho osobného počítača. Základné štatistické charakteristiky údajov (MAX, MIN) sme rovnako vyhodnotili pomocou softwaru Mini32.

Meranie vlhkosti jemného paliva bolo realizované pomocou austrálskeho vlhkomeru ME 2000 (Fine Fuel Moisture Meter). Cieľom vlhkomeru je určenie percentuálneho podielu vlhkosti živých a mŕtvych palív (napr. listov, ihličia a kôry nájdených na povrchu pôdy). Toto zariadenie umožňuje presné a rýchle meranie vlhkosti jemného paliva, ktoré považujeme za jeden z najdôležitejších faktorov na určenie intenzity šírenia lesného požiaru a vzniku bodových požiarov (www.wiltronics.com.au). Týmto zariadením sme merali obsah vlhkosti v jemnom palive za 24 hodín od 13.8. do 14.8. 2024 v štvorhodinovom intervale (obr. 2). Na terénnych plochách sme merali vlhkosť jemného paliva, t. j. smrekového opadu, lišajníka otrubového (*Pseudovernia furfuracea*) a trávnatého podrastu (*Calamagrostis arundinacea*).

Postup merania pomocou zariadenia Wiltronics ME 2000

- 1) nazbierame jemné palivo (smrekový opad, tráva a lišajník),
- 2) jemné palivo si pripravíme do oceleového prstenca,
- 3) zoberieme si špecializovaný mlynček, ktorým mŕtvy materiál zomelieme na jemné frakcie do oceleového prstenca,
- 4) na prístroj položíme kompresný valček, ktorým pritlačíme vzorku na senzor konštantným tlakom,
- 5) spustí sa vlhkomer, ktorý v priebehu pár sekúnd odmeria odpor vzorky a potom prostredníctvom kalibračných kriviek určíme vlhkosť jemného paliva (Odmerať vzorku jemného paliva trvá približne 10 až 15 sekúnd, čo závisí od typu paliva. Pri mokrom palive trvá vzorku odmerať cca 3 sekundy a pri veľmi suchom palive až 40 sekúnd),
- 6) mŕtvy materiál je kalibrovaný pod určitým kódom t.j. smrekový opad – 2; lišajník – 3 a tráva – 1,
- 7) na jednotlivých plochách robíme 3 opakované merania pre lepšiu presnosť meraní.



Obr. 2 Wiltronics ME 2000 (Speedy Moisture Meter – Victoria's Forests & Bushfire Heritage)

Fig. 2 Wiltronics ME 2000 (Fine Fuel Moisture Meter) (Speedy Moisture Meter – Victoria's Forests & Bushfire Heritage)

Angström index

Je požiarň index, ktorý vznikol vo Švédsku, no používa sa celosvetovo. Tento index (I) (1) vypočítame podľa nasledujúceho vzorca (ŠKVARENINA et al. 2004).

$$I = \left(\frac{R}{20} \right) + \left(\frac{27-T}{10} \right)$$

R – relatívna vlhkosť vzduchu (%)

T – teplota vzduchu (°C)

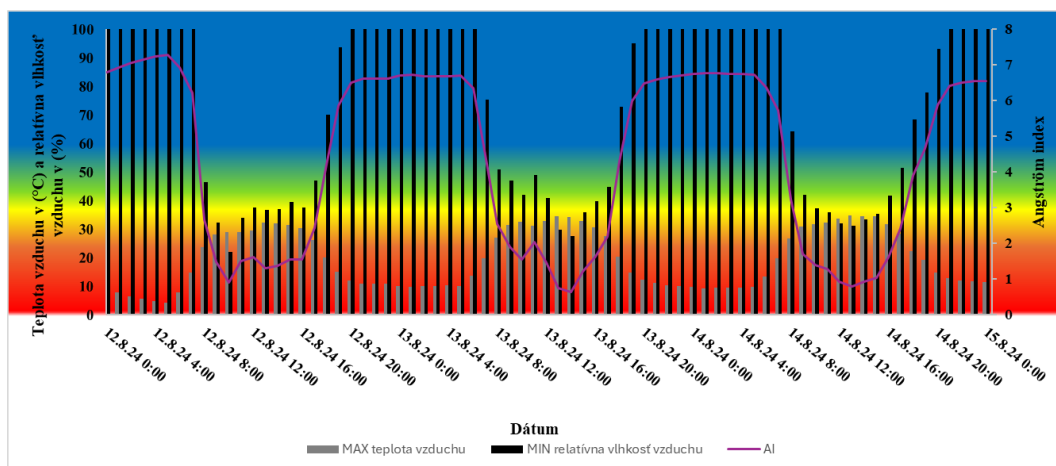
Hodnoty Angström indexu transformované do stupňov požiarneho nebezpečenstva (fire danger class) podľa ŠKVARENINA et al. 2004:

- 1) $I > 4.0$ veľmi nízka pravdepodobnosť vzniku požiaru
- 2) $4.0 > I > 3.0$ nízka pravdepodobnosť vzniku požiaru
- 3) $3.0 > I > 2.5$ stredná pravdepodobnosť vzniku požiaru
- 4) $2.5 > I > 2.0$ vysoká pravdepodobnosť vzniku požiaru
- 5) $I < 2.0$ veľmi vysoká pravdepodobnosť vzniku požiaru

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Otvorená nezalesnená plocha

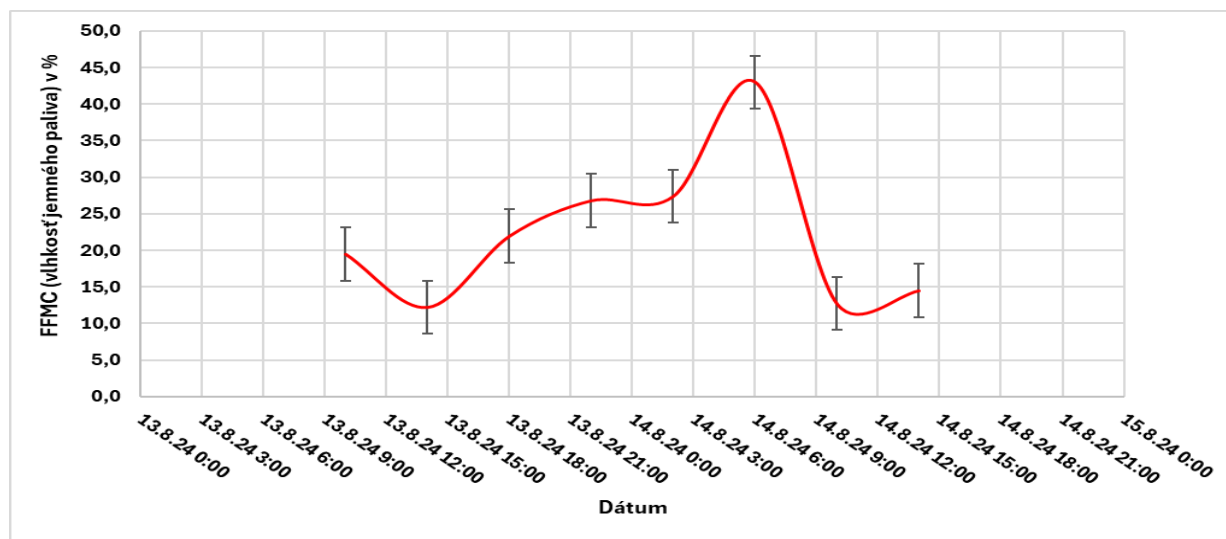
Na otvorenej nezalesnenej ploche bola dňa 14.8. 2024 nameraná maximálna teplota vzduchu 34,7°C o 13:00 hod. a dňa 12.8. 2024 bola nameraná minimálna vlhkosť vzduchu 22% o 10:00 hod. Pri 100 % relatívnej vlhkosti je hodnota Angström indexu 8,0, čo znamená veľmi nízke riziko vzniku požiaru (tieto hodnoty I zaraďujeme do 1 stupňa požiarneho nebezpečenstva) na voľnej ploche. Najväčšie riziko vzniku lesného požiaru je o 13:00 hod. a 14:00 hod., kedy hodnota Angström indexu je < 1 (a túto hodnotu Angström indexu zaraďujeme do 5. stupňa požiarneho nebezpečenstva) (obr. 3). Môžeme konštatovať, že v skorých ranných hodinách na voľnej ploche je relatívne vysoká vlhkosť vzduchu, na trávnom poraste sa udržiava rosa a teplota vzduchu je nízka. Počas dňa teplota vzduchu narastá a vlhkosť vzduchu klesá, a zároveň sa relatívne znižuje vlhkosť v jemnom palive ako to dokazujú naše dáta. Mikroklima voľného priestranstva sa výrazne odlišuje od mikroklimy lesného porastu. Voľná plocha sa vyznačuje krátkodobou slnečnou radiáciou, extrémnymi povrchovými teplotami, vysokou teplotou pôdy, nízkou relatívnou vlhkosťou a vysokou rýchlosťou vetra v porovnaní s lesným porastom. Mikroklima voľného priestranstva, ktorá vzniká prirodzene alebo je výsledkom lesného hospodárstva môže mať silný vplyv na regeneráciu lesa. Na voľnej ploche boli priemerné maximálne a minimálne teplotné amplitúdy väčšie o 17,1 °C ako vo vnútri lesného porastu, kde teplotné amplitúdy klesli o 10,1°C (CARLSON a GROOT 1997). Podľa našich výsledkov amplitúda voľnej plochy je vyššia o 8,7 °C pri maximálnej teplote vzduchu v porovnaní so živým smrekovým lesom. Živý smrekový les má o 12,5 % vyššiu minimálnu relatívnu vlhkosť vzduchu ako otvorená nezalesnená plocha. Na otvorenej ploche môžeme vidieť veľké rozdiely v teplote vzduchu a jej amplitúd oproti živému lesu, pretože na otvorené priestranstvo dopadá priamo slnečné žiarenie a dochádza k extrémnemu prehrievaniu pôdy.



Obr. 3 Teplota vzduchu, relatívna vlhkosť vzduchu a Angström index na otvorenej nezalesnenej ploche 12.8.-14.8. 2024; pozn.: modrá farba – veľmi nízke riziko požiaru, zelená farba – nízke riziko požiaru, žltá farba – stredné riziko požiaru, oranžová farba – vysoké riziko požiaru, červená farba – veľmi vysoké riziko požiaru

Fig. 3 Air temperature, relative air humidity and Angström index on open area from 12.8. to 14.8. 2024; note: blue colour : very low risk of fire, green colour: low risk of fire, yellow colour: mediate risk of fire, orange colour: high risk of fire, red colour: very high risk of fire

Na nezalesnenej otvorenej ploche dňa 14.8. 2024 bola nameraná maximálna vlhkosť suchej trávy 43,0 % o 6:00 hod. a dňa 13.8. 2024 bola nameraná minimálna vlhkosť trávy 12,2 % o 14:00 hod so strednou chybou priemeru 3,63 (obr. 4). V ranných hodinách je vysoká relatívna vlhkosť vzduchu a vlhkosť trávy (*Calamagrostis arundinacea*). Počas dňa relatívna vlhkosť a vlhkosť trávy výrazne klesá. Teplota vzduchu zohráva významnú úlohu pri výskyte lesných požiarov, znižuje relatívnu vlhkosť vzduchu a podporuje výpar vody. V dôsledku extrémneho sucha sa lesné palivo ľahko vznieti a spôsobuje šírenie lesného požiaru (ZHANG et al. 2025). Podľa doterajších výsledkov veľmi vysoké riziko vzniku lesných požiarov je na otvorenej ploche, kde práve suchá tráva tvorená (*Calamagrostis arundinacea*) je najviac zápalným materiálom v porovnaní so živom smrekovým lesom, kde je riziko lesného požiaru nízke.



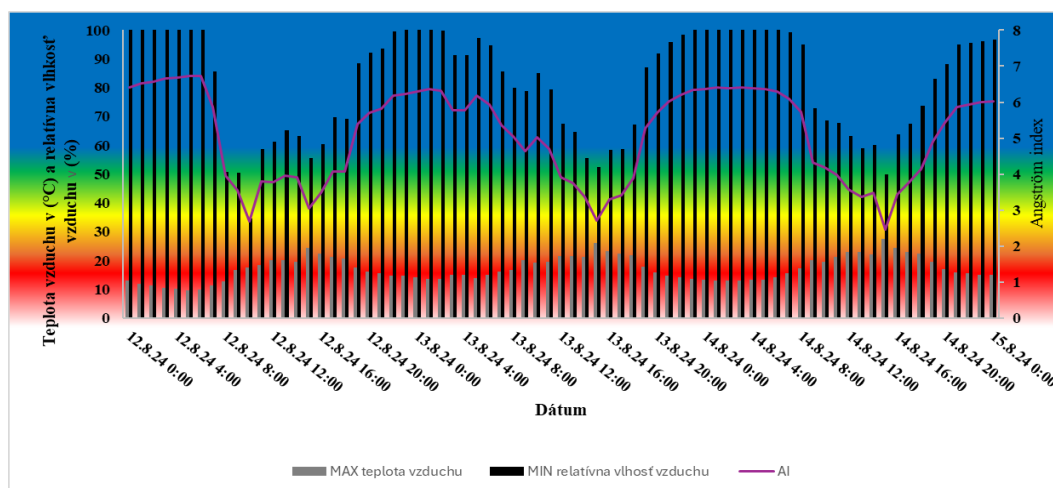
Obr. 4 Vlhkosť jemného paliva (*Calamagrostis arundinacea*) na voľnej ploche od 13.8. do 14.8. 2024

Fig. 4 Fine fuel moisture content (*Calamagrostis arundinacea*) on open area from 13.8. to 14.8. 2024

Živý smrekový les

V živom smrekovom lese dňa 13.8. 2024 bola nameraná maximálna teplota vzduchu 26,0 °C a minimálna vlhkosť vzduchu 34,5 % o 15:00 hod. V ranných hodinách pri vysokej relatívnej vlhkosti nad 95 % Angström index dosahuje vysoké hodnoty 8,0 a 7,0 čo podľa stupňov požiarneho nebezpečenstva zaraďujeme do 1 stupňa. V poobedných hodinách od 13:00 až 15:00 hod. dosahuje Angström index hodnotu okolo 3,0 čo podľa stupňov požiarneho nebezpečenstva zaraďujeme do 3 stupňa (obr. 5).

Mikroklima lesa je určená štruktúrou porastu, drevinovým zložením, pôdnou vlhkosťou, priestorovou diferenciáciou a následkom toho je ovplyvňovaná prírodnými disturbanciami, ktoré menia charakteristiky porastovej štruktúry. Kľúčovou charakteristikou lesnej mikroklimy je tlenie slnečného žiarenia, teplotných extrémov korunovým zápojom, redukovanie zápoja a zmiešanie ovzdušia (tzv. microclimate buffering effect). Pri extrémnych podmienkach počasia ako sú napr. horúce letá, horúčavy v lesnom poraste s uzavretým korunovým zápojom teplota klesá cca na 5 až 9 °C (tzv. cooling effect) (KOVÁCS et al. 2020; KOVÁCS et al. 2024; HORVÁTH et al. 2023; BRAZIUNAS et al. 2025). Mikroklima tienených smrečín je po celý rok stála a vyznačuje sa vysokou relatívnou vlhkosťou vzduchu a nízkymi teplotami vzduchu vo vegetačnom období v porovnaní s voľným priestranstvom (TUŽINSKÝ et al. 2003; MALOVCOVÁ et al. 2023; 2024).



Obr. 5 Teplota a relatívna vlhkosť vzduchu a Angström index v živom smrekovom lese od 12.8. do 14.8. 2024

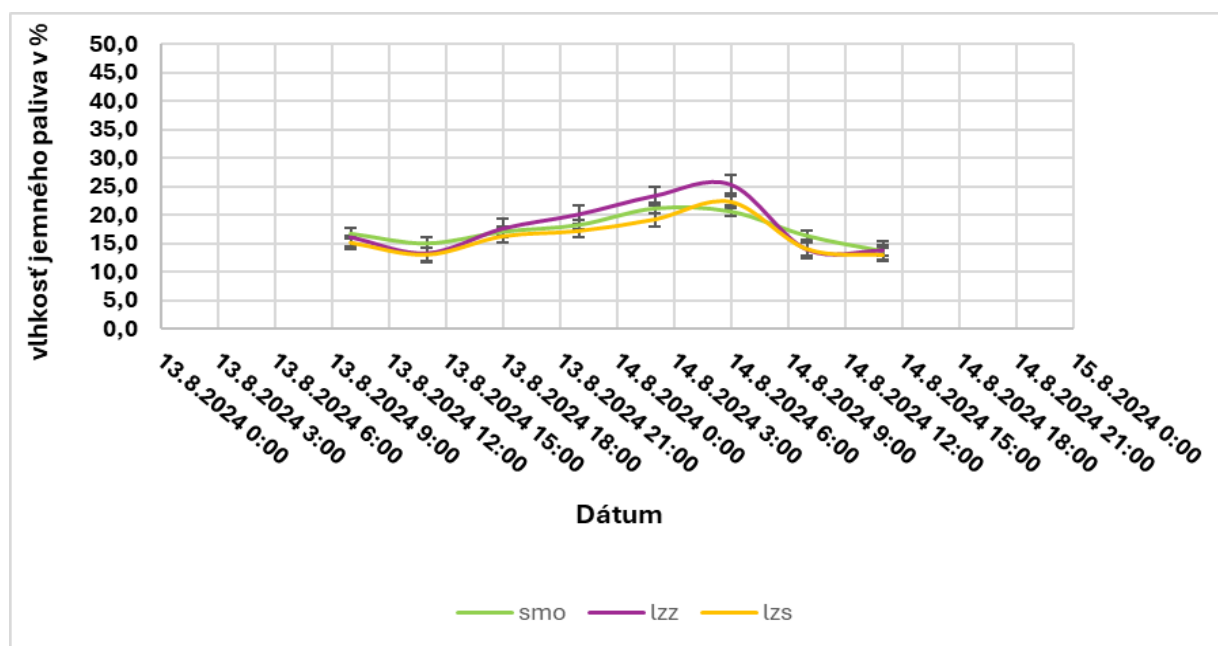
Fig. 5 Air temperature, relative air humidity and Angström index in living spruce forest from 12.8. to 14.8. 2024

Maximálna vlhkosť smrekového opadu bola nameraná dňa 14.8. 2024 o 2:00 hod. s hodnotu 21,2 % a minimálna vlhkosť smrekového opadu bola nameraná o 14:00 hod. s hodnotou 13,7 % a so strednou chybou priemeru 0,90. Maximálna vlhkosť lišajníka pozbieraného z povrchu pôdy bola nameraná dňa 14.8. 2024 o 6:00 hod. s hodnotou 25,4 % a minimálna vlhkosť lišajníka z povrchu zeme bola nameraná dňa 13. 8. 2024 o 14:00 hod. 13,3 % so strednou chybou priemeru 1,62. Vlhosť lišajníka zozbieraného z povrchu stromov bola nameraná dňa 14.8. 2024 o 6:00 hod. s hodnotu 22,3 % a minimálna vlhkosť lišajníka zozbieraného z povrchu stromov bola nameraná dňa 13.8. 2024 o 14:00 hod. s hodnotou 13,1 % a so strednou chybou priemeru 1,14 (obr. 6). Čím je poobede teplejšie, tak teplota vzduchu rastie, a tým klesá relatívna vlhkosť vzduchu a vlhkosť v jemnom palive. A naopak, čím je ráno chladnejšie, je rosa, teplota vzduchu klesá, ale stúpa vlhkosť vzduchu a vlhkosť v jemnom palive.

Vlhkosť jemného paliva je určujúca z hľadiska mnohých aspektov ako napr.: riziko požiaru, ktoré zahŕňa vznik požiaru, správanie požiarov, počet a šírenie požiarov, intenzitu požiarov a pod. Pri vzniku lesného požiaru najprv vzplanie vrstva opadu (napr. lesný opad, rastlinná vegetácia, kříky a popadané drevo), ktoré sa rýchlo šíri na povrchu zeme. V lesnom poraste s uzavretým korunovým zápojom sa formuje taká vrstva opadu, ktorá ďalej umožňuje šírenie požiaru, tam kde ostatné povrchové palivá sa nešíria. Vlastnosti horľavosti lesného opadu sa odlišujú v závislosti od vlhkosťných podmienok (MATTHEWS 2006; MATTHEWS et al. 2015; LOPES et al. 2023; CRAWFORD et al. 2025). Vlhosť paliva určíme ako percentuálny podiel voľnej absorbovanej vody v palive ku hmotnosti suchej biomase. Pri absencii zrážok má mŕtve palivo (napr. rastlinný materiál menej ako 6 mm) vlhkosť medzi 3 % do 35 % (SLIJEPCEVIC et al. 2015). Z hľadiska našich výsledkov mal smrekový opad nízku vlhkosť o 7,5 % ako lišajník otrubový z povrchu zeme, ktorý mal vyššiu vlhkosť o 11,7 %. CRAWFORD et al. (2025) vo svojej

publikácii porovnáva smrek obyčajný (*Picea abies*) so smrekom sitkanským (*Picea sitchensis*). Podľa jeho zistení mal smrek obyčajný nízku vlhkosť v opadanke, zatiaľ čo smrek sitkanský (Sitka spruce) vykazoval vysokú vlhkosť v opadanke. Podľa potvrdených výsledkov lišajníky z povrchu zeme má vyššiu vlhkosť hlavne počas letného obdobia pri extrémnych horúčavách a suchu, pretože si dokáže udržať svoju vlhkosť, ktorú čerpá zo zeme. Na druhej strane smrekový opad a lišajník pozbieraný z povrchu stromov vykazujú nízke hodnoty vlhkosti jemného paliva v poobedných hodinách.

Lišajníky sú symbiotické organizmy formované zelenými riasami, cyanobaktériami a hubami. Na základe symbiotického vzťahu huby poskytujú lišajníkom ochranné prostredie pred vysušením a tým stabilitu, ktorú riasy potrebujú pre fotosyntézu. Na druhej strane riasy poskytujú hubám živiny prostredníctvom fotosyntézy. V porovnaní s cievnatými rastlinami sú lišajníky kľúčovými ekosystémami. Väčšina lišajníkov absorbuje živiny zo vzduchu a približne 10 % z nich fixuje atmosférický dusík vďaka ich symbiotickému vzťahu s cyanobaktériami. Lišajníky vo všeobecnosti pomaly rastú, dlho žijú a sú tolerantné voči stresu, ale vyznačujú sa obrovskou diverzitou na Zemi. Počas suchých období lišajníky dokážu rýchlo absorbovať vodu zo zrážok a kondenzačných zdrojov (ASPLUND a WARDLE 2017; KLAMERUS – IWAN et al. 2023; STANTON et al. 2023; WALKER 2025).



Obr. 6 Vlhkosť jemného paliva (smo – smrekový opad, lzz – lišajník na povrchu pôdy a lzs – lišajník na povrchu stromov) v živom smrekovom lese od 13.8. do 14.8. 2024

Fig. 6 Fine fuel moisture content (smo – spruce litter, lzz – lichen collects on the soil surface, lzs – lichen collects on the tree surface) in living spruce forest from 13.8. to 14.8. 2024

ZÁVER

Mikroklima zohráva kľúčovú úlohu v prostredí pôda – vzduch – rastlina, pretože nám poskytuje informácie o meteorologických a fyziologických variabilitách. Cieľom nášho výskumu prezentovaného v tejto publikácii je porovnať meteorologické parametre, obsah vlhkosti jemného paliva a vypočítať Angströmov index a určiť triedy požiarneho nebezpečenstva pre otvorenú plochu a živý smrekový les počas anticyklonálneho typu počasia, ktoré reprezentuje najrizikovejšiu časť letného požiarneho obdobia. Meteorologické prvky (teplotu vzduchu a relatívnu vlhkosť vzduchu) sme merali pomocou automatickej meteorologickej stanice počas 48 hodín od 12.8. do 14.8. 2024 a vlhkosť jemného paliva sme merali zariadením ME 2000 počas 24 hodín od 13.8. do 14.8. 2024 na dvoch porovnávacích plochách: otvorená nezalesnená plocha a živý smrekový porast. Ďalej sme určovali Angström index podľa ktorého sme hodnoty zaradovali do príslušného stupňa požiarneho nebezpečenstva.

Naše výsledky potvrdili, že na otvorenej nezalesnenej ploche sú výrazné rozdiely v teplote vzduchu oproti živému smrekovému lesu. Keďže holá pôda sa prehrieva a dopadá na ňu priamo slnečné žiarenie a povrchové teploty narastajú v dôsledku toho tam nerastie skoro žiadna vegetácia len krikovitý a bylinný kryt. V živom lese koruny stromov zadržiavajú slnečnú radiáciu, ktorá nepreniká do vnútra živého porastu, a tým pádom sa pôdna

povrch extrémne neprehrieva. Na voľnom priestranstve v skorých ranných hodinách je skoro 100 % relatívna vlhkosť vzduchu kvôli teplote rosného bodu a tiež je vysoká vlhkosť trávnatého podrastu, ale v poobedných hodinách keď sa začína otepľovať relatívna vlhkosť vzduchu a vlhkosť jemného paliva výrazne klesajú. Vo vnútri živého smrekového lesa je relatívna vlhkosť vzduchu výrazne vyššia, ale počas dňa začína klesať. V živom smrekovom lese maximálnu vlhkosť paliva má lišajník pozbieraný z povrchu zeme, vyššiu ako smrekový opad a lišajník pozbieraný z povrchu stromov, ktorý dosahujú minimálnu vlhkosť. Na voľnej nezalesnenej ploche má vysokú vlhkosť trávnatý porast tvorený *Calamagrostis arundinacea*. Vlhkosť v jemnom palive definujeme ako množstvo vody za určitú jednotku z množstva suchej biomasy, čo je určujúce pre uvoľňovanie tepla pri horení paliva. Toto je základom pre požiarne charakteristiky ako sú napr. šírenie požiarov, intenzita horenia a spotreba paliva. Pri určovaní správania požiarov obsah vlhkosti v živých a mŕtvych palivách zohráva kľúčovú úlohu. Podľa hodnôt Angström indexu je najvyššie riziko lesného požiaru na otvorenej ploche a najmenej pravdepodobný vznik lesného požiaru je v živom smrekovom lese.

V súčasnosti sú horské smrečiny čoraz väčšmi ohrozované rizikom poškodenia lesnými požiarimi, preto je potrebné zaoberať sa danou problematikou. Aktuálnosť predkladanej práce potvrdzuje aj nedávny výskyt lesného požiaru v Západných Tatrách (NPR Mních, máj 2025). Požiarom narušené prírodné smrekové ekosystémy môžu priniesť výrazné zmeny v hydroekologickom režime týchto horských oblastí. Dôležité je vytvárať rámcové a adaptívne opatrenia, ktoré môžu zvýšiť ochranu a odolnosť horských smrečín pri lesných požiaroch a zabezpečiť tak plnenie ich hydrických, sociálnych a environmentálnych funkcií v lesnom prostredí.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla s finančnou podporou projektov: APVV-21-0270, APVV-21-0224, VV-MVP-24-0208 a projektov: VEGA 1/0392/22, VEGA 1/0443/23 a VEGA 2/0019/23.

LITERATÚRA

ASPLUND, J., & WARDLE, D. A. (2017). How lichens impact on terrestrial community and ecosystem properties. *Biological reviews*, 92(3), 1720-1738.

BARTÍK, M., SITKO, R., OREŇÁK, M., SLOVIK, J., & ŠKVARENINA, J. (2014). Snow accumulation and ablation in disturbed mountain spruce forest in West Tatra Mts. *Biologia*, 69(11), 1492-1501.

BARTÍK, M., HOLKO, L., JANČO, M., ŠKVARENINA, J., DANKO, M., & KOSTKA, Z. (2019). Influence of mountain spruce forest dieback on snow accumulation and melt. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 67(1), 59-69.

BRAZIUNAS, K. H., RAMMER, W., DE FRENNE, P., DÍAZ-CALAFAT, J., HEDWALL, P. O., SENF, C., ... & SEIDL, R. (2025). Microclimate temperature effects propagate across scales in forest ecosystems. *Landscape Ecology*, 40(2), 37.

BRŮNA, J., MACEK, M., KLINEROVÁ, T., HEDEROVÁ, L., RŮŽIČKOVÁ, A., & KOPECKÝ, M. (2024). Disturbance effects on mountain spruce forest microclimates. *Silva Gabreta*, 30, 141-160.

CARLSON, D. W., & GROOT, A. (1997). Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 313-329.

CRAWFORD, A. J., BELCHER, C. M., MORISON, J. I., DOERR, S. H., KETTRIDGE, N., & CLAY, G. D. (2025). Fuel moisture and flammability of leaf litter in British forest plantations and their implications for wildfire risk. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpaf029.

DANÁČOVÁ, M., DANKO, M., LAJDA, D. (2019): Vplyv spôsobu určenia teplotného faktora na simuláciu vodnej hodnoty snehu. *Meteorologický časopis*, 22 (1), 11-20.

DE FRENNE, P., LENOIR, J., LUOTO, M., SCHEFFERS, B. R., ZELLWEGER, F., AALTO, J., ... & HYLANDER, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global change biology*, 27(11), 2279-2297.

FERNANDEZ-ANEZ, N., KRASOVSKIY, A., MÜLLER, M., VACIK, H., BAETENS, J., HUKIĆ, E., ... & CERDA, A. (2021). Current wildland fire patterns and challenges in Europe: A synthesis of national perspectives. *Air, Soil and Water Research*, 14, 11786221211028185.

HORVÁTH, C. V., KOVÁCS, B., TINYA, F., LOCATELLI, J. S., NÉMETH, C., CRECCO, L., ... & ÓDOR, P. (2023). A matter of size and shape: Microclimatic changes induced by experimental gap openings in a sessile oak–hornbeam forest. *Science of the Total Environment*, 873, 162302.

- JANČO, M., MEZEI, P., KVAS, A., DANKO, M., SLEZIAK, P., MINĐÁŠ, J., ŠKVARENINA, J. (2021): Effect of mature spruce forest on canopy interception in subalpine conditions during three growing seasons. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69, 4, 436–446.
- JÚNIOR, J. S., PAULO, J. R., MENDES, J., ALVES, D., RIBEIRO, L. M., & VIEGAS, C. (2022). Automatic forest fire danger rating calibration: Exploring clustering techniques for regionally customizable fire danger classification. *Expert Systems with Applications*, 193, 116380.
- KEMPPINEN, J., LEMBRECHTS, J. J., VAN MEERBEEK, K., CARNICER, J., CHARDON, N. I., KARDOL, P., ... & DE FRENNE, P. (2024). Microclimate, an important part of ecology and biogeography. *Global Ecology and Biogeography*, 33(6), e13834.
- KLAMERUS-IWAN, A., KOZŁOWSKI, R., SADOWSKA-ROCIEK, A., SŁOWIK-OPOKA, E., KUPKA, D., GIORDANI, P., ... & VAN STAN, J. T. (2023). Influence of polycyclic aromatic hydrocarbons on water storage capacity of two lichens species. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(2), 139-147.
- KOVÁCS, B., TINYA, F., NÉMETH, C., & ÓDOR, P. (2020). Unfolding the effects of different forestry treatments on microclimate in oak forests: results of a 4-yr experiment. *Ecological Applications*, 30(2), e02043.
- KOVÁCS, B., NEMETH, C., ASZALÓS, R., & VERES, K. (2024). Small oases below the canopy: The cooling effects of water-filled tree holes on the local microclimate in oak-dominated stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 353, 110058.
- LOPES, S., SANTOS, S., RODRIGUES, N., PINHO, P., & VIEGAS, D. X. (2023). Modelling sorption processes of 10-h dead *Pinus pinaster* branches. *International Journal of Wildland Fire*, 32(6), 903-912.
- MALOVCOVÁ L., OSTRIHOŇ M., JACKO F. a ŠKVARENINA J. (2023). Mikroklimatické zmeny klimaxových vysokohorských smrečín v dôsledku ich kalamitného rozpadu v Západných Tatrách - TANAP-u. Contemporary challenges in environmental research: book of peer-reviewed papers. Bratislava: Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, 73-84. ISBN 978-80-89139-58-3.
- MALOVCOVÁ L., OSTRIHOŇ M. a ŠKVARENINA J. (2024). Mikroklima klimaxových horských smrečín z hľadiska lesných požiarov. Hydrological processes, ecosystems and climate change: book of peer-reviewed papers. Bratislava: Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, 107-120. ISBN 978-80-89139-61-3.
- MÁLIŠ, F., UJHAZY, K., HEDEROVA, L., UJHAZYOVA, M., CSÖLLEOVÁ, L., COOMES, D. A., & ZELLWEGER, F. (2023). Microclimate variation and recovery time in managed and old-growth temperate forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 342, 109722.
- MATTHEWS, S. (2006). A process-based model of fine fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 155-168.
- MATTHEWS, S., LOVEDAY, S., HURLEY, R., & ROXBURGH, S. (2015). Modelling fuel moisture across the landscape for fire management.
- OSTRIHOŇ, M., HILLAYOVA, M. K., KORISTEKOVA, K., LEŠTIANSKA, A., JANČO, M., VIDA, T., ... & 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.
- PAUSAS, J. G., & KEELEY, J. E. (2021). Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(7), 387-395.
- PETRÍK, M., HAVLÍČEK, V., UHRECKÝ, I. (1986). Lesnícka bioklimatológia. *Príroda*
- 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.
- SLIJEPCEVIC, A., ANDERSON, W. R., MATTHEWS, S., & ANDERSON, D. H. (2015). Evaluating models to predict daily fine fuel moisture content in eucalypt forest. *Forest Ecology and Management*, 335, 261-269.
- STANTON, D. E., ORMOND, A., KOCH, N. M., & COLESIE, C. (2023). Lichen ecophysiology in a changing climate. *American journal of botany*, 110(2), e16131.
- TUDORAN, G. M., & ZOTTA, M. (2020). Adapting the planning and management of Norway spruce forests in mountain areas of Romania to environmental conditions including climate change. *Science of the Total Environment*, 698, 133761.
- TUŽINSKÝ, L., STŘELCOVÁ, K., ŠKVARENINA, J., TUŽINSKÝ, E. (2003): Štúdium mikroklimy a bioklimy horských lesných porastov. In Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): Seminář „Mikroklima porostů“, Brno, 203–206.
- WALKER, M. (2025). BRITISH LICHENS BIOLOGY, ECOLOGY, AND USE AS BIOINDICATORS.

WASTL, C., SCHUNK, C., LEUCHNER, M., PEZZATTI, G. B., & MENZEL, A. (2012). Recent climate change: long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 162, 1-13.

ZHANG, G., ZHANG, L., LI, X., FENG, X., WANG, Y., GUO, J., ... & WEI, X. (2025). Spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of wildfires in China under the context of climate change and human activities. *Ecological Indicators*, 176, 113694.

MENIACE SA PODMIENKY PROSTREDIA A VODNÝ REŽIM SMREKA A BUKA: HOSPODÁRSKY VS. PRÍRODE BLÍZKY ZMIEŠANÝ LES

Paulína NALEVANKOVÁ¹ – Peter POPADIČ¹ – Katarína STŘELCOVÁ¹ – Jaroslav VIDO^{1,2}

¹Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, TU vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovensko;
xnalevankova@tuzvo.sk

²Ústav lesnické botaniky, dendrologie a geobiocenologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně,
Zemědělská 1665/1, 61300 Brno, Česká republika

ABSTRACT

Nalevanková, P., Popadič, P., Střelcová, K., Vido, J.: Water Regime of Norway Spruce and European Beech under Changing Environmental Conditions in the Fir–Beech Forest Vegetation Zone: Managed Stand vs. Close-to-Nature Mixed Forest

The paper focuses on assessing the dynamics of changes in stem circumference and sap flow of Norway spruce (*Picea abies*) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in relation to soil moisture and meteorological factors. The study was conducted on a research plot located near the Dobročský prales National Nature Reserve (5th fir-beech forest vegetation zone) during the growing seasons (May 1 to October 31) of the years 2021 and 2022. The growing season of 2022 was characterized by average temperatures significantly exceeding the normal (except in September). This season also recorded a high precipitation deficit (196 mm), resulting in periods of reduced soil water availability. Drought stress manifested in the limitation of the transpiration process; for example, in the 2022 season, the total transpiration of spruce was 52% lower than in the previous season. The soil water deficit also affected the water status of the trees, as observed through changes in stem circumference and related parameters. Of the studied tree species, spruce showed a more sensitive response, with more pronounced stem shrinkage and higher values of cumulative stem water deficit, as well as a significant reduction in total seasonal stem circumference growth. The weakening of spruce trees due to drought resulted in an infestation by bark beetles, leading to the logging of the stand in 2023. Data analysis further confirmed a statistically significant impact of environmental factors on the sap flow rate; however, in 2022, compared to 2021, we observed a decrease in the strength of these relationships. This phenomenon is attributed to the abnormal environmental conditions in 2022 – an enormous precipitation deficit, high temperatures, and high evaporative demand of the atmosphere. Generally, the transpiration rate of beech was several times higher than that of spruce. Under ideal conditions, beech transpired 250 l/day, while the recorded maximum for spruce was 56 l/day.

Key words: sap flow, stem circumference changes, beech, spruce, environmental factors, drought

ÚVOD

Vplyv zmeny klímy na lesné ekosystémy sa v posledných desaťročiach značne zintenzívňuje. Dôsledky zmeny klímy, najmä zmena v distribúcii zrážok a zníženie ich dostupnosti v rámci vegetačnej sezóny sprevádzané dlhými vlnami horúčav majú neblahý vplyv na vitalitu a tiež samotné prežívanie jedincov drevín, ale aj celých porastov, ktoré ináč plnia významnú stabilizačnú funkciu krajiny. Znížená dostupnosť disponibilnej vody v pôde a vysoké evaporačné požiadavky ovzdušia rastlínám, dreviny nevynímajúc, spôsobujú stres, ktorý ovplyvňuje životné dôležité fyziologické procesy a často priamo alebo sekundárne spôsobuje ich úmrtie. V lesnom hospodárstve je vplyv poveternostných extrémov na lesné spoločenstvá citlivo vnímaný nie len z ekologickej stránky, ale aj tej ekonomickej, kedy sa daný vplyv odráža na znížení produkcie drevnej hmoty.

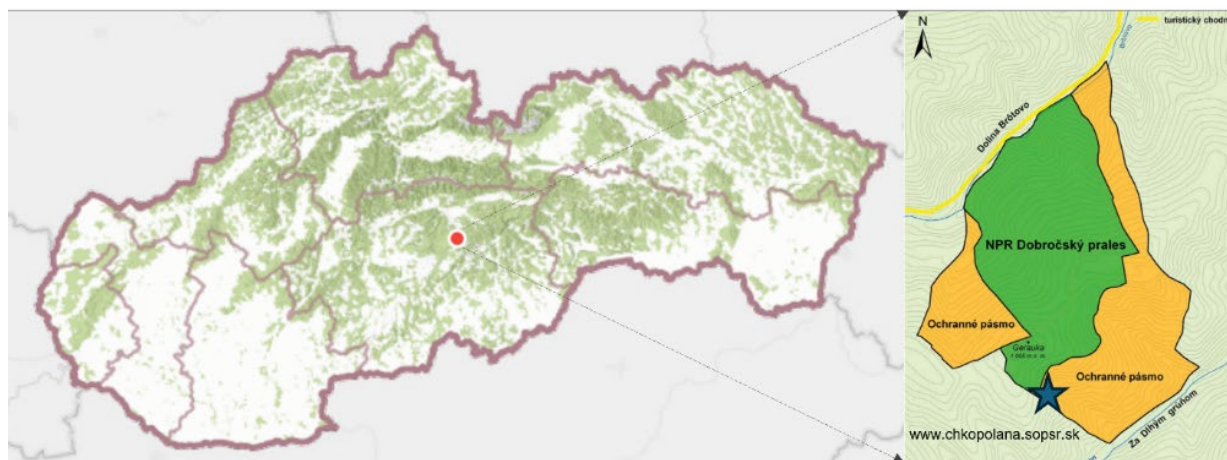
Bezprostredné reakcie stromov na meniace sa podmienky prostredia alebo na extrémne meteorologické udalosti dnes dokážeme pozorovať prakticky „v priamom prenose“ prostredníctvom monitorovania fyziologických procesov a ich prejavov. Napríklad priamo merateľná intenzita transpiračného prúdu a tiež jemné zmeny obvodu

kmeňov stromov (vrátane odvodených ukazovateľov) nám poskytujú informácie o narábaní jednotlivých druhov drevín s vodou a tiež o ich vodnom statuse. Vieme skúmať ich zmeny ako odozvu na vplyv podmienok prostredia a na základe toho ich modelovať v budúcich podmienkach. Štúdium reakcií ekonomicky a ekologicky významných drevín na meniace sa poveternostné podmienky a rôzne úrovne zásobenia vodou, či rôzne teplotné extrémny má význam pre predikciu dopadov zmeny klímy na ich rozsiahle spoločenstvá, ale aj pre plánovanie budúcich lesníckych opatrení rešpektujúcich predpovedaný zmenený režim environmentálnych faktorov. Zmeny vo fyziologických procesoch zároveň môžu byť spoľahlivým skorým indikátorom pôsobenia rôznych stresových faktorov ohrozujúcich ich vitalitu, zdravie a prežívanie.

V predložennom príspevku sa zameriavame na transpiračný prúd a zmeny obvodov kmeňov smreka (*Picea abies*) a buka (*Fagus sylvatica* L.), našich najrozšírejších, ekonomicky a ekologicky najvýznamnejších drevín a ich reakcie na podmienky prostredia s dôrazom na výskyt epizód so zníženou dostupnosťou pôdnej vody. Odozvu vodného statusu hodnotíme na vzorkách dospelých stromov vybraných v ochrannom pásme Dobročského pralesa a susednom hospodárskom lese, na experimentálnych plochách, v rámci ktorých je monitorovaný aj vodný potenciál pôdy a meteorologické faktory.

METODIKA

Na výskumnej lokalite v tesnej blízkosti Dobročského pralesa, situovanej v piatom jedľovo-bukovom lesnom vegetačnom stupni, sa prvé merania spustili v roku 2020. Lokalita sa nachádza v nadmorskej výške 950 m n. m. v okrese Brezno nad obcou Sihla na strednom Slovensku, v strednej časti Veporských vrchov (Obr. 1). Územie z geologického hľadiska patrí do kráľovohoľskej zóny veporského pásma. Horniny tohto pásma sú prevažne hlbinné granitoidy s ich metamorfným plášťom. Horniny vznikli kryštalizáciou magmy v období karbónu, čím sa metamorfovali aj nadložné horniny a tak vznikol granitoidový plášť. Prevládajú tu kambizeme, hlboké až veľmi hlboké, s vysokým obsahom humusu. Kyslé prostredie materskej horniny a vysoké zastúpenie ihličnatých drevín zapríčinilo vznik podzolovej, či pomiestne sa vyskytujúcej pseudoglejovej kambizeme s vysokým podielom skeletu (Molčanyi 2022).



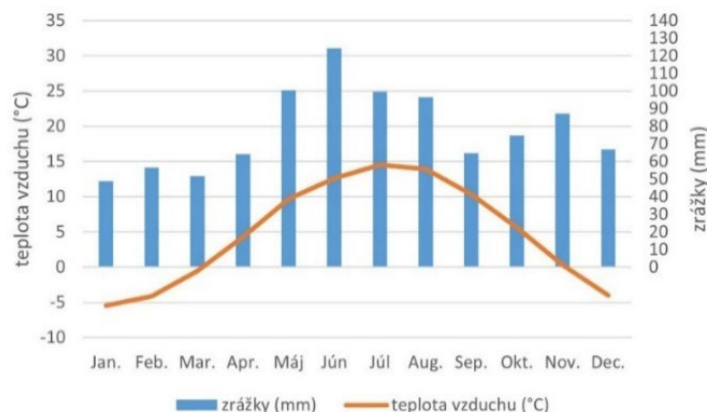
Obr. 1 Lokalizácia NPR Dobročský prales a ochranného pásma v rámci územia Slovenska a umiestnenie výskumnej lokality (modrá hviezda)

Fig. 1 Location of the Dobročský prales National Nature Reserve (NPR) and its buffer zone within Slovakia, and the position of the study site (blue star)

Klimatické pomery danej oblasti ilustruje klimadiagram na Obr. 2. Je zostrojený z 30 ročného radu údajov (1960–1990) nameraných na meteorologickej stanici Lom nad Rimavicou (v správe Slovenského hydrometeorologického ústavu). Na základe dlhodobých údajov bola pre danú lokalitu stanovená priemerná ročná teplota 4,8 °C a suma zrážok 935 mm. Najteplejším mesiacom je júl, mesiacom s najvyšším úhrnom zrážok jún. Na lokalite v blízkosti NPR Dobročský prales boli založené dve výskumné plochy. Prvá priamo v ochrannom pásme pralesa a druhá vo vedľajšej smrekovej monokultúre. Priemerný sklon svahu je na oboch plochách 45 % so zakmenením 0,6. Na oboch plochách sme na vitálnych vzorníkových stromoch, ktoré majú reprezentatívne postavenie a vek nad 80 rokov, monitorovali dendrometrom DRL26 zmeny v obvode kmeňov a pomocou Sap flow metra SF81 ich transpiračný prúd. V zmiešanom bukovom poraste ochranného pásma merania prebiehali na dvoch reprezentatívnych drevinách buk s priemerom kmeňa 49,9 cm a 45,5 cm. V smrekovom poraste na dvoch

reprezentatívnych drevinách smrek s priemerom kmeňa 41,7 cm a 40,04 cm. Postavenie všetkých vzorníkov drevín v poraste bolo úrovňové.

V blízkosti výskumnej plochy je umiestnená jednoduchá meteorologická stanica, ktorá zaznamenáva relatívnu vlhkosť vzduchu, globálne žiarenie, ale aj teplotu a množstvo zrážok. Je umiestnená na holej ploche (vzniknutej po ťažbe), ktorú obklopuje nerovnomerné bukové zmladenie. Nachádza sa na juhozápadnom svahu s priemerným sklonom 25 % a jej nadmorská výška je 950 m n. m. Meranie zrážok prebieha prostredníctvom zrážkomera Pronamic professional (zachytávacia plocha 200 cm², Pronamic ApS, Skjern, Denmark). Ďalším inštalovaným zariadením je Minikin RTHi (EMS Brno, Česká republika), vo vode odolnom puzdre tvare trubice, uloženom v radiačnom kryte, sa nachádzajú senzory, pomocou ktorých sa meria globálne žiarenie (presnosť ± 5 %), teplota vzduchu s rozsahom od -40 do 60 °C (presnosť 0,15 °C) a relatívna vlhkosť vzduchu v rozmedzí od 0 do 100 % (presnosť ± 2 %). Na kalkuláciu potenciálnej evapotranspirácie (Penman 1948) a sýstostného doplnku, ktoré boli odvodené z nameraných meteorologických údajov sme využili softvér Mini32 od dodávateľa prístrojov EMS Brno.



Obr. 2 Klimadiagram výskumnej lokality

Fig. 2 Climate diagram of the study site

V blízkosti záujmových stromov sú rozmiestnené 3 pôdne sondy, z ktorých v každej sú v troch hĺbkach (10, 25 a 50 cm) inštalované senzory, tzv. sadrové bločky (Delmhorst instruments Co., USA), určené na meranie vodného potenciálu pôdy. Senzory každej sondy sú pripojené na vlastný dataloger Microlog SP3 (ESM Brno, CZ). Dané zariadenie dokáže zmerať vodný potenciál pôdy do hodnoty -1,5 MPa. Hĺbky merania boli zvolené tak, aby dostatočne reprezentovali parametre prostredia, keďže vodné zásoby v pôde sú v priebehu sezóny využívané nerovnomerne a vertikálne rozloženie koreňovej sústavy je pri rozdielnych druhoch drevín rôzne.

Na vybraných dospelých vzorníkoch buka lesného a smreka obyčajného bol za pomoci Sap flow metra SF 81 od českej firmy ESM Brno meraný transpiračný prúd. Systém využíva metódu tepelnej bilancie „Tree trunk Heat Balance method“. Riadiaca jednotka systému, po zadaní parametrov potrebných pre kalkuláciu (obvod kmeňa v mieste merania a hrúbka borky + floému), udáva výsledné hodnoty transpiračného toku vyjadrené v kilogramoch za hodinu na celý strom, resp. kmeň. Na meranie zmien obvodu kmeňov sme použili neinvazívnu metódu za pomoci prístroja DRL26 (ESM Brno), ktorý má nízke nároky na údržbu. Meranie prebieha automaticky v predom nastavených časových intervaloch, pričom samotné dáta sa ukladajú do pamäte snímača a následne sa bezdotykovým spôsobom sťahujú do terénneho počítača bez potreby demontáže dendrometra. Dátová pamäť prístroja dokáže uložiť až 50 000 hodnôt po dobu troch rokov, čo zabezpečuje lítiovo-iónová batéria. Prístroj dokáže detegovať zmeny už na úrovni 1 μ m a maximálny možný rozsah merania je 6,4 cm (EMS Brno 2018).

Pri transpiračnom toku bol na substrakciu nulovej hodnoty (na grafické odčítanie tepelných strát v sap flow premenných meraných THB metódou) využitý doplnok Base line softvéru Mini32. Vodný deficit kmeňa bol vypočítaný podľa práce Nalevanková et al. (2018) a maximálna denná kontrakcia kmeňa podľa práce Ježík et al. (2011). Štatistické zhodnotenie nameraných a odvodených údajov sme realizovali programom Statgraphics Centurion 19 (Statgraphics Technologies, Inc., Virginia, USA).

VÝSLEDKY A DISKUSIA

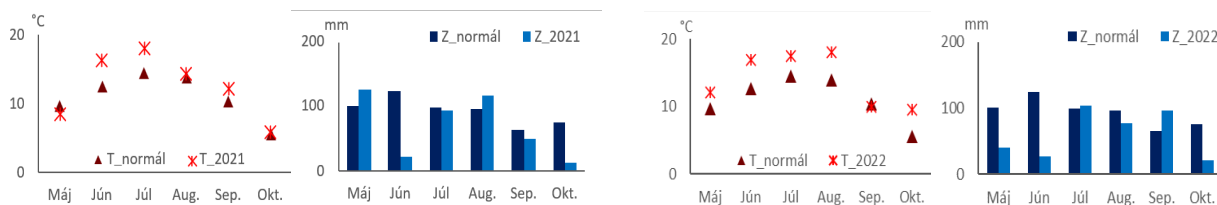
V nasledujúcej časti uvádzame výsledky meraní transpiračného prúdu a zmien obvodov kmeňov vybraných jedincov buka lesného (*Fagus sylvatica* L.) a smreka obyčajného (*Picea abies*), ktorých sezónnu dynamiku dávame do súvislosti s priebehom podmienok prostredia. Obe skupiny stromov sa nachádzajú v tesnej blízkosti NPR Dobročský prales, no v rozličných lesných ekosystémoch. Z toho dôvodu bol vodný potenciál pôdy meraný pre

každý z nich (zmiešaný les a smreková monokultúra) a vyhodnocovaný tiež osobitne. Záujmové sezóny rokov 2021 a 2022 sme z klimatologického hľadiska vyhodnotili na základe porovnania mesačných priemerov teplôt vzduchu, respektíve úhrnov zrážok s dlhodobými normálmi.

V blízkosti výskumnej plochy je umiestnená meteorologická stanica, na ktorej sa počas doby trvania výskumu merali meteorologické prvky. Tie predstavujú významný faktor, ktorý vo veľkej miere ovplyvňuje fyziologické procesy drevín. Namerané priemerné hodnoty pre teplotu vzduchu a úhrny zrážok pre roky 2021 a 2022 sme porovnávali s dlhodobým priemerom pre danú lokalitu. Normály boli stanovené na základe 30 ročného radu údajov (1960–1990) zo Slovenského hydrometeorologického ústavu nameraných na stanici Lom nad Rimavicou, ktorá sa nachádza najbližšie k výskumnej ploche a má porovnateľné podmienky.

Pri porovnávaní priemernej teploty (T_{2021}) za jednotlivé mesiace máj až október roku 2021 a dlhodobého priemeru teploty vzduchu ($T_{\text{normál}}$) sme zistili, že okrem mesiaca máj bola priemerná teplota vzduchu v každom mesiaci vyššia ako je normál (Obr. 3). Mesiac máj bol chladnejší o 1,1 °C, čo súvisí s vyšším úhrnom zrážok znázornenom vpravo na Obr. 3. Najväčšiu kladnú odchýlku od dlhodobého priemeru sme zaznamenali v mesiacoch jún a júl, kde rozdiel teplôt dosahoval hodnotu vyššiu o 3,5 °C. Priemerná teplota mesiacov august a október dosahovala približne úroveň normálov pre dané mesiace. Na základe zobrazeného vidíme, že distribúcia zrážok v roku 2021 je nerovnomerná. V mesiacoch jún a október nastal výraznejší deficit, pričom rozdiel oproti normálu predstavoval v júni 2021 až o 102 mm zrážok menej ako je normál a v októbri o 62 mm menej ako normálová hodnota. V rámci celého sledovaného obdobia (máj–október) bol úhrn zrážok o 136,8 mm nižší ako dlhodobý priemer. Mesiace máj (+26,6 mm) a august (+20 mm) boli zrážkovo nadpriemerné. Dňa 18. 05. 2021 bol zaznamenaný najvyšší denný úhrn zrážok na danej lokalite, a to až 53,2 mm.

Za sledované vegetačné obdobie 2022 bola priemerná teplota vzduchu v porovnaní s normálom vyššia o 3 °C. Najväčšiu kladnú odchýlku 4,3 °C mal mesiac jún a 4,2 °C mesiac august, čím môžeme tieto mesiace charakterizovať ako mimoriadne teplé (Obr. 3). V júni bola zistená priemerná teplota vzduchu až 16,9 °C popri vysokom deficite zrážok. V tomto mesiaci činila suma zrážok len 26,8 mm, čo predstavuje len 22 % z normálu (odchýlka 78 %) a tento mesiac hodnotíme ako mimoriadne suchý (Obr. 3 vpravo). Priemerná septembrová teplota bola prakticky na úrovni normálu, len o 0,4 °C nižšia. Najvyššia priemerná denná teplota za sledované vegetačné obdobie bola zaznamenaná 30. 06. 2022, a to 24,5 °C. Za sledovanú vegetačnú sezónu sme zaznamenali o 35 % menej zrážok oproti normálu (celkový deficit za máj–október činil 196 mm). Zrážkovo podnormálne boli mesiace máj (-60 mm), jún (-97 mm), august (-20 mm) a október (-54 mm), ktorých spoločný úhrn atmosférických zrážok činil len 164 mm a naopak, najvyššiu zrážkovú činnosť sme zaznamenali v mesiacoch júl, august a september, ktorých suma zrážok predstavovala 276,2 mm.



Obr. 3. Priemerná mesačná teplota vzduchu a úhrny zrážok za rok 2021 (vľavo) a 2022 (vpravo) v porovnaní normáli

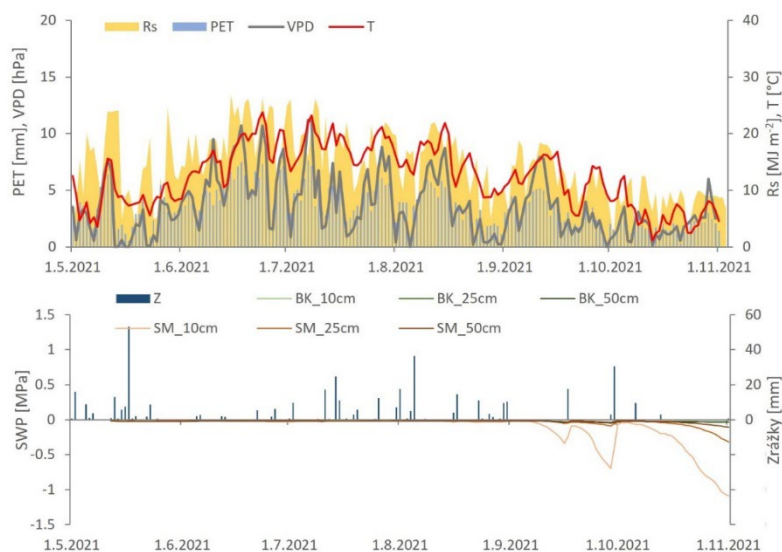
Fig. 3 Comparison of mean monthly air temperature and monthly precipitation totals in 2021 (left) and 2022 (right) with climatological normals

Vo vrchnej časti Obr. 4 je znázornený priebeh teploty vzduchu, globálnej radiácie (R_s), sýtostného doplnku (VPD) a potencionalnej evapotranspirácie (PET) na výskumnej ploche v blízkosti Dobročského pralesa. Pri pohľade na graf môžeme potvrdiť, že so stúpajúcou radiáciou a teplotou (T), stúpa PET a VPD a naopak. Najnižšiu dennú sumu PET sme zaznamenali 17. 05. 2021, a to 0,53 mm. Potencionalná evapotranspirácia znázorňuje celkový možný výpar za daných meteorologických podmienok pri pôde nasýtenej vodou, inak povedané je ukazovateľom evaporačných požiadaviek ovzdušia. Dňa 17. 05. 2021 sme okrem nízkej PET zaznamenali minimálnu radiáciu (R_s 3,2 MJ.m⁻²) a nulový sýtostný doplnok, čo znamená, že vzduch už je maximálne nasýtený vodnou parou. Tento deň bola zaznamenaná aj najvyššia zrážková činnosť o úhrne 53,2 mm, ktorá mala kľúčový vplyv na všetky spomínané merané veličiny. Vlhkosť vzduchu bola v tento deň na maximálnej úrovni 100 % s priemernou teplotou 7,2 °C. Maximálna zaznamenaná denná teplota 23,8 °C pripadala na deň 24. 06. 2021. V tento deň sme zaznamenali aj najvyššiu PET (7,3 mm) a najvyšší VPD 10,7 hPa. Dňa 24. 06. 2021 bola radiácia na úrovni 25 MJ.m⁻² a zrážková činnosť nulová. Suma PET pre celú sezónu 2021 predstavovala 649 mm, priemer VPD 3,3 hPa.

V spodnej časti Obr. 4 vidíme obdobie od 25. 05. 2021 do 31. 06. 2021, za ktoré bol úhrn zrážok iba 23 mm. V tejto perióde sme predpokladali nižšie hodnoty SWP, avšak tie kvôli nadpriemerným májovým zrážkam a kvôli nižším evaporačným požiadavkám nenastali. SWP určuje akou silou je viazaná voda v pôde, inak povedané, čím nižšia hodnota SPW je, tým väčšiu energiu musí rastlina vynaložiť na jej získanie. Za celý október sme zaznamenali úhrn zrážok iba 13 mm, čo sa prejavilo na SWP meranom v smrekovom poraste, a to hlavne v hornej vrstve pôdy

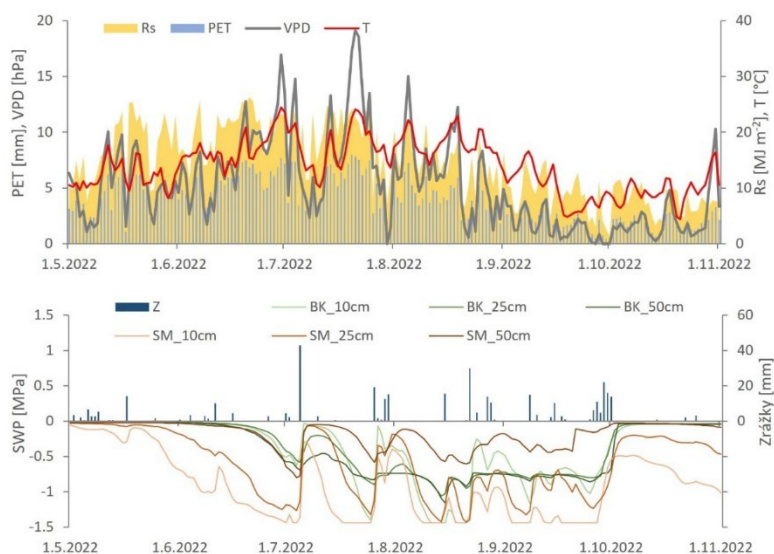
(hĺbka 10 cm), kde hodnoty klesli 31. 10. 2021 až na $-1,05$ MPa. Mierny pokles SWP bol detegovaný aj v septembri. Tým, že sa deficit vody prejavil až na konci vegetačného obdobia nemôžeme tvrdiť, že bol prítomný stres suchom. V hĺbke 25 cm bola hodnota SPW $0,3$ MPa a v hĺbke 50 cm $0,1$ MPa. V bukovej časti výskumnej plochy sme pokles vodného potenciálu pôdy zaznamenali len minimálny.

Vegetačná sezóna v roku 2022 sa vyznačovala situáciami so zníženou dostupnosťou pôdnej vody (Obr. 5). V období od 01. 05. 2022–31. 06. 2022 sme zaznamenali len 62 mm zrážok, čo zapríčinilo nepriaznivé hodnoty vodného potenciálu pôdy (SWP). Dňa 30. 06. 2022 bola hodnota SWP v smrekovom poraste $-1,4$ MPa v hĺbke 10 cm a $-1,8$ v hĺbke 25 cm. Hodnoty SWP sa po silnej zrážkovej činnosti z dňa 05. 07. 2022 (43 mm) priblížili k nulovej hodnote, no po krátkom čase znovu dosahovali extrémne nízke hodnoty nielen v smrekovom poraste. Dňa 15. 08. 2022 bola v bukovom poraste zaznamenaná priemerná hodnota SPW v hĺbke 50 cm až $-1,2$ MPa a zároveň v hĺbke 10 cm hodnota $-1,44$ MPa, čo je maximálna možná hodnota merateľná daným prístrojom. Najvyššia teplota vzduchu bola $24,5$ °C dňa 30. 06. 2022 a v ten deň sme zaznamenali aj najvyššiu PET (7,7 mm). Najvyššia VPD (19,1 hPa) bola zaznamenaná 24. 07. 2022 pri teplote vzduchu $24,1$ °C. Najnižšia hodnota Rs bola dňa 14. 10. 2022, a to $3,2$ MJ.m⁻², pri PET $0,61$ mm a minimálnom sýtostnom doplnku $0,23$ hPa. Vegetačná sezóna roku 2022 bola výnimočná nie len vysokým nedostatkom zrážok, ale aj výskytom vln horúčav a enormnými evaporačnými požiadavkami (suma PET pre celú sezónu 2022 predstavovala 712 mm pri úhrne zrážok 363 mm, priemerný VPD 5,2 hPa), najmä v letnom období. Deficit pôdnej vlhky demonštrovaný nízkymi hodnotami SWP mal dlhotrvajúci charakter, pričom znížené hodnoty sme detegovali takmer v priebehu celej sezóny, vynímajúc len začiatok sezóny a jej koniec v zmiešanom poraste s monitorovanými bukmi. Deficit bol prerušovaný (alebo mierne znižovaný) len občasným výskytom prehánok, v lete najmä búrok z tepla, aj to len na rádovo niekoľko dní. Môžeme konštatovať, že hodnoty SWP v hĺbke 50 cm sa v smrekovom poraste v období po výdatnej júlovej zrážke držali zvyšok obdobia na priaznivejších hodnotách, najmenej sa tu prejavoval sezónny deficit zrážok. Na druhej strane, pri porovnaní dvoch študovaných porastov sa ukázalo, že všeobecne nižšie hodnoty SWP v hĺbkach 10 a 25 cm, boli zaznamenané práve v smrekovom poraste.



Obr. 4 Sezónny priebeh priemerných denných teplôt vzduchu (T), globálnej radiácie (Rs), sýtostného doplnku (VPD), potencionalnej evapotranspirácie (PET), vodného potenciálu pôdy (SWP) v troch hĺbkach a úhrn zrážok v roku 2021

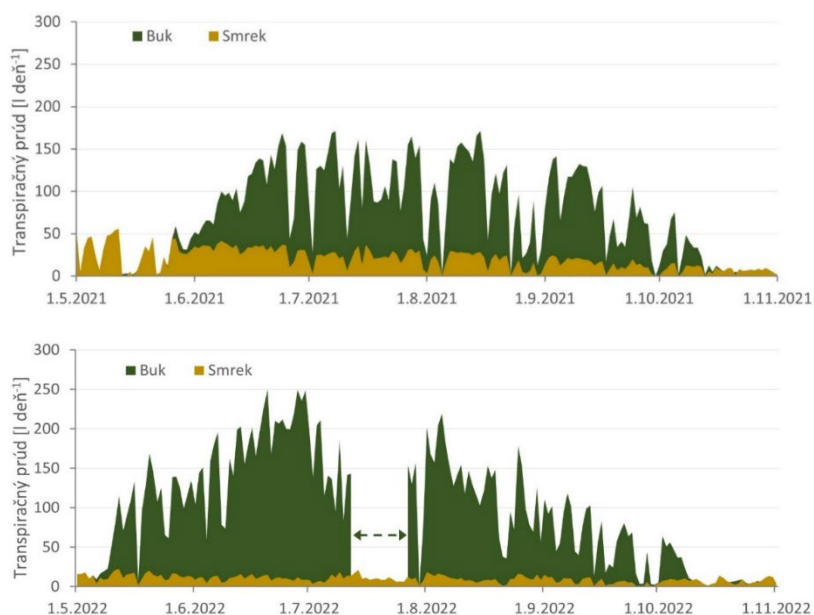
Fig. 4 Course of mean daily air temperature (T), global radiation (Rs), vapour pressure deficit (VPD), potential evapotranspiration (PET), soil water potential (SWP) at three depths, and precipitation totals (May–October 2021)



Obr. 5 Sezónny priebeh priemerných denných teplôt vzduchu (T), globálnej radiácie (Rs), sýstostného doplnku (VPD), potencionalnej evapotranspirácie (PET), vodného potenciálu pôdy (SWP) v troch hĺbkach a úhrn zrážok v roku 2022

Fig. 5 Course of mean daily air temperature (T), global radiation (Rs), vapour pressure deficit (VPD), potential evapotranspiration (PET), soil water potential (SWP) at three depths, and precipitation totals (May–October 2022)

Na Obr. 6 je znázornený sezónny priebeh dynamiky transpiračného prúdu dvoch záujmových drevín (smrek a buk) počas vegetačnej sezóny máj–október za obdobie rokov 2021 a 2022. Na grafoch vidíme, že na začiatku vegetačnej sezóny sú zaznamenané hodnoty transpiračného prúdu násobne vyššie u ihličnatých drevín, keďže počas obdobia vegetačného pokoja nestrácajú asimilačný aparát. Na začiatku sezóny sú pre ich fyziologickú aktivitu dôležité najmä podmienky prostredia. Väčšie výkyvy v priebehu transpiračného prúdu smreka začiatkom vegetačného obdobia zaznamenávame predovšetkým v sezóne 2021 a prisudzujeme to okrem zvýšenia miery transportu vody vplyvom evaporačných požiadaviek aj dopĺňaniu zásob vody do pletív po zimnom období. Výrazné zníženie v polovici mája bolo spôsobené daždivým obdobím, kedy bola transpirácia znížená na minimum v dôsledku vysokej vlhkosti vzduchu a nízkym evaporačným požiadavkám ovzdušia.



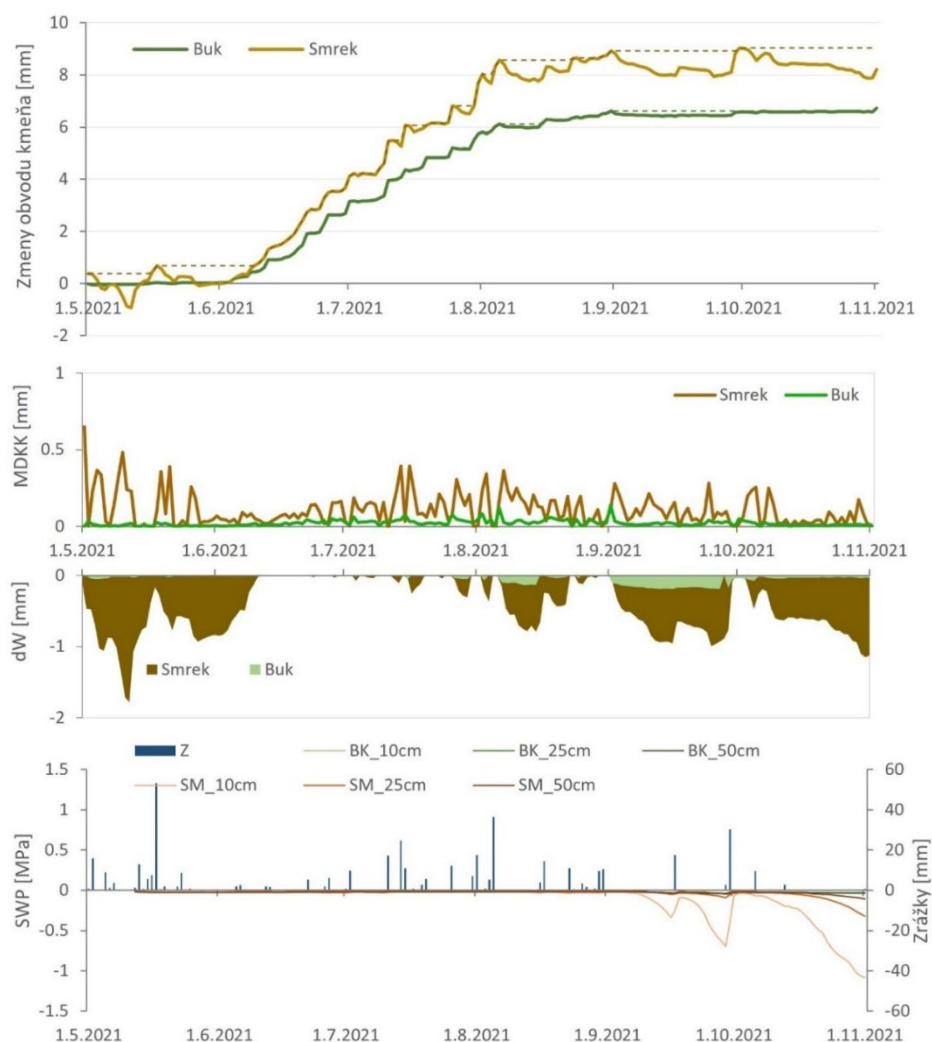
Obr. 6 Sezónny priebeh transpiračného prúdu drevín buk a smrek za sledované obdobie 2021 a 2022

Fig. 6 Seasonal course of sap flow in beech and spruce during the study period of 2021–2022

Maximálna miera transpiračného prúdu smreka v sezóne 2021 bola dosiahnutá dňa 12. 05., a to 56,2 l/deň, pričom u buka v daný deň neprekročila hodnotu 10 l/deň. Príčinou môže okrem samotnej dimenzie stromov byť napríklad aj starší fylogenetický vývoj u smreka alebo menšia plocha asimilačného aparátu a rozdiely v prieduchovej vodivosti. Táto maximálna hodnota bola zaznamenaná ešte pred vývojom plného olistenia buka. S nástupom olistenia začína buk intenzívne transpirovať, pričom maximá dosahuje 08. 07. 2021 s hodnotou 171,3 l/deň, 30. 06. 2022 s hodnotou až 248,8 l/deň (najvyššia zaznamenaná teplota za celé sledované obdobie 24,5 °C). Hlavný vplyv na intenzitu transpiračného prúdu majú evapotranspiračné požiadavky prostredia, s ktorými súvisí teplota a vlhkosť vzduchu a globálna radiácia, no predovšetkým dostupnosť pôdnej vody, čo sa vo veľkej miere prejavilo na rozdielnej medzioročnej výške transpirácie smreka. V roku 2021 pretranspiroval smrek za sledovanú sezónu 3745 l vody a hodnota SWP dosahovala len minimálne záporné hodnoty, aj to len na konci sezóny. U buka bola suma stanovená na 13067 l. V roku 2022 hodnota SWP (Obr. 5) kolísala počas celej sezóny a dosahovala vysoko záporné hodnoty, čo sa prejavilo na transpirácii smreka, ktorý za celé obdobie pretranspiroval 1795 l vody, čo je o 52 % menej ako za predošlú sezónu. Výraznú limitáciu transpirácie smreka pripisujeme najmä vplyvu deficitu pôdnej vody. Dostupnosť pôdnej vody ovplyvňuje aj drevinu buk, no ten kvôli hlbšiemu zakoreneniu (srdcová koreňová sústava) dokáže čerpať vodu potrebnú k transpirácii aj z väčších hĺbok a prekonať dlhšie obdobie suchej periódy. Podľa meraní dokázal buk v suchšom roku 2022 pretranspirovať viac vody ako v predšlom roku, zrejme kvôli vysokým evaporačným požiadavkám ovzdušia (sezónna suma PET bola 712 mm, priemerné VPD 5,2 hPa) a zásobám vody v pletivách. Zároveň, na bukovom stanovišti, hodnoty SWP najmä v 25 a 50 cm hĺbke klesali menej výrazne, čo môže mať súvislosť s tým, že ide o porast v ochrannom, bezzásahovom pásme pralesa, so značne odlišnou štruktúrou a vlastnosťami ako u obhospodarovanej monokultúry. Tu však treba dodať, že vplyvom okolností došlo v tomto roku k prerušeniu merania transpiračného prúdu na dva týždne práve v období poklesu intenzity transpiračného prúdu. Potvrdzuje sa, že transpirácia a transpiračný prúd sú uplatniteľnými indikátormi pri skúmaní stresu suchom či vodného hospodárenia, keďže odrážajú vodný status stromu a ich limitáciu považujú Nalevanková et al. (2018) za reakciu drevín na suchu.

Na obr. 7 je znázornená sezónna dynamika zmien obvodu priemerného kmeňa (ZOK) smreka a buka v roku 2021. Počiatkové výraznejšie kolísanie obvodu v sezóne u drevin smrek je spôsobené doplňovaním vody zo zimného obdobia a výskytom výdatných májových zrážok. Nárast obvodu kmeňa zaznamenávame až začiatkom júna, kedy kmene oboch drevín postupne zväčšujú svoj obvod. Fáza markantného zväčšovania obvodu kmeňa trvala do 01. 08. 2021 (nárast o 8,56 mm) u smreka a 05. 08. 2021 (6,11 mm) u buka. Prerušovaná čiara na daných grafoch znázorňuje rastovú krivku, teda v každom bode predchádzajúce dosiahnuté maximum v rámci priebehu ZOK. Určuje hranicu, od ktorej došlo k zmršťovaniu kmeňov, resp. vodnému deficitu kmeňa. Od tohto obdobia sa vyskytli stagnácie nárastu obvodu kmeňa najmä u smreka, ktorého obvod reagoval výraznejšie na zníženie SWP na konci sezóny, no aj na bezzrážkové obdobie v auguste, ktoré sa na znížení SWP takmer neprejavilo (len veľmi nevýrazne).

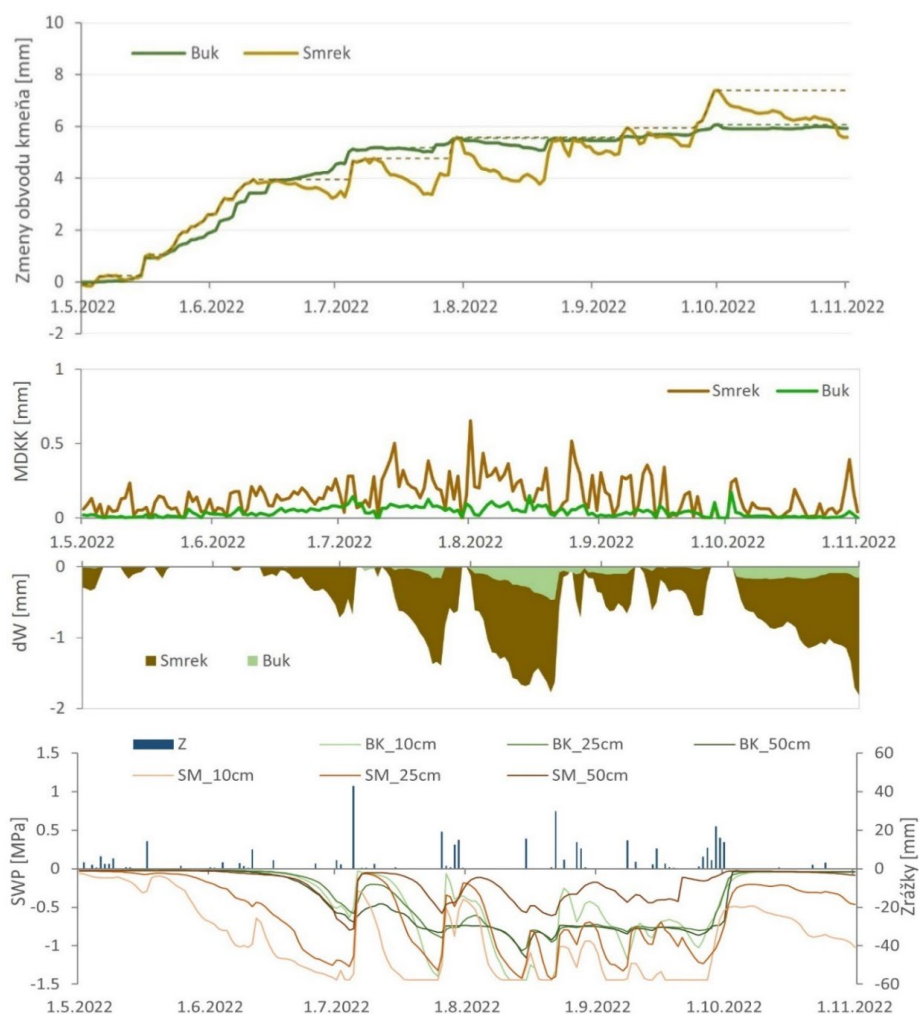
Vegetačná sezóna 2022 bola z hľadiska nízkej dostupnosti disponibilnej vody v pôde omnoho mimoriadnejšia (Obr. 8). Rast obvodov kmeňov oboch drevín začal oproti sezóne 2021 skôr, no bol miernejší a prvú stagnáciu nárastu obvodu kmeňa zaznamenávame už v prvej polovici júna. Prvé výrazné zmršťovanie u drevin smrek sa bolo ukončené dňa 05. 07. 2022, kedy napršalo 43 mm zrážok, následkom čoho drevena začala dosycovať pletivá a prakticky v priebehu pár hodín zväčšila obvod kmeňa na hodnotu 4,6 mm. Postupné zväčšovanie kmeňa trvalo len 6 dní a nastlalo ďalšie zo série markantných zmršťovaní – obvody kmeňov sa zmenšovali, kumuloval sa účinok deficitu zrážok. U buka v porovnaní so smrekom celkovo dochádzalo k menšiemu zmršťovaniu kmeňa, do júna skôr len k stagnácii nárastu. Ako bolo spomenuté, hodnoty SWP dosahovali počas danej vegetačnej sezóny minimálne merané hodnoty nielen v hĺbke 10 cm, ale aj v 25 cm. Takýto priebeh je charakteristický pre celé vegetačné obdobie 2022, ako pre stanovište drevin smrek, tak aj pre buk a evidujeme 4 dlhodobšie epizódy sucha, počas ktorých nastal výraznejší stres suchom, čo nám potvrdzujú namerané hodnoty. Je nutné podotknúť, že deficit zrážok, ktorý sa prejavoval aj v znížení množstva disponibilnej vody pre rastliny, sme zaznamenali prakticky už od októbra predchádzajúceho roku. Celkový prírastok na obvode bol u smreka 7,4 mm, čo je o 1,6 mm menej ako za sezónu 2021 a u buka 6 mm, čo predstavuje pokles v náraste obvodu oproti predošlej sezóne o 0,7 mm. Ježík et al. (2015) spája narastajúcu frekvenciu a intenzitu suchého obdobia s prebiehajúcou klimatickou zmenou a tvrdí, že negatívne ovplyvňuje stabilitu a produktivitu celých lesných ekosystémov, čo naznačujú aj naše výsledky, kedy vplyv suchých epizód spôsobuje badateľnú stagnáciu zväčšovania dimenzií kmeňov.



Obr. 7 Sezónna dynamika zmien obvodu kmeňa drevín buk a smrek v roku 2021; maximálne denné kontrakcie kmeňa (MDKK) a vodný deficit kmeňa (dW); vodný potenciál pôdy SWP v troch hĺbkach pre každú drevinu (SM, BK)

Fig. 7 Dynamics of stem circumference changes in beech (buk) and spruce (smrek) in 2021; maximum daily stem shrinkage (MDKK) and stem water deficit (dW); soil water potential (SWP) at 3 depths for both species (SM, BK) (bottom)

Na Obr. 7 a 8 sú zobrazené sezónne priebehy veličín odvodených z krivky priebehu zmien obvodov kmeňov stromov – maximálna denná kontrakcia kmeňa (MDKK) a vodný deficit kmeňa (dW). Vychádzajú z typických fáz vyskytujúcich sa v rámci priebehu zmien obvodu kmeňa stromov počas dňa popísaných napríklad v práci Ježík et al. (2011) či Deslauriers et al. (2007) a odzrkadľujú vodný status kmeňa stromu. MDKK je rozdielom medzi maximálnym dopoludňajším maximom a poobedným minimom zmien obvodu kmeňa. Hodnoty dW sú vypočítané ako rozdiely medzi rannými maximálnymi obvodovými hodnotami na krivke ZOK a predchádzajúcim dosiahnutým maximom obvodu kmeňa, čo vlastne predstavuje odpovedajúcu hodnotu na rastovej krivke. V našej práci uvádzame maximálne denné dW. Čím viac sú hodnoty dW negatívne, tým väčšie sucho, resp. stres suchom značia (Leštianska et al. 2023b). Rastová krivka vychádza rovnako z priebehu ZOK, pričom v danom okamihu znamená "od začiatku obdobia až dovtedy" dosiahnuté maximum obvodu kmeňa.



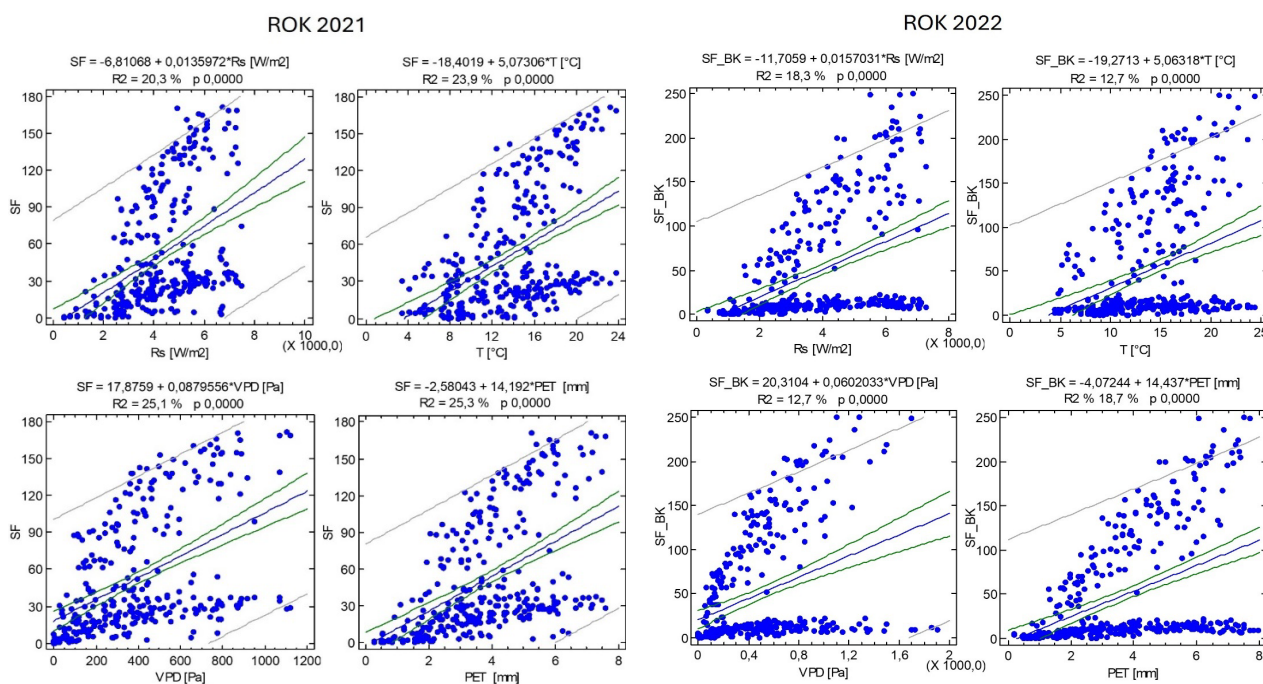
Obr. 8 Sezónna dynamika zmien obvodu kmeňa drevín buk a smrek v roku 2022; maximálne denné kontrakcie kmeňa (MDKK) a vodný deficit kmeňa (dW) ; vodný potenciál pôdy SWP v troch hĺbkach pre každú drevinu (SM, BK)

Fig. 8 Dynamics of stem circumference changes in beech (buk) and spruce (smrek) in 2021; maximum daily stem shrinkage (MDKK) and stem water deficit (dW); soil water potential (SWP) at 3 depths for both species (SM, BK) (bottom)

Zmeny obvodov kmeňov sú podľa Ježíka et al. (2011) zložené z dvoch základných komponentov: zo zmien zapríčinených sezónnym rastom a z variácií spôsobených zmenami vodnej bilancie pletív. Môžeme tvrdiť, že denné kontrakcie (zmršťovanie) kmeňov, prevažne počas dní s vysokými evapotranspiračnými požiadavkami, sú zapríčinené oneskorením absorpcie a transportu vody za vysokými transpiračnými stratami, s ktorými súvisí aj pokles vodného potenciálu. Počas noci absorpcia a transport vody dopĺňa straty a kmene expandujú. Pri silnejšej viazanosti vody v pôde (vysoké záporné hodnoty SWP) dosahujú MDKK vyššie hodnoty ako v prípade lepšej dostupnosti vody. Tento fakt je znázornený na Obr. 8, kde vegetačná sezóna 2022 bola zrážkovo hlboko podpriemerná, čo ovplyvnilo aj mieru zmršťovania kmeňa. Pri zníženej dostupnosti vody, nočná expanzia (napučiavanie) kmeňov súvisiaca s dopĺňaním zásob vody nedokáže vyrovnať straty spôsobené dennou transpiráciou a ranné maximum obvodu oproti predchádzajúcemu dňu klesá. Inak povedané dW (vodný deficit kmeňa) predstavuje rozdiel medzi predchádzajúcim maximum obvodu a maximum obvodu kmeňa v danom dni. Najvyššia zaznamenaná hodnota dW bola 20. 08. 2022 až -1,77 mm. V ten deň bola zaznamenaná aj najnižšia možná hodnota SWP (10 cm) -1,44 MPa a priemerná teplota predchádzajúci deň dosiahla hodnotu 23 °C. To malo za následok vysoké evaporačné požiadavky atmosféry, stromy nemali dostatok vody na večerné a nočné dosycovanie pletív a tak nedokázali vykompenzovať kontrakciu z predošlého dňa. Podobne kolektív autorov Ježík et al. (2011) u smreka popisujú situácie, kedy kvôli zníženej dostupnosti vody v pôde nočné napučanie kmeňa (expanzia v dennom chode ZOK) nedokázalo dosycovať denné zmršťovanie kmeňa a tak dochádzalo ku kumulatívnemu zmršťovaniu kmeňov počas viacerých dní. To bolo neskôr kompenzované v rámci zrážkových dní. Spracované odvodené parametre dobre korelujú s výskytom sucha a poukazujú na stres drevín, hlavne v priebehu vegetačného obdobia. Na začiatku sezóny však podľa nás môžu vychádzať z pôsobenia neskorých mrazov, prípadne

z počiatočného intenzívneho dopĺňania vody do zásob po zimnom období. Inak sa dajú považovať za výborný ukazovateľ vodného stavu stromov, či pôsobenia pôdneho sucha ako stresového faktora. Výhodou je to, že sú odvodené z údajov z citlivých dendrometrov, ktoré predstavujú technicky nenáročnú, nedeštruktúrnú a pomerne dostupnú metódu meraní.

Záverom sme sa zamerali na posúdenie vzťahu medzi transpiračným prúdom a environmentálnymi premennými. Transpiračný prúd vypovedá o hospodárení stromov s vodou, pričom práve to sa odzrkadľuje v krátkodobých zmenách obvodu kmeňov detekovateľných pomocou dendrometrov. Pre popísanie a posúdenie vzťahu medzi transpiračným prúdom a faktormi prostredia sme aplikovali regresnú a korelačnú analýzu v prostredí programu Statgraphics 19. Aby sme posúdili závislosť transpiračného prúdu od jednotlivých faktorov, využili sme jednoduchú (jednorozmernú) lineárnu regresiu. Keďže sa potvrdilo, že existuje významný rozdiel medzi rokmi 2021 a 2022 (jednofaktorová analýza variancie ANOVA, Fisherov post hoc test), rozhodli sme sa spraviť pre dané roky analýzu oddelene (Obr. 9). Analýza potvrdila štatisticky signifikantný vplyv viacerých prvkov na transpiračný prúd na hladine významnosti $\alpha = 0,05$, a to žiarenia, teploty vzduchu, sýtostného doplnku a potenciálnej evapotranspirácie (R^2 v intervale 20,3–25,3). Najtesnejší vzťah sa v roku 2021 aj v roku 2022 potvrdil pri potenciálnej evapotranspirácii (PET). Koeficient determinácie naznačuje, že v roku 2021 možno 25,3 % variability transpiračného prúdu vysvetliť vplyvom PET, pričom korelačný koeficient 0,5 poukazuje na stredne silnú závislosť medzi premennými. V roku 2022, ktorý sa vyznačoval deficitom zrážok vo vegetačnom období a následným pôdnym suchom, sme však zaznamenali pokles závislosti transpiračného prúdu od tohto faktora ($R^2 = 18,7$, $R = 0,43$), čo naznačuje relatívne slabý vzťah. Podobne sme pokles zaznamenali aj pri ostatných premenných, aj pri radiácii (R_s), teplote vzduchu (T) a sýtostnom doplnku (VPD). Najvyšší pokles miery závislosti transpiračného prúdu medzi rokmi sme zistili pri sýtostnom doplnku a teplote vzduchu, naopak, najnižší pri žiarení. Popísanú zmenu v závislosti transpirácie na faktoroch prostredia medzi rokmi vysvetľujeme práve tým, že rok 2022 sa vyznačoval extrémnymi podmienkami. V dôsledku nedostačujúcej distribúcie zrážok v rámci vegetačnej sezóny, no najmä v lete, doplnenej enormne vysokými evaporačnými požiadavkami ovzdušia, sa v danom roku vyskytovali časové úseky, v ktorých stromy boli vystavené predĺženému vplyvu stresu suchom. Deficit pôdnej vody sa stal limitujúcim faktorom pre proces transpirácie. Viaceré práce popisujú, že v prípade dostatočnej zásoby disponibilnej pôdnej vody, je transpirácia, resp. intenzita transpiračného prúdu určovaná faktormi prostredia, no v podmienkach sucha sa práve nedostatok vody stáva limitom (Kirchen et al. 2017, Lüttschwager et al. 2020, Nalevanková et al. 2020). Pokles miery závislosti transpirácie alebo transpiračného prúdu na atmosférických faktoroch popisujú napríklad práce Nalevanková et al. (2020), Nalevanková et al. (2018) a Matejka et al. (2009).



Obr. 9 Vzťah medzi dennými hodnotami transpiračného prúdu (SF) a globálnym žiarením (R_s), teplotou vzduchu (T), sýtostným doplnkom (VPD) a potenciálnou evapotranspiráciou (PET) v roku 2021 (vľavo) a 2022 (vpravo) ($\alpha = 0,05$)

Fig. 9 Relationships between daily sap flow (SF) and global radiation (R_s), air temperature (T), vapour pressure deficit (VPD), and potential evapotranspiration (PET) in 2021 (left) and 2022 (right) ($\alpha = 0.05$)

ZÁVER

Z výsledkov štúdie vyplýva, že dynamika vodného režimu smreka obyčajného a buka lesného je výrazne ovplyvnená meniacimi sa podmienkami prostredia, najmä dostupnosťou pôdnej vody a meteorologickými extrémami. V mimoriadne suchom roku 2022 bol aj v nadmorskej výške viac ako 900 m n. m. zaznamenaný výrazný pokles intenzity transpiračného prúdu a tiež stagnácia narastania obvodov kmeňov. Merania na kmeni stromov detegovali pôsobenie stresu suchom, výraznejšie u smreka. Smrek reagoval na zníženie množstva disponibilnej vody v pôde doprevádzanej vysokými teplotami a evaporačnými požiadavkami oveľa citlivejšie. Odzrkadlilo sa to na výraznej limitácii procesu transpirácie a rovnako kumulovanom zmršťovaní obvodov kmeňov stromov, znížení celkového sezónneho prírastku na obvode. Vodný status kmeňov smreka výrazne reagoval na zmeny v dostupnosti vody v pôde, vodný deficit kmeňa dosahoval násobne zápornejšie hodnoty ako u buka. Buk jednak vďaka hlbšej koreňovej sústave, ale aj vďaka prírodnému lesnému ekosystému (zmiešaný porast), ktorého je súčasťou (ochranné pásmo NPR, lepšia úroveň SWP), preukázal vyššiu odolnosť voči nedostatočnej distribúcii zrážok v danej lokalite. Spolupôsobenie stresu suchom a vlny horúčav sa pravdepodobne podieľali na oslabení smrekových jedincov do takej miery, že v nasledujúcom roku podľahli napadnutiu lykožrúta smrekového a v júli 2023 boli vyťažené. Sucho sa stalo predispozičným faktorom pre následné zničenie porastu iným škodlivým činiteľom. Výsledky výskumu zdôrazňujú dôležitosť monitorovania fyziologických reakcií stromov na meniace sa klimatické podmienky, čo môže byť kľúčové pre efektívne riadenie a adaptáciu lesných ekosystémov v kontexte prebiehajúcich klimatických zmien.

Pod'akovanie: Táto práca vznikla s finančnou podporou projektov APVV-21-0224, APVV-19-0183 a projektov VEGA čísla 1/0392/22 a 1/0285/23.

LITERATÚRA

DESLAURIERS, A., ROSSI, S., ANFODILLO, T., 2007. Dendrometer and intra-annual tree growth: what kind of information can be inferred?. *Dendrochronologia*, 25(2), 113-124.

EMS Brno, 2018. *Sap flow system EMS 81. Installation guide*. Dostupné na: http://www.emsbrno.cz/r.axd/Datasheets_manuals_v_SapFlow_EMS_81_SDI_t_12_v_EMS81_installation_u_pdp.jpg?ver

JEŽÍK, M., BLAŽENEC, M., STŘELCOVÁ, K., KOVALČÍKOVÁ, D., 2011. Sezónna dynamika transpirácie, rastových procesov a zmien obvodu kmeňov smreka v rastových fázach žrdoviny a kmeňoviny v podmienkach zavlažovacieho pokusu. In Střelcová, K. et al. (Eds) *Stres suchom a lesné porasty. Aktuálny stav a výsledky výskumu*. Zvolen: Technická univerzita, 265 s. ISBN 978-80-228-2233-6.

JEŽÍK, M., BLAŽENEC, M., LETTS, M. G., DITMAROVÁ, L., SITKOVÁ, Z., STŘELCOVÁ, K., 2015. Assessing seasonal drought stress response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) by monitoring stem circumference and sap flow. *Ecohydrology*, 8 (3), 378-386.

KIRCHEN, G., CALVARUSO, C., GRANIER, A., REDON, P.O., VAN DER HEIJDEN, G., BRÉDA, N., TURPAULT, M. P., 2017. Local soil type variability controls the water budget and stand productivity in a beech forest. *Forest Ecology and Management*, 390: 89–103.

LEŠTIANSKA, A., STŘELCOVÁ, K., FLEISCHER, P., 2023. Hodnotenie bilancie vody v systéme pôda-rastlina-atmosféra na základe monitoringu zmien obvodu kmeňov. *Hydrologie malého povodia 2023*. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AVČR, 2023, 100-108. ISBN 978-80-87117-22-4.

LEŠTIANSKA, A., FLEISCHER JR, P., MERGANIČOVÁ, K., FLEISCHER SR, P., NALEVANKOVÁ, P., STŘELCOVÁ, K., 2023b. Effect of provenance and environmental factors on tree growth and tree water status of Norway spruce. *Forests*, 14(1),165

LÜTTSCHWAGER, D., JOCHHEIM, H., 2020. Drought primarily reduces canopy transpiration of exposed beech trees and decreases the share of water uptake from deeper soil layers. *Forests*, 11(5), 537.

MATEJKA, F., STŘELCOVÁ, K., HURTALOVÁ, T., GÖMÖRYOVÁ, E., DITMAROVÁ, L., 2009. Seasonal changes in transpiration and soil water content in a spruce primeval forest during a dry period. *Bioclimatology and Natural Hazards*, 197-206. ISBN: 978-1-4020-8875-9

MOLČANYI, P., 2022. *Reverzibilné zmeny obvodu kmeňov stromov*. Bakalárska práca. Zvolen: TU vo Zvolene.

NALEVANKOVÁ, P., JEŽÍK, M., SITKOVÁ, Z., VIDO, J., LEŠTIANSKA, A., STŘELCOVÁ, K., 2018. Drought and irrigation affect transpiration rate and morning tree water status of a mature European beech (*Fagus sylvatica* L.) forest in Central Europe. *Ecohydrology*, 11(6), e1958.

NALEVANKOVÁ, P., SITKOVÁ, Z., KUČERA, J., STŘELCOVÁ, K., 2020. Impact of water deficit on seasonal and diurnal dynamics of European beech transpiration and time-lag effect between stand transpiration and environmental drivers. *Water*, 12(12), 3437.

PENMAN, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society*, 1948, A193, 120–146

https://chkopolana.sopsr.sk/wp-content/uploads/2020/09/dobrotsky-prales_skladacka_SK_29-9-1.pdf

LONG-TERM MECHANIC DENDROMETER CHRONOLOGIES REVEAL POST-DROUGHT GROWTH RESPONSES OF FIVE COMMON CENTRAL EUROPEAN TEMPERATE FOREST SPECIES

Jerguš RYBÁR¹ – Peter MARČIŠ^{1,2} – Zuzana SITKOVÁ¹

¹ National Forest Centre (NFC), T.G. Masaryka 22, 96001 Zvolen, Slovakia

² Faculty of Forestry, Technical University in Zvolen, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen, Slovakia

ABSTRACT

Rybár, J., Marčíš, P., Sitková, Z.: Long-term mechanic dendrometer chronologies reveal post-drought growth responses of five common Central European temperate forest species

Extreme drought events are among the most important recent drivers of forest productivity decline. Central European monitoring systems within ICP Forests include sites with high potential to reveal drought-induced stress reactions. Using an ICP Forests Level II plot in the Poľana Mountains, central Slovakia (Hukavský grúň), we compared the responses of five common Western Carpathian tree species to three well-documented severe drought events (2015, 2018, 2022). Over the period 2015–2024, the highest mean annual DBH increments were recorded in Norway spruce (*Picea abies*, Karst.) and European ash (*Fraxinus excelsior*, L.) ($\approx 29 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$), followed by European beech (*Fagus sylvatica*, L., $27 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$) and silver fir (*Abies alba*, Mill., $26 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$). The lowest increments were observed in sycamore maple (*Acer pseudoplatanus*, L.). Growth reductions associated with drought were most pronounced in *P. abies* and *A. alba* in 2017–2018, while broadleaved species responded more negatively to the 2022 drought. *F. excelsior* showed a continuous decline throughout the study period without distinct responses to individual drought years. The strongest recovery potential was found in *F. sylvatica* and *A. alba*, with *P. abies* in mixed stands also showing enhanced growth in the post-drought years 2023–2024.

Key words: post-drought recovery, drought, resilience, mountain forest, Western Carpathians

INTRODUCTION

Extreme droughts are increasingly shaping forest productivity and the terrestrial carbon balance, altering growth, mortality risk and carbon uptake across biomes. Recent syntheses identify drought as a primary driver of growth depression and tree death via hydraulic failure and carbon starvation, with impacts that can persist beyond the drought year (so-called “legacy effects”) (BOSE et al. 2021; BOSELA et al. 2025; CIAIS et al. 2005; HLÁSNY et al. 2011; MINDAŠ et al. 2020; RYBAR et al. 2023; ZHAO A RUNNING 2010).

Central Europe has overcome several major drought events over the last decade (BLAUHUT et al. 2022; TORETI et al. 2022). The 2015 episode produced widespread soil-moisture deficits and vegetation stress; the 2018 “hot drought” caused continent-scale canopy browning, defoliation and growth losses; and the 2022 heat/drought event reduced European gross primary productivity, leaving a measurable imprint on the regional carbon sink (KIRCHNER a HAGGENMÜLLER 2022). Studies also document significant post-event legacy effects—depressed growth and altered carbon fluxes in the following 1–5 years—modulated by stand structure and site characteristics (SCHNABEL et al. 2022). Mountain forests of the Western Carpathians are typically adapted to cool, moist climates; several common species (e.g., European beech, silver fir, sycamore maple and European ash show marked growth sensitivity to warm-season water deficits, with responses further mediated by tree size, age and competition. Large-scale monitoring efforts often trade plot density for spatial coverage, limiting tree-level resolution for mechanistic inference. The ICP Forests programme addresses this via two complementary designs: an extensive Level I grid and intensive Level II plots where harmonized methods enable repeated, high-frequency growth assessments (including mechanic band dendrometers). These protocols support comparability across countries and years and are well suited to detecting drought impacts and their legacies on individual trees (LORENZ 1995). In this study, we leverage the ICP Forests Level II plot at Poľana – Hukavský grúň (Slovakia) to analyze intra- and inter-annual growth dynamics of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, *Acer pseudoplatanus*, *Abies alba* and *Fraxinus excelsior* measured with mechanic dendrometers. We specifically compare growth in drought and post-drought years (2015, 2017–2018, 2022 and the subsequent seasons) and evaluate evidence for legacy effects at tree level.

METHODS

POLANA - HUKAVSKÝ GRŮŇ

The permanent research plot Poľana – Hukavský grúň is located in the Poľana Biosphere Reserve, central Slovakia (deims.org), on the south-eastern slopes of the Poľana stratovolcano at ~850 m a.s.l. (48°38' N, 19°29' E). The forest stand is a mature forest, dominated by European beech, (70%) and Norway spruce (19.6%), with admixtures of silver fir, sycamore maple, and ash. The age of the stand is estimated at 90–120 years, with more than 180–450 trees per 0.5 ha plot. From a phytosociological perspective, the forest is classified as Carpathian mountainous beech forest (European Environment Agency 2007). The climate is characterized by a mean annual temperature of 5.5 °C and annual precipitation of 898 mm for the reference period 1961–1990; recent on-site monitoring (2011–2017) indicated slightly warmer and drier conditions (7.1 °C, 790 mm). The site was established in 1991 and integrated into the ICP Forests Level II network in 1995; it is also part of LTER Slovakia/eLTER. Long-term research focuses on forest ecosystem processes, including deposition, canopy water balance, nutrient cycling, and tree physiology (PAVLENDÁ et al. 2007).

ANALYSIS

We evaluated monthly stem circumference changes recorded by manual dendrometers in the period 2015–2024. Manual dendrometers (DB 20 type, EMS Brno) were installed at breast height and readings were taken at two-week intervals since 2015. In total, 37 time series were analyzed (13 European beech, 5 Silver fir, 4 ash, 5 sycamore maple, and 10 Norway spruce) (Fig. 1). Only dominant or codominant individuals in terms of sociological position according to the Kraft classification were selected for the analysis. Raw measurements were firstly adjusted to remove manual device resets and processed into cumulative increment curves for each tree. From these curves, annual increments were calculated as the difference between the first and last measurement of each calendar year.

To assess growth trends, drought responses, and post-drought recovery, we summarized increments and defoliation rates at the species level. Mean annual increments and associated 95% confidence intervals were computed from tree-level values, allowing both interspecific comparisons and visualization of variation among individual trees. These summaries were then used to highlight species-specific growth declines in dry years and subsequent recovery trajectories. All analyses and visualizations were conducted in the R programming language (R Core Team 2025), using the packages *dplyr* and *tidyr* for data processing, and *ggplot2* for visualisation.

RESULTS

TREE CONDITION AND GROWTH CHARACTERISTICS

Across the five studied species, we monitored a total of 37 trees (Table 1). Crown defoliation in initial year 2015 ranged between 14% (silver fir) and 29% (sycamore maple). By 2024, defoliation increased substantially in silver fir (from $14 \pm 2.2\%$ to $31 \pm 19.2\%$) and ash (from $27.5 \pm 2.9\%$ to $31.3 \pm 18\%$), while a slight decrease was observed in European beech (from $24.6 \pm 7.5\%$ to $22.1 \pm 7.5\%$) and sycamore (from $29 \pm 4.2\%$ to $26 \pm 8.2\%$). Spruce also showed increase in defoliation (from $21.5 \pm 5.8\%$ to $24.5 \pm 4.4\%$). Average DBH in 2015 varied from 32.4 ± 2.7 cm in sycamore to 58.4 ± 6.5 cm in spruce. Over the monitoring period, mean DBH increased by approximately 1–3 cm across all species, reflecting consistent radial growth (Table 1). Mean annual increments (2015–2024) ranged from 0.09 ± 0.14 cm·year⁻¹ in sycamore to 0.29 ± 0.10 cm·year⁻¹ in ash and spruce. Intermediate growth rates were observed in beech (0.27 ± 0.09 cm·year⁻¹) and fir (0.26 ± 0.13 cm·year⁻¹) (Table 1). Overall, the results indicate that broadleaved species and conifers showed contrasting patterns of crown defoliation dynamics, but relatively similar ranges of mean annual increment, except for sycamore, which displayed notably lower growth.

Table 1 Overview of monitored trees and comparison between 2015 and 2024. n = number of trees, Def = crown defoliation (%), Dbh = diameter at breast height (cm), Inc.y⁻¹ = mean annual increment in the period 2015–2024 (cm·year⁻¹). Values are presented as mean ± standard deviation.

Species	n	Def 2015	Def 2024	Dbh 2015	Dbh 2024	Inc.y ⁻¹
	37	%	%	cm	cm	cm·year ⁻¹
<i>Fagus sylvatica</i>	13	24.6 ± 7.5	22.1 ± 7.5	42.7 ± 5.2	45.2 ± 5.7	0.27 ± 0.09
<i>Abies alba</i>	5	14 ± 2.2	31 ± 19.2	45.7 ± 3.6	48.1 ± 4.6	0.26 ± 0.13
<i>Fraxinus excelsior</i>	4	27.5 ± 2.9	31.3 ± 18	55.4 ± 4.9	58 ± 5.7	0.29 ± 0.1
<i>Acer pseudoplatanus</i>	5	29 ± 4.2	26 ± 8.2	32.4 ± 2.7	33.2 ± 3.3	0.09 ± 0.14
<i>Picea abies</i>	10	21.5 ± 5.8	24.5 ± 4.4	58.4 ± 6.5	61 ± 7	0.29 ± 0.08

ANNUAL GROWTH DYNAMICS AND DROUGHT RESPONSES

Time-series of annual increments revealed distinct species-specific growth trajectories over the study period 2015–2024 (Fig. 1). Beech showed relatively stable increments with moderate declines in the drought years 2015 and 2018, followed by clear recovery in 2023–2024. Fir exhibited high variability, with pronounced reductions in 2017–2018 and again in 2022, but also marked rebounds in 2021 and 2023, indicating high interannual plasticity. Ash displayed the steepest long-term decline: increments dropped sharply after 2015 and remained at low levels thereafter, with no clear recovery after drought years. In contrast, Sycamore maintained low increments throughout the period, with only minor fluctuations and no distinct drought-related signals. Spruce showed high increments in 2016, but a marked reduction during the 2017–2018 prolonged drought period, and persistently lower growth in the following years. Nevertheless, in 2023–2024 spruce trees growing in mixed stands exhibited partial recovery, approaching pre-drought levels.

Overall, conifers (spruce and fir) were most affected by the 2017–2018 drought, while broadleaved species, especially beech, showed greater sensitivity to the 2022 drought. Species differed markedly in their recovery potential: beech and fir demonstrated the strongest capacity to regain growth after drought, while ash showed a continuous decline without recovery.

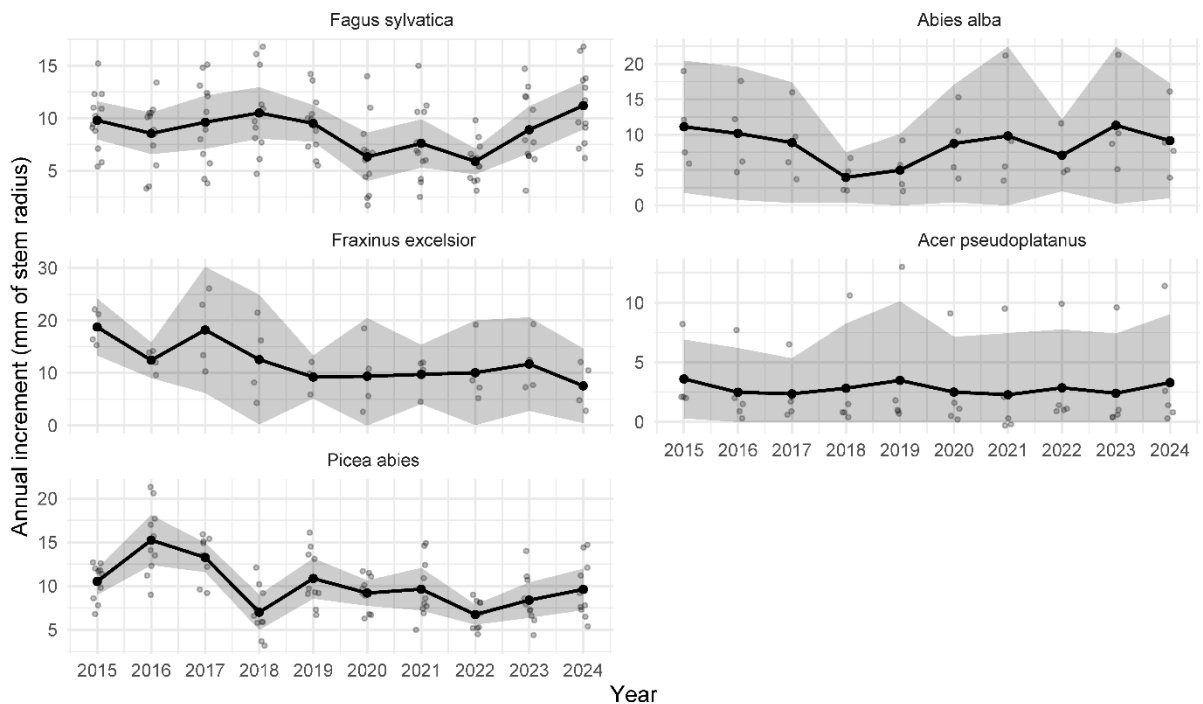


Figure 1 Absolute annual stem radius increments during the period 2015–2024 for five representative Carpathian mountain forest tree species. Shaded areas indicate 95% confidence intervals. Only trees with complete period coverage are included (Fig. 1).

DISCUSSION

Our results demonstrate different drought responses and recovery dynamics among five common Western Carpathian tree species growing in the same community and site conditions.

Beech showed relatively stable growth over the monitoring period, with only moderate reductions during drought years and a strong recovery in 2023–2024. This confirms the well-documented drought resilience of beech in mountain sites, where deep rooting and high plasticity in stomatal control allow partial compensation for reduced water availability (PRETZSCH 2022; PRETZSCH et al. 2020). The recovery of beech after 2022 indicates a capacity to regain growth once favorable conditions return, supporting its role as a long-term stabilizing species in mixed Carpathian forests, especially in optimum conditions.

Fir displayed high interannual variability, with sharp declines in 2017–2018 but also notable recovery. Such oscillations may reflect both vulnerability to drought stress and an ability to recover when soil moisture improves. Previous studies have highlighted the declining vitality of silver fir under combined drought/heatwave events (MARCIS et al. 2025) yet our findings suggest that at mid-elevation optimum sites silver fir can still maintain a relatively strong recovery potential. In contrast, Spruce was strongly affected by the 2017–2018 drought and showed persistently reduced increments thereafter. This supports the view of spruce as one of the most drought-sensitive Central European conifers (BOSELA et al. 2021; BURAS et al. 2020) particularly outside its natural high-elevation distribution range. Nevertheless, our data also indicate partial recovery in 2023–2024, especially in mixed stands, suggesting that stand composition may facilitate drought impacts for spruce (PRETZSCH et al. 2013).

Ash exhibited the steepest declining trajectory: a continuous decline from 2015 onwards, without distinct responses to individual drought years. This pattern is consistent with widespread reports of ash dieback caused by *Hymenoscyphus pseudoalbidus* in combination with drought stress (GROSS et al. 2014). The absence of recovery indicates limited adaptive capacity of ash under current pest pressure combined with drought stress regime in the Carpathians. Finally, sycamore maintained very low increments throughout the study period, showing neither strong drought signals nor post-drought recovery. This likely reflects its ecological role as a subordinate species in mixed stands, characterized by inherently lower growth rates rather than specific drought sensitivity. In the case of sycamores, our results may also have been influenced by increasing competitive pressure from dominant beech, which is gradually occupying more disponible space and thereby reducing the sociological status of sycamore.

Our study demonstrates that maintaining species diversity is fundamental for enhancing the resilience of Carpathian mountain forests under increasing climatic stress. spruce and fir exhibited pronounced vulnerability to extreme droughts, whereas beech showed a strong capacity for post-drought recovery, and mixed-stand conditions appeared to buffer conifers against long-term decline. The continuous decline of ash reflects the compounding effects of drought and biotic stressors, raising concerns about its future role in these ecosystems. These findings underline the necessity of long-term, multispecies monitoring, such as that provided by the ICP Forests network, to detect drought legacies and to guide adaptive management strategies. Promoting structurally diverse, mixed species stands emerges as a key measure to secure the stability and resilience of Carpathian mountain forests in a changing climate.

REFERENCES

- BLAUHUT, Veit, Michael STOELZLE, Lauri AHOPELTO, Manuela I. BRUNNER, Claudia TEUTSCHBEIN, Doris E. WENDT, Vytautas AKSTINAS, Sigrid J. BAKKE, Lucy J. BARKER, Lenka BARTOŠOVÁ, Agrita BRIEDE, Carmelo CAMMALLERI, Ksenija Cindrić KALIN, Lucia DE STEFANO, Miriam FENDEKOVÁ, David C. FINGER, Marijke HUYSMANS, Mirjana IVANOV, Jaak JAAGUS, Jiří JAKUBÍNSKÝ, Svitlana KRAKOVSKA, Gregor LAAHA, Monika LAKATOS, Kiril MANEVSKI, Mathias NEUMANN ANDERSEN, Nina NIKOLOVA, Marzena OSUCH, Pieter VAN OEL, Kalina RADEVA, Renata J. ROMANOWICZ, Elena TOTH, Mirek TRNKA, Marko UROŠEV, Julia URQUIJO REGUERA, Eric SAUQUET, Aleksandra STEVKOV, Lena M. TALLAKSEN, Iryna TROFIMOVA, Anne F. VAN LOON, Michelle T.H. VAN VLIET, Jean Philippe VIDAL, Niko WANDERS, Micha WERNER, Patrick WILLEMS a Nenad ZIVKOVIĆ, 2022. Lessons from the 2018–2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences* [online]. 2022, roč. 22, č. 6, s. 2201–2217. ISSN 16849981. Dostupné na: doi:10.5194/NHESS-22-2201-2022
- BOSE, Arun K., Daniel SCHERRER, J. Julio CAMARERO, Daniel ZICHE, Flurin BABST, Christof BIGLER, Andreas BOLTE, Isabel DORADO-LIÑÁN, Sophia ETZOLD, Patrick FONTI, David I. FORRESTER, Jordane GAVINET, Antonio GAZOL, Ester González DE ANDRÉS, Dirk Nikolaus KARGER, Francois LEBOURGEOIS, Mathieu LÉVESQUE, Elisabet MARTÍNEZ-SANCHO, Annette MENZEL, Burkhard NEUWIRTH, Manuel NICOLAS, Tanja G.M. SANDERS, Tobias SCHARNWEBER, Jens SCHRÖDER, Roman ZWEIFEL, Arthur GESSLER a Andreas RIGLING, 2021. Climate sensitivity and drought seasonality determine post-drought growth recovery of *Quercus petraea* and *Quercus robur* in Europe. *Science of The Total Environment* [online]. 2021, roč. 784, s. 147222. ISSN 0048-9697. Dostupné na: doi:10.1016/J.SCITOTENV.2021.147222
- BOSELA, M, J TUMAJER, E CIENCIALA a L DOBOR, 2021. Climate warming induced synchronous growth decline in Norway spruce populations across biogeographical gradients since 2000. *Science of the Total Environment* [online]. 2021 [cit. 26.10.2023]. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720353237>
- BOSELA, Michal, Peter MARCIS, Dominik POLŤÁK, Jerguš RYBÁR, Peter FLEISCHER SR, Peter FLEISCHER JR, Erika GÖMÖRYOVÁ, Jaroslav VIDO, Paulína NALEVANKOVÁ, Jaroslav ŠKVARENINA, Marián HOMOLÁK, Jozef VÝBOŠŤOK, Boris ŤUPEK, Tijana MARTINOVIĆ, Petr BALDRIAN, Aleksi LEHTONEN a Raisa MÄKIPÄÄ, 2025. Norway spruce monoculture has lower resilience and carbon sequestration capacity than a more diverse broadleaved forest: A case study

in Central Europe. *Forest Ecology and Management* [online]. 2025, roč. 591, s. 122829. ISSN 0378-1127. Dostupné na: doi:10.1016/j.foreco.2025.122829

BURAS, Allan, Anja RAMMIG a Christian S. ZANG, 2020. Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosciences* [online]. 2020, roč. 17, č. 6, s. 1655–1672. ISSN 1726-4170. Dostupné na: doi:10.5194/bg-17-1655-2020

CIAIS, Ph, M. REICHSTEIN, N. VIOVY, A. GRANIER, J. OGÉE, V. ALLARD, M. AUBINET, N. BUCHMANN, Chr BERNHOFER, A. CARRARA, F. CHEVALLIER, N. DE NOBLET, A. D. FRIEND, P. FRIEDLINGSTEIN, T. GRÜNWALD, B. HEINESCH, P. KERONEN, A. KNOHL, G. KRINNER, D. LOUSTAU, G. MANCA, G. MATTEUCCI, F. MIGLIETTA, J. M. OURCIVAL, D. PAPALE, K. PILEGAARD, S. RAMBAL, G. SEUFERT, J. F. SOUSSANA, M. J. SANZ, E. D. SCHULZE, T. VESALA a R. VALENTINI, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 2005 437:7058 [online]. 2005, roč. 437, č. 7058, s. 529–533. ISSN 1476-4687. Dostupné na: doi:10.1038/nature03972

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2007. *European forest types* [online]. Copenhagen: European Environment Agency [cit. 6.5.2023]. Dostupné na: https://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2006_9

GROSS, Andrin, Ottmar HOLDENRIEDER, Marco PAUTASSO, Valentin QUELOZ a Thomas Niklaus SIEBER, 2014. Hymenoscyphus pseudoalbidus, the causal agent of European ash dieback. *Molecular Plant Pathology* [online]. 2014, roč. 15, č. 1, s. 5–21. ISSN 1364-3703. Dostupné na: doi:10.1111/mp.12073

HLÁSNY, Tomáš, Zoltán BARCZA, Marek FABRIKA, Borbála BALÁZS, Galina CHURKINA, Jozef PAJTÍK, Róbert SEDMÁK a Marek TURČÁNI, 2011. Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research* [online]. 2011, roč. 47, č. 3, s. 219–236. ISSN 0936577X. Dostupné na: doi:10.3354/CR01024

KIRCHNER, T a K HAGGENMÜLLER, 2022. *ICP Forests Database Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention)*. Eberswalde: Thünen Institute of Forest Ecosystems.

LORENZ, M., 1995. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests-ICP Forests-. *Water, Air, & Soil Pollution* [online]. 1995, roč. 85, č. 3, s. 1221–1226. ISSN 00496979. Dostupné na: doi:10.1007/BF00477148

MARCIS, Peter, Jaroslav VIDO, Daniel KURJAK, Adriana LESTIANSKA, Dominik POLTAK, Jergus RYBAR a Michal BOSELA, 2025. A combined effect of heat and drought limits the growth of Central European silver fir. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2025, roč. 371, s. 110610. ISSN 0168-1923. Dostupné na: doi:10.1016/j.agrformet.2025.110610

MINDÁŠ, Jozef, Miriam HANZELOVÁ, Jana ŠKVARENINOVÁ, Jaroslav ŠKVARENINA, Ján ĎURSKÝ a Slávka TÓTHOVÁ, 2020. Long-Term Temporal Changes of Precipitation Quality in Slovak Mountain Forests. *Water* [online]. 2020, roč. 12, č. 10, s. 2920. ISSN 2073-4441. Dostupné na: doi:10.3390/w12102920

PAVLENDÁ et al. (2007): Monitoring lesov Slovenska, Správa za Forest Focus a ČMS Lesy za rok 2006. Zvolen, NLC-LVÚ, 2007, 114 s.

PRETZSCH, H., T. GRAMS, K. H. HÄBERLE, K. PRITSCH, T. BAUERLE a T. RÖTZER, 2020. Growth and mortality of Norway spruce and European beech in monospecific and mixed-species stands under natural episodic and experimentally extended drought. Results of the KROOF throughfall exclusion experiment. *Trees* [online]. 2020, roč. 34, č. 4, s. 957–970. ISSN 1432-2285. Dostupné na: doi:10.1007/s00468-020-01973-0

PRETZSCH, H, G SCHÜTZE, E Uhl - Plant BIOLOGY a undefined 2013, 2013. Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Wiley Online Library* [online]. 2013, roč. 15, č. 3, s. 483–495. Dostupné na: doi:10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x

PRETZSCH, Hans, 2022. Facilitation and competition reduction in tree species mixtures in Central Europe: Consequences for growth modeling and forest management. *Ecological Modelling* [online]. 2022, roč. 464, s. 109812. ISSN 0304-3800. Dostupné na: doi:10.1016/j.ECOLMODEL.2021.109812

R CORE TEAM, 2025. *R: A Language and environment for statistical computing* [online]. 2025. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Dostupné na: <https://www.r-project.org/>.

RYBAR, Jergus, Zuzana SITKOVÁ, Peter MARCIS, Pavel PAVLENDÁ a Jozef PAJTÍK, 2023. Declining Radial Growth in Major Western Carpathian Tree Species: Insights from Three Decades of Temperate Forest Monitoring. *Plants* [online]. 2023, roč. 12, č. 24, s. 4081. ISSN 2223-7747. Dostupné na: doi:10.3390/plants12244081

SCHNABEL, Florian, Sarah PURRUCKER, Lara SCHMITT, Rolf A. ENGELMANN, Anja KAHL, Ronny RICHTER, Carolin SEELE-DILBAT, Georgios SKIADARESI a Christian WIRTH, 2022. Cumulative growth and stress responses to the 2018–2019 drought in a European floodplain forest. *Global Change Biology* [online]. 2022, roč. 28, č. 5, s. 1870–1883. ISSN 1365-2486. Dostupné na: doi:10.1111/gcb.16028

TORETI, A, D MASANTE, NJ ACOSTA a D BAVERA, 2022. Drought in Europe July 2022 [online]. 2022 [cit. 26.10.2023]. Dostupné na: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130253?fbclid=IwAR3qqwgHQqkT2FBVj_fasxivke7Lc2lU1FaBgWEzc0GDHPE0mKNUC0-0o?utm_source=rss_feed&utm_medium=rss&utm_campaign=rss_syndication

ZHAO, Maosheng a Steven W. RUNNING, 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* [online]. 2010, roč. 329, č. 5994, s. 940–943. ISSN 00368075. Dostupné na: doi:10.1126/SCIENCE.1192666/SUPPL_FILE/ZHAO.SOM.REVISION.1.PDF

MŮŽE MÍT DRUHOVÁ SKLADBA DŘEVIN MĚSTSKÝCH PARKŮ DOPADY NA ZDRAVÍ OBYVATEL?

Petr SALAŠ¹ – Jana BURGOVÁ¹ – Jaroslav ROŽNOVSKÝ¹ – Jindřiška JEŘÁBKOVÁ² – IRENA DROBILIČOVÁ¹

¹Ústav šlechtění a množení zahradnických rostlin, Zahradnická fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Valtická 337, 691 44 Lednice; petr.salas@mendelu.cz, jana.burgova@mendelu.cz, jaroslav.roznovsky@mendelu.cz

²Ústav zahradnické techniky, Zahradnická fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Valtická 337, 691 44 Lednice; jindriska.jerabkova@mendelu.cz

ABSTRACT

Salaš, P., Burgová, J., Rožnovský, J., Jeřábková, J.: Can the species composition of trees in urban parks impact residents' health?

Urban greenery provides numerous ecological and social functions, contributing to both physical and mental health of residents and improving urban environmental quality. However, it may also pose health risks in the form of pollen exposure, particularly from wind-pollinated species with high allergenic potential. The aim of this study was to compare the tree species composition in three urban parks (Brno, Ostrava, Hradec Králové) and to evaluate their potential risk for visitors and nearby residents. The inventory of woody taxa was complemented with data on pollination type, flowering period, flowering duration, and allergenicity. Based on these data, a Potential Risk Index (PRI) was calculated. The results showed clear differences among the parks – the highest values were recorded in Brno (0.32), intermediate in Hradec Králové (0.26), and the lowest in Ostrava (0.21). In all cases, pollen load peaked in April and May. The key risk factor was the presence of highly allergenic wind-pollinated taxa such as *Betula*, *Corylus*, and *Fraxinus*. The study confirms the importance of species composition in shaping the allergenic burden of urban parks and suggests the need to consider this aspect in urban greenery planning and management.

Key words: urban greenery, allergenic pollen, public health, risk assessment

ÚVOD

Zeleň v městském prostředí plní řadu ekologických, estetických i sociálních funkcí. Parky a další vegetační plochy přispívají ke zlepšení kvality života obyvatel tím, že poskytují prostor pro pohyb, relaxaci, společenská setkání i kontakt s přírodou. Jejich přínos pro fyzické a duševní zdraví obyvatel je dobře doložen, stejně jako jejich pozitivní vliv na mikroklima, snížení dopadů tepelného ostrova města, zachycování polutantů a zadržování srážkové vody (MCCUTCHEON, SCHNOOR, 2003; MAAS et al., 2006). Městské parky jsou také významnými prvky biodiverzity, neboť poskytují útočiště pro široké spektrum druhů rostlin a živočichů (MORAVEC et al., 1994).

Přestože většina dopadů městské zeleně na zdraví obyvatel je pozitivní, v některých případech může zeleň představovat i potenciální zdravotní riziko. Jedním z málo zvažovaných aspektů je alergenní působení pylu dřevin, zejména těch, které jsou opylovány větrem a produkují velké množství lehkého, snadno šířitelného pylu s vysokým senzibilizačním potenciálem. Tento pyl se může ve vyšších koncentracích vyskytovat ve veřejných parcích a přilehlých oblastech právě v období kvetení, čímž přispívá ke zhoršování symptomů u osob s alergiemi, astmatem nebo jinými chronickými respiračními onemocněními (CARIÑANOS et al., 2019). Výskyt těchto zdravotních komplikací navíc ovlivňují i klimatické faktory, které prodlužují pylovou sezónu a zvyšují koncentrace pylových částic v ovzduší (ZAHRADNÍKOVÁ et al., 2023).

Alergenita dřevin je dána souborem biologických vlastností, mezi které patří typ opylení, doba a délka kvetení a schopnost produkce a disperze pylu. Vzhledem k rozdílnému druhovému složení vegetace jednotlivých parků je proto důležité posuzovat rizika individuálně, s ohledem na místní podmínky a složení taxonů. Systematické hodnocení potenciální alergenní zátěže pomocí jednoduchého, kvantitativního nástroje by mohlo pomoci

urbanistům, krajinářům i veřejné správě plánovat a upravovat městskou zeleň tak, aby pozitivní přínosy převyšovaly případná zdravotní rizika.

Cílem této studie bylo porovnat a vyhodnotit druhové složení dřevinné vegetace ve třech modelových městských parcích a analyzovat jejich potenciální rizika z hlediska zdravotního dopadu na návštěvníky parků i obyvatele v jejich okolí.

Hypotéza vychází z předpokladu, že druhové složení dřevin významně ovlivňuje míru potenciální alergenní zátěže městského parku, a že pomocí kvantitativního indexu PRI lze mezi parky identifikovat rozdíly, které mohou být relevantní pro tvorbu veřejné politiky v oblasti zdravého městského plánování.

MATERIÁL A METODY

Výběr městských parků

Jako modelové pro průzkum byly vytipovány 3 parky ve městech Brno, Ostrava a Hradec Králové. Parky se vyznačují různou charakteristikou z hlediska typologie, velikosti nebo designu. Kritériem pro zařazení parků do studie byla jejich potenciální srovnatelnost z hlediska funkce, velikosti i způsobu využívání veřejností. Do výběru byly zařazeny městské parky nacházející se ve velkých urbanizovaných centrech České republiky (Brno, Ostrava, Hradec Králové), které mají rozsáhlejší plochu, volně přístupný charakter a jsou intenzivně využívány obyvateli i návštěvníky města v průběhu celého roku.

Dalším důležitým kritériem byla druhová diverzita dřevinné vegetace, přičemž všechny analyzované parky obsahují větší počet stromovitě rostoucích taxonů, včetně jak domácích (autochtonních), tak introdukovaných (cizokrajných) druhů. Tento výběr umožnil provést komparativní analýzu druhového složení a jeho možného dopadu na alergenní potenciál městské zeleně.

Městský park Lužánky v Brně (dále Brno) je nejstarším veřejným parkem v České republice. Nabízí rozlehlé plochy zeleně, historický pavilon a různé možnosti pro rekreaci, sport a kulturní akce. Nachází se severně od historického centra Brna a jeho rozloha činí 22 ha.

Sad Dr. Milady Horákové (dále Ostrava) je jedním z nejvýznamnějších a druhým největším parkem v Ostravě. Nachází se poblíž historického centra, mezi ulicemi 28. října a Varenská. Park se rozkládá na ploše 12,3 ha a plní kulturní a relaxační roli pro obyvatele i návštěvníky. V blízké budoucnosti je naplánována rekonstrukce.

Park Jiráskovy sady v Hradci Králové (dále Hradec Králové) je trojúhelníkovitého tvaru a rozprostírá se na ploše 52,5 ha. Nachází se na soutoku Labe a Orlice, v blízkosti velkého náměstí a zimního stadionu. Park slouží obyvatelům a návštěvníkům ke kulturnímu vyžití a rekreaci. Součástí parku jsou například rozárium, alpinárium, pravoslavný kostelík, pevnostní zbytky a památník.

Inventarizace dřevin

V modelových parcích byla provedena inventarizace zejména stromovitě rostoucích dřevin s výjimkou dvou taxonů dřevin s „možným“ keřovitým typem růstu. Tyto taxony, *Taxus baccata* a *Corylus avellana*, byly zastoupeny ve zkoumaných parcích ve větším měřítku a byly zařazeny do inventarizace. Inventarizace probíhala terénním průzkumem a identifikací dřevin *in situ*.

Bylo zjišťováno zastoupení jednotlivých taxonů v parcích (v kusech). Získané údaje byly tabelárně zpracovány a bylo vypočteno procento zastoupení jednotlivých taxonů z celkového množství dřevin nacházejících se v parku. Dalšími údaji, které byly kromě taxonomického zařazení dřevin zpracovávány, jsou: opadavost listů (listnatá dřevina/ jehličnatá dřevina), způsob opylování (anemofilní/entomofilní/jiný), alergenita dřevin (stupnice: 1-bez způsobování alergií, 2-nízká, 3-střední, 4-vysoká, 5-velmi vysoká), doba květu (měsíc), délka trvání kvetení taxonů (v měsících).

Posuzování potenciálního rizika ohrožení obyvatelstva pomocí navrženého indexu PRI

Index PRI použitý v této studii byl upraven podle metodiky **Urban Green Zone Allergenicity Index (UGZA)** (CARIÑANOS et al., 2017), aby bylo možné komplexněji zohlednit druhovou skladbu, typ opylení a fenologii dřevin v modelových městských parcích. Analýza byla provedena na datech ze tří modelových parků reprezentujících města Brno, Hradec a Ostrava. Pro každý park byly evidovány tyto proměnné na úrovni druhu dřeviny:

- počet jedinců druhu v parku (N_i , ks)
- typ opylení (To_i kód 1–3): 1 = hmyzosnubná, 2 = větrosnubná, 3 = jiný – nebyl zaznamenán
- alergenita (A_i ; škála 1–5; 1 = bez rizika, 2 = nízká, 3 = střední, 4 = vysoká, 5 = velmi vysoká)
- doba květu (měsíce; např. „5–6“) a trvání kvetení (M_i ; 1–12)
- průměrná doba kvetení (např. 5,5; používá se volitelně v doplňkové analýze sezónnosti)
- pro každý park byl dále vypočten celkový počet dřevin dle vzorce:

$$N_{tot} = \sum_i N_i$$

Index PRI

Cílem bylo definovat a vypočítat **index potenciálního rizika (PRI)** vyjadřující relativní pylovou/alergenní zátěž pro návštěvníky parku a obyvatele v jeho okolí, danou druhovým složením, typem opylení a délkou kvetení. Index je konstruován tak, aby byl bezrozměrný v intervalu 0–1 (lze převést na 0–100 bodů), a srovnatelný napříč parky. Před samotným výpočtem indexu byla potřebná transformace některých vstupních proměnných.

Alergenita (A_i) byla převedena na škálu 0–1 dle vzorce:

$$A_i = \frac{A - 1}{4}$$

(tedy 1 → 0,5 → 1).

Typ opylení (To_i) byl převeden na váhový koeficient:

$$To_i = \begin{cases} 0,5 & \text{hmyzosnubná (kód 1)} \\ 1,0 & \text{větrosnubná (kód 2)} \end{cases}$$

Tento poměr odráží vyšší expozici u větrosnubných druhů.

Délka kvetení (M) byla převedena na „délkový“ faktor L_i s horní hranicí 3 měsíců kvetení, což byla nejvyšší zaznamenaná hranice kvetení u všech taxonů:

$$L_i = \min\left(\frac{M}{3}, 1\right)$$

(L_i vyjadřuje dostupnost květů pro opylovače, nebo produkci pylu, t.j. 1 měsíc → 0,33; 2 měsíce → 0,67; ≥ 3 měsíce → 1.)

Před samotným výpočtem indexu PRI bylo potřebné stanovení:

Druhově rizikového skóre r_i , které se definuje pro každý taxon (i):

$$r_i = A_i \cdot To_i \cdot L_i \in [0, 1]$$

Jedná se o bezrozměrné číslo a vyšší hodnoty znamenají vyšší potenciální riziko (vyšší alergenita, větrosnubnost, delší kvetení).

Váhy podle zastoupení taxonů v parku

Podíl jednotlivých taxonů (i) v parku je vyjádřeno jako váha (v_i), kdy: $v_i = \frac{N_i}{N_{tot}}$,

a zároveň platí:

$$\sum_i v_i = 1$$

Výpočet parkového (ročního) indexu potenciálního rizika (PRI_r)

Souhrnné roční riziko pro park je vážený průměr skóre jednotlivých taxonů:

$$PRI_r = \sum_i v_i \cdot r_i$$

Výsledek je v intervalu 0–1; (lze převést na 0–100 bodů).

Výpočet parkového (měsíčního) indexu potenciálního rizika (PRI_m)

Pro posouzení časově omezeného rizika se z doby květu u jednotlivých taxonů sestaví binární **indikátor kvetení** I v měsíci m (1–12):

$$I_{i,m} = \begin{cases} 1 & \text{pokud druh } i \text{ kvete v měsíci } m \\ 0 & \text{pokud druh } i \text{ nekvete v měsíci } m \end{cases}$$

Pro výpočet měsíčního indexu pro jednotlivý park vypočteme parkový (měsíční) index potenciálního rizika ($PRI_{r,m}$):

$$PRI_{r,m} = \sum_i v_i \cdot r_i \cdot I_{i,m}$$

Z měsíční řady $\{PRI_{r,m}\}$ je možné vyhodnotit měsíční maxima (ve kterém měsíci je pylová/alergenní zátěž nejvyšší), průměr v klíčovém období (např. duben–květen, stanovení měsíců, které jsou z pohledu hodnocení alergenní zátěže nejdůležitější), a délku sezóny kvetení (počet měsíců ≥ 50 % maxima = významná aktivita).

Výpočty byly provedeny pomocí tabulkového procesoru MS Excel, ve kterém byly zpracovány i grafické a tabulkové záznamy výsledků.

VÝSLEDKY A DISKUSE

K průzkumu byly vybrány modelové městské parky ve třech městech Brno, Hradec Králové a Ostrava. Vybrané parky jsou umístěny v blízkosti center měst, což dává předpoklad jejich hojné návštěvnosti. Se zvýšeným pohybem a pobytem osob v těchto parcích a jejich okolí se očekává vliv na jejich zdraví. Na základě provedené inventarizace tří modelových parků je možné konstatovat, že v parku Lužánky v Brně bylo zaznamenáno celkově 90 taxonů stromovitě rostoucích dřevin, což byl nejvyšší zaznamenaný počet. Druhým taxonově nejpočetnějším parkem byl park Jiráskovy sady v Hradci Králové s celkově s 73 různými taxony dřevin. Nejméně taxonů, a to 50, bylo zaznamenáno v parku Sad Dr. Milady Horákové.

Ve sledovaných parcích se výrazně lišila druhová skladba z pohledu zastoupení jehličnanů a listnáčů. V Brně bylo zaznamenáno celkem 1852 jedinců, z toho 409 (22,1 %) jehličnanů a 1443 (77,9 %) listnáčů. V Hradci Králové činil celkový počet 858 stromů, přičemž 384 (44,7 %) tvořily jehličnany a 474 (55,3 %) listnáče. V Ostravě bylo evidováno 1089 jedinců, z nichž pouze 120 (11,0 %) připadalo na jehličnany, zatímco 969 (89,0 %) tvořily listnáče. Tyto výsledky ukazují, že zatímco Ostrava je výrazně listnatá, Hradec Králové vykazuje nejvyrovnanější poměr obou skupin a Brno se nachází mezi těmito dvěma extrémy. Zjištěné rozdíly v podílu jehličnatých a listnatých druhů ovlivňují nejen vizuální charakter sledovaných parků, ale také sezónní dynamiku a intenzitu pylové zátěže, která je v prostředí významným faktorem ovlivňujícím zdraví obyvatelstva.

Ve sledovaných parcích tří měst se ukázaly výrazné rozdíly v druhové skladbě dřevin. V Brně jednoznačně dominoval rod *Acer* (18,8 %), následovaný rodem *Taxus* (13,2 %) a *Tilia* (8,7 %). V Hradci Králové byl nejčetnější rod *Tilia* (12,7 %), dále *Picea* (12,5 %) a *Acer* (11,9 %). Oproti tomu v Ostravě se projevil extrémní podíl lípy (*Tilia*, 30,0 %), která tvořila téměř třetinu všech jedinců, zatímco další zastoupené rody, zejména *Fraxinus* (12,7 %) a *Acer* (9,7 %), dosahovaly výrazně nižších hodnot, jak je vidět v Tab. 1.

Z hlediska zdravotní významnosti je nutné zdůraznit výskyt alergenních taxonů. Výsledky inventarizace dále ukázaly zřetelné rozdíly v druhové skladbě parkových porostů mezi jednotlivými městy, které mají potenciální významné důsledky jak pro stabilitu ekosystémů, tak pro zdraví obyvatel. V Ostravě byla zaznamenána výrazná dominance lípy (*Tilia*, 30 % všech jedinců), což na jednu stranu představuje relativně nízké pylové riziko, avšak na druhou stranu snižuje druhovou diverzitu a zvyšuje zranitelnost porostu vůči biotickým i abiotickým stresovým faktorům. Význam druhové diverzity pro stabilitu městských ekosystémů zdůrazňují například NIELSEN et al. (2014).

V Brně byl oproti tomu zjištěn vysoký podíl tisů (*Taxus baccata*, 13 %; Tab. 1), což je druh známý svou toxicitou i potenciálně vyšší alergenitou. Přítomnost taxinů a dalších bioaktivních látek byla popsána i jako možný faktor vyvolávající hypersenzitivní reakce (VANHAELLEN et al., 2002). Hradec Králové vykázal vyrovnanější druhovou strukturu, s relativně vyšším zastoupením jehličnanů (*Picea*, *Thuja*, *Pinus*, *Chamaecyparis*, *Larix*). Jehličnany sice obecně vykazují nižší alergenní potenciál než některé listnaté rody, avšak i jejich pyl může přispívat k celkové pylové zátěži, zejména na jaře, jak ukazují nedávné studie ze střední Evropy (Šauliene et al., 2023). Společným rysem všech tří měst byl výskyt taxonů s vysokým alergenním potenciálem, zejména *Betula*, *Corylus*, *Fraxinus*, *Quercus* a *Carpinus*. Tyto taxony jsou dlouhodobě spojovány se zvýšeným výskytem alergických reakcí, přičemž například na březový pyl je senzibilizováno 15–20 % pacientů se sezónní rýmou (VALENTA et al., 2010). Variabilita hlavního alergenu břízy (Bet v 1) navíc komplikuje efektivitu imunoterapeutických přístupů (MOTHESLUKŠCH et al., 2011).

Tab. 1 Inventarizace dřevin – srovnání výskytu s četností min. 2 %, souhrn dle rodů

Tab. 1 Inventory of woody plants – comparison of occurrences with a minimum frequency of 2%, summary by genus

Brno			Hradec Králové			Ostrava		
Název taxonu	Počet (ks)	% zastoupení	Název taxonu	Počet (ks)	% zastoupení	Název taxonu	Počet (ks)	% zastoupení
<i>Acer</i>	348	18,79	<i>Tilia</i>	109	12,7	<i>Tilia</i>	327	30,03
<i>Taxus</i>	244	13,18	<i>Picea</i>	107	12,47	<i>Fraxinus</i>	138	12,67
<i>Tilia</i>	161	8,69	<i>Acer</i>	102	11,89	<i>Acer</i>	106	9,73
<i>Fraxinus</i>	134	7,24	<i>Thuja</i>	81	9,44	<i>Betula</i>	80	7,35
<i>Quercus</i>	113	6,10	<i>Taxus</i>	65	7,58	<i>Aesculus</i>	78	7,16
<i>Aesculus</i>	99	5,35	<i>Fagus</i>	63	7,34	<i>Pinus</i>	65	5,97
<i>Robinia</i>	78	4,21	<i>Pinus</i>	33	3,85	<i>Carpinus</i>	62	5,69
<i>Carpinus</i>	62	3,35	<i>Chamaecyparis</i>	31	3,61	<i>Picea</i>	38	3,49
<i>Pinus</i>	61	3,29	<i>Fraxinus</i>	28	3,26	<i>Prunus</i>	34	3,12
<i>Salix</i>	52	2,81	<i>Quercus</i>	28	3,26	<i>Fagus</i>	27	2,48
<i>Populus</i>	51	2,75	<i>Aesculus</i>	25	3,26	<i>Quercus</i>	27	2,48
<i>Prunus</i>	43	2,32	<i>Carpinus</i>	24	2,80			
<i>Fagus</i>	40	2,16	<i>Magnolia</i>	21	2,45			
<i>Corylus</i>	37	2,0	<i>Larix</i>	19	2,21			

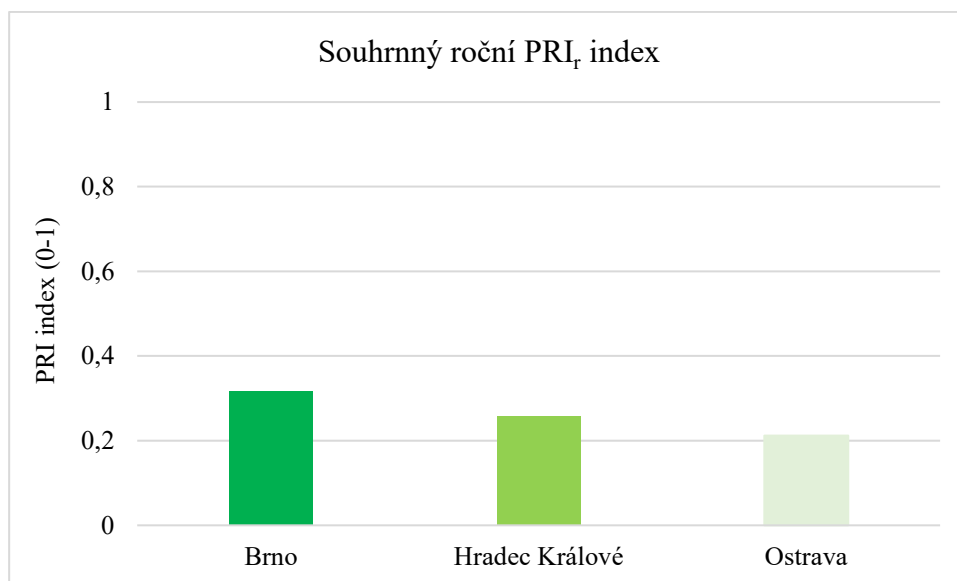
Taxony s procentuálním zastoupením nad 10 %

Taxony s procentuálním zastoupením nad 3 %

Taxony s procentuálním zastoupením nad 2 %

Po provedené inventarizaci byly u zjištěných taxonů doplněny informace týkající se jejich způsobu opylení, doby, trvání kvetení a alergenity jednotlivých druhů dřevin. Tyto informace poskytly vstupní data pro výpočet navrženého a aplikovaného indexu potenciálního rizika (PRI_i), který umožňuje kvantifikovat pylovou zátěž dřevinné vegetace v městských parcích. Roční i měsíční varianta indexu (PRI_r , $PRI_{r,m}$) umožňuje posoudit nejen celkovou rizikovost, ale i sezónní dynamiku potenciální expozice.

Výpočty indexu potenciálního rizika (PRI_r) ukázaly rozdíly mezi jednotlivými městskými parky. Celkově se hodnoty indexu pohybovaly mezi 0,21 (Ostrava) a 0,32 (Brno) (Obr. 1). To naznačuje, že ze sledovaných lokalit je z hlediska alergenity dřevin nejrizikovější park v Brně, zatímco nejnižší hodnoty vykázal park v Ostravě. Hradec Králové se pohyboval na střední úrovni indexu (0,26). Tento výsledek odráží odlišnou druhovou skladbu parkových dřevin – v Brně se významně uplatňují druhy s vyšší alergenitou a delší dobou kvetení, zatímco v Ostravě dominuje lípa (*Tilia sp.*), která má i přes vysoký počet jedinců nízké druhové rizikové skóre.

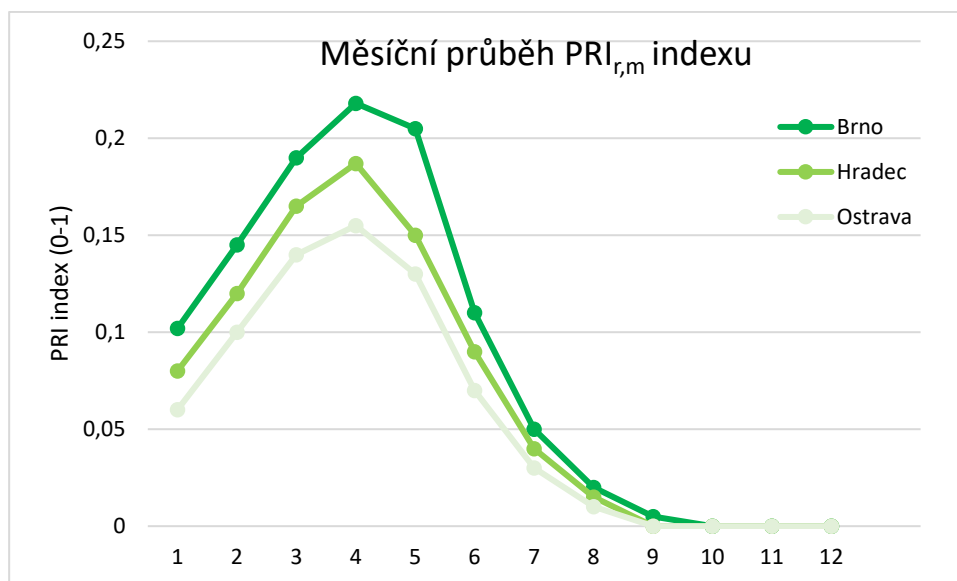


Obr. 1 Souhrnný roční index PRI_r třech modelových parků
Fig. 1 Summary annual PRI_r index of three model parks

Ve všech třech parcích se index zvyšoval od února/března, maxima dosáhl v dubnu a květnu, a poté prudce klesal na minimální hodnoty v letních měsících. V podzimním a zimním období byla alergenita prakticky nulová (Obr. 2). Sezónní průběh měsíčního indexu PRI ukázal, že nejvyšší pylová zátěž nastává ve všech třech městech během jarních měsíců, zejména v dubnu a květnu. V Brně se objevuje nejvýraznější maximum, související s vyšším zastoupením jasanů (*Fraxinus*), dubů (*Quercus*) a lísek (*Corylus*), tedy druhů s vyšší alergenitou a významným podílem větrosnubnosti. Hradec Králové vykazuje plošnější a méně intenzivní průběh, který poukazuje na rovnoměrnější rozložení pylové zátěže mezi více taxonů. V Ostravě je celková hodnota indexu nejnižší, avšak lokálně se zde projevuje vliv bříz (*Betula*), které způsobují výrazný nárůst hodnoty indexu v květnu. Celkově lze shrnout, že ačkoliv Ostrava vykazuje nejnižší celkové riziko, přítomnost silně alergenních druhů (zejména bříz) činí toto prostředí potenciálně problematickým pro citlivé jedince v období jejich kvetení. Naproti tomu Brno představuje z hlediska celoroční pylové zátěže nejrizikovější prostředí z analyzovaných měst. Zatímco souhrnný index PRI vyjadřuje celkovou míru pylové a alergenní zátěže v jednotlivých parcích, druhové rizikové skóre (r_i) umožňuje identifikovat konkrétní taxony, které k této zátěži nejvíce přispívají, a tím lépe porozumět rozdílům mezi jednotlivými městy i časovým průběhem rizika.

Analýza druhově rizikového skóre (r_i) ukázala, že ve všech třech hodnocených parcích se mezi nejvýznamnější rizikové taxony opakovaně zařazují druhy *Taxus baccata*, *Ulmus minor*, *Ailanthus altissima* a *Betula pendula*. V Brně dosahovaly nejvyšších hodnot r_i zejména *Taxus baccata* ($r_i = 0,75$; 244 jedinců), dále *Ulmus minor*, *Corylus avellana* a *Ailanthus altissima* se shodným skóre ($r_i = 0,75$), a rovněž *Betula pendula* ($r_i = 0,67$). Podobně v Hradci Králové byly jako rizikově nejvýznamnější identifikovány *Taxus baccata* ($r_i = 0,75$; 65 jedinců), doplněné o *Juniperus virginiana*, *Ailanthus altissima*, *Betula pendula* a *Quercus robur* ($r_i = 0,63$). V Ostravě pak dominoval opět *Taxus baccata* spolu s *Ulmus minor*, *Juniperus virginiana* a *Corylus avellana* (shodně $r_i = 0,75$), přičemž významným zdrojem pylového rizika byl rovněž *Platanus × hispanica* ($r_i = 0,67$).

Celkově lze konstatovat, že i když se zastoupení rizikových taxonů mezi městy částečně liší, opakovaný výskyt některých vysoce rizikových druhů (zejména *Taxus*, *Ulmus* a *Betula*) naznačuje jejich zásadní podíl na formování pylové a alergenní zátěže městského prostředí.



Obr. 2 Měsíční index $PRI_{r,m}$ třech modelových parků
Fig. 2 Monthly $PRI_{r,m}$ index of three model parks

Zajímavým výsledkem je, že ačkoliv se parky liší celkovou hodnotou indexu, časový průběh je velmi podobný (Obr. 2). To poukazuje na klíčový vliv fenologie dřevin – především rozšířených větrosnubných druhů, jejichž pyl je významným zdrojem alergenů.

V rámci výpočtu indexu PRI byly využity literární údaje o době kvetení jednotlivých taxonů, jejich alergenním potenciálu a typu opylení. Je však třeba zdůraznit, že fenologické charakteristiky nejsou statické – současné klimatické změny, zejména oteplování a vliv městského tepelného ostrova, vedou k posunům fenofází a mohou prodlužovat nebo naopak zkracovat délku kvetení (LI et al., 2007; LUEDELING et al., 2011; NEIL, WU, 2006). Tyto faktory mohou ovlivnit přesnost predikcí pylové zátěže. V evropském kontextu je navíc dobře zdokumentován jev tzv. „season creep“, tedy postupného posouvání fenologických fází do dřívějších období roku (MENZEL et al., 2006). V podmínkách měst může tento efekt probíhat ještě výrazněji než v přirozených ekosystémech.

Zároveň je nutné připomenout, že PRI je relativní index založený na druhové skladbě, opylení a fenologii, který nebere v úvahu další faktory prostředí. Nezahrnuje přímo meteorologické podmínky (teplotu, rychlost větru, srážky), prostorovou distribuci stromů v rámci parku, ani reálně naměřené koncentrace pylu v ovzduší. Jeho využití je proto nejvhodnější zejména ke srovnávání jednotlivých parků, k identifikaci relativních rozdílů mezi nimi a k vyhodnocení sezónních špiček pylové zátěže. Nepředstavuje však náhradu za pylový monitoring, ale spíše doplňkový nástroj umožňující prediktivní hodnocení potenciální rizikovosti druhového složení v městských parcích.

Výsledky naznačují, že při plánování městské zeleně by bylo vhodné omezit výsadbu vysoce alergenních druhů, zejména těch s maximem kvetení v dubnu a květnu, kdy se pylová zátěž kumuluje a dochází k nejvyššímu riziku pro citlivou část populace. Vhodným opatřením je rovněž kombinace druhů s rozdílnou dobou kvetení, což umožňuje rozložit pylovou expozici v čase a snížit koncentrace v kritických měsících (CARIÑANOS, CASARES-PORCEL 2011). Zároveň je nezbytné zohlednit i prostorové umístění dřevin – například v blízkosti chodníků, zastávek nebo obytných budov, kde se lidé zdržují delší dobu, může být riziko expozice výrazně zvýšeno (D'AMATO et al. 2007; CARIÑANOS et al. 2016). Přístup, který kombinuje druhovou skladbu, fenologii a prostorové aspekty výsadby, je proto důležitým nástrojem pro podporu veřejného zdraví a zlepšování kvality života ve městech.

ZÁVĚR

Výsledky ukázaly, že hodnoty indexu potenciálního rizika (PRI) se mezi parky liší – nejvyšší byly zaznamenány v Brně, nejnižší v Ostravě, přičemž ve všech lokalitách dochází k sezónnímu maximu v dubnu a květnu. Klíčovým faktorem rizika jsou vysoce alergenní, větrosnubné druhy. Index PRI je relativní ukazatel založený na druhové skladbě, délce kvetení a typu opylení. Nepočítá s meteorologickými vlivy ani prostorovým rozmístěním stromů, a proto je vhodný zejména pro srovnání parků a identifikaci sezónních špiček, nikoli jako náhrada pylového monitoringu. Pro plánování městské zeleně se doporučuje omezit podíl vysoce alergenních druhů, podporovat pestrost doby kvetení a zohlednit umístění stromů vzhledem k frekventovaným plochám.

Další výzkum by se mohl zaměřit na rozšíření hodnocení o reálně měřené koncentrace pylu v ovzduší, fenologická pozorování a analýzu vlivu mikroklimatických podmínek. Vhodné by také bylo sledovat prostorové rozmístění stromů v parcích a jejich vztah k místům, kde se lidé nejčastěji pohybují. Tyto kroky by mohly přispět k

přesnějšímu odhadu pylové zátěže a nabídnout podklady pro citlivější plánování městské zeleně s ohledem na zdraví obyvatel.

Poděkování

Autoři děkují Technologické agentuře ČR za finanční podporu při řešení projektu SS07020449 „Omezení negativních dopadů meteorologických extrémů (teploty, větru a srážek) na veřejné zdraví a životní prostředí ve velkých aglomeracích“. Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život. Tento projekt je financován v rámci Národního plánu obnovy z evropského Nástroje pro oživení a odolnost.

LITERATURA

- CARIÑANOS, P. et al. 2019. Estimation of the Allergenic Potential of Urban Trees and Urban Parks: Towards the Healthy Design of Urban Green Spaces of the Future. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(8), 1357. DOI: 10.3390/ijerph16081357.
- CARIÑANOS, P., CALLEJA, J. A., ALONSO, J., BELMONTE, J., DE LA GUARDIA, C. D., et al. 2016. Assessing allergenicity in urban parks: A nature-based solution to reduce the impact on public health. *Environmental Research*, 147, 375–383.
- CARIÑANOS, P., CASARES-PORCEL, M. 2011. Urban green zones and related pollen allergy: A review. *Some perspectives for future planning and management*. *Landscape and Urban Planning*, 101(3), 205–214.
- CARIÑANOS, P., CALLEJA, J. A., ALONSO, J., BELMONTE, J., DE LA GUARDIA, C. D., et al. 2017. Assessing allergenicity of urban green spaces: development of the Urban Green Zone Allergenicity Index (UGZA). *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 295–304.
- D'AMATO, G., CECCHI, L., BONINI, S., NUNES, C., ANNESI-MAESANO, I., et al. 2007. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*, 62(9), 976–990.
- LI, X., SHEN, Y., WANG, S. 2007. Climate change and flowering phenology in plants: a review. *Environmental Research Letters*. 2(3), s. 1–9. ISSN 1748-9326.
- LUEDELING, E., ZHANG, M., GIRVETZ, E. H. 2011. Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950–2009. *PLoS ONE*. 6(5), e20155. ISSN 1932-6203.
- MENZEL, A. et al. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*. 12(10), s. 1969–1976. ISSN 1365-2486.
- MOTHES-LUKSCH, N., VRTALA, S., NEUMANN, C., MÜLLER, U., HARTL, A., WIDHIARTO, T., VALENTA, R. 2011. Valency, potency, and allergenic activity of isoforms of the major birch pollen allergen Bet v 1. *Allergy*, 66(11): 1418–1427. ISSN 0105-4538.
- NEIL, K., WU, J. 2006. Effects of urbanization on plant flowering phenology: A review. *Urban Ecosystems*. 9, s. 243–257. ISSN 1573-1642.
- NIELSEN, A. B., VAN DEN BOSCH, M., MARUTHAVEERAN, S., VAN DEN BOSCH, C. K. 2014. Species richness in urban parks and its drivers: A review of empirical evidence. *Urban Ecosystems*, 17(1): 305–327. ISSN 1083-8155.
- ŠAULIENE, I., ŠUKIENĖ, L., RADZEVICIUS, A., et al. 2023. Variation of airborne pollen concentrations in response to climate change in Europe: a review. *Science of the Total Environment*, 858: 159755. ISSN 0048-9697.
- VALENTA, R., NIEDERBERGER, V., GRAF, D., et al. 2010. Molecular and immunological characterization of allergens from birch pollen and related species. *International Archives of Allergy and Immunology*, 151(2): 103–112. ISSN 1018-2438.
- VANHAELEN, M., VERVAET, C., PIETERS, L., et al. 2002. Taxus poisoning: a review. *Phytotherapy Research*, 16(5): 478–486. ISSN 0951-418X.
- ZAHRAVNÍKOVÁ, E. et al. 2023. Temporal variation of allergenic potential in urban parks during the vegetation period: a case study from Bratislava, Slovakia. *Environmental Science and Pollution Research International*. DOI: 10.1007/s11356-023-29454-5.

VÝSADBA OVOCNÝCH DŘEVIN V MĚSTSKÉ AGLOMERACI – VLIV NA OMEZENÍ NEGATIVNÍCH DOPADŮ KLIMATICKÝCH EXTRÉMŮ

Jiří SEDLÁK¹ – Tomáš BÍLEK¹ – Aleš VÁVRA¹ – Jaroslav ROŽNOVSKÝ² – Petr SALAŠ³

¹Výzkumný a šlechtitelský ústav ovocnářský Holovousy s. r. o., Holovousy 129, 508 01 Hořice; jiri.sedlak@vsuo.cz, tomas.bilek@vsuo.cz, ales.vavra@vsuo.cz

²Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 43, 616 67 Brno; jaroslav.roznovsky@chmi.cz

³Ústav šlechtění a množení zahradnických rostlin, Zahradnická fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Valtická 337, 691 44 Lednice; petr.salas@mendelu.cz

ABSTRACT

Sedlák, J., Bílek, T., Vávra, A., Rožnovský, J., Salaš, P.: Planting fruit trees in an urban agglomeration – influence on limiting the negative impacts of climate extremes

In the context of climate change and increasing extremes (heat waves, droughts, heavy rain), urban green infrastructure is a key adaptation strategy. Fruit trees provide cooling shade, improve air quality, enhance water retention and offer social benefits (nutrition, community gardens). We report on a pilot urban planting of diverse fruit trees (apple, pear, plum, cherry, mulberry) and small fruits (currant, gooseberry, aronia, honeysuckle, etc.) in Hradec Králové under the TAČR MITEXTREM program. The design uses three orchard blocks (A–C) and solitary high-stem trees, combining quarter-standard trees and double-row shrubs. Container-grown and bare-root stock were planted with water-retentive hydrogel additives. We discuss the selected species and cultivars, planting layout and the anticipated benefits for urban climate resilience, landscape character and community well-being. The planting is expected to moderate microclimate (local cooling, reduced temperature fluctuations), improve stormwater infiltration and support urban biodiversity (pollinators, insects).

Key words: urban fruit trees; climate adaptation; ecosystem services; microclimate; biodiversity

ÚVOD

Klimatické změny prohlubují extrémní povětrnostní jevy (dlouhotrvající sucha, vlny veder, přivalové srážky), které negativně ovlivňují městské prostředí a kvalitu života. Z analýzy teploty vzduchu z měření klimatologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (dále jen ČHMÚ) za období 1961 až 2020 jednoznačně vyplývá, že průměrné roční teploty vzduchu, ale i jednotlivých ročních období a měsíců statisticky prokazatelně rostou (BRÁZDIL et al., 2024). Jestliže povrch měst tvoří rozsáhlé plochy umělých povrchů, jako asfalt, beton apod. místo zeleně, logicky se ve městech zvyšují teploty vzduchu. Jde o tzv. tepelný ostrov měst, kdy se vyskytují vyšší teploty vzduchu oproti okolní krajině. Jestliže se roční úhrny srážek za období 1961 až 2020 významně nemění, jsou splněné podmínky pro častější výskyty sucha (ROŽNOVSKÝ a CHALUPNÍKOVÁ, 2025). Zeleně ve městech – zejména stromy – mají významný adaptační potenciál: absorbují znečišťující látky, snižují odtok dešťové vody a chlazením prostřednictvím evapotranspirace snižují teplotu vzduchu (RAHMAN et al., 2020; LIANG a HUANG, 2023). Ovocné dřeviny přidávají k těmto funkcím i produkci jedlých plodů a posilují sociální vazby (CLARK a NICHOLAS 2013). V České republice patří ovocné rostliny mezi významné zemědělské plodiny s dlouhou tradicí; kromě nutričních kvalit jsou nedílnou součástí krajiny a ekosystémů. Zároveň mohou sloužit jako zdroj vitamínů pro místní komunity či prvky komunitních zahrad. Cílem tohoto článku je popsat pilotní výsadbu ovocných dřevin v aglomeraci Hradce Králové realizovanou v rámci projektu MITEXTREM (TAČR) a zhodnotit ekologický, krajinářský a společenský přínos této výsadby pro omezení dopadů klimatických extrémů.

MATERIÁL A METODY

V městské aglomeraci Hradec Králové byla uskutečněna v průběhu řešení projektu v roce 2024 první fáze založení pilotní výsadby ovocných dřevin v městském prostředí v lokalitě mezi ulicemi Na Potoce a panelovou zástavbou na třídě Edvarda Beneše. Plocha o rozloze 1 ha byla vytipována z více kandidátních lokalit a vybrána jako

vhodná pro výsadbu ovocných dřevin v rámci systému podnětů občanů Hradce Králové „Municipalis“. Plocha byla v minulosti používána jako zařízení staveniště při výstavbě panelového sídliště. Zástupci občanských sdružení a zájemci z řad občanů v této lokalitě byli s plánem výsadby před vlastní realizací seznámeni formou vzdělávací přednášky, která v sobě zahrnovala i zdůraznění pozitivního vlivu ovocných dřevin v omezení negativních dopadů klimatických extrémů v městských aglomeracích.

Rostlinný materiál kmenných tvarů ovocných dřevin a keřů jako hlavní vegetační prvek byl dopěstován ve VŠÚO Holovousy s.r.o. Ve výsadbě byly použity vzrostlé kontejnerované a prostokořenné formy ovocných dřevin pro co nejrychlejší dosažení plánovaných projektových výsledků.

Vlastní výsadba byla realizována ve formě tří ucelených bloků označených A, B a C (obrázek 1). V těchto blocích se nachází dvě řady (bloky A, B) nebo tři řady (blok C) nižších kmenných tvarů ve formě čtvrtkmenů odrůd jabloní a slivoní. Na vnějších částech těchto bloků byly vysazeny řady keřů, ve kterých je zastoupen černý a bílý rybíz, angrešt, moruše černá, aronie, josta a jedlý muchovník. Solitérní prvky (vysokokmeny) tvoří po stranách těchto bloků třešně, hrušně a líska. V lokalitě bylo v roce 2024 vysazeno celkem 15 vysokokmenů, 54 čtvrtkmenů a 111 keřů. Z hlediska omezení šíření chorob a škůdců byly cíleně vysazeny v lokalitě různé adaptabilní, z hlediska agrotechniky nenáročné druhy a odrůdy ovocných plodin.

Použité druhy a odrůdy ovocných dřevin zahrnují široký sortiment přizpůsobený městskému prostředí. Mezi vysazenými stromy byly zejména:

Jabloně: ‘Rubinstep’, ‘Angold’, ‘Meteor’, ‘Judita’, ‘Kalvil červený podzimní’, ‘Žďárské úrodné’, ‘Berlepschova reneta’.

Slivoně: ‘Katinka’, ‘Veeblue’, ‘Kulinaria’, ‘Valjevka’, ‘Jojo’.

Hrušně: ‘Konference’, ‘Williamsova červená’, ‘Bohemica’.

Třešně: ‘Kordia’, ‘Tamara’, ‘Kasandra’.

Moruše: ‘Illinois Everbearing’, ‘Milanowek’.

Rybízy: černý ‘Moravia’, bílý ‘Blanka’.

Angrešty: zelený ‘Mucurines’, červený ‘Kaptivator’, žlutý ‘Hinnonmäki žlutý’.

Aronie: ‘Nero’.

Zimolez kamčatský: ‘Amur’.

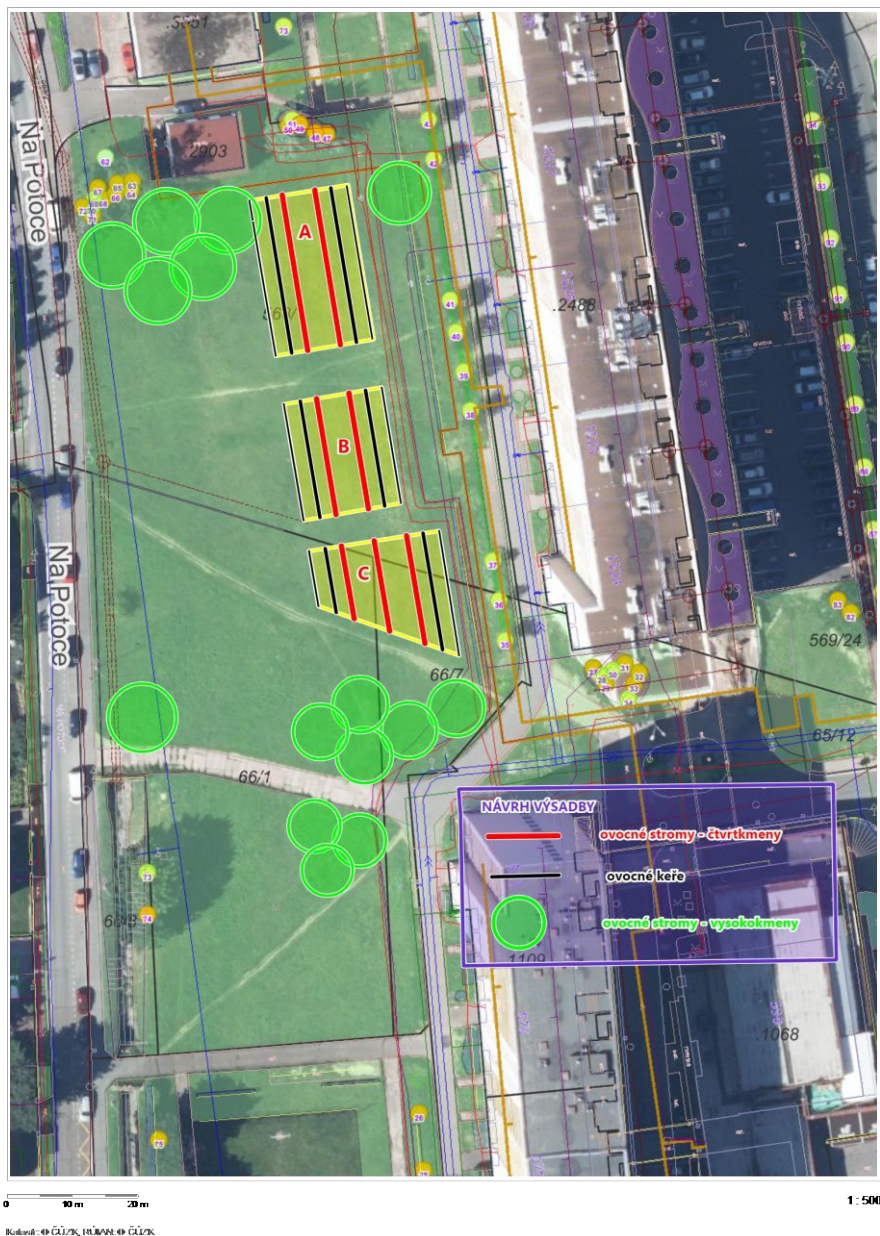
Muchovník (Amelanchier): ‘Amela’.

Líska: ‘Lombardská červená’.

Před vlastní výsadbou byly vykopány v místě vybraných výsadbových bloků a stanovišť vysokokmenů půdní sondy a uskutečněn odběr vzorků půdy pro chemické analýzy, tj. stanovení pH a prvků v půdě. Analýzy byly provedeny ve VŠÚO Holovousy dále v textu uvedenými metodami dle jednotného pracovního postupu (JJP) definovaného dle Ústředního kontrolního a zkušebního ústavu zemědělského (ÚKZÚZ) – analýza půd (Zbíral a Honsa 2010).

Pro stanovení prvkového složení byly půdní vzorky ze zkoumané lokality nejprve zbaveny zbytku pevných materiálů (kamenů, dřevin, aj.), dále předsušeny na vzduchu a homogenizovány na analytickém síťovacím přístroji na definovanou velikost částic. Výživové prvky (Mg, P, K, Ca, Al, Mn, Fe, Cu, Zn) byly stanoveny v 10 g vzorku v extraktu připraveném dle metody Melich III (Zbíral a Honsa 2010) a následně chemicky analyzovány. V případě stanovení těžkých kovů (Cr, As, Cd, Pb) byla navážka 0,25 g rozložena v mikrovlnném zařízení (Discover SP-D 80, CEM, USA) za zvýšené teploty a tlaku v přítomnosti 6 ml koncentrované kyseliny dusičné (určené pro stopové analýzy) při definovaném teplotním programu (200 °C, 4 min). Všechny výše zmíněné prvky vyjma rtuti byly následně analyzovány hmotnostní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS, Agilent 7900, Agilent Technologies Inc., USA). Rtuť byla stanovována na jednoúčelovém atomovém absorpčním spektrometru AMA 254 ve vzorcích v pevné formě bez potřeby mikrovlnného rozkladu.

Všechny použité chemikálie a standardy byly určeny pro příslušné analýzy a splňovaly požadavky norem ISO/IEC 17025 a ISO 17034. Laboratoř zároveň pracuje v souladu s normou ISO/IEC 17025. Analytické metody byly validovány pomocí certifikovaného referenčního materiálu AN-ZP02.



Obr. 1 Grafické znázornění realizované výsadby
Fig. 1 Graphic visualization of implemented planting

Před výsadbou bylo realizováno vylepšení půdních podmínek i částečným návozem kvalitního půdního substrátu do bezprostředního okolí stromů a keřů před výsadbou. Jako inovativní prvek byl ke kořenům při výsadbě aplikován hydroabsorbent Hydrogel® pro zlepšení vláhových poměrů v oblasti kořenů ovocných dřevin a granulovaná neupravená ovčí vlna, která funguje jako zdroj živin, zachycuje vodu v půdě a půdu i provzdušňuje. Rovněž obohacuje půdu o organickou hmotu. Na místě je instalována meteorostanice Zahradnické fakulty MENDELU monitoringu lokálního klimatu (teplota, vlhkost, vítr, srážky) pod nově se tvořící korunou stromů. Naměřené údaje budou vyhodnoceny i ve vazbě na měření klimatologické stanice ČHMÚ v Hradci Králové. Tímto vyhodnocením bude možné určit rozdíly mezi podmínkami městského klimatu včetně vlivu výsadby a meteorologickými podmínkami klasického měření na klimatologické stanici ČHMÚ.

Po výsadbě byla zajištěna běžná péče (zálivka, fixace kůly u kmenných tvarů, základní výchovný řez), jak je obvyklé u městských alejí (obrázek 2).



Obr. 2 Běžná péče po výsadbě
Fig. 3 Management after planting

VÝSLEDKY A DISKUSE

Před výsadbou provedené půdní analýzy ukázaly vhodné podmínky pro pěstování ovocných dřevin. Hodnoty pH půdy se pohybovaly v rozmezí 6,21–7,62, což odpovídá optimálnímu rozsahu pro růst většiny ovocných dřevin (BRADY & WEIL, 2017). Podle literatury je optimální pH pro ovocné stromy v rozmezí 6,0–7,0, přičemž při pH 6,0–6,5 je nejvyšší dostupnost výživových makroprvků jako je dusík, draslík, vápník a hořčík (HAVLIN et al., 2014). Naměřené hodnoty tedy poskytují vhodné prostředí pro příjem živin kořenovými systémy vysazených dřevin. Podobné výsledky pH zaznamenali v městském prostředí i ARÁN et al. (2025).

Analýza těžkých kovů prokázala, že všechny naměřené koncentrace jsou výrazně pod mezními hodnotami stanovenými nařízením vlády č. 80/2023 Sb. Koncentrace olova se pohybovaly v rozmezí 11,07–30,88 mg/kg (limit 100 mg/kg), kadmia 0,07–0,45 mg/kg (limit 0,4 mg/kg -- pouze jeden vzorek mírně překročil limit), chromu 10,09–22,17 mg/kg (limit 100 mg/kg), arsenu 2,74–5,91 mg/kg (limit 30 mg/kg) a rtuti 0,03–0,13 mg/kg (limit 0,6 mg/kg). Tyto hodnoty potvrzují bezpečnost lokality pro pěstování ovocných dřevin, což je v souladu se studiemi, které ukazují, že koncentrace těžkých kovů v plodech stromových ovocných druhů jsou velmi nízké i při pěstování na kontaminovaných půdách (MITCHELL et al., 2014).

Minerální složení půdy ukázalo dostatečné zásoby základních živin. Obsah vápníku (1 221–9 910 mg/kg) a hořčíku (58–259 mg/kg) je v optimálním rozmezí pro růst ovocných dřevin. Obsah fosforu se pohyboval v široké škále (15–200 mg/kg), přičemž vyšší hodnoty byly zaznamenány v některých vzorcích, což může být výsledkem předchozí činnosti na lokalitě.

Všechny vysazené dřeviny přezimovaly a na jaře vyrašily, což potvrzuje vhodnost kontejnerového materiálu a použitých půdních vylepšení (pomocné půdní látky). Struktura výsadby (bloky A--C s rostlinami a výsadbové řady keřů) vytváří pestrou mozaiku habitatů. Z ekologického hlediska lze očekávat řadu pozitivních vlivů: květy ovocných stromů a keřů podporují hmyzí opylovače (včely, motýly), zatímco plody slouží jako potrava ptákům a drobné zvěři. Studie z pražských sadů dokazují, že řízená údržba (sečení, péče) tradičních ovocných sadů významně zvyšuje druhovou pestrost hmyzu, zatímco stagnace nebo opuštění sadů naopak vede k poklesu biodiverzity (RADA et al., 2022). Proto je aktivní péče o městské ovocné sady klíčová pro udržení hmyzí a rostlinné rozmanitosti. Z mikroklimatického hlediska stromy ochlazují okolí stínem a transpirací – podle literatury mohou husté aleje snižovat teplotu vzduchu o několik stupňů při nadměrném oteplení (PATAKI et al., 2021). Výsadbou liniových „klimatických prvků“ (zástěny stromů a keřů) se mění proudění vzduchu a akumulace sněhu: stromy blokují letní žáru a vysušující vítr, zatímco v zimě udržují sníh na místě, současně zvyšují relativní vlhkost vzduchu. To vede ke zmírnění extrémních výkyvů denních a nočních teplot a redukuje erozi i povrchový odtok vody. Tím napomáhají zadržování vody v půdě a stabilizaci krajiny podle dřívějších poznatků (BARTENS et al., 2009).

Krajinářsky výsadba obnovuje tradiční ráz sadů a alejí, které z městských prostředí vymizely (obrázek 3). Javory, lípy a ovocné stromy v ulicích či sadech působí esteticky a podněcují vnímání střídání ročních období.

Květy ovocných stromů i barva jejich plodů obohacují městský prostor. Společenský přínos je rovněž významný – výsadba zapojuje obyvatele, kteří mohou ve společných sadech sklízet ovoce a učit se o přírodě. Ovoce z městských sadů poskytuje zdroj vitamínů pro místní komunity a podporuje vznik komunitních zahrad. Kombinace ovocných dřevin v zeleni města přináší mnohohrstevnaté benefity: ekologické (biodiverzita, mikroklima, zadržení vody), krajinářské (kulturní krajinné prvky, estetika) a společenské (výživa, vzdělávání, komunitní vazby). Současná předběžná pozorování souhlasí s literaturou, že městské stromové aleje mohou účinně přispívat k adaptaci na klimatickou změnu (PATAKI et al., 2021).



Obr. 4 Realizace výsadby v městském prostředí
Fig. 3 Implementation of planting in urban environment

ZÁVĚR

Pilotní výsadba ovocných dřevin v Hradci Králové představuje perspektivní přístup k adaptaci městského prostředí na klimatickou změnu. Cílené začleňování ovocných sadů do městské zeleně má v budoucnu potenciál přispívat ke zmírnění negativních dopadů klimatických extrémů prostřednictvím ochlazování okolí, stabilizace půdy a zvýšení retence vody. Kromě ekologických funkcí tyto výsadby obohacují městské prostředí o produkci potravin a posilují vztah obyvatel k přírodě.

Dlouhodobé sledování bude zaměřeno na kvantifikaci vlivů výsadby na teplotní a vlhkostní poměry, kvalitu ovzduší a sociální interakce v lokalitě. Meteorologická měření umožní posoudit rozdíly mezi porostním klimatem a standardními meteorologickými stanicemi. Výsadba bude v následujících letech doplněna o další vegetační prvky a budou aplikována agrotechnická opatření přizpůsobená specifickým podmínkám městské aglomerace.

Součástí projektu jsou i edukační aktivity zaměřené na zvyšování povědomí obyvatel o významu zelené infrastruktury s ovocnými dřevinami pro adaptaci měst na klimatické změny.

Poděkování

Projekt „Omezení negativních dopadů meteorologických extrémů na zdraví a životní prostředí ve velkých aglomeracích“ (TAČR SS07020449, MITEXTREM), jehož řešením vznikl tento článek, je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostorů pro život.

LITERATURA

- ARÁN, D.; SANTOS, O.; FETEIRA-SANTOS, R.; BENHALIMA, Y.; SANTOS, E.S. 2025. Soil Quality and Trace Element Risk in Urban and Rural Kitchen Gardens: A Comparative Analysis. *Toxics* 13, 697. <https://doi.org/10.3390/toxics13080697>
- BARTENS, J., DAY, S. D., HARRIS, J. R., et al. 2009. Can urban tree roots improve infiltration through compacted sub-soil? *Journal of Environmental Quality*, 38(4), 1226–1234.

BRADY, N. C., & WEIL, R. R. 2017. The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson.

BRÁZDIL, R.; ZAHRADNÍČEK, P.; DOBROVOLNÝ, P.; ŘEHOŘ, J.; TRNKA, M.; LHOTKA, O.; ŠTĚPÁNEK, P. 2022. Circulation and Climate Variability in the Czech Republic between 1961 and 2020: A Comparison of Changes for Two Normal Periods. . Atmosphere 13(1): Article number 137.

CLARK, K. H., & NICHOLAS, K. A. 2013. Introducing Urban Food Forestry: A Multifunctional Approach to Increase Food Security and Provide Ecosystem Services. Landscape Ecology, 28(9), 1649–1669. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9903-z>

HAVLIN, J. L., TISDALE, S. L., NELSON, W. L., & BEATON, J. D. 2014. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (8th ed.).

LIANG, D., & HUANG, G. 2023. Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. Land, 12(9), 1699. <https://doi.org/10.3390/land12091699>

MITCHELL, R.G.; SPLIETHOFF, H.M.; RIBAUDO, L.N.; LOPP, D.M.; SHAYLER, H.A.; MARQUEZ-BRAVO, L.G.; LAMBERT, V.T.; FERENZ, G.S.; RUSSELL-ANELLI, J.M.; STONE, E.B.; et al. 2014. Lead (Pb) and other metals in New York City community garden soils: Factors influencing contaminant distributions. Environ. Pollut. 187, 162–169.

RAHMAN, M. A., STRATOPOULOS, L. M. F., MOSER-REISCHL, A., ZÖLCH, T., HÄBERLE, K. H., RÖTZER, T., PRETZSCH, H., & PAULEIT, S. 2020. Traits of Trees for Cooling Urban Heat Islands: A Meta-Analysis. Building and Environment, 170, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>

NOWAK, D. J., CRANE, D. E., & STEVENS, J. C. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. Urban Forestry & Urban Greening, 4(3-4), 115–123.

PATAKI, D. E., ALBERTI, M., CADENASSO, M. L., et al. 2021. The benefits and limits of urban tree planting for environmental and human health. Frontiers in Ecology and Evolution, 9:603757.

RADA, P., BOGUSCH, P., PECH, P., et al. 2022. Active management of urban fruit orchard meadows is important for insect diversity. Forest Ecology and Management (preprint, 2021).

ROŽNOVSKÝ, J. a CHALUPNÍKOVÁ, B. 2025. Mimořádné srážky v roce 2024. In: Electronic book: HYDROLOGICAL RESPONSE TO CHANGING NATURAL CONDITIONS, UH SAV, Bratislava, 92-97.

ZBÍRAL, J. a HONSA, I. 2010. Analýza půd I. Vyd. 3., přeprac. a rozš. Jednotné pracovní postupy. Brno: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, ISBN 978-80-7401-031-6.

FENOLOGICKÉ FÁZE VYBRANÝCH LESNÍCH DŘEVIN: VÝSLEDKY DLOUHODOBÉHO SLEDOVÁNÍ

Andrea Srubková¹, Jaroslav Rožnovský^{1,2}

¹Czech Hydrometeorological department, branch Brno, Křofťova 43, 616 67 Brno, Czech Republic

²Department of Breeding and Propagation of Horticultural Plants, Faculty of Horticulture, Mendel University in Brno
Valtická 337, 691 44 Lednice, Czech Republic

ABSTRACT

Srubková A., Rožnovský J.: Phenological Phases of Selected Forest Tree Species: Results of Long-Term Monitoring

Phenology, the study of the timing of recurring biological events, is a key tool for assessing the impact of climate change on forest ecosystems. This study monitored three important tree species in Central European forests – small-leaved lime (*Tilia cordata*), pedunculate oak (*Quercus robur*) and silver birch (*Betula pendula*) – at the Frýdlant, Sobotín, and Běleč nad Orlicí phenological stations, using data collected over a period of more than thirty years. The aim was to compare their phenological rhythms, evaluate their ecological roles, and assess the effects of climate change on the timing of their developmental phases. The observations show that birch flushes and flowers very early, providing an early source of pollen but facing a higher risk of late frosts. Pedunculate oak exhibits medium-late phenophases, sensitive to temperature fluctuations, while its phenology is crucial for many insect species. Small-leaved lime leafs out later and its summer flowering provides an important nectar source for pollinators. These contrasting phenological strategies ensure a **temporal continuity of ecological functions** within the forest, but at the same time make the species differently vulnerable to climate change. The results confirm the importance of phenological monitoring for forest ecology, biodiversity conservation, and adaptive forest management. Monitoring the phenophases of lime, oak, and birch provides valuable insights for predicting the future development of forests stands and their resilience under changing environmental conditions.

Key words: forests, phenology, climate change

ÚVOD

Fenologie, vědní disciplína zabývající se studiem časového průběhu periodicky opakujících se životních projevů (HÁJKOVÁ et al., 2012), představuje významný nástroj pro studium ekosystémů a jejich vazby na klimatické a environmentální podmínky. Sledování fenologických fází u lesních dřevin - rašení, kvetení, plodnosti, opadu listů apod. má zásadní význam z hlediska biodiverzity, ekologie lesa, tak i z pohledu hospodářského využití. Časování těchto fází totiž ovlivňuje dostupnost potravy pro hmyz, ptáky a savce, určuje průběh sukcese a přirozené obnovy porostů a odráží míru adaptability jednotlivých druhů na měnící se klimatické podmínky. V posledních letech se fenologický výzkum stává stále důležitějším, neboť dřeviny patří mezi nejcitlivější indikátory probíhající klimatické změny. Jakékoliv výkyvy a posuny fenologického rytmu mohou vést k nesouladu, tedy situaci, kdy se důležité články potravních řetězců a ekologické interakce časově rozpojí. Znalost fenologických procesů hlavních lesních dřevin, bylin i živočichů na území České republiky je klíčová pro pochopení fungování ekosystémů a predikci budoucího vývoje porostů (HÁJKOVÁ et al., 2012; SCHWARTZ, MARK, 2013).

Cílem práce je analýza dlouhodobého sledování fenologických fází u vybraných lesních dřevin České republiky, porovnání dat, zdůraznění dopadů možných posunů fenofází, vysvětlení rolí dřevin v ekosystému a poukázání na jejich ekologické a praktické souvislosti.

MATERIÁL A METODY

Metody

S ohledem na orientaci okolo ekologie lesa a jeho souvislosti, byly pro hodnocení vybrány lesní dřeviny – lípa srdčitá, bříza bělokorá a dub letní a jejich fenologické fáze: rašení, první listy (10%, 50%, 100%), plné olistění (100%), žloutnutí listů (10%, 100%) a opad listů (100%). Zpracovaná data pocházejí z databáze Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Tato data byla zaznamenána na základě pozorování provedených v rámci

sítě fenologických stanic podle metodiky uvedené v příručce Návod pro činnost fenologických stanic, metodická směrnice č. 1 – Lesní dřeviny.

Pro tuto studii byly vybrány fenologické stanice v Bělči nad Orlicí, Frýdlantu a Sobotíně. Data jsou analyzována od roku 1991-2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín). Stanice Frýdlant poskytuje data dřevin od roku 1997 až dodnes, s výjimkou dubu letního, který byl z hlediska špatného zdravotního stavu pokácen, a poslední údaje jsou z roku 2023. Zpracování dat proběhlo pomocí standardních statistických metod.

Fenologická stanice Běleč nad Orlicí se nachází v Královéhradeckém kraji v nadmořské výšce 241 m. Stanice Sobotín spadá do Olomouckého kraje a je umístěná v nadmořské výšce 425 m. Stanice Frýdlant se nachází v Libereckém kraji v nadmořské výšce 345 m. Zkoumané dřeviny jsou na každé stanici orientované na jinou světovou stranu, nachází se buď na rovině, nebo v mírném svahu, ale všechny mají stejně dobré světelné podmínky.

Materiál

Analýza dat proběhla v rámci dílčího zpracování projektu QL24020351: Aktualizace Lesnicko-typologického klasifikačního systému, kde jsou monitorovány lokality Doksy, Ještěd, Chlum-Opočno, Loštice a Ostravice. Pro tyto lokality byly vybrány nejbližší fenologické stanice lesních dřevin, a to již zmíněné Běleč nad Orlicí (Chlum-Opočno), Frýdlant (Doksy a Ještěd) a Sobotín (Loštice).

Bříza bělokorá - tento anemochorní druh je rozšířen na celém území České republiky. Jedná se o nenáročnou dřevinu, která se nachází jako příměs ve všech typech lesních porostů (Coufal et al., 2004; Hejný, Slavík et al., 2003). Bříza bělokorá je významnou, rychle rostoucí pionýrskou dřevinou a patří k prvním stromům, které na jaře raší. Díky citlivosti na jarní mrazy a sucho lze sledovat dopady extrémů počasí a dá se označit za citlivý bioindikátor klimatických změn (JONCZAK et al., 2020). Přestože má v krajině tento strom významnou roli, řadí se z alergologického pohledu mezi význačné rané alergenů a alergicitu pylu je velmi vysoká. Společně s dubem a lípou dokonce způsobuje zkříženou reaktivitu. V rámci fenologického pozorování jsou podle metodiky ČHMÚ u břízy bělokoré sledovány následující fenofáze: rašení, první listy, plné olistění, butonizace, počátek kvetení, konec kvetení, tvorba pupenů, dřevnatění výhonů, žloutnutí listů, opad listů a zralost plodů. V síti lesních fenologických stanic ČHMÚ jsou břízy v minimálním počtu dvou jedinců monitorovány v nadmořských výškách od 155 m po 1102 m na rovině či mírném svahu (HÁJKOVÁ et al., 2012).

Lípa srdčitá - tato dlouhověká dřevina se vyskytuje hojně v lesích České republiky jako příměs od nížin až po pahorkatiny. Lípa je středně náročný strom a vyznačuje se velkou přizpůsobivostí klimatickým vlivům. Oproti bříze nebo dubu raší později a poskytuje tak zásadní zdroj nektaru a pylu pro opylovače, což udržuje potravní kontinuitu v ekosystému. V rámci fenologického pozorování jsou podle metodiky ČHMÚ u lípy srdčité sledovány následující fenofáze: rašení, první listy, plné olistění, butonizace, počátek kvetení, konec kvetení, tvorba pupenů, počátek fruktifikace, dřevnatění výhonů, žloutnutí listů, opad listů a zralost plodů. V síti lesních fenologických stanic ČHMÚ jsou lípy monitorovány v nadmořských výškách od 155 m po 820 m na rovině či mírném svahu na velmi světlých stanovištích (HÁJKOVÁ et al., 2012; DE JAEGERE et al., 2016).

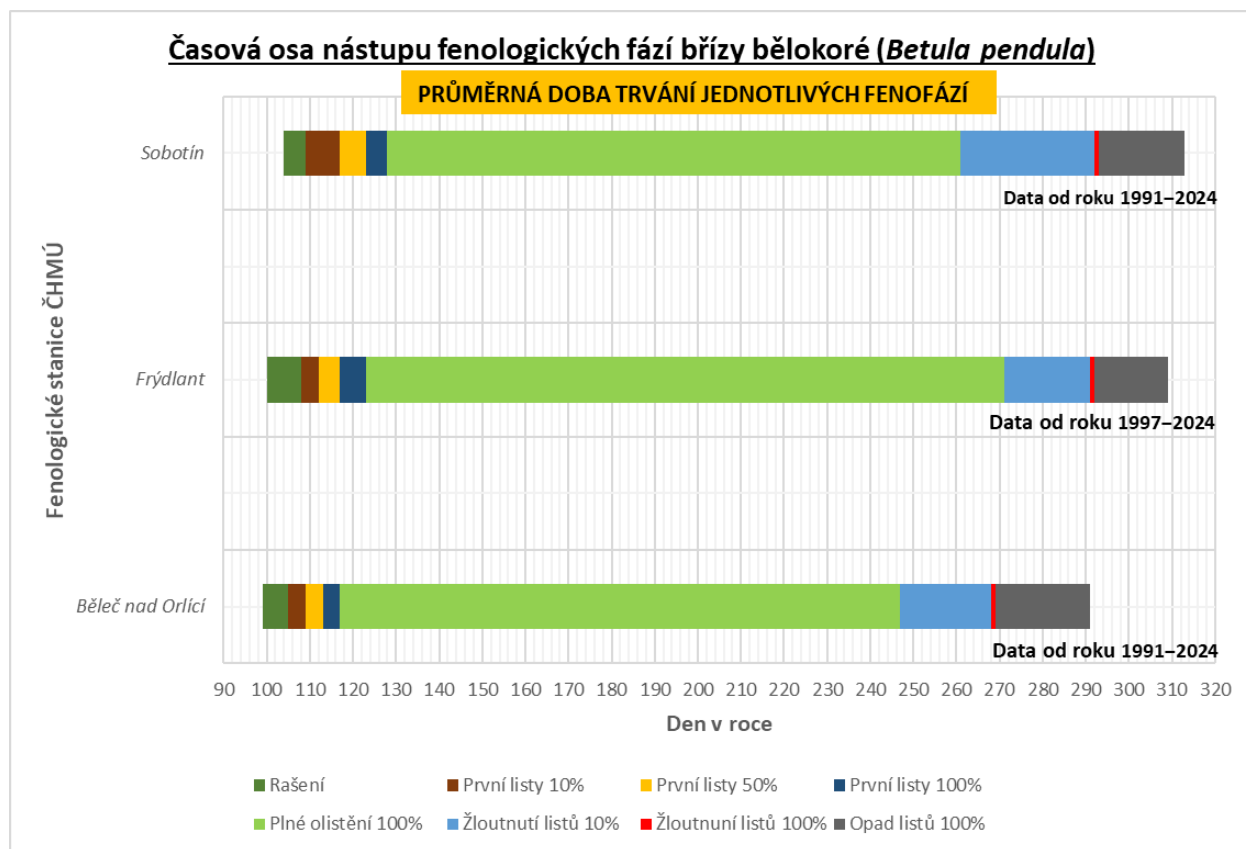
Dub letní - patří k našim nejmohutnějším dřevinám a roste na většině území České republiky s těžištěm výskytu převážně v nížinných lužních lesích a pahorkatinových doubravách (Hejný, Slavík et al., 2003). Na dubech žije největší množství hmyzu ze všech našich stromů a lze jej označit jako ekologický pilíř pro ptáky, savce i další organismy. Je dlouhověký a má hluboký kořenový systém, který pomáhá zadržovat půdu a zlepšuje koloběh vody. Z fenologického hlediska se jedná o středně raně rašící dřevinu, jež je citlivá k pozdním mrazům. Z důvodů reakcí na jarní teploty je dobrým ukazatelem klimatických změn v dlouhodobém časovém horizontu (CARVALHO, 2012). V rámci fenologického pozorování jsou podle metodiky ČHMÚ u dubu letního sledovány následující fenofáze: rašení, první listy, plné olistění, butonizace, počátek kvetení, konec kvetení, tvorba pupenů, počátek fruktifikace, jánské výhony, dřevnatění výhonů, žloutnutí listů, opad listů a zralost plodů. V síti lesních fenologických stanic ČHMÚ jsou duby monitorovány v nadmořských výškách od 155 m po 830 m (HÁJKOVÁ et al., 2012).

VÝSLEDKY A DISKUZE

Pro dané lokality jsou výsledky uvedeny v grafech č. 1, 2, 3, 4 a 5. V grafech 1-3 jsou zohledněny průměrné nástupy vybraných fenologických fází, jako je rašení, první listy (10%, 50%, 100%), plné olistění (100%), žloutnutí listů (10%, 100%) a počátek až úplný opad listů (10%, 100%). V grafu č. 4 je vyjádřena průměrná doba trvání kvetení, konkrétně počátek kvetení (10%, 50%, 100%) a konec kvetení. Fenologické stanice Běleč nad Orlicí a Sobotín disponují více než třicetiletou řadou dat, kdy pozorování probíhá od roku 1991 až dodnes. Stanice Frýdlant začala měřit od roku 1997. Graf č. 5 je příkladnou ukázkou zpracování dat, které bylo provedeno pro každou jednotlivou fenofázi dané dřeviny a lokality, z nichž byly vyhodnoceny průměrné doby trvání vybraných fenologických fází. Vztah mezi fenologickými fázemi a klimatologickými veličinami nebyl v této studii analyzován. Tato otázka bude řešena v navazující analýze zaměřené na vliv klimatických faktorů na fenologickou variabilitu.

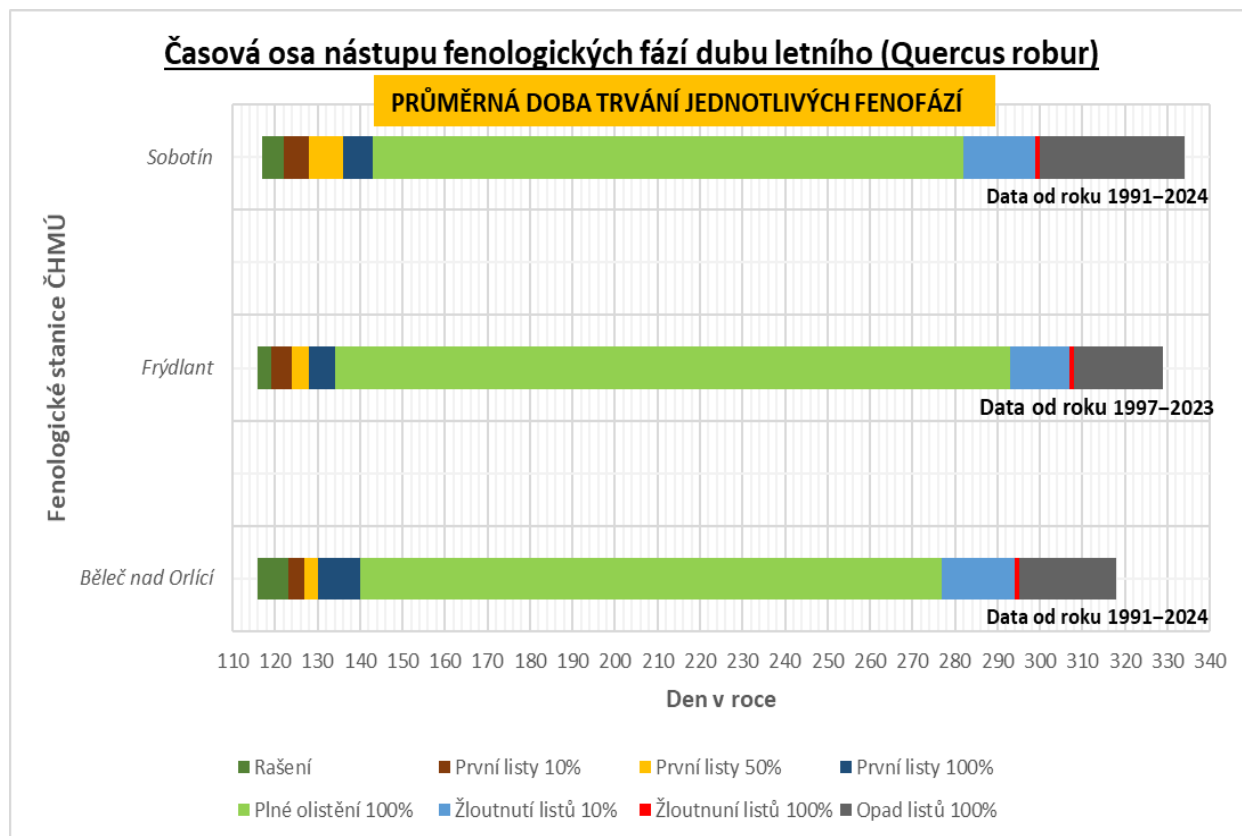
Bříza bělokorá u nás patří mezi první stromy, které na jaře raší. Z dlouhodobého hlediska břízy na všech třech stanicích začínají rašit zhruba druhý týden v dubnu, ale liší se délkou doby úplného rozvinutí čepele listu. U stanice Běleč nad Orlicí průměrně dochází k nejkratší době mezi rašením a plným olistěním (18 dní) a

rovněž doba mezi plným olistěním a začátkem žloutnutí listů je výrazně kratší. Opad listů nastává oproti ostatním stanicím již o 20 dní dříve. Stanice Frýdlant a Sobotín vykazují stejně dlouhou dobu mezi rašením a plným olistěním (Frýdlant 23 dní, Sobotín 24 dní), avšak ve Frýdlantu převládá délka doby fenofáze plného olistění (148 dní) a kratší doba žloutnutí až po úplný opad listů (38 dní).



Graf 1: Časová osa nástupu fenologických fází břízy bělokoré (*Betula pendula*) v období 1991–2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín) a 1997–2024 (Frýdlant)
Graph 1: Timeline of the onset of phenological phases of silver birch (*Betula pendula*) during the periods 1991–2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín) and 1997–2024 (Frýdlant)

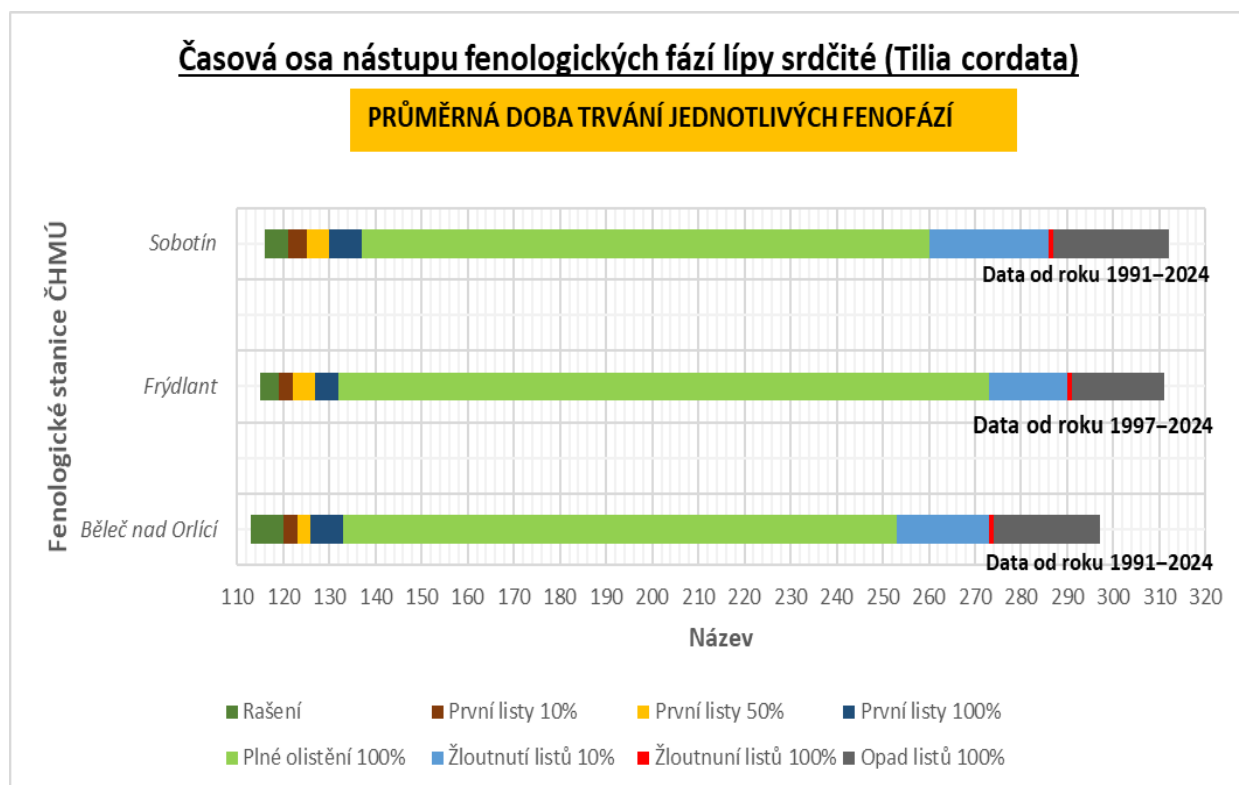
Dub letní spadá do kategorie středně raně rašících dřevin. Z dlouhodobého hlediska duby na všech třech stanicích začínají rašit poslední týden v dubnu. Na stanici Frýdlant je doba mezi rašením a úplným vývinem listu zhruba o 6 dní urychlená (18dní), ale zároveň dochází k nejdelší době fenofáze plného olistění (159 dní). Stanice Sobotín a Běleč nad Orlicí mají podobně dlouhé období mezi rašením až plným olistěním (Sobotín 26 dní, Běleč nad Orlicí 24 dní), podobnou délku trvání fenofáze plného olistění a žloutnutí listů (cca 155 dní), avšak duby v Bělči nad Orlicí opadají zhruba o 20 dní dříve, okolo 315 dne v roce.



Graf 2: Časová osa nástupu fenologických fází dubu letního (*Quercus robur*) v období 1991–2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín) a 1997–2023 (Frýdlant)

Graph 2: Timeline of the onset of phenological phases of pedunculate oak (*Quercus robur*) during the periods 1991–2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín) and 1997–2023 (Frýdlant)

Lípa srdčitá patří mezi později rašící dřeviny a její hlavní ekologický přínos spočívá v pozdně letním kvetení. Z dlouhodobého hlediska lípy na všech třech stanicích začínají rašit na přelomu dubna a května. Obdobně jako na předešlých grafech dochází k dřívějšímu nástupu rašení na stanici Běleč nad Orlicí (113 den, ostatní stanice okolo 116 dne) a fenofáze plného olistění a úplného opadu listů je znatelně urychlená (okolo 295 dne v roce, u ostatních stanic je to průměrně cca 311 den). Stanice Frýdlant se komplexně vyznačuje nejdelší dobou trvání plného olistění (141 dní) a Sobotín dominuje nejpozdějším opadem listů (bříza

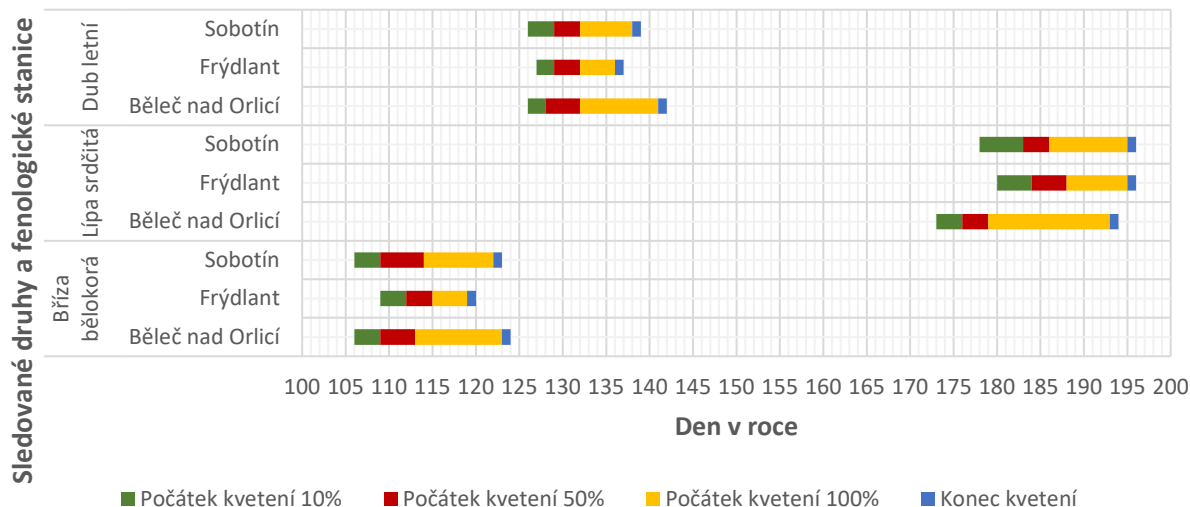


Graf 3: Časová osa nástupu fenologických fází lípy srdčité (*Tilia cordata*) v období 1991–2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín) a 1997–2024 (Frýdlant)

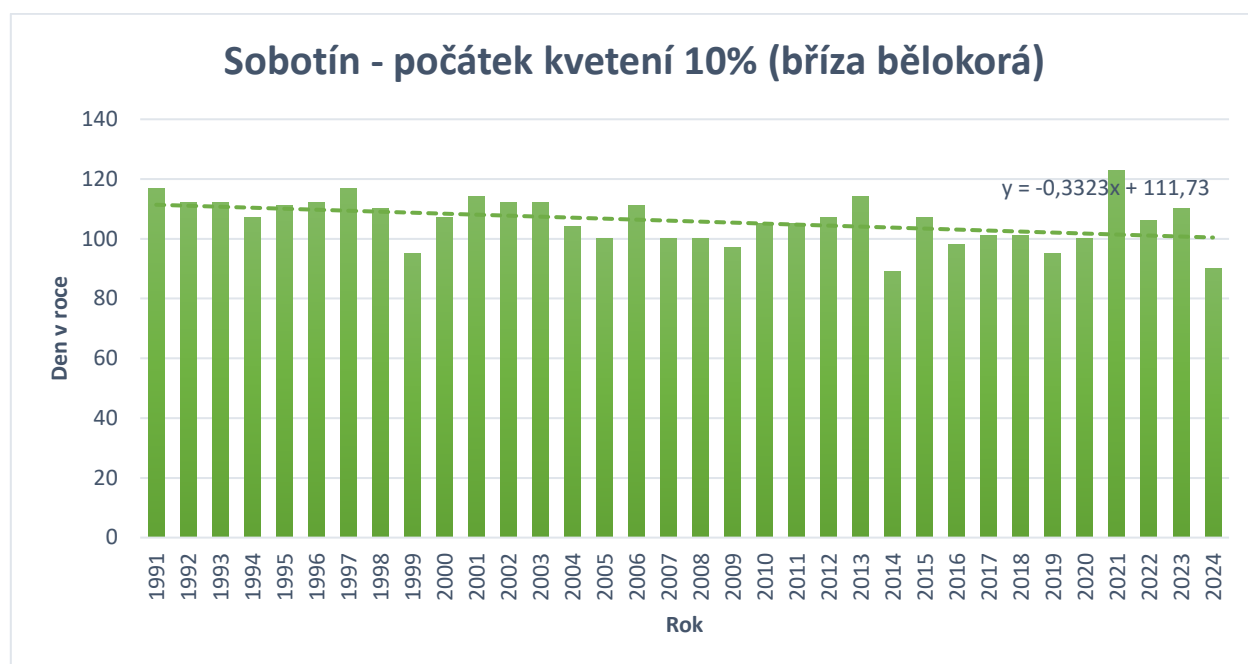
Graph 3: Timeline of the onset of phenological phases of small-leaved lime (*Tilia cordata*) during the periods 1991–2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín) and 1997–2024 (Frýdlant)

Nástup a trvání fenologických fází kvetení se mezi sledovanými druhy výrazně liší. Nejčasněji kvete bříza bělokorá, následovaná dubem letním a nejpozději lípou srdčitou. Délka kvetení je u všech druhů nejdelší ve stanici Běleč nad Orlicí, což pravděpodobně souvisí s teplejšími podmínkami lokality. V chladnějších oblastech (Sobotín, Frýdlant) dochází k pozdějšímu a kratšímu období kvetení. Dub letní průměrně kvete na stanici Sobotín 13 dní, ve Frýdlantu 10 dní a v Bělči nad Orlicí 16 dní. Lípa srdčitá průměrně kvete v Sobotíně 18 dní, ve Frýdlantu 16 dní a v Bělči nad Orlicí 21 dní. Bříza bělokorá průměrně kvete v Sobotíně 17 dní, ve Frýdlantu 11 dní a v Bělči nad Orlicí 18 dní.

Časová osa nástupu průměrného trvání doby kvetení v letech 1991-2024 (Sobotín, Běleč nad Orlicí) a 1997-2023/2024 (Frýdlant)



Graf 4: Časová osa nástupu průměrného trvání doby kvetení v letech 1991-2024 (Běleč nad Orlicí, Sobotín) a 1997-2023/2024 (Frýdlant)
Graph 4: Timeline of the onset of the average flowering period in 1991–2024 (Sobotín, Běleč nad Orlicí) and 1997–2023/2024 (Frýdlant)



Graf 5: Ukázka dílčího zpracování. Analýza pro každou fenologickou fázi, dřevinu a lokalitu
Graph 5: Example of partial processing. Analysis for each phenological phase, tree species, and location

Fenologická pozorování u sledovaných druhů – břízy bělokoré, dubu letního a lípy srdčité potvrzují, že tyto dřeviny reagují na klimatické podmínky rozdílným způsobem a jejich odlišné rytmy se v ekosystému vzájemně doplňují. Přestože jsou v práci uvedeny jen průměrné hodnoty fenologických fází po dobu delší než třicet let, dílčí každoroční vyhodnocení dat ukazuje, jak se tyto dřeviny během roku chovají. V posledním desetiletí se urychlil nástup rašení a prodlužuje se doba kvetení. Duby a břízy vykazují za celou dobu pozorování výkyvy během nástupu doby žloutnutí listů a úplného opadu listů. Dřeviny, jako je dub a bříza jsou náchylné na jarní mrazy a podzimní sucha s nedostatkem vláhy, což způsobuje opad listů i o měsíc dříve, než je obvykle zvykem. Je důležité si uvědomit, že výsledky se odrážejí rovněž od aktuálního prostředí a mikroklimatických podmínek. Zásadní roli hraje také teplota vzduchu, směr a rychlost větru, vlhkost vzduchu a půdy, srážky, světelné podmínky, zapojení porostu a

kompetice. Porovnání všech těchto veličin s fenologickými daty by bylo přínosem pro ekologii, lesnictví i klimatický management.

CUI et al. (2022) ukazují, že průměrná jarní teplota je hlavním faktorem ovlivňujícím nástup vegetační sezóny, zatímco půdní vlhkost výrazně ovlivňuje konec sezóny. LIU et al. (2024) a SCHINDLER et al. (2011) se ve svých studiích zaměřují na vliv větru. LIU et al. (2024) zmiňuje, že větší povětrnostní podmínky zásadně mění fenologii porostů – urychlují senescenci listů, což ovlivňuje celkovou fotosyntetickou aktivitu a ukládání uhlíku. Schindler s kolektivem (2011) zase vysvětluje, jak turbulence ovlivňují fyziologii stromu a mění mikroklimatické podmínky. LORER et al. (2024) zkoumali světelné podmínky v zapojeném porostu, přičemž výsledky ukazují, že dřeviny rostoucí v podrostu vykazují značné posuny nástupů rašení a kvetení.

Bez dlouhodobého fenologického monitoringu by se výrazně snížila naše schopnost pochopit, předvídat a reagovat na změny v přírodě způsobené klimatickými anomáliemi, dlouhodobými trendy, a pokud se nebude brát dostatečný zřetel na tuto vědní disciplínu, znamenalo by to v budoucnosti ztrátu cenných historických řad a možné predikce.

ZÁVĚR

Dlouhodobé sledování lípy srdčité (*Tilia cordata*), dubu letního (*Quercus robur*) a břízy bělokoré (*Betula pendula*) ukazuje, že každý z těchto druhů reaguje na klimatické podněty odlišným tempem a v různém ekologickém kontextu. Dub jako klíčová klimaxová dřevina představuje stabilitu i zranitelnost dlouhověkých stromů, bříza jako pionýrský druh dokládá rychlou reakci na změny prostředí, zatímco lípa je významnou příměsí a podrostovou dřevinou, která zajišťuje stabilitu lesního ekosystému.

Fenologická data proto nelze chápat pouze jako záznam o načasování růstových a reprodukčních fází, ale především jako nástroj pro interpretaci dynamiky ekosystémů a jejich schopnosti adaptace na klimatickou variabilitu. Významné je především propojení fenologie s ekologií lesa: změny fenologických cyklů mohou vyvolávat nesoulad mezi trofickými úrovněmi, ovlivňovat úspěšnost obnovy lesa a zásadním způsobem modifikovat populační dynamiku druhů závislých na synchronizaci s vegetačním cyklem.

Pokud by se fenologické sledování přestalo systematicky provádět, ztratila by věda i lesnická praxe klíčový zdroj dat pro predikci dopadů klimatické změny. Výsledkem by bylo omezení schopnosti činit kvalifikovaná rozhodnutí v hospodaření s lesy, snížení možností adaptace, a také riziko nenapravitelných ekologických ztrát. Fenologický výzkum je tedy nejen vědeckým přínosem, ale také strategickým nástrojem pro zachování ekologické stability, produkčních funkcí i biodiverzity lesních ekosystémů.

Poděkování

Článek je součástí projektu QL24020351: Aktualizace Lesnicko-typologického klasifikačního systému včetně stanovení předpokládaného vývoje lesních vegetačních stupňů s vyhodnocením vlivu mezo a mikroklimatu s ohledem na probíhající klimatické změny a jejich predikce.

LITERATURA:

- BARTOŠOVÁ, Lenka. Fenologický výzkum jako ukazatel změn počasí a podnebí / Phenological Research as a Bioindicator of Climate Change. Online. Živa. 2024, roč. 2024, č. 06, s. 324-326. Dostupné z: <https://ziva.avcr.cz/2024-6/fenologicky-vyzkum-jako-ukazatel-zmen-pocasi-a-podnebi.html>. [cit. 2025-09-02].
- CARVALHO, João P. F. OAK FOREST MANAGEMENT. Online. In: CHUTEIRA, C. Aleixo a GRÃO, A. Bispo (ed.). Oak: Ecology, Types and Management. 2011048504. New York: Nova Science Publishers, 2012, s. 13-58. ISBN ISBN: 978-1-61942-492-0. Dostupné z: <http://www.novapublishers.com>. [cit. 2025-09-02].
- COUFAL, Lubomír. Fenologický atlas. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2004, s. [1a]. ISBN 80-86690-21-0.
- CUI, X.; XU, G.; HE, X.; LUO, D. Influences of Seasonal Soil Moisture and Temperature on Vegetation Phenology in the Qilian Mountains. Remote Sens. 2022, 14, 3645. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs14153645>. [cit. 2025-09-02].
- DE JAEGERE, T.; HEIN, S.; CLAESSENS, H. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate. Forests 2016, 7, 56. <https://doi.org/10.3390/f7030056> [cit. 2025-09-02].
- HÁJKOVÁ, Lenka, et al. Atlas fenologických poměrů Česka. Praha, Olomouc, Český hydrometeorologický ústav Praha, Univerzita Palackého Olomouc, 2012, ISBN 978-80-86690-98-8 (ČHMÚ), ISBN 978-80-244-3005-8 (UP).
- HEJNÝ, S. – SLAVÍK, B., et. al., 2023. Květena České republiky 2. 2. vydání, Praha, Academia, ISBN 80-200-1089-0.
- JONCZAK, Jerzy et al., The influence of birch trees (*Betula* spp.) on soil environment – A review. Online. Forest Ecology and Management. 2020, roč. 477, 1 December 2020, 118486, č. 477, s. 1-13. ISSN ISSN 0378-1127. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118486>. [cit. 2025-09-02].
- LIU, Y.; SU, M.; JIN, J.; RUAN, H.; XUE, J.; SUN, Y.; YU, S.; WANG, W. Wind-Induced Variations in Phenology Regulate Carbon Fluxes in Two Warm-Temperate Plantation Forests. Forests 2024, 15, 2240. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f15122240>. [cit. 2025-09-02].
- LORER, E., VERHEYEN, K., BLONDEEL, H., DE PAUW, K., SANCZUK, P., DE FRENNE, P. and LANDUYT, D. (2024), Forest understorey flowering phenology responses to experimental warming and illumination. New Phytol, 241: 1476-1491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/nph.19425>. [cit. 2025-09-02].
- SCHINDLER, Dirk; BAUHUS, Jürgen a MAYER, Helmut. Wind effects on trees. Online. European Journal of Forest Research. 2011, vol. 131, no. 1, s. 159-163. ISSN 1612-4669. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0582-5>. [cit. 2025-09-02].
- SCHWARTZ, Mark Donald. Phenology: an integrative environmental science. Second edition. Dordrecht: Springer, [2013]. ISBN 9789400769243. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-6925-0> [cit. 2025-09-02].

VLIV TOPOGRAFICKÉ EXPOZICE NA RADIÁLNÍ RŮSTOVOU DYNAMIKU A ODEZVU NA SUCHO U SMRKU ZTEPILÉHO (*PICEA ABIES* (L.) H. KARST)

Martin ŠRÁMEK¹, Dušan VAVŘÍČEK¹, Jiří NOVÁK², Petr MADĚRA¹

¹ Ústav lesnické botaniky, dendrologie a geobiocenologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1665/1, 61300 Brno, email: martin.sramek@mendelu.cz, dusan.vavricek@mendelu.cz, petr.madera@mendelu.cz

² Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady 136, 25202 Jíloviště, Výzkumná stanice Opočno, email: novak@vulhmop.cz

ABSTRACT

Šrámek, M., Vavříček, D., Novák, J., Maděra, P.: Effect of topographic exposure on radial growth dynamics and drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst)

This study investigates the influence of topographic exposure and volumetric soil moisture on radial growth dynamics and drought response in Norway spruce (*Picea abies*) under temperate conditions in Central Europe. Using automatic dendrometers, stem diameter changes were measured in two forest stands with contrasting slope exposures (south vs. north) during the 2025 growing season. The results showed that trees on the north-facing slope began growing earlier, had a longer growing season, and achieved greater radial increments than those on the south-facing slope. A key factor was the higher volumetric soil moisture on the northern exposure, which mitigated the effects of summer drought. The study highlights the importance of microclimatic conditions for spruce growth response and suggests that north-facing slopes may serve as suitable microclimatic refugia for spruce cultivation in lower elevations. The findings are relevant for forestry practice in the context of climate change, although the local and pilot nature of the study limits broader generalization.

Key words: radial growth, drought response, topographic exposure, Norway spruce

ÚVOD

Klimatická změna významně ovlivňuje délku vegetačního období v evropských lesních ekosystémech i u jednotlivých lesních dřevin (MENZEL et al., 2006). V důsledku rostoucích teplot se počátek nástupu vegetačního období posouvá do ranějších jarních dnů a trvá až do pozdních podzimních dnů (MENZEL, FABIAN, 1999), čímž se prodlužuje vegetační období a potenciálně se zvyšuje produktivita a sezónní příjem uhlíku lesními stromy (PRETZSCH et al., 2014; ZANI et al., 2020). V důsledku klimatických změn je však nárůst teplot doprovázen rostoucím nedostatkem vody během vegetačního období v důsledku zvýšené evapotranspirace a rostoucí frekvence a intenzity sucha (STOCKER et al., 2013). Snížení dostupnosti vody omezuje růst stromů (BOSE et al., 2021; KASPER et al., 2022; MONTIBELLER et al., 2022), což je v kontrastu s potenciálně zvýšenou produktivitou způsobenou delší vegetační dobou (BUERMANN et al., 2018). Například MATULA et al. (2023) takovéto snížení produktivity v důsledku sucha způsobeného vysokými teplotami prokázali u 8 druhů evropských dřevin.

Se zřetelem k těmto skutečnostem musí lesníci velmi citlivě volit dřevinou skladbu při obnově lesa a mimo jiné musí též brát v úvahu i terénní mikroklimatické odchylky stanovišť. Topografie může velmi významně měnit makroklimatické charakteristiky (DALY, 2006). Jedna z možností, jak nalézt mikroklimatická „refugia“ (Stark, Fridley 2021) pro chladnomilnější dřeviny, je i využití topografické expozice (BARNARD et al. 2017), která může svými mikroklimatickými rozdíly kompenzovat vliv projevů globální klimatické změny (SLAVICH et al. 2014) způsobující posuny areálů výskytu jednotlivých druhů dřevin (KUSBACH et al. 2023).

Smrk ztepilý (*Picea abies*) v posledních letech v České republice významně trpí periodami sucha, které způsobují jako primární ekologický faktor velkoplošný rozpad jeho hospodářských porostů (ČERMÁK et al. 2019). Jako původně horský druh, je naše hlavní hospodářská dřevina smrk ztepilý (*Picea abies*), poměrně náročná na

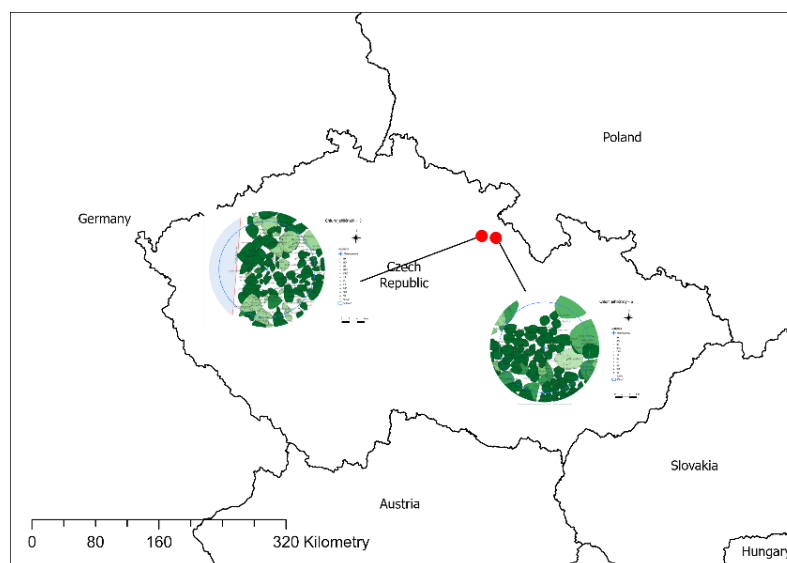
vláhu (ÚRADNÍČEK et al. 2010). Chceme-li smrk i nadále pěstovat, je zapotřebí soustředit pozornost i na stanoviště s vhodným mikroklimatickým režimem.

Cílem práce je proto zjistit, zda vybrané mikroklimatické faktory prostředí, v našem případě vlhkost půdy, mohou vysvětlit radiální tloušťkové změny kmene smrku (*Picea abies*) indikující stres suchem na extrémně odlišné jižní a severní expozici v rámci stejného 3. lesního vegetačního stupně.

MATERIÁL A METÓDY

Studie byla provedena ve dvou lesních porostech mírného pásu střední Evropy. Zájmové území se nacházelo v katastru obce Dobruška v Královohradeckém kraji, Česká republika (Obr. 1, Tab. 1). Jedná se o smíšené lesy nižších až středních poloh s výskytem maloplošných výsadeb monokultur smrku ztepilého. Oblast se nachází v regionu s mírným středoevropským klimatem. Dlouhodobé klimatické normály představují hodnoty průměrné roční teploty 7,8 °C a ročního úhrnu srážek 732 mm. Nejteplejším měsícem je červenec s průměrnou teplotou 16,8 °C, zatímco nejchladnějším měsícem bývá leden s průměrnou teplotou −1,4 °C. (data 1991 – 2020, ČHMÚ).

Převládajícím půdním typem v porostu s jižní expozicí byla kambizem dystrická, luvická, v porostu se severní expozicí pak kambizem pelická. Stručná charakteristika zájmových porostů viz Tab. 1.



Obr. 1 Lokalizace zájmových porostů s ukázkou porostní struktury formou zobrazení projekčních ploch korun

Fig. 1 Localization of the study plots with an illustration of their stand structure shown through the projection areas of tree crowns

Tab. 1 Charakteristika sledovaných porostů. SLT – soubor lesních typů, LVS – lesní vegetační stupeň, DBH – výčetní tloušťka, H – výška.

Table 1 Characteristics of the study forest stands. SLT – forest type group, LVS – forest vegetation zone, DBH – diameter at breast height, H – height

Označení porostu	Lokalizace GPS	Dřevina	Expozice	SLT	LVS	Nadmořská výška (m n.m.)	Věk	Ø DBH (cm)	Ø H (m)
CHJ_J1	50°16'16.437"N, 16°9'32.926"E	smrk	jih	3B	3	335	43	17	16
CHJ_S3	50°15'59.623"N, 16°10'48.583"E	smrk	sever	3H	3	340	46	19	18

Pro měření růstu stromů, jejich dynamiky a fenologie růstu byly v roce 2024 nainstalovány automatické bodové dendrometry (TOMST, Praha, Česká republika) v celkovém počtu 10 ks. Pro instalaci dendrometrů byly vybrány dva porosty s dominantním zastoupením smrku ztepilého s rozdílnou expozicí svahu (jižní/severní). Porosty byly vybírány s požadavkem na stejnou nadmořskou výšku, podobné stanoviště a blízkost porostů (vzdušná vzdálenost mezi porosty je 1,7km). V každém porostu bylo vybráno 5 zdravých stromů s korunami v hlavní úrovni porostu a na ty byly ze severní strany nainstalovány dendrometry ve výšce 1,3 m nad zemí. V místě měřicí plochy byla očištěna kůra. Od okamžiku instalace (7/2024) dendrometry automaticky měřily změny poloměru kmene s rozlišením 1 µm každou hodinu a ukládaly měřená data do interního dataloggeru. Dendrometry byly pravidelně kontrolovány na možné poruchy, data byla stažena po skončení vegetačního období následujícího roku. Pro tuto studii byla použita data za vegetační sezónu 2025. Hrubá data o změnách poloměru kmene (RadKmen) stažena

z dendrometrů byla zkontrolována a proběhla korekce chybných měření (např. skoků vyplývajících z úprav či servisu dendrometrů). Následně byla data agregována do denních průměrů pomocí balíčku PLOTer ve statistickém programu R (R Core Team, 2022). Denní změny poloměru stonku byly poté vypočítány z RadKmen jako klouzavý průměr se 14denním oknem posouvajícím se v jednodenních intervalech. Poté jsme použili prahové hodnoty odpovídající 5 % maximálních denních rychlostí RadKmen k určení data začátku a konce sekundárního růstu stonku (GS_začátek a GS_konec). Délka růstové sezóny (GS_délka) byla vypočtena jako rozdíl (ve dnech) mezi GS_konec a GS_začátek. Z dat RadKmen byl vypočítán kumulovaný denní růst (GRO) s využitím konceptu nulového růstu (ZWEIFEL, 2016a). Model denní rychlosti růstu (GRm) byl vypočítán jako rozdíl rychlosti růstu dosaženého daný den a dne předešlého. Data GRm byla vyhlazena zobecněným aditivním modelem (GAM) s použitím kubické regresní spline ($s(bs='cs')$) a bazových dimenzí (k) nastavených na 25. Vypočítaný parametr TWD (z anglického tree water deficit) je ukazatel smrštění kmene, který udává, kolik vody stromu chybí. Ukazuje tedy na stres suchem. Počítá se jako rozdíl aktuálního poloměru kmene od předchozího maximálního poloměru (ZWEIFEL, 2016b). Pro měření objemové vlhkosti půdy byly využity automatické meteorologické stanice MeteoUNI, které byly vybavené třemi snímači VIRIB (FIEDLER, České Budějovice, Česká republika) na měření objemové vlhkosti půdy (VWC). Údaje byly odečítány ve čtvrt hodinových intervalech a pravidelně předávány na webový server. Půdní vlhkost byla měřena ve třech hloubkách 10, 20 a 50 cm. Čidla jsou uložena ve vodorovné poloze odpovídající půdní hloubce. Pro optimalizovaný kontakt se zemí jsou umístěna ve vrstvě půdní frakce jemnozeme I < 2 mm. Pro prezentaci naměřených dat byly použity naměřené hodnoty ze snímače umístěného 20 cm pod povrchem.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Při porovnání fenologie růstu smrku ztepilého v zájmových porostech, je patrné, že v porostu se severní expozicí začaly růst stromy o 8 dnů dříve než v porostu s jižní expozicí, ukončily však růst prakticky ve stejný den měsíce srpna (Tab. 2). Totožný konec růstové sezóny odpovídá zjištěním dřívějších studií, které ukázaly, že konec růstové sezóny je určen teplotou nebo délkou dne (KRAMER et al., 2000; ROSSI et al., 2007). Fotoperioda vnímaná rostlinami reaguje na přímé, difúzní a odražené světlo (HOLMES, SMITH, 1977), je tedy nepravděpodobné, že by zde expozice hrála významnou roli. Délka růstové sezóny byla u stromů v porostu se severní expozicí delší o 10 dnů. Souviset to mimo jiné může z vlhkosti půdy, která byla v porostu se severní expozicí vyšší v průměru o 17,5 procentních bodů (Obr. 2). Stromy tak měly do začátku růstu vyšší dostupnost vody. MATULA et al. (2023) prezentuje délku růstové sezóny u smrku ztepilého na teplotně podobném, ale srážkově rozdílném stanovišti, o cca 10 – 15 dnů delší, nicméně s dřívějším začátkem růstu. BARNARD et al. (2017) uvádí, že v horských podmínkách Coloráda měly jehličnaté druhy až o 21 dnů delší růstovou sezónu na jižní topografické expozici. Toto obecně platí v horských podmínkách, nicméně v nižších polohách mohou některé druhy ze severní expozice benefitovat, jak ukazuje také naše studie. Děje se tak vytvořením tzv. mikroklimatického refugia (STARK, FRIDLEY 2021) vhodného pro chladnomilnější druhy dřevin, v našem případě smrk ztepilý. Ukazuje to, že komplexní interakce topografie prostředí může ovlivňovat růst stromů a jejich fenologii (BRUENING et al., 2017; TRAN et al., 2017).

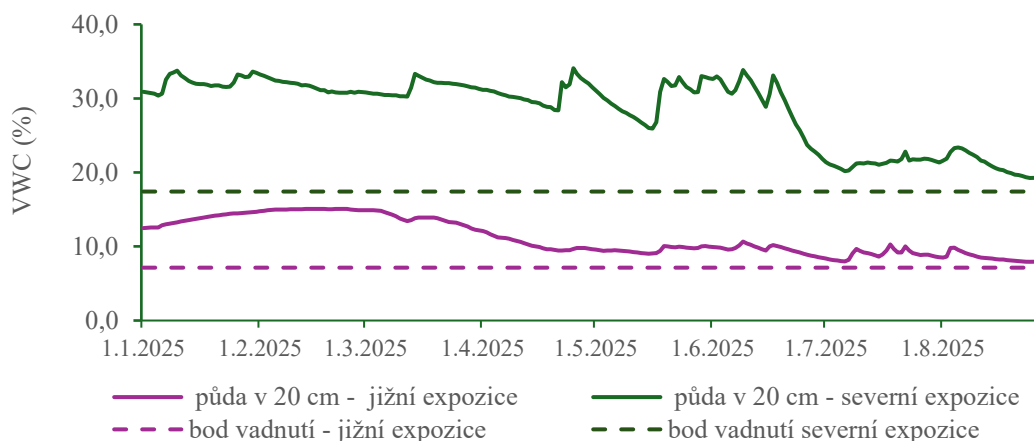
Tab. 2 Data růstové fenologie smrku ztepilého v porostech odlišné expozice. GS_začátek – začátek růstové sezóny, GS_konec – konec růstové sezóny, GS_délka – délka růstové sezóny

Table 2 Growth phenology data of Norway spruce in plots with different slope exposures. GS_start – start of the growing season, GS_end – end of the growing season, GS_length – length of the growing season

Expozice	GS_začátek (den roku)	GS_konec (den roku)	GS_délka (dny)
jih	137	215	78
sever	129	216	88

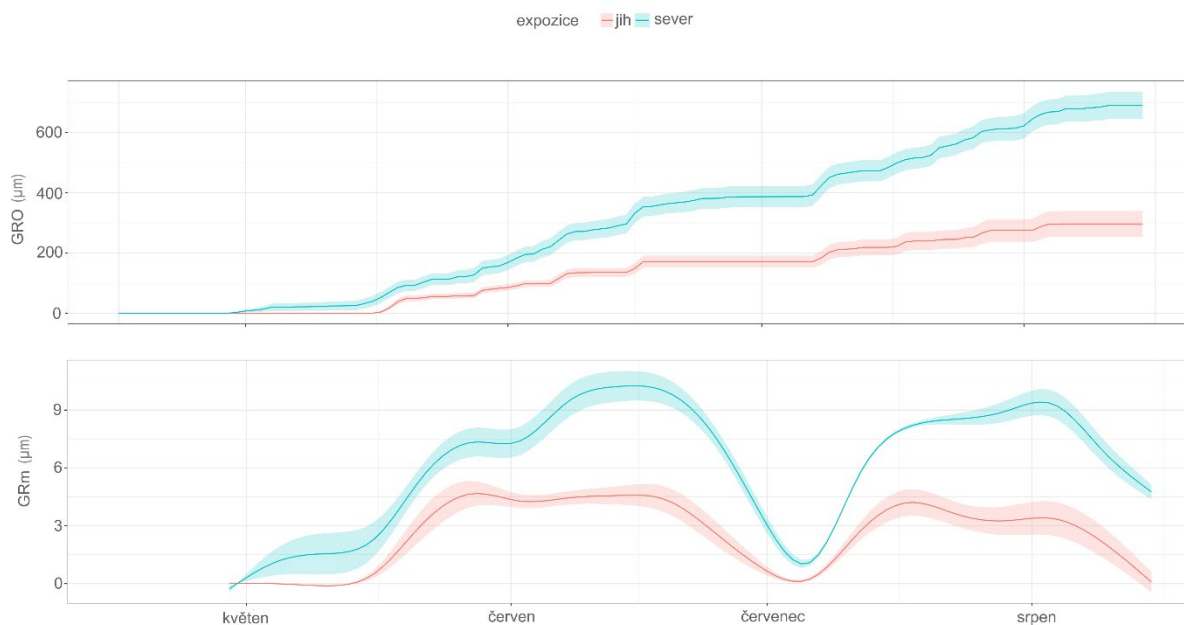
Stromy v porostu s jižní expozicí přirostly za růstovou sezónu na průměru kmene o cca 0,9 mm, kdežto stromy v porostu se severní expozicí přirostly na průměru kmene o cca 1,7 mm, tedy výrazně více. Kumulativní denní růst (GRO) byl v porostu se severní expozicí od začátku růstové sezóny výrazně větší v než v porostu s jižní expozicí (Obr. 3). Dřívější studie identifikovaly načasování jarního začátku růstu jako klíčový faktor ročního radiálního růstu (ROSSI et al., 2013; OBERHUBER et al., 2014) a také, že se toto období může posouvat ve vztahu k průměrné roční teplotě (SULLIVAN et al., 2015). Mohla to být tedy příčina vyššího GRO vzhledem k dřívějšímu začátku růstu stromů v porostu se severní expozicí, stejně jako vyšší objemová vlhkost půdy (VWC). Na to ukazuje také studie BARNARDA et al. (2017), který udává pozitivní korelaci délky růstové sezóny na přírůst výčetní kruhové základny. Při pohledu na model rychlosti denního růstu (GRm) je patrné, že smrky ztepilé v porostu se severní expozicí dosahovaly vyšší rychlosti růstu v průběhu celé růstové sezóny (Obr. 3). Nicméně, píky GRm dosáhly stromy na obou expozicích ve stejném období, ačkoliv s rozdílnou amplitudou. Výše GRm bude tedy více závislá na množství dostupné půdní vlhkosti než na topografické expozici. Tuto hypotézu potvrzuje zjištění ADAMSE et al.

(2014), kteří ve své studii zjistili významný vztah mezi meziroční variabilitou srážek a růstem letokruhů, což indikuje, že dostupnost vláhy může řídit rychlost radiálního růstu. Některé studie identifikovaly vrchol radiálního růstu na začátku července, s koncem v srpnu (SEO et al., 2011; CUNY et al., 2012; OBERHUBER et al., 2014). To je v rozporu s naším zjištěním, kdy GRm začala kulminovat v půlce června, tedy spíše v začátku růstu. Kulminace růstu v dřívější růstové etapě jsou uváděny v předchozích studiích z mírného pásu Evropy (ETZOLD et al. 2022) a Severní Ameriky (DOW et al., 2022). Z Obr. 3 je také patrný výrazný pokles GRm a prakticky zastavení GRO v období července, kdy přišla perioda sucha bez srážek, která je zřetelně viditelná na Obr. 2. V tomto období bez srážek se objemová vlhkost půdy v porostu s jižní expozicí dostala až k hraniční hodnotě bodu vadnutí. Rychlost růstu i denní kumulativní přírůst se však po příchodu deště dostal téměř k původním hodnotám v druhé půlce července.



Obr. 2 Objemová vlhkost půdy (VWC) v porostech smrku ztepilého s rozdílnou expozicí. Vodorovné přerušované linie vyjadřují body vadnutí

Fig. 2 Soil volumetric water content (VWC) in Norway spruce stands with different slope exposures. Horizontal dashed lines indicate wilting points

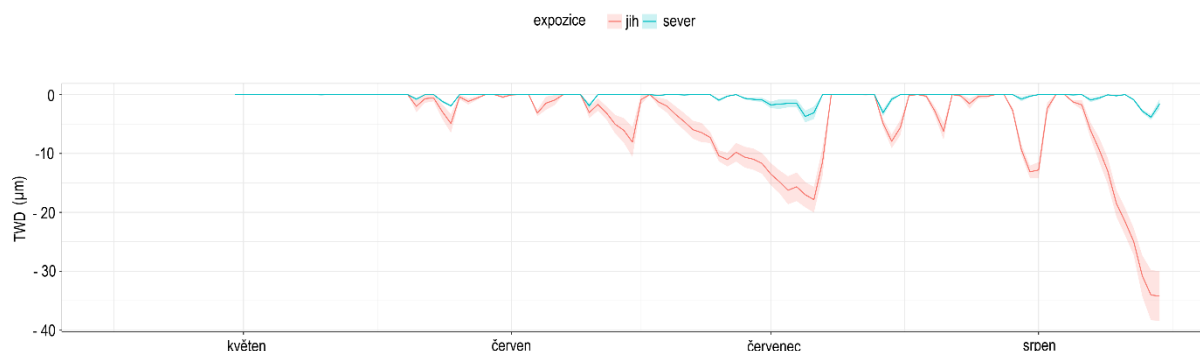


Obr. 3 Kumulovaný denní růst (GRO) a model denní rychlosti růstu (GRm) smrku ztepilého na rozdílných expozicích.

Fig. 3 Cumulative daily growth (GRO) and model of daily growth rate (GRm) of Norway spruce under different slope exposures

Jak již bylo zmíněno výše, průběh VWC byl v porostu se severní expozicí vyšší (Obr. 2), přičemž v obou porostech došlo vlivem sucha k poklesu VWC. Období bez srážek přišlo na přelomu června a července. Výraznější pokles je patrný v porostu se severní expozicí, kde byla půda vodou relativně dobře zásobena. Pokles VWC v periodě sucha vedl ke stresu stromů, který je patrný na Obr. 4. Vypočítaný parametr TWD (indikátor vodního stresu stromu neboli

tzv. smrštění kmene) vykazuje výrazný pokles hodnot v období přelomu měsíce června a července zejména u porostu s jižní expozicí. Ukazuje to na silný stres stromů suchem a koresponduje tak s poklesem VWC k bodu vadnutí zjištěného pro porost s jižní expozicí. Zvýšený deficit vody snižuje růst stromů tím, že brání aktivitě proliferace kambia a následné tvorbě buněk dřeva (BALDUCCI et al., 2013; KÖRNER, 2015). Deficit vody v půdě je často doprovázen tepelnými vlnami, které tak ještě více zhoršují růst a stres stromu suchem (TESKEY et al., 2015). Stromy v porostu se severní expozicí byly suchem stresovány minimálně, pravděpodobně v souvislosti s vyšší VWC na počátku suché periody, díky čemuž pokles VWC nebyl limitující faktor.



Obr. 4 Průběh indikátoru vodního stresu stromů (TWD) smrku ztepilého v závislosti na expozici svahu.

Fig. 4 Development of the tree water stress indicator (TWD) of Norway spruce depending on slope exposure.

ZÁVĚR

Výsledky této studie ukazují, že topografická expozice má významný vliv na růstovou dynamiku smrku ztepilého (*Picea abies*) v podmínkách mírného pásu střední Evropy. Stromy na severní expozici zahájily růst dříve, rostly déle a dosáhly vyššího radiálního přírůstu než stromy na jižní expozici. Klíčovým faktorem se ukázala být vyšší objemová vlhkost půdy na severní expozici, která zmírnila dopady letního sucha a umožnila stromům udržet vyšší růstové tempo i během stresového období. Zjištění naznačují, že severní svahy mohou představovat mikroklimatická refugia vhodná pro pěstování smrku v nižších nadmořských výškách, kde je tento druh jinak ohrožen klimatickými extrémy. Dostupnost půdní vláhy se jeví jako limitující faktor růstu. Je však nutné zdůraznit, že studie má pilotní a lokální charakter, a její závěry nelze bez dalšího výzkumu zobecnovat na širší území. Budoucí výzkum by měl zahrnout více lokalit a delší časové období, aby bylo možné lépe porozumět interakcím mezi topografií, mikroklimatem a růstovou odezvou lesních dřevin.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu č. QL24020351 Národní agentury pro zemědělský výzkum s názvem „Aktualizace Lesnicko-typologického klasifikačního systému včetně stanovení předpokládaného vývoje lesních vegetačních stupňů s vyhodnocením vlivu mezo a mikroklimatu s ohledem na probíhající klimatické změny a jejich predikce“.

LITERATURA

- ADAMS, H. R., BARNARD, H. R., & LOOMIS, A. K. (2014). Topography alters tree growth–climate relationships in a semi-arid forested catchment. *Ecosphere*, 5(11), 1-16.
- BALDUCCI, L., DESLAURIERS, A., GIOVANNELLI, A., ROSSI, S., & RATHGEBER, C. B. (2013). Effects of temperature and water deficit on cambial activity and woody ring features in *Picea mariana* saplings. *Tree Physiology*, 33(10), 1006-1017.
- BARNARD, D. M., BARNARD, H. R., & MOLOTCH, N. P. (2017). Topoclimate effects on growing season length and montane conifer growth in complex terrain. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064003.
- BOSE, A.K. et al. (2021). Climate sensitivity and drought seasonality determine postdrought growth recovery of *Quercus petraea* and *Quercus robur* in Europe. *Science of the Total Environment*, 784, 147222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147222>
- BRUENING, J. M., TRAN, T. J., BUNN, A. G., WEISS, S. B., & SALZER, M. W. (2017). Fine-scale modeling of bristlecone pine treeline position in the Great Basin, USA. *Environmental Research Letters*, 12(1), 014008.
- BUERMANN, W. et al. (2018). Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity. *Nature*, 562(7725), 110–114. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0555-7>

- CUNY, H. E., RATHGEBER, C. B., LEBOURGEOIS, F., FORTIN, M., & FOURNIER, M. (2012). Life strategies in intra-annual dynamics of wood formation: example of three conifer species in a temperate forest in north-east France. *Tree physiology*, 32(5), 612-625.
- DALY, C. (2006). Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology*, 26, 707–721. <https://doi.org/10.1002/joc.1322>
- DOW, C., KIM, A. Y., D'ORANGEVILLE, L., GONZALEZ-AKRE, E. B., HELCOSKI, R., HERRMANN, V., ... & ANDERSON-TEIXEIRA, K. J. (2022). Warm springs alter timing but not total growth of temperate deciduous trees. *Nature*, 608(7923), 552-557.
- ETZOLD, S., STERCK, F., BOSE, A. K., BRAUN, S., BUCHMANN, N., EUGSTER, W., ... & ZWEIFEL, R. (2022). Number of growth days and not length of the growth period determines radial stem growth of temperate trees. *Ecology Letters*, 25(2), 427-439.
- HOLMES, M. G., & SMITH, H. (1977). The function of phytochrome in the natural environment—II. The influence of vegetation canopies on the spectral energy distribution of natural daylight. *Photochemistry and Photobiology*, 25(6), 539-545.
- KASPER, J. et al. (2022). Higher growth synchrony and climate change-sensitivity in European beech and silver linden than in temperate oaks. *Journal of Biogeography*, 50(1), 209–222. <https://doi.org/10.1111/jbi.14525>
- KÖRNER, C. (2015). Paradigm shift in plant growth control. *Current opinion in plant biology*, 25, 107-114.
- KRAMER, K., LEINONEN, I., & LOUSTAU, D. (2000). The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview. *International journal of biometeorology*, 44(2), 67-75.
- KUSBACH, A., DUJKA, P., ŠEBESTA, J., LUKEŠ, P., DEROSE, R.J., MADĚRA, P. (2023). Ecological classification can help with assisted plant migration in forestry, nature conservation, and landscape planning. *Forest Ecology and Management*, 546, 121349. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121349>
- MATULA, R. et al. (2023). Shifts in intra-annual growth dynamics drive a decline in productivity of temperate trees in Central European forest under warmer climate. *Science of the Total Environment*, 905, 166906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166906>
- MENZEL, A., FABIAN, P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721), 659. <https://doi.org/10.1038/17709>
- MENZEL, A. et al. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12(10), 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- MONTIBELLER, B. et al. (2022). Increased carbon assimilation and efficient water usage may not compensate for carbon loss in European forests. *Communications Earth & Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/S43247-022-00535-1>
- OBERHUBER, W., GRUBER, A., KOFLER, W., & SWIDRAK, I. (2014). Radial stem growth in response to microclimate and soil moisture in a drought-prone mixed coniferous forest at an inner Alpine site. *European journal of forest research*, 133(3), 467-479.
- PRETZSCH, H. et al. (2014). Mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.] stands under drought: from reaction pattern to mechanism. *Trees*, 28(5), 1305–1321. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1035-9>
- ROSSI, S., DESLAURIERS, A., ANFODILLO, T., & CARRARO, V. (2007). Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152(1), 1-12.
- ROSSI, S., ANFODILLO, T., ČUFAR, K., CUNY, H. E., DESLAURIERS, A., FONTI, P., ... & RATHGEBER, C. B. (2013). A meta-analysis of cambium phenology and growth: linear and non-linear patterns in conifers of the northern hemisphere. *Annals of botany*, 112(9), 1911-1920.
- SEO, J. W., ECKSTEIN, D., JALKANEN, R., & SCHMITT, U. (2011). Climatic control of intra- and inter-annual wood-formation dynamics of Scots pine in northern Finland. *Environmental and Experimental Botany*, 72(3), 422-431.
- STARK, J. R., & FRIDLEY, J. D. (2022). Microclimate-based species distribution models in complex forested terrain indicate widespread cryptic refugia under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 31(3), 562-575.
- STOCKER, T.F. et al. (2013). *Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- SULLIVAN, P. F., MULVEY, R. L., BROWNEE, A. H., BARRETT, T. M., & PATTISON, R. R. (2015). Warm summer nights and the growth decline of shore pine in Southeast Alaska. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124007.
- TEAM, R. C. (2022). R: a language and environment for statistical computing and graphics. *Foundation for Statistical Computing*.
- TESKEY, R., WERTIN, T., BAUWERAERTS, I., AMEYE, M., MCGUIRE, M. A., & STEPPE, K. (2015). Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. *Plant, cell & environment*, 38(9), 1699-1712.

TRAN, T. J., BRUENING, J. M., BUNN, A. G., SALZER, M. W., & WEISS, S. B. (2017). Cluster analysis and topoclimate modeling to examine bristlecone pine tree-ring growth signals in the Great Basin, USA. *Environmental Research Letters*, 12(1), 014007.

ÚRADNÍČEK, L., MADĚRA, P., KOBLÍŽEK, J., TICHÁ, S. (2010). *Woody plants of the Czech Republic*. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce.

ZANI, D. et al. (2020). Increased growing-season productivity drives earlier autumn leaf senescence in temperate trees. *Science*, 370(6520), 1066–1071. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABD8911>

ZWEIFEL, R. (2016)a. Radial stem variations—a source of tree physiological information not fully exploited yet. *Plant, Cell & Environment*, 39(2), 231-232.

ZWEIFEL, R., HAENI, M., BUCHMANN, N., & EUGSTER, W. (2016)b. Are trees able to grow in periods of stem shrinkage?. *New Phytologist*, 211(3), 839-849.

ROLE KLIMATU V TYPOLOGICKÉM SYSTÉMU LESŮ ČR: REVIEW

Václav ZOUHAR^{1,2}

¹Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Strnady, Výzkumná stanice Opočno, Na Olivě 550, 517 73, Opočno, Česká republika

²Národní lesnický institut, pobočka Brno, Vrázova 1, 616 00, Brno, Česká republika

ABSTRACT

Zouhar, V.: The role of climate in the czech forest ecosystem classification: review

Climate is one of the main factors of the ecotope that influences the form of forest vegetation. In the Czech forest ecosystem classification, climate is most closely associated with the forest vegetation zone unit. When determining vegetation domains, the composition of natural forest vegetation is decisive, which is problematic in forests with altered species composition. Many researchers have attempted to solve the issue of non-native forests by defining the potential vegetation stages using climatic characteristics. However, these attempts have been more or less unsuccessful so far because trees respond to changes in conditions on a smaller gradient than the climatic gradient. Another recent problem with the use of climatic characteristics is rapid climate change, which means that the climatic characteristic systems from the second half of the 20th century are no longer valid today. In addition, the response of forest communities to climate change is not as rapid as climate change itself, which poses new challenges for the field of forest ecosystem classification.

Key words: Czech forest ecosystem classification, vegetation zones, climate change, vegetation response to environmental changes

ÚVOD

Klima je jedním z hlavních faktorů prostředí, který má vliv na podobu a vývoj lesní vegetace. V klasifikačních systémech lesních ekosystémů nebo lesní vegetace tak hraje pochopení vlivu klimatu na lesní společenstvo důležitou roli, která je v poslední době umocněna o problematiku změny klimatu. V lesnické typologii se vliv klimatu nejvíce odráží v nadstavbové jednotce lesní vegetační stupeň, ale vliv klimatu hraje také svoji úlohu u základní jednotky – lesního typu. Rozdíl je v úrovni a podrobnosti prostorového měřítka.

Cílem předkládaného přehledu je proto shrnout známé poznatky o roli klimatu ve vztahu k jednotkám lesnické typologie se zaměřením na lesní vegetační stupně a nastínit problémy, které jsou z hlediska klimatu v lesnické typologii aktuální.

VZTAH KLIMATU A VEGETAČNÍHO STUPNĚ

Na území ČR dnes používáme systém lesních vegetačních stupňů, který vychází z vegetačních stupňů definovaných prof. Zlatníkem. ZLATNÍK (1959b) definuje jednotku „lesní vegetační stupeň“ (LVS), jako nadstavbovou jednotku, při tvoření skupin lesních typů, na základě rozdílů v lokálním a výškovém klimatu na fytocenologickém podkladě, tj. na určitém druhovém složení vegetace. Autor uvádí charakteristické druhy bylinného podrostu a jejich kombinace pro jednotlivé LVS. Pro vylišení LVS ctil autor myšlenku, že „pro vyjádření vztahů mezi celkovým klimatem a lesní vegetací je důležitější rozšíření celé přírodní geobiocenoty než jednotlivých druhů dřevin“. Při vylišení LVS se vychází z poznatků o rekonstruované původní skladbě lesů. Autor též stanovuje tzv. „vedoucí skupinu stupně“, kterou pokládal za subklimax příslušného výškového klimatického stupně. Dále Zlatník zavádí dělení některých skupin typů, které svým výskytem v terénu zasahují do dvou LVS na tzv. nižší a vyšší stupeň. A také zde upozorňuje na odlišnosti geobiocenoty na lokalitách s trvale vyšší hladinou podzemní vody, kde se vyskytují cenózy lokalit vyšších nadmořských výšek nebo inverzních poloh.

Na prof. Zlatníka navázal později AMBROS (1988), který považuje LVS za ekologicky diferencovanou a kartograficky znázornitelnou nadstavbu chorické dimenze bezprostředně nad skupinou typů geobiocénů. LVS definuje jako jednotky vegetační struktury celých krajinných segmentů a jejich typu makroklimatu (oblastní klima,

oblastní flóra a vegetace) závislé na výškovém a expozičním klimatu, kdy vztahy se skladbou dřevinného a podrostového komplexu platí pouze v makroklimaticky jednotném krajinném segmentu, pro který byly zjištěny a potvrzeny. Rozdíly ve vegetaci LVS, jak potenciální přírodní, tak i recentní, spatřuje v ekologických podmínkách, např. srážkový stín, vyšší kontinentalita území a v chorologickém šíření rostlinných taxonů.

V pozdější publikaci geobiocenologického systému (BUČEK, LACINA, 1999) autoři uvádějí, že LVS vyjadřují souvislost sledu rozdílů přírodní vegetace se sledem rozdílů výškového a expozičního klimatu. Dále uvádí, že vegetační stupňovitost je závislá především na teplotách ovzduší a půdy a časovém rozložení atmosférických srážek, včetně srážek horizontálních. Kontakty a sled LVS mohou být výrazně modifikovány zvláštnostmi mezoklimatu (klimatickou inverzí) a expoziční klima se projevuje především v členitém reliéfu pahorkatin a nižších vrchovin, kde jsou výrazné rozdíly mezi svahy jižních a severních expozic.

Další definici LVS najdeme v publikaci Typologického systému ÚHÚL (PLÍVA, 1971), kde se uvádí, že vegetační stupňovitost není podmíněná jen makroklimatem, ale je podmíněna většinou mezoklimatem (lokálním klimatem), tj. výsledným účinkem klimatu a polohy za spolupůsobení některých dalších faktorů (voda v půdě, živiny apod.). Jde tedy o celý komplex podmínek ovlivňující výsledný poměr klimaxových dřevin. Následně PLÍVA (1991) charakterizuje LVS jako jednotky vyjadřující změnu druhové skladby přírodních fytocenóz včetně edifikátorů způsobenou vlivem mikro a mezoklimatu ve vertikálním směru daného území. Rozhodující pro diagnostiku LVS je přirozené rozšíření dřevin.

Nověji WIEVEGH (2003) popisuje LVS jako jednotky vyjadřující určitý vztah mezi klimatem a biocenózou. Pro determinaci LVS považuje za rozhodující dřevinnou složku.

VÝVOJ SYSTÉMU VEGETAČNÍCH STUPŇŮ NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

Na území České republiky (ČR) dochází k rozvoji oboru typologie lesních stanovišť od 50. let 20. století (DUJKA, KUSBACH, 2023). Nejprve se na území ČR používaly dvě odlišné klasifikace. V hercynské části se používala stanovištně zaměřená klasifikace označovaná jako „MMS“ (MEZERA a kol., 1956), a v karpatské části se používala vegetačně zaměřená klasifikace prof. ZLATNÍKA (1956). Na základě těchto klasifikací pak vznikla v 70. letech 20. století nová klasifikace, nazývaná „Typologický systém ÚHÚL“ (PLÍVA, 1971). Snahou autorů při tvorbě nové klasifikace bylo využít silných stránek původních klasifikací a zkombinovat stanovištní a vegetační přístup při klasifikaci lesů. Ze Zlatníkovy klasifikace tak nový systém přebíral mírně upravený koncept vegetační stupňovitosti, jako nadstavbové jednotky, pro kterou je důležité klima.

Průkopníkem myšlenky o vegetačních stupních ve smyslu klimatických stupňů byl v Československu v období 30-40. let prof. Alois Zlatník (ZLATNÍK, 1956, 1959b). Všichni ostatní autoři, kteří se později problematice vegetační stupňovitosti věnovali, vycházeli z jeho myšlenek, případně jeho myšlenky dále rozvíjeli nebo modifikovali. Vegetační stupně (VS) podle prof. Zlatníka se staly nadstavbovými jednotkami geobiocenologického systému (ZLATNÍK, 1956, 1959b, 1976) a jejich upravená podoba jednotkami Typologického systému ÚHÚL (PLÍVA, 1971, 1991). Srovnání vegetačních stupňů systému dle ZLATNÍKA (1959b, 1963) a Typologického systému ÚHÚL (PLÍVA, 1971, 1991) je uvedeno v tabulce č. 1.

Tab. 1 Srovnání vegetačních stupňů dle klasifikace prof. Zlatníka a Typologického systému ÚHÚL

Tab. 1 Comparison of vegetation zones according to Prof. Zlatník's classification and the Czech forest ecosystem classification

Zlatník 1957, 1976*	Plíva 1971, 1991*
1. dubový	1. dubový
2. bukově-dubový	2. buko-dubový
3. dubovo-bukový	3. dubo-bukový
4. bukový	4. bukový
5. jedlovo-bukový	5. jedlo-bukový
6. smrkovo-jedlovo-bukový	6. smrko-bukový
	7. buko-smrkový
7. smrkový	8. smrkový
8. klečový	9. klečový
9. alpský*	(10. alpský)*
10. subnivální* (jen pro Tatry)	-

Vegetační stupně v geobiocenologickém systému

Za první náznaky definice vegetačních stupňů můžeme v díle A. Zlatníka považovat část ve stati Typologické podklady pěstění lesů (ZLATNÍK, 1956), kde autor pro oblast Československé republiky vylíčil šest tzv. stanovištních oblastí (údolní/lužní, nížinnou, pahorkatinnou, vysočinnou, nižších horských poloh a vyšších horských poloh). Mezi charakteristikami těchto oblastí Zlatník použil mimo jiné i rozpětí nadmořských výšek, průměrnou roční teplotu, roční sumu srážek a délku vegetačního období – tedy charakteristiky, které později on i další použili jako charakteristiky vegetačních stupňů.

První zmínka o vegetačních stupních v pojetí, jak jsou použity v Geobiocenologickém systému nebo Typologickém systému ÚHÚL, se v literatuře objevuje v roce 1957 v práci Zlatníka (ZLATNÍK, 1957), kde je již pojednáno o LVS jako klimatických stupních, s tím, že ve stejném výškovém klimatu se ještě významně uplatňuje expozice. Zlatník zde pro území ČSR vymezil tyto VS: 1. dubový, 2. bukovo-dubový, 3. dubovo-bukový, 4. bukový, 5. jedlovo-bukový, 6. smrkovo-bukovo-jedlový, 7. smrkový, 8. klečový, 9. alpský, 10. subnivální (jen pro Tatry). Další zmínka o LVS (ZLATNÍK, 1959a) je velmi stručná a autor pouze uvádí, že „je možno lesní typy účelově sdružovat do jednotek vyššího stupně pro potřeby mapování a vzájemného porovnávání“. Tyto jednotky chápe jako abstraktní, ale s výskytem v konkrétních podmínkách, tzv. segmentech. Vegetační stupně chápe jako abstraktní soubornou jednotku, která představuje určitý soubor typologických jednotek (typů geobiocény, skupiny lesních typů) se zřetelem na určité vztahy k lokálnímu a výškovému podnebí.

Naproti tomu v dalším díle z téhož roku (ZLATNÍK, 1959b) již koncept vegetačních stupňů rozpracoval dosti detailně. Jednotku „lesní vegetační stupeň“ vylíčil jako nadstavbovou jednotku (při tvoření skupin lesních typů) na základě rozdílů v lokálním a výškovém klimatu na fytocenologickém podkladě, tj. na určitém druhovém složení vegetace. Zlatník uvádí charakteristické druhy bylinného podrostu a jejich kombinace pro jednotlivé LVS. Definici a charakteristiky vegetační stupňovitosti pak ZLATNÍK (1963) dále obohatil o poznatky fytoindikační hodnoty druhů lesního podrostu. Jednotlivé taxony seskupil do skupin podle jejich výskytu v jednotlivých LVS. Zlatník rozlišuje dvě hlavní skupiny druhů a to, druhy sestupující z vyšších stupňů níže a druhy vyskytující se v nižších LVS a vystupující do vyšších stupňů.

V další publikaci, pak ZLATNÍK (1975) navíc přidává 9. VS alpský a 10. nivální, a rozpracovává myšlenky o variantách vegetační stupňovitosti, které způsobují rozdíly ve vegetaci způsobené rozdílným typem vývoje určitých krajinných segmentů, nebo rozdílnou migrací a vývojem flóry na straně jedné a rozdíly v klimatu u podobných krajinných segmentů na straně druhé. Na tomto základě Zlatník vylíčil tyto varianty vegetační stupňovitosti: a) varianty chorologické – podle původu elementů flóry, b) varianty ekologické – podle klimatických pomínek a c) varianty ekologicko-chorologické – vznikající kombinací dvou předešlých.

Ekologické varianty jsou dále děleny na: a) suchou, b) ombrickou, c) kontinentální a d) edafickou. Varianty se projevují ve skladbě dřevinného komplexu zpravidla jen gradací nebo úbytkem až nedostatkem určité dřeviny, kvantitativně nahrazeným jinou dřevinnou, kdežto v podrostovém komplexu se odchylka týká více taxonů.

Po smrti Aloise Zlatníka se vegetační stupně v podobě, jak je publikoval, objevují u několika autorů. Všichni vycházejí ze Zlatníkova práce a zpravidla přidávají nové poznatky k definicím a výskytu jednotlivých LVS. AMBROS (1988) jen opětovně publikoval věci z díla A. Zlatníka, naproti tomu, MÍCHAL (1988) při srovnávání jednotek Walterova systému (orobiomy) s jednotkami Zlatníkova systému (LVS), dochází k názoru, že v rámci bývalé ČSSR lze rozlišit nejméně čtyři vegetační stupňovitosti, různé podle biogeografických oblastí, s odlišným chováním hlavních dřevin přírodních lesů v jednotlivých výškových stupních na vyspělých „zonálních“ půdách.

BUČEK A LACINA (1999) velmi podrobně rozpracovali popisy (od klimatických charakteristik, fytoindikačních druhů až po současný stav krajiny a reprezentativní ukázky) jednotlivých vegetačních stupňů na území ČR, včetně xerické varianty 2. LVS a dubojehličnaté varianty 4. LVS. Prozatím nejpodrobnější popis a charakteristiky vegetačních stupňů najdeme v díle CULEK A KOL. (2005), který ve spolupráci s Bučkem a Lacinou rozšířil jimi publikované popisy LVS a navíc rozpracoval ekologické varianty VS, kdy u 2. – 4. LVS rozlišuje variantu oceánickou a kontinentální.

Vegetační stupně v Typologickém systému ÚHÚL

Typologický systém ÚHÚL (PLÍVA, 1971) převzal koncept vegetačních stupňů od Zlatníkova systému a pouze jej upravil pro podmínky hercynika, a to tak, že původní Zlatníkův 6. VS smrko-bukovo-jedlový byl rozdělen na dva vegetační stupně, a to VS smrko-bukový a VS buko-smrkový. Mimo tuto změnu však byl Zlatníkův teorém vegetační stupňovitosti převzat zcela.

Přestože byl Typologický systém ÚHÚL v několika následných publikacích (RANDUŠKA A KOL., 1986; PLÍVA, 1991; PRŮŠA, 2001; VIEWEGH, 2003) mírně opravován a doplňován, vegetační stupně již zůstaly beze změn. Jednotliví autoři převzali vše o vegetačních stupních, včetně jejich charakteristik z prvotní publikace systému. Dále můžeme nalézt drobné zmínky o vegetační stupňovitosti v práci dalších autorů. MACKŮ (1993) poukazuje na nutnost upřesnění LVS, zejména vymezení 4. LVS včetně jeho dubojehličnaté varianty, resp. bezbukové varianty zejména v hercynské oblasti a VOKOUN (1999) zmiňuje chorologicko-ekologické varianty vegetační stupňovitosti a pro některé oblasti ČR zmiňuje specifický výskyt nebo absenci některých důležitých stromových edifikátorů.

Podrobné charakteristiky VS však nezpracoval žádný z těchto autorů – to co bylo publikováno jsou jen popisy zastoupení dřevin ve vegetačních stupních, doplněné tabulkou s klimatickými charakteristikami. První, kdo popisuje strukturu edifikátorů lesních ekosystémů s popisem rozdílů jednotlivých vegetačních stupňů je HOLUŠA (2003). Diferenciální znaky VS pro oblast severovýchodní Moravy a Slezska pak publikovali HOLUŠA & HOLUŠA (2008, 2010, 2011).

PROBLEMATIKA DETERMINACE LESNÍCH VEGETAČNÍCH STUPŇŮ

Jak je uvedeno v předchozím textu, LVS jsou determinovány přirozeným rozšířením dřevin a rozhodující význam mají edifikátory. Při praktické aplikaci konceptu LVS založeném na rostlinných společenstvech však narážíme na problém, že velká část, ne-li všechny lesy na území České republiky byly nebo jsou ovlivněny lidskou činností. V oblastech, kde je recentní složení lesních společenstev s vysokým stupněm přirozenosti to není problém, protože na základě studia zachovalých lesních přírodě blízkých společenstev, zejména v rezervacích víme, že se uměle založená společenstva s druhovou skladbou podobnou té přirozené, chovají podobně. Problematická pak bývá determinace LVS v územích, kde jsou v současnosti společenstva druhově odlišná od těch přirozených. Tento problém je přítomen při determinaci LVS od samého počátku typologického mapování lesů. V minulosti proto byly snahy pomoci si při determinaci LVS jinými parametry, než jsou vlastnosti lesního rostlinného společenstva. Protože LVS mají do jisté míry odrážet vlastnosti klimatu, byly v minulosti často hledány právě klimatické charakteristiky jednotlivých LVS, pro snadnější určení LVS v oblastech se společenstvy s nízkým stupněm přirozenosti. Podrobný přehled různých systémů charakterizování LVS pomocí klimatických parametrů uvádí DUJKA A KUSBACH (2023). Příklad takových charakteristik je uveden v tabulce č. 2.

Tab. 2 Přehled lesních vegetačních stupňů a jejich klimatická charakteristika v hercynské oblasti (RANDUŠKA A KOL. 1986)

Tab. 2 Overview of forest vegetation zones and their climatic characteristics in the Hercynian region (RANDUŠKA A KOL. 1986)

LVS		Nadmořská výška	Průměrná teplota	Roční srážky	Vegetační doba
označení	%	(v m n.m.)	(v °C)	(v mm)	(dní)
1. dubový	8,31	<350	>8,0	<600	>165
2. bukodubový	14,89	350 - 400	7,5 - 8,0	600 - 650	160 - 165
3. dubobukový	18,41	400 - 550	6,5 - 7,5	650 - 700	150 - 160
4. bukový	5,69	550 - 600	6,0 - 6,5	700 - 800	140 - 150
5. jedlobukový	30,04	600 - 700	5,5 - 6,0	800 - 900	130 - 140
6. smrkobukový	11,95	700 - 900	4,5 - 5,5	900 - 1050	115 - 130
7. bukosmrkový	5,00	900 - 1050	4,0 - 4,5	1050 - 1200	100 - 115
8. smrkový	1,69	1050 - 1350	2,5 - 4,0	1200 - 1500	60 - 100
9. klečový	0,29	>1350	<2,5	>1500	<60
0. bory	3,73				

Jakkoli vypadají tyto klimatické charakteristiky jednoznačně, při jejich praktickém použití jsou limitovány faktem, že předpokládají určité průměrné vlastnosti lesního ekosystému, což odpovídá zonálnímu konceptu, jak jej zmiňují DUJKA A KUSBACH (2022). Použití klimatických charakteristik vytvořených v minulosti je bohužel limitováno proměnlivostí lesních stanovišť na úrovni expozičního klimatu a mikroklimatu. Tuto lokální rozrůzněnost růstových podmínek lesů dokážou zachytit dřeviny, které reagují na změnu podmínek na gradientu v řádu metrů až nižších desítek metrů, zatímco klimatické charakteristiky byly vytvořeny na základě charakteristik mezoklimatu. Navíc při tvorbě klimatických charakteristik byly a jsou používány údaje klimatických stanic, které

se standardně nachází v otevřené krajině. Tyto aspekty pak při použití klimatických charakteristik LVS způsobují významný rozpor při porovnání mapy LVS vytvořené na základě výskytu edifikátorů lesního společenstva a mapy na základě klimatických charakteristik. Z výše uvedených důvodů je tak při mapování LVS lesnickými typologemi jednoznačně použitelný pouze systém vymezující LVS na základě vlastností (zejména druhové složení) edifikátorů lesního společenstva.

DETERMINACE LVS V PODMÍNKÁCH MĚNÍCÍHO SE KLIMATU

Významným aspektem při determinaci LVS je měnící se klima. Jakkoli jde do určité míry o přirozený proces, který na Zemi probíhá neustále, rychlost, s jakou se klimatické podmínky v současnosti a nedávné minulosti mění, je z pohledu života vegetace obrovská.

Asi nejvíce vnímáme změny klimatu prostřednictvím teploty vzduchu. Teplé zimy téměř bez sněhu a léta s vysokým počtem tropických dnů se stávají všední realitou současnosti. Od šedesátých let 20. století je na území ČR pozorován postupný růst teplot vzduchu. Každé nové desetiletí je teplejší než to předchozí a nejvyšší průměrná teplota vzduchu byla dosažena v posledním desetiletí (2011-2019). V tomto období byla průměrná teplota vzduchu pro území ČR 9,1 °C což je o 1,3 °C více než průměrná teplota normálového období 1961-1990. Kontinuální nárůst teploty je pozorován hlavně v jarním a letním období. V poslední dekádě byly letní teploty vzduchu o 2,2 °C vyšší než v normálovém období 1961-1990, což je i největší pozorovaný nárůst z jednotlivých sezón (MAREK, 2022).

Zásadní z hlediska lesnické typologie je právě rychlost změn. Vezmeme-li v úvahu, že životní cyklus lesního společenstva jsou řádově stovky let, pak změny klimatu v řádu desetiletí jsou velmi rychlé. Problematický je fakt, že současný stav lesních společenstev do jisté míry odráží klima z doby, ve kterém společenstvo vzniklo až do současnosti. Pokud bychom se snažili využít pro determinaci LVS klimatické charakteristiky (viz tab. 2), pak bychom zjistili, že za poslední dekádu, jak uvádí MAREK (2022), by muselo dojít na našem území k posunu ve vegetační stupňovitosti minimálně o jeden LVS. V lesích však nic takového nepozorujeme. Tento aspekt má několik vysvětlení:

a) Rezistence lesních ekosystémů a jejich dlouhověkost.

Lesní dřeviny jsou z průběhu svého evolučního vývoje přizpůsobeny výkyvům klimatu, které se v minulosti také odehrávaly. Tyto změny klimatu ale zřejmě nebyly tak rychlé, jako jsou dnes. Reakční doba lesních dřevin je výrazně pomalejší, než je současná změna klimatu. Proto nelze očekávat, že během 10 až 20 let uvidíme zásadní změny u lesních dřevin, jejichž přirozená délka života se počítá na stovky let.

b) Problematika klimatu.

Jak je uvedeno výše, na lesní ekosystémy působí klima na všech svých úrovních a lze pozorovat významné změny na úrovni mezo a topo klimatu vůči makroklimatu (např. u expozičního klimatu může lokálně činit rozdíl více než jeden LVS). Problematický z hlediska posuzování klimatu je fakt, že údaje o klimatu pocházejí z „normovaných“ klimatických stanic, které se nachází na otevřené ploše mimo les. Vztahujeme tedy údaje o klimatu z otevřené krajiny na krajinu lesů. Je zde výrazný rozdíl, protože les sám o sobě je krajinný prvek, který klima ovlivňuje.

c) Ekologická valence druhů a společenstev.

Druhové složení a prostorová výstavba lesního společenstva je výsledkem působení mnoha abiotických a biotických faktorů. Není možné jednoduše na základě jednoho faktoru předpovídat změny chování celého společenstva. U lesních dřevin také neznáme, v jaké poloze jejich ekologické valence se momentálně nacházíme a zda změny klimatu budou znamenat překročení limitů daného druhu v blízké budoucnosti nebo se daný druh jen posune v rámci svého rozpětí podmínek, které je schopen ještě snášet. Nesmíme také zapomínat na vliv mezidruhové konkurence, protože ta může způsobovat, že některé druhy mohou být posunuty mimo své optimum jinými druhy a nemůžeme tedy zcela jednoznačně usuzovat na ekologickou amplitudu jednotlivých druhů na základě jejich současného postavení v konkrétním lesním společenstvu.

d) Adaptace, epigenetika.

V neposlední řadě nejsou nám zcela známy možnosti adaptace jednotlivých druhů tvořících lesní ekosystém a role epigenetiky. Z lesnické praxe můžeme uvést řadu příkladů lokálních populací, které se adaptovaly na specifické podmínky. Stejně tak je neopomenutelná adaptační schopnost jedince nebo celé populace. Zejména nově vznikající porosty, které se již budou vyvíjet ve změněných podmínkách mohou překvapit svým adaptačním potenciálem, který není známý.

ZÁVĚR

Klima na různé úrovni (makro, mezo, topo, expoziční) z pohledu lesnické typologie v současnosti představuje celou řadu nedořešených otázek. Mezi ty nejdůležitější patří:

- 1) Lesní společenstva nereagují na klima lineárně, ale klima je jeden z mnoha faktorů, který společenstvo formuje. Dosud neznáme, jak velkou měrou klima společenstvo ovlivňuje, víme spolehlivě, že klima může být při překročení určitých mezí fatálním faktorem. Jak velký prostor pro existenci v podmínkách měnícího se klimatu mají současná lesní společenstva?
- 2) Z hlediska klimatu a krajiny máme dobře zmapovány charakteristiky otevřené krajiny, protože v ní se nachází síť klimatických stanic. Charakteristiky lesního mikroklimatu však nejsou dosud detailně zmapovány v krajinném rozsahu, zpravidla se jedná o lokální informace. Jaké jsou rozdíly mezi klimatem otevřené krajiny, lesní krajiny a lesním mikroklimatem?
- 3) Současné mapování LVS je založeno na porostech, které zpravidla vznikly v 1. polovině 20. století nebo ještě dříve. Odráží tedy hlavně klimatické podmínky nedávné minulosti, nikoliv přítomnosti. Což přináší výzvu do lesnického plánování, kde je jednotka LVS zásadním aspektem. Jak tedy provádět lesnické plánování na jednotkách odrážejících minulé klima, když chceme reagovat na probíhající změny klimatu?
- 4) Rychlost změn klimatu je velmi rychlá a není jasné, jak přesně na ni budou lesní společenstva reagovat. Lze předpokládat rychlý (často kalamitní, fatální) ústup druhů, kterým nové podmínky nevyhovují a postupný nástup druhů nových. Neznámou je reakce lesních společenstev jako takových. Dojde k pouhému posunu jednotlivých společenstev nebo se začnou tvořit společenstva zcela odlišná od těch, které známe dnes?

Dokud nebudou známy odpovědi na tyto otázky, bude pro lesnickou typologii jako obor velmi těžké vypořádat se s měnícími se podmínkami, jak těmi přírodními, tak těmi společenskými. Je proto žádoucí nasměrovat výzkumné a odborné aktivity k intenzivnímu řešení této problematiky.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory projektu NAZV QL24020351.

LITERATURA

AMBROS, Z., 1988. *Ekologické řady a vegetační stupně – baze pro porovnávání typologických a fytoecologických jednotek v rámci ČSSR*. In: *Význam díla prof. Zlatníka pro současnou geobiocenologii a lesnickou typologii – sborník referátů*, Lesnická fakulta Vysoké školy zemědělské v Brně, Brno.

BUČEK, A., LACINA, J. 1999: *Geobiocenologie II*. Scriptum, Mendelova zemědělská a lesnická Univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, Brno, 240 pp.

CULEK, M. & kol. 2005. *Biogeografické členění České republiky II. díl*, Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha, 590 s.

DUJKA, P., KUSBACH, A. 2022. *Zonální koncept v lesnické typologii: review*. In: *Zprávy lesnického výzkumu*, 67, 2022 (4), s. 236 – 245.

DUJKA, P., KUSBACH, A. 2023. *Klasifikace vegetační stupňovitosti v České republice: review*. In: *Zprávy lesnického výzkumu*, 68, 2023 (1), s. 1 – 14.

HOLUŠA, O. 2003. *Vegetační stupňovitost a její bioindikace pomocí řádu pisívek (Insecta: Psocoptera)*. [Dísační práce]. Mendelova zemědělská a lesnická Univerzita, Lesnická a dřevařská fakulta, Brno, 258 s.

HOLUŠA, O., HOLUŠA, J. st. 2008. *Characteristics of 3rd (Querci-fageta s. lat.) and 4th (Fageta (abietis) s. lat.) vegetation tiers of north-eastern Moravia and Silesia (Czech Republic)*. Journal of Forest Science, 54: s. 439-451.

HOLUŠA, O., HOLUŠA, J. st. 2010. *Characteristics of 5th (Abieti-fageta s. lat.) and 6th (Picei-fageta s. lat.) vegetation tiers of north-eastern Moravia and Silesia (Czech Republic)*. Acta Musei Beskydensis, 2: s. 49-62.

HOLUŠA, O., HOLUŠA, J. st. 2011. *Characteristics of 7th (Picei-fageta s. lat.) and 8th (Piceeta s. lat.) vegetation tiers of north-eastern Moravia and Silesia (Czech Republic)*. Acta Musei Beskydensis, 3.

MACKŮ, J. 1993. *Současná náplň šetření typologie lesů při vyhotovení LHP*, s. 89 – 97. In: Štykar J. (Ed.) *Geobiocenologický průzkum lesů, výsledky a aplikace poznatků*, Sborník referátů ze sympozia k 90. výročí narození prof. Aloise Zlatníka, VŠZ v Brně, 150 s.

MAREK, M., V. A KOL. 2022. *Klimatická změna – příčiny, dopady a adaptace*. Academia, Praha, ISBN 978-80-200-3362-8

MEZERA, A., MRÁZ, K., SAMEK, V. 1956. *Stanovištně typologický přehled lesních rostlinných společenstev*. Lesprojekt – ústav pro hospodářskou úpravu lesů v Brandýse nad Labem

- MÍCHAL, I. 1988. *Nadstavbové jednotky geobiocenologického systému v evropských souvislostech*, s. 39 – 56. In: Význam díla prof. Zlatníka pro současnou geobiocenologii a lesnickou typologii, Sbor. referátů. LF VŠZ Brno, 107 s.
- PLÍVA, K. 1971. *Typologický systém ÚHÚL*. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, Brandýs nad Labem, 90 s.
- PLÍVA, K. 1991. *Přírodní podmínky v lesním plánování*. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, Brandýs nad Labem, 264 s.
- PRŮŠA, E. 2001. *Pěstování lesů na typologických základech*. Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy, 593 s.
- RANDUŠKA, D., VOREL, J. & PLÍVA, K. 1986. *Fytocenológia a lesnícka typológia*. Príroda, Bratislava, 339 s.
- VIEWEGH, J. 2003. *Klasifikace lesních rostlinných společenstev*, skriptum, Česká zemědělská univerzita v Praze, 216 s.
- VOKOUN, J. 1999. *Typologický systém ÚHÚL a cesty k jeho dalšímu rozvoji*, Lesnická práce, 1999 (3): s. 111-113.
- ZLATNÍK, A. 1956. *Typologické podklady pěstění lesů*, s. 317 – 415. In: POLANSKÝ, B. & kol., Pěstění lesů III., Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 595 s.
- ZLATNÍK, A. 1957. *Využití generálních typologických map k tvoření územních celků a jejich význam pro lesnickou praxi*, Sborník vysoké školy zemědělské a lesnické v Brně, řada C: spisy fakulty lesnické. s. 75-89
- ZLATNÍK, A. 1959a. *Skupiny lesných typov Slovenska*, Slovenské vydavateľstvo podohospodárskej literatúry v Bratislave, 145 pp.
- ZLATNÍK, A., 1959b. *Přehled Slovenských lesů podle Skupin lesních typů*. In: *Spisy Vědecké laboratoře biogeocenologie a typologie lesa Lesnické fakulty Vysoké školy zemědělské v Brně číslo 3.*, Lesnická fakulta Vysoké školy zemědělské v Brně, Brno.
- ZLATNÍK, A. 1963. *Die Vegetationstufen und deren Indikation durch Pflanzenarten am Beispiel der Wälder der ČSSR*. Preslia, 35. s. 31-51.
- ZLATNÍK, A. 1975. *Ekologie krajiny a geobiocenologie*. Scriptum VŠZ Brno. 172 s.
- ZLATNÍK, A. 1976. *Přehled skupin typů geobiocénů původně lesních a křovitých v ČSSR*. Zprávy Geografického Ústavu ČSAV 13, Brno, 13: s. 55- 65.

SOUBOR MAP ČR PRO NAVRHOVÁNÍ MALÝCH VODNÍCH PLOCH JAKO VÝSLEDEK MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZY FYZICKO-GEOGRAFICKÝCH PODKLADŮ

Marek Bednář¹, Patrik Netopil¹, Bořivoj Šarapatka¹

¹Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra ekologie a životního prostředí, Šlechtitelů 27, 783 71, Olomouc-Holice, marek.bednar@upol.cz, patrik.netopil@upol.cz, borivoj.sarapatka@upol.cz

ABSTRACT

Bednář, M., Netopil, P., Šarapatka, B.: A Map Collection of the Czech Republic for Designing Small Water Bodies Based on Multicriteria Analysis of Physical-Geographical Datasets.

This paper introduces a map collection of the Czech Republic designed for planning small water bodies (SWBs). This map atlas is the result of a nationwide multicriteria analysis (MCA) that integrated ten physical-geographical geolayers, such as waterlogged soils, hydrological soil groups, concentrated runoff pathways, soil water retention capacity, historical ponds, and others. The main objective was to identify potentially suitable locations for the implementation of SWBs, which serve as a key adaptation measure for water retention in the landscape, biodiversity support, and mitigation of climate change impacts like droughts and floods. The MCA results are presented in the form of a printed atlas and an interactive map server called MAVOPIS, which allow for a detailed assessment of site suitability. The paper also discusses the importance of SWBs not only for water retention but also for their multifunctional benefits to landscape ecological stability, emphasizing the need to consider local conditions, especially the presence of protected species, in the final selection and design of these measures.

Key words: multicriteria data analysis (MCA), small water bodies, water retention, biodiversity, climate change

ÚVOD

Zadržování vody v krajině je klíčové adaptační opatření v unijní i národní strategii pro zmírnění tzv. hydrometeorologických extrémů, tj. období sucha nebo povodní (EVROPSKÁ KOMISE 2021, MŽP 2021). S postupující klimatickou změnou se frekvence těchto jevů bude velmi pravděpodobně dále zvyšovat (BRÁZDIL ET AL. 2015). Hlavním limitem pro racionální využití vodních zdrojů jsou zejména fyzicko-geografické poměry, kdy převážná část území ČR spadá do pramenných oblastí velkých evropských řek (hranice evropských rozvodí) nebo jejich významných přítoků. Většina vody z našeho území tedy odtéká, proto jsme nuceni hospodařit převážně jen s vodou, která na naše území spadne ve formě atmosférických srážek a transformuje se na povrchový odtok. Zadržování vody se projevuje v krajině i v dalších oblastech hospodaření, jako například při ochraně půdy před erozí, podpoře biodiverzity, změně mikroklimatu a dalších neprodukcích funkcí krajiny.

Jedním z hlavních nástrojů k dosažení adaptačních cílů může být realizace malých vodních ploch (MVP) na vybraných a k tomuto účelu vhodných lokalitách. Za MVP jsou v tomto příspěvku považovány nejen malé vodní nádrže (např. závlahové, retenční, suché a krajinotvorné), ale i přírodě blízká opatření, jako jsou různé typy mokřadů, tj. močály, prameniště, podmačené louky, tůňe nebo prostory vypuštěných rybníků. Přehled těchto opatření přináší katalog přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině (DZURÁKOVÁ ET AL. 2017). Tato opatření mají různě velkou retenční (retardační) funkci, a to zejména soustředěného odtoku vody z krajiny. Zároveň však mohou plnit i jiné funkce, jako například ekosystémovou (ekologickou), biodiverzitní či krajinotvornou, a to zejména v případě, že jsou v krajině vhodně lokalizovány a projektovány.

Pro ochranu krajinných území a biodiverzity je důležitá znalost místních podmínek při lokalizaci daného opatření, neboť různé skupiny rostlin a živočichů preferují různé podmínky prostředí. V případě narušení nebo dokonce likvidace těchto podmínek (např. zátopou) může v krajním případě dojít k zániku místní populace, což může být u chráněných druhů velmi nežádoucí a kontraproduktivní.

Pro realizaci MVP je v naší krajině, která byla v minulosti silně pozměněna, poměrně málo vhodných lokalit. Jako perspektivní se jeví především některé typy tzv. neprodukcí ploch, a to jak polo/přírodních (např.

mokřady, podmačené louky), tak i antropogenních, které vznikly v rámci lidské činnosti (v zemědělské krajině např. travnaté porosty, remízky a křoviny kolem údolnic). Specifická jsou v krajině místa s nefunkčními drenážními systémy, plochy bývalých (zaniklých) historických rybníků, polních mokřadů nebo tzv. kritické body na hranici intravilánu a okolní krajiny, kde realizace MVP může významně přispět i k protipovodňové a protierozní ochraně sídel (NOVÁK A TOMEK 2015). Protipožární funkci mohou MVP plnit v lesnictví.

Obecně jsou tyto specifické typy neprodukcí ploch problematicky obhospodařovatelné, a to hlavně kvůli nepříznivému půdně-hydrologickému režimu (vysoká hladina podzemní vody/voda na povrchu). Ačkoliv mají nízkou produkční hodnotu, jejich mimoprodukční význam je obrovský, protože zadržují vodu (zpomalují odtok), pozitivně ovlivňují mikroklima, jsou centry biodiverzity a plní funkci genové banky (SYCHRA ET AL. 2022). Potenciál těchto ploch je velký nejen z pohledu druhové, ale i krajinné diverzity, a to i s ohledem na národní strategii pro podporu biologické rozmanitosti (MŽP 2006), včetně unijní strategie (EVROPSKÁ KOMISE 2021).

Hlavním cílem tohoto příspěvku je představit atlas (soubor map) ČR, který je výsledkem celorepublikové multikriteriální analýzy (MKA). Toto mapové dílo má primárně pomáhat s výběrem potenciálně vhodných lokalit pro realizaci MVP v krajině.

MATERIÁL A METODY

Pro řešení úkolu byla využita multikriteriální analýza, tj. proces hodnocení a porovnání několika variant nebo řešení na základě sady předem stanovených kritérií. Obecný postup zahrnuje stanovení cíle, výběr a standardizaci kritérií, přiřazení váhy každému kritériu, provedení operací (např. překryvných) a nakonec validaci a interpretaci výsledků. Využívá se často v oblastech strategického plánování, hodnocení projektů a výběru investic (DODGSON ET AL. 2009, DEAN 2022). MKA je subjektivní metoda založená na předpokladech a odborném posouzení, výsledky totiž mohou být ovlivněny váhami kritérií a zvolenými metodami hodnocení, na což je třeba brát ohled.

Multikriteriální analýza byla v našem případě realizována prostřednictvím nástrojů GIS jako tzv. rastrová analýza vhodnosti. V prostředí GIS je rozhodovací proces postaven nad prostorovými daty (geodaty), kdy se na základě zvolených kritérií hledá nejlepší možné řešení na základě předem stanovené váhy jednotlivých kritérií z hlediska jejich (ne)důležitosti. V našem případě MKA hodnotila vhodnost realizace MVP na území celé ČR na základě níže uvedených vstupních fyzicko-geografických podmínek (digitálních vrstev). Velikost rastru (rozlišení pixelu) byla pro celorepublikové pokrytí stanovena na hodnotu 100×100 m. Výsledná hodnota vhodnosti realizace MVP se pohybuje v intervalu od 0 (realizace nejméně vhodná) až po 1 (nejvíce vhodná). Váha jednotlivých vrstev byla určena na základě analýzy hlavních komponent (PCA) jednotlivých vstupních proměnných, kdy výsledná váha vycházela z příspěvku jednotlivých proměnných pro celkovou variabilitu v rámci hlavních os PCA analýzy. Vzhledem k možným prostorovým odlišnostem byly při výpočtu také zohledněny jednotlivé zemědělské výrobní oblasti (NETOPIIL ET AL. 2023).

Pro vlastní analýzu bylo vybráno následujících 10 fyzicko-geografických podkladů:

1) Trvale a periodicky zamokřené půdy

Trvale a periodicky zamokřené půdy byly určeny podle hlavních půdních jednotek (HPJ), které jsou součástí geodatabáze bonitovaných půdně-ekologických jednotek (BPEJ), která vychází z metodiky pro bonitaci zemědělského půdního fondu ČR (NOVOTNÝ ET AL. 2013). Skupina trvale zamokřených půd zahrnuje HPJ 64–76. K typickým představitelům této skupiny patří gleje a stagnogleje. Skupina periodicky zamokřených půd obsahuje HPJ 44, 47–54 a 58. K typickým představitelům skupiny jsou pseudogleje.

2) Hydrologická skupina půd

Hydrologická skupina půd (HSP) obecně sdružuje půdy s podobnými fyzikálními a odtokovými parametry. Určení HSP bylo opět provedeno s pomocí databáze BPEJ na základě kódu HPJ. K převodu HPJ na HSP byla použita převodní tabulka podle metodiky Ochrana zemědělské půdy před erozí (PODHRÁZSKÁ ET AL. 2024). Půdy lze podle jejich hydrologických vlastností obecně rozdělit do 4 skupin: A, B, C, D na základě nasycené hydraulické vodivosti, hloubky nepropustné vrstvy a hladiny podzemní vody (HPV).

Duální hydrologické skupiny půd (B/D, C/D) jsou uvedeny u půd HSP skupiny D pouze na základě hloubky hladiny podzemní vody, a to v hloubce < 60 cm, kdy je nasycená hydraulická vodivost příznivá. Pokud jsou tyto půdy částečně odvodněné (hloubka hladiny podzemní vody > 60 cm), řadí se do skupiny podle nasycené hydraulické vodivosti.

3) Povodí kritických bodů

Kritický bod je průsečíkem hranice zastavěného území obce (intravilánu) s linií dráhy soustředěného odtoku. Právě tato místa, kde linie drah soustředěného odtoku vnikají do zástavby, jsou kritická z pohledu koncentrace odtoku. Zejména v případě přívalových srážek je tak území ohroženo nejen vodou, ale i erozí a akumulací transportovaného sedimentu.

4) Dráhy soustředěného odtoku a jejich přispívající plochy

Často se jedná o přirozené údolnice, tzv. dráhy soustředěného povrchového odtoku (DSO) nebo o linie podél jiných přímočarých krajinných prvků, např. hranice pozemků, rýhy vytvořené v rámci zemědělské činnosti nebo podél polních cest.

5) Retenční vodní kapacita půd

Retenční vodní kapacitu (RVK) lze definovat jako množství vody, které je půda schopna zadržet v kapilárních pórech a postupně ji rostlinám podle potřeby uvolňovat. V rámci zemědělského půdního fondu ji lze určit na základě BPEJ jednotek a údajů z databáze fyzikálních, chemických a morfologických charakteristik půd ČR. Hodnoty RVK zohledňují průměrnou hloubku profilu a obsah vody, ukazují na skutečné množství vody, které je půda schopná při srážkách zadržet. Celkem byly definovány 4 kategorie RVK: nízká < 100 mm, střední 100–200 mm, vysoká 200–300 mm, velmi vysoká > 300 mm.

6) Územní systémy ekologické stability (ÚSES) – nadregionální a regionální

ÚSES je z definice vzájemně propojený soubor přirozených i pozměněných, ale přírodě blízkých ekosystémů, které udržují přírodní rovnováhu. Hlavním účelem ÚSES je vytvářet základní ekologickou síť a posílit tak ekologickou stabilitu krajiny. V rámci MKA byly definovány tři kategorie ÚSES: prvky zamokřené, potenciálně zamokřené a suché. Každé kategorii byla určena určitá bodová hodnota.

7) Dálkový průzkum Země (DPZ)

Do analýzy MKA vstupovala i speciální geovrstva založená na spektrálních indexech vypočítaných ze satelitních dat otevřených družicových systémů. Nakonec byly využity dva spektrální indexy – Normalized Difference Water Index (NDWI) a Water In Wetlands index (WIW). Výsledkem byla vrstva obsahující 3 kategorie: vodní plocha – stálá/převážně stálá, často zaplavovaná a občas zaplavovaná. Indexy byly počítány kombinací dat družic Landsat 5 (období 1984–2012), Landsat 8 (2013–2022) a Sentinel-2 (2017–2022).

8) Historické rybníky

Geodatabáze historických rybníků byla převzata z výsledků projektu NAZV KUS QJ1220233, kde byla v rámci výzkumné činnosti vytvořena celorepubliková databáze historických rybníků, která vznikla porovnáním aktuálních ortofot a výsledků vektorizace rybníků zachycených na archivních mapách 2. vojenského mapování (1836–1852).

9) Svažitost

Obecně je lokalizace či případná realizace MVP nevhodná v příliš svažitém terénu. Vzhledem k nízkému rozlišení výsledné rastrové vrstvy MKA (100×100 m) byla stanovena prahová hodnota sklonu terénu 5°, nad kterou je realizace MVP nevhodná.

10) Sesuvná území

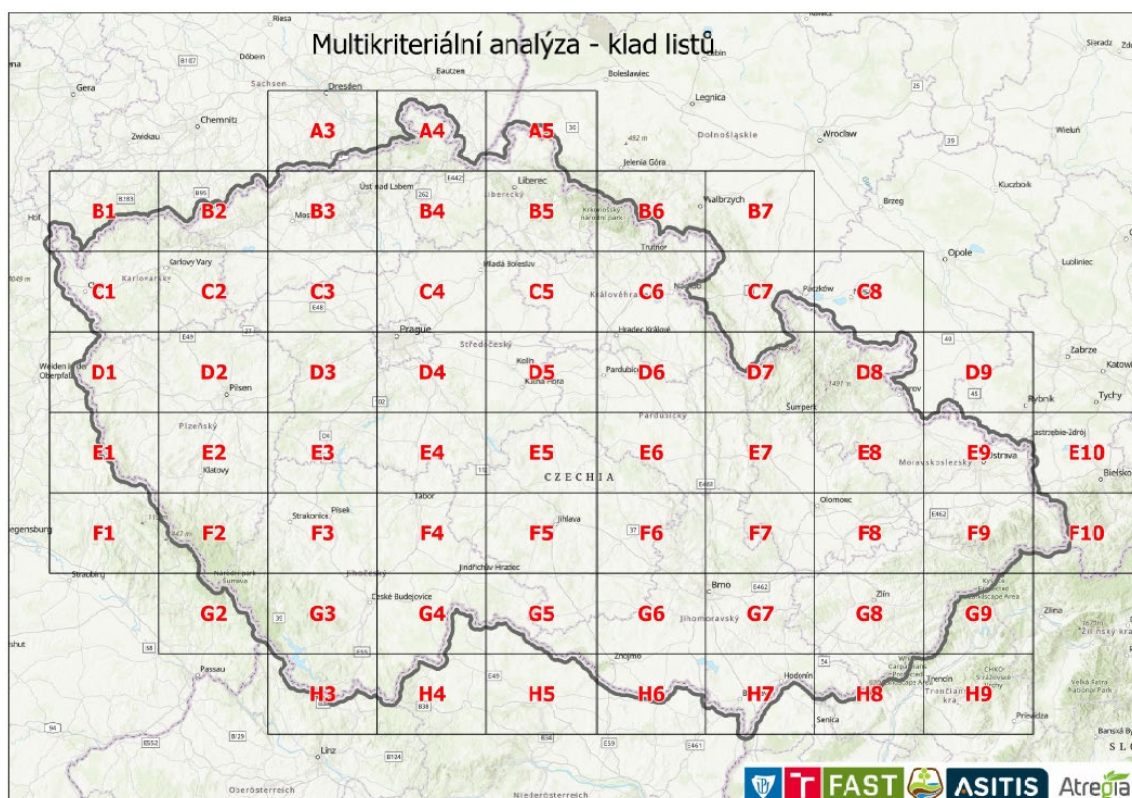
Území náchylná k sesuvům jsou obecně pro realizaci MVP nevhodná. Tato vrstva byla využita jen na počátku pro určení rizikových území jako vylučující podmínka a do dalších kroků výpočtu MKA již nestupovala.

V případě dostupnosti celostátní vrstvy odvodnění (zamokření) by o tyto lokality mohla být MKA vhodně rozšířena. Součástí výstupů pro území Jihomoravského kraje jsou i lokality pro budování opatření nevhodné z důvodu výskytu cenných deštníkových druhů a biotopů. Samotný výběr nejvhodnějšího opatření a jeho přesná lokalizace v konkrétní lokalitě tak vždy závisí na detailním biologickém průzkumu daného stanoviště.

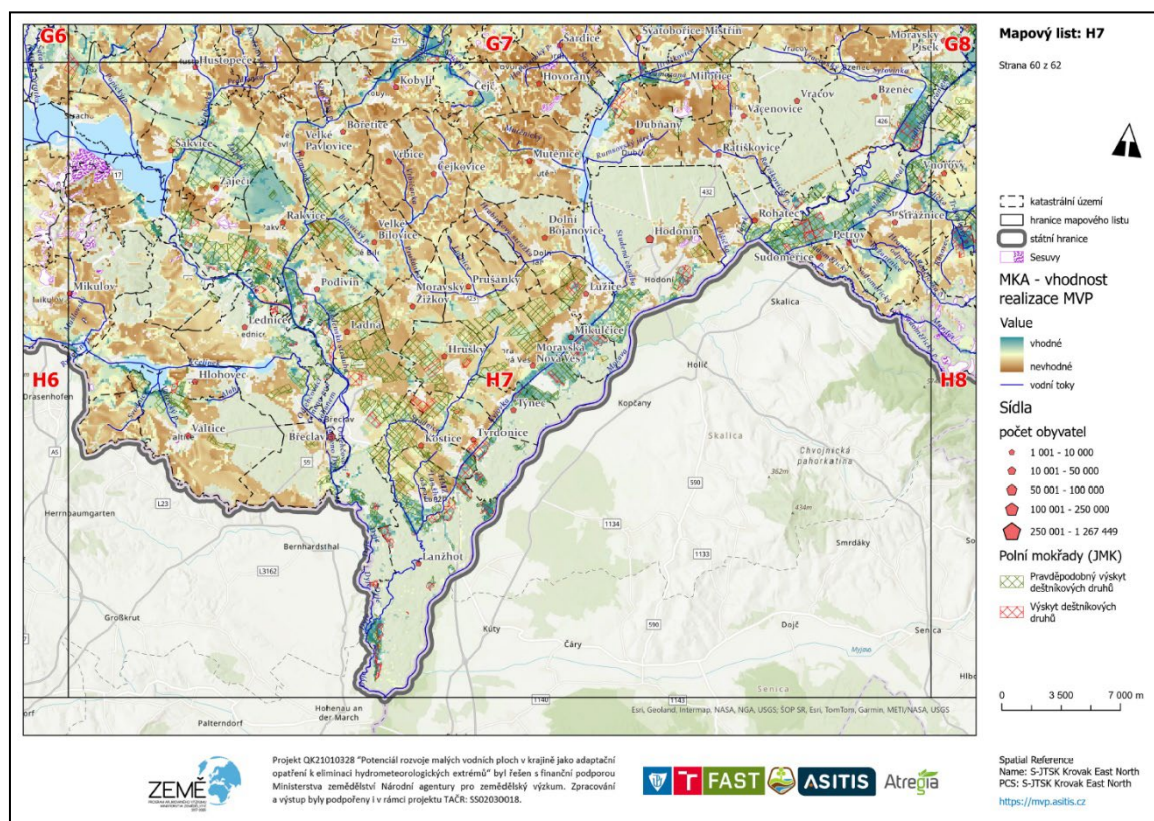
VÝSLEDKY A DISKUZE

Výsledkem MKA je celorepubliková bezešvá digitální vrstva v rastrovém formátu s rozlišením pixelu 100×100 m. Výsledné rozlišení je kompromisem mezi čitelností a výpočetní náročností v rámci celostátního pokrytí. Váhy jednotlivých vrstev byly při výpočtu MKA stanoveny na základě PCA analýzy jednotlivých vrstev individuálně za jednotlivé výrobní oblasti. Finální kombinovaná vrstva MKA za ČR je tedy váženým průměrem jednotlivých faktorů, které nabývají hodnot od 0 do 1, kde 1 znamená nejvhodnější a 0 nejméně vhodné lokality.

Následně byl na tomto základu vytvořen soubor map s názvem „Zobrazení prostorové lokalizace ploch vhodných k návrhu a realizaci malých vodních ploch“, který pokrývá celé území České republiky. Celkově se jedná o 62 mapových listů exportovaných v digitální formě do souboru PDF v rozlišení 300 DPI. Vrstva výsledné MKA je pro lepší orientaci v mapovém díle zobrazena na jednotlivých mapových listech nad podkladem základní topologické mapy. Přehled kladu listů výsledného souboru map ukazuje Obr. 1, ukázka konkrétního mapového listu ze souboru map viz Obr. 2.

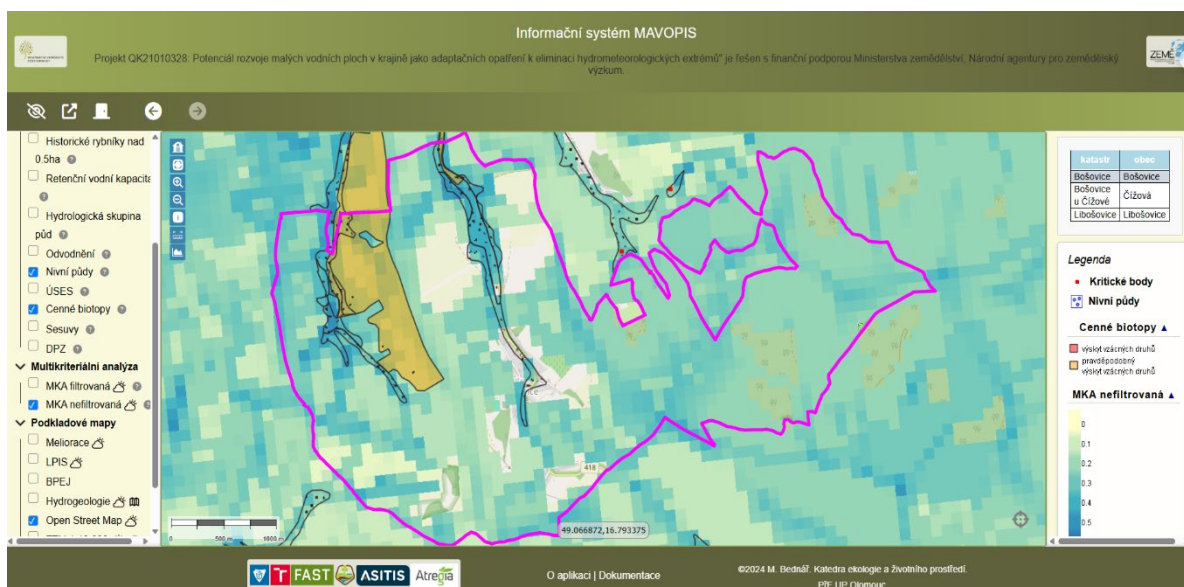


Obr. 1 MKA – uspořádání kladu listů (celkem 62 samostatných map).
Fig. 1 MCA – layout of map sheets (total of 62 separate maps).



Obr. 2 Ukázka konkrétního mapového listu (H7) zachycujícího část Jihomoravského kraje.
Fig. 2 Example of a specific map sheet (H7) showing part of the South Moravian Region.

Hlavním cílem MKA bylo vytvořit podklad pro plánování (projektování) jak technických, tak i přírodně blízkých retenčních prvků, které by napomohly k zadržování vody v krajině v kontextu současné klimatické změny. Lokality pro realizaci zmíněných opatření jsou potenciálně vhodné, vždy je třeba je detailně posoudit a zhodnotit s ohledem na místní poměry. Jednotlivé mapové listy dávají jasný a rychlý přehled o místech vhodných (odstíny modré až zelené barvy) až nevhodných (odstíny žluté, oranžové až hnědé barvy). Ideální je výsledky MKA ověřovat na konkrétních plochách s lokálními projevy zamokření, s výskytem hydromorfních půd či bývalých rybníků. To umožňuje mapový server MAVOPIS (<https://mvp.asitis.cz>), kde lze interaktivně pracovat s jednotlivými vstupními vrstvami, stejně jako s dalšími relevantními geodaty, které do MKA analýzy přímo nevstupovaly, viz Obr. 3. Zatímco atlas slouží pro všeobecnou orientaci ohledně vhodných lokalit pro výstavbu MVP, webová aplikace je již určena pro detailnější průzkum jednotlivých lokalit.



Obr. 3 Ukázka výstupu webové aplikace MAVOPIS – katastr Bošovice.

Fig. 3 Example of output from the MAVOPIS web application – Bošovice cadastral area.

Obecně platí, že plochy s projevy zamokření bývají pro realizaci vybraného opatření nejvhodnější. Tyto plochy mají dlouhodobě sníženou produkční funkci a i v minulosti byly často extenzivně využívány (podmáčené louky, rybníky) (ŠANTRŮČKOVÁ ET AL. 2017). Proto je v těchto místech velký potenciál pro obnovu malých vodních ploch, a to nejen malých vodních nádrží se stálou hladinou, ale i polo/suchých nádrží nebo retenčních opatření mokřadního typu. Tato tzv. přírodně blízká opatření, často netechnického charakteru (např. mokřady, drobné vodní nádrže (tůně), revitalizace drobných vodních toků s pobřežní vegetací) plní v krajině mnoho důležitých a z ekologického hlediska velmi pozitivních funkcí. Proto i když nemají takový retenční potenciál (objem) jako klasické vodní nádrže, budované často s primárně protipovodňovou funkcí, jsou tato opatření přesto v krajině velmi užitečná. Zmiňovaná opatření mohou být plánována multifunkčně a propojeně, dokonce v návaznosti na např. různá protierozní opatření (zatravněné údolnice, trvalé travní porosty nebo liniovou i plošnou dřevinnou vegetací). Tento celkově multifunkční (polyfunkční) přístup v rámci udržitelného hospodaření v krajině by měl mít i efekt ekonomický z pohledu efektivního nakládání s prostředky existujících dotačních titulů patřících státních organizací.

V rámci mezioborové diskuse s kolegy z různých oborů vyvstala otázka, zda plochy identifikované v rámci MKA nebo jiných studií jako vhodné jsou zároveň vhodné i pro případnou konkrétní realizaci MVP (SYCHRA ET AL. 2021). Diskuze se vede zejména o stávajících tzv. polních mokřadech – polních rozlivech (SYCHRA ET AL. 2022), kdy tato místa mají často unikátní zastoupení flóry a fauny, a to včetně ohrožených druhů. Oproti okolní intenzivně obhospodařované zemědělské krajině mají vysokou druhovou diverzitu, i když se často vyskytují jen (semi)periodicky (např. v jarním období) až epizodicky (po deštích) (TOMAN ET AL. 2023). Důležité je si uvědomit, že některé druhy preferují nepřítomnost volné hladiny a hluboké vody, nevdají jim zásahy v podobě orby či jiných zemědělských prací, naopak jiné druhy mají přesně opačné preference. Proto např. realizace MVP ve smyslu klasických vodních nádrží nebo (polo)suchých nádrží může mít pro mnoho druhů až devastující účinek, i když i nově vzniklá vodní plocha může být pro jiné organismy zajímavou ekologickou nikou.

K diskuzi je rozšíření mapového serveru o další funkcionalitu v podobě individuálního doplňování dat (např. o výskytu zamokřených ploch) registrovaným uživatelům. Server by tak nebyl jen užitečným nástrojem pro např. projektanty komplexních pozemkových úprav (KoPÚ), ale i pro širší aktivní veřejnost, která by se mohla takto zapojit do procesu mapování detailních podmínek místního prostředí, vč. sledování výskytu ohrožených druhů.

ZÁVĚR

V rámci adaptace a mitigace na klimatickou změnu jsou opatření vedoucí k retenci vody, včetně přírodních blízkých opatření, důležitá pro zadržení vody v krajině a zpomalení odtoku. Významnými jsou i další funkce těchto opatření, jako podpora biodiverzity, krajinné konektivity nebo vliv na lokální klima. Důležitá jsou vhodně vybraná a lokalizovaná opatření, v čemž může napomoci představená MKA. Ta si klade za cíl poskytnout agregovaný podklad, kombinující několik fyzicko-geografických podkladových vrstev, který by jasně a přehledně ukázal potenciálně vhodná či naopak nevhodná místa pro návrh (realizaci) opatření vedoucích k zadržení vody v krajině. Na tomto základě vytvořená mapová verze (soubor map) je zpracována za celou ČR v PDF souboru (65 stran, cca 260 MB). Součástí je úvodní text, klad listů jednotlivých map a hlavní obsah tvoří 62 map s patřičnou legendou (BEDNÁŘ ET AL. 2025). PDF verze výstupu MKA je k dispozici formou odkazu DOI <https://doi.org/10.5507/prf.25.24466736>. Interaktivní podobu výsledků MKA pro celou ČR, včetně všech podkladových vrstev, lze nalézt na internetovém odkazu <https://mvp.asitis.cz>, kde je veřejně přístupná formou mapového serveru s názvem MAVOPIS.

Poděkování

Autoři děkují Ministerstvu zemědělství ČR za podporu výzkumu prostřednictvím grantu NAZV Země (QK21010328 Potenciál rozvoje malých vodních ploch jako adaptačních opatření v krajině k eliminaci hydrometeorologických extrémů) a Technologické agentuře ČR (SS02030018 DivLand – Centrum pro krajinu a biodiverzitu).

Poděkování patří i spoluřešitelům projektu za poskytnutí podkladových materiálů.

LITERATURA

AOPK ČR (2023): *Nálezová databáze ochrany přírody – Portál AOPK*. Dostupné z: <https://portal.nature.cz/nd/>

BEDNÁŘ, M., ŠARAPATKA, B., NETOPIL P., DUMBROVSKÝ, M., SOBOTKOVÁ, V., PODHRÁZSKÁ, J., KUČERA, J., KARÁSEK, P., BOHOVIC, R., MÁJKOVÁ, B. (2025): *Zobrazení prostorové lokalizace ploch vhodných k návrhu a realizaci malých vodních ploch*. Univerzita Palackého v Olomouci. Vydavatelství UP, Olomouc.

BRÁZDIL, R. et al. (2015): *Sucho v českých zemích: minulost, současnost a budoucnost*. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. (CzechGlobe), Brno, 402 s.

DEAN, M. (2022): *A Practical Guide to Multi-Criteria Analysis*. DOI: 10.13140/RG.2.2.15007.02722.

DODGSON, J., SPACKMAN, M., PEARMAN, A., PHILLIPS, L. (2009): *Multi-Criteria Analysis: A Manual*.

DZURÁKOVÁ, M. et al. (2017): *Katalog přírodních blízkých opatření pro zadržení vody v krajině*.

EVROPSKÁ KOMISE (2020): *Strategie EU v oblasti biologické rozmanitosti do roku 2030: Navrácení přírody do našeho života*. Sdělení Komise Evropskému parlamentu, Radě, Evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a Výboru regionů. COM(2020) 380 final, Brusel, 20. 5. 2020.

EVROPSKÁ KOMISE (2021): *Vytvoření Unie odolné vůči změně klimatu – nová strategie EU pro přizpůsobení se změně klimatu*. Sdělení Komise Evropskému parlamentu, Radě, Evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a Výboru regionů. COM(2021) 82 final. Brusel, 24. 2. 2021.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČESKÉ REPUBLIKY (2006): *Strategie ochrany biologické rozmanitosti České republiky po roce 2010*. Praha: MŽP.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČESKÉ REPUBLIKY (2021): *Aktualizace Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR*. Praha: MŽP.

NETOPIL, P., BEDNÁŘ, M., ŠARAPATKA, B., PAVELKOVÁ, R. (2023): *Multikriteriální analýza jako nástroj pro výběr lokalit malých vodních ploch v zemědělské krajině*. In: *Rybníky 2023*, Česká společnost krajinných inženýrů: 23-31.

NOVÁK, P., TOMEK, M. (2015): *Prevence a zmírňování následků přívalových povodní ve vztahu k působnosti obcí*. Certifikovaná metodika výsledků výzkumu, vývoje a inovací. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

NOVOTNÝ, I., VOPRAVIL, J., KOHOUTOVÁ, L., PORUBA, M., PAPAJ, V., KHEL, T., ŽIGMUND, I., VAŠKŮ, Z., TOMIŠKA, Z., KOUTNÁ, R., PACOLA, M., NOVOTNÝ, J., HAVELKOVÁ, L., BROUČEK, J., & ŽÍŽALA, D. (2013). *Metodika mapování a aktualizace bonitovaných půdně ekologických jednotek* (4., přepr. a dopl. vyd). Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy.

PODHRÁZSKÁ, J., BEDNÁŘ, M., DOSTÁL, T., DUMBROVSKÝ, M., HANEL, M., KAPIČKA, J., KARÁSEK, P., KAVKA, P., KONEČNÁ, J., KRÁSA, J., KUČERA, J., MISTR, M., NETOPIL, P., NOVOTNÝ, I., POCHOP, M., PROCHÁZKA, J., SOBOTKOVÁ, V., STŘEDA, T., STŘEDOVÁ, H., ŠARAPATKA, B., VOTOČEK, M. (2024): *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha: VÚMOP, v.v.i.

SUŠNIK, J., MASIA, S., KRAVČÍK, M., POKORNÝ, J., HESSLEROVÁ, P. (2022): *Costs and benefits of landscape-based water retention measures as nature-based solutions to mitigating climate impacts in eastern Germany, Czech Republic, and Slovakia*. Land Degradation & Development, 33(16), 3074-3087.

SYCHRA, J., STRAKA, M., BOJKOVÁ, J., POLÁŠEK, M., ČAMLÍK, G. (2021): *Proč budování 800 vodních ploch na jižní Moravě není bojem se suchem*. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/publicistika/nazory-a-komentare/vedci-proc-budovani-800-vodnich-ploch-na-jizni-morave-neni-bojem-se-suchem>

SYCHRA, J., BOJKOVÁ, J., DEVÁNOVÁ, A., PLISKA, D., ČERNÁ, A., PFEIFER, L. (2022): *Vysychavé polní mokřady na jižní Moravě: jedinečné ostrovy života v zemědělské krajině*. Živa. Praha: Nakladatelství Academia, roč. 70, č. 5, s. 261-264.

ŠANTRŮČKOVÁ, M., DEMKOVÁ, K., WEBER, M., LIPSKÝ, Z., DOSTÁLEK, J. (2017): *Long term changes in water areas and wetlands in an intensively farmed landscape: A case study from the Czech Republic*. European Countryside, 9(1), 132-144.

TOMAN, V., SKALOŠ, J., ÖZMAN, K. O. (2023): *Analysis of long-term spatio-temporal wetland change reveals the complex nature of habitat alterations – A case study from the Czech Republic 1842-2017*. The Science of the total environment, 894, 164769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164769>

POSÚDENIE MIKROKLIMATICKÉHO VPLYVU ČIASTOČNEJ ZELENEJ STRECHY REALIZOVANEJ NA BUDOVE TUZVO

Miriam HANZELOVÁ¹ – Paulína NALEVANKOVÁ^{1*} – Zuzana GREŠTIAK-ORAVCOVÁ¹ – Ilja VYSKOT² – Jaroslav VIDO^{1,3}

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

²Ústav environmentalistiky a prírodných zdrojů, Fakulta regionálního rozvoje a mezinárodních studií, Mendelova univerzita v Brně, tř. Generála Píky 7, 61300 Brno

³Ústav lesnické botaniky, dendrologie a geobiocenologie, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1665/1, 61300 Brno, Česká republika

ABSTRACT

Hanzelová M., Nalevanková P., Vido J., Greštiak Oravcová Z.: Assessment of the Microclimatic Effect of a Partial Green Roof on a TUZVO Building

This paper presents the results of air temperature and relative humidity measurements conducted above a green and a traditional bitumen roof on the building of the Technical University in Zvolen (Block C). The aim was to assess the microclimatic effect of an extensive green roof during various seasons, with a focus on extreme summer conditions. Measurements were carried out at two levels – 1 meter above the surface and directly at the roof level – from June 2023 to August 2025. The results revealed only minimal differences between the two roof types, with average air temperature and humidity differing by less than 0.5 °C and 1 %, respectively. Slight variations were observed mainly during sunny days near the surface, where the bitumen roof exhibited higher temperatures and the green roof showed slightly increased humidity, likely due to evapotranspiration. Regression analysis confirmed a very strong correlation between both surfaces ($R^2 > 0.99$). The findings suggest that the implemented green roof has no significant impact on the thermal and humidity regime above the roof surface. However, it provides several additional benefits – particularly thermal insulation, stormwater retention, and visual enhancement. Such solutions can positively contribute to meeting the goals of a climate-responsible and sustainable university.

Key words: green roof, microclimate, air temperature, air humidity, TUZVO

ÚVOD

V posledných rokoch sa v rámci miest ale aj obcí rozšírilo budovanie tzv. zelených striech, ktoré sú považované za progresívne adaptačné a mitigačné opatrenie, významne prispievajúce k znižovaniu negatívnych dôsledkov klimatickej zmeny v mestskom prostredí. Ich environmentálne, technické i spoločenské prínosy sú predmetom mnohých výskumov (napr. MIHALAKAKOU *et al.*, 2023; DAVID, 2024; ZHANG *et al.*, 2024). Okrem estetickej a ekologickej hodnoty zlepšujú mikroklimatické podmienky, zmierňujú efekt mestského tepelného ostrova (UHI), zadržiavajú zrážkovú vodu a predlžujú životnosť strešnej konštrukcie.

Zelené strechy poskytujú aj sekundárne benefity, ako je zlepšenie kvality ovzdušia. Pôsobia ako pasívne filtre pevných častíc a plynných znečisťujúcich látok, čím prispievajú k lokálnemu zlepšeniu kvality ovzdušia. Účinnosť tohto procesu je podmienená výberom druhov vegetácie, indexom plochy listov a celkovým zdravotným stavom rastlín. Medzi ďalšie významné prínosy patrí znižovanie energetickej spotreby budov a podpora biodiverzity v mestách, čo z nich robí dôležitú súčasť stratégií trvalo udržateľného rozvoja (MIHALAKAKOU *et al.*, 2023; DAVID, 2024).

V letných mesiacoch sa tradičné strešné krytiny prehrievajú, čo vedie k sekundárnemu ohrevu okolitého vzduchu. Vegetačný pokryv zelenej strechy pôsobí ako prirodzený chladiaci prvok. Tento efekt prináša nielen výhody pre samotnú budovu, ale prispieva aj k znižovaniu teploty v širšom mestskom prostredí, čím efektívne zmierňuje dopady mestských tepelných ostrovov (PARK *et al.*, 2018). Dlhodobý, takmer 20-ročný monitoring na Univerzite aplikovaných vied v Neubrandenburgu (Nemecko) preukázal stabilitu teploty v substráte zelenej strechy napriek všeobecnému nárastu teploty vzduchu spôsobenému UHI efektom (KÖHLER & KAISER, 2019). Kvantitatívne

údaje naznačujú, že zelené strechy môžu znížiť povrchovú teplotu až o 15 °C a zadržať viac ako 50 % ročných zrážok (ZHANG *et al.*, 2024). Iné štúdie dokonca preukázali zníženie povrchovej teploty o 30 °C a pokles okolitej teploty vzduchu o 2–4 °C v dôsledku izolačných mechanizmov, slnečného odrazu a evapotranspirácie (DAVID, 2024). Zelené strechy taktiež prispievajú k tlmeniu extrémnych horúčav a znižujú energetickú potrebu budov až o 90 % počas chladenia a o 30 % počas vykurovania (GAGLIANO *et al.*, 2017).

Proces evapotranspirácie vedie k zvýšeniu relatívnej vlhkosti vzduchu nad zelenými strechami, čo priaznivo ovplyvňuje mikroklimatické podmienky (SOHAILI *et al.*, 2018). Rozsah tohto účinku je však podmienený veľkosťou strechy a jej interakciou s okolím (POMPEII & HAWKINS, 2011). Vplyv zelených striech na teplotu a vlhkosť vzduchu je determinovaný viacerými faktormi, ako sú miestne klimatické podmienky, druhová skladba vegetácie, rozsah pokrytia, vlastnosti pôdneho substrátu vrátane jeho vlhkosti, ako aj mestská geometria (SUTER *et al.*, 2017).

Zatiaľ čo mnohé štúdie potvrdzujú chladiace účinky a schopnosti filtrácie znečisťujúcich látok (SOHAILI *et al.*, 2018, VOURDOUBAS, 2024), pretrvávajú neistoty týkajúce sa ich účinnosti počas extrémnych horúčav a sucha, ako aj vplyv konštrukčných parametrov, ako je hĺbka substrátu, typ vegetácie a zavlažovacie postupy (FENG *et al.*, 2022, SPEAK *et al.*, 2013, ABUSEIF, 2023). Existujú aj kontroverzie týkajúce sa škálovateľnosti vplyvu zelených striech na mikroklimu v celom meste a kompromisov medzi výhodami chladenia a požiadavkami na údržbu (JOSHI & JOSHI, 2024, KIM & PARK, 2024).

V odbornej literatúre sa upozorňuje aj na tzv. „maladaptive patterns“, teda prípady, keď zelené strechy nedosahujú očakávané efekty, alebo dokonca spôsobujú negatívne dôsledky. Ide napríklad o strechy, ktoré namiesto ochladzovania zvyšujú teplotu (v dôsledku nevhodnej konštrukcie či použitia materiálov s vysokým albedom, napr. svetlé štrkové plochy), ďalej nedostatočne udržiavanú vegetáciu, ktorá stráca chladiacu funkciu, alebo nesprávne zavlažovacie postupy, ktoré znižujú účinnosť opatrenia (KIM & PARK, 2024).

Súčasný výskum poukazuje na absenciu jednotnej metodiky na porovnanie efektívnosti zelených striech, najmä v malom meradle. Hoci viaceré štúdie potvrdzujú ich pozitívny vplyv na ochladzovanie miest (napr. YIN *et al.*, 2012; HEUSINGER *et al.*, 2014), iné práce spochybňujú ich účinnosť, prípadne uvádzajú, že môžu viesť aj k zvýšeniu teploty (KIM & PARK, 2024). Táto kontroverzia zdôrazňuje potrebu ďalšieho systematického výskumu.

Technická univerzita vo Zvolene prijala Stratégiu klimaticky zodpovednej Zelené univerzity 2021–2026, ktorej cieľom je znižovanie uhlíkovej stopy prostredníctvom implementácie adaptačných a mitigačných opatrení. V rámci piliera „Technické opatrenia“ sa univerzita zaviazala budovať zelenú infraštruktúru. V roku 2022 bola v súlade s touto stratégiou zrealizovaná prvá zelená strecha. Tento krok je súčasťou dlhodobej vízie univerzity ako „zelené inštitúcie“ a jej záväzku k trvalo udržateľnému rozvoju. Vzhľadom na konštrukčné limity strešného plášťa však nebolo možné zazeleniť celú plochu, preto boli realizované iba vybrané segmenty plochy strechy. Cieľom predkladanej štúdie je posúdiť vplyv zelenej strechy, ktorá pokrýva len časť vodorovných strešných plôch a vyhodnotiť jej ochladzovací efekt v mikroklimu, a to prostredníctvom sledovania teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu nad jej povrchom.

MATERIÁL A METÓDY

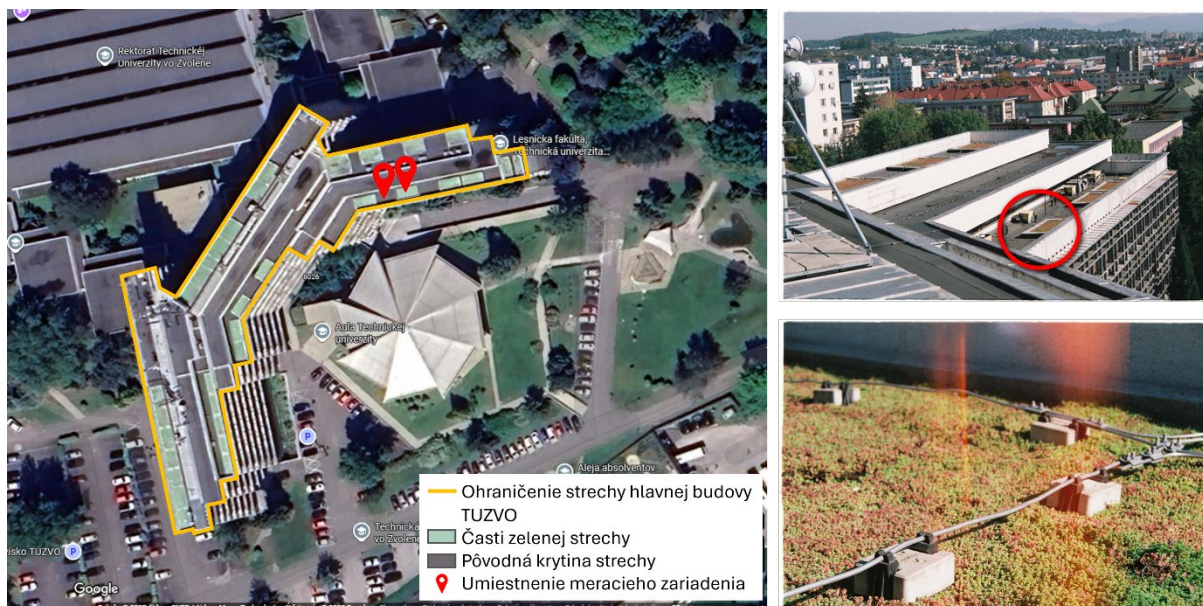
Merania teploty vzduchu a relatívnej vlhkosti vzduchu boli realizované na streche bloku C hlavnej budovy Technickej univerzity vo Zvolene (TUZVO), na ktorej časti je realizované opatrenie „zelená strecha“. Daná lokalita spadá do teplého klimatického regiónu, klimatický okrsok je teplý, mierne vlhký s chladnou zimou a s priemernou ročnou teplotou 7,9 °C. Z klimaticko-geografického hľadiska ide o typ kotlinovej klímy s veľkou inverziou teplôt a malou veternosťou. V jesennom a zimnom období sa vyskytuje častý výskyt hmiel a dochádza tu k hromadeniu znečisťujúcich látok v ovzduší mesta (LAPIN *et al.* 2002; FORESTWEATHER).

Meracie body boli umiestnené na dvoch typoch povrchu strechy – s pôvodnou strešnou krytinou (asfaltová (bitúmenová) krytina) a s vegetačným pokryvom (zelená strecha – nízke rozchodníkové koberce *Sedum sp.*) (Obr. 1a Obr. 2).

Merania boli realizované súčasne 1 meter nad zelenou strechou a nad pôvodnou strešnou krytinou (Obr. 2), aby sa mohli priamo porovnať teplotné a vlhkosťné priebehy a určiť prípadný rozdiel v mikroklimatických podmienkach. Na zber údajov boli použité snímače typu Minikin RTHi (EMS Brno, Česká republika), schopné súčasne merať a zaznamenávať teplotu vzduchu, relatívnu vlhkosť vzduchu a globálne slnečné žiarenie. Dlhodobé merania prebiehali v období od 29. júna 2023 do 19. augusta 2025, pričom došlo k výpadku dát medzi 15. aprílom 2024 od 15:00 a 4. májom 2024 do 17:40. Meracie zariadenia zaznamenávali údaje v 10-minútovom meracom intervale, pričom údaje sa ukladali v 20-minútových intervaloch.

Na zachytenie detailného teplotného režimu počas extrémne teplých letných dní boli realizované doplnkové krátkodobé merania v tesnej blízkosti povrchu oboch typov strešnej krytiny. Tieto merania sa uskutočnili v období od 6. do 19. augusta 2025, pričom boli zaznamenávané teplota vzduchu a relatívna vlhkosť vzduchu, opäť s 10-minútovým meracím a 20-minútovým ukladajúcim intervalom.

Všetky merania prebiehali v identických podmienkach a pomocou rovnakého typu senzorov, aby bola zabezpečená ich porovnateľnosť. Údaje boli spracované a vizualizované pomocou softvéru Mini32 (EMS Brno).



Obr. 7 Rozmiestnenie častí zelenej strechy na budove TUZVO a lokalizácia umiestnenia meračov Minikin, záber na použitý rozchodníkový koberec (Ateliér Toman, 2022)

Fig. 3 Layout of green roof sections on the TUZVO building with localization of Minikin sensors and view on the sedum mat (Photo: Ateliér Toman, 2022)



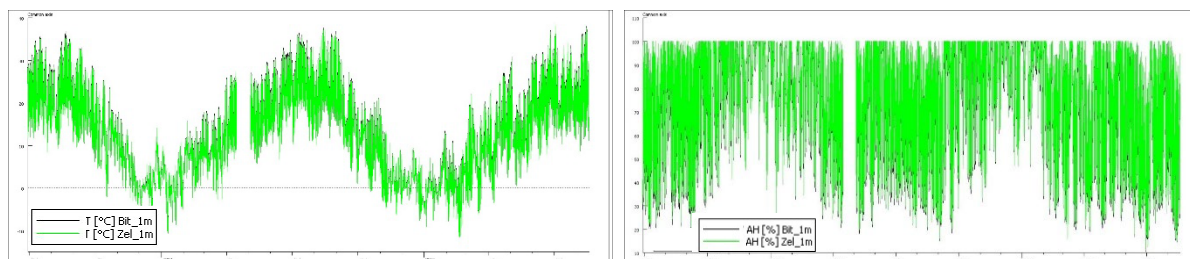
**Obr. 8 Rozmiestnenie meračov Minikin na streche bloku C hlavnej budovy TUZVO
Foto: Hanzelová (6.8.2025)**

Fig. 4 Layout of Minikin sensors on the roof of Block C, main TUZVO building, Photo: Hanzelová (6.8.2025)

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na zelenej streche bola za sledované obdobie nameraná priemerná teplota vzduchu $12,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ a na streche s pôvodnou krytinou bola $12,39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mierne vyššiu celkovú priemernú vlhkosť vzduchu sme zaznamenali nad zelenou strechou, a to $76,29\text{ }\%$ v porovnaní so $75,45\text{ }\%$.

Dlhodobý priebeh teplôt, ale aj vlhkosti vzduchu vo výške 1 m nad povrchom bitúmenovej a zelenej strechy potvrdzuje výraznú sezónnu dynamiku, pričom priebeh hodnôt je medzi oboma povrchmi takmer identický (Obr. 3). Teploty kolísajú v závislosti od ročných období, s maximami počas letných mesiacov a minimami v zimnom období, pričom krátkodobé výkyvy odrážajú zmeny počasia. Rozdiely medzi bitúmenovou a zelenou strechou sú vizuálne nevýrazné, čo naznačuje, že v sledovanej výške sa mikroklimatický efekt zelenej strechy prejavuje len veľmi mierne. Časový priebeh vlhkosti vzduchu vo výške 1 m nad bitúmenovou a zelenou strechou ukazuje typickú variabilitu zodpovedajúcu ročným obdobiam a aktuálnym meteorologickým podmienkam. Hodnoty sa pohybujú od približne $10\text{ }\%$ až po 100% .



Obr. 9 Priebek teploty vzduchu (°C, vľavo) a vlhkosti vzduchu (% , vpravo) vo výške 1 m nad povrchom strechy počas celého obdobia merania (29. 6. 2023 – 19. 8. 2025); Bit_1m = bitúmenová strecha, Zel_1m = zelená strecha

Fig. 5 Air temperature (°C, left) and air humidity (% , right) at 1 m above the roof surface during the entire measurement period (29 June 2023 – 19 August 2025); Bit_1m = bitumen roof, Zel_1m = green roof

Merania realizované v období od 29. júna 2023 do 19. augusta 2025 ukázali veľmi podobné teplotné a vlhkosťné pomery nad povrchom bitúmenovej a zelenej strechy (Tab. 1). Priemerná teplota sa pohybovala okolo 12,4 °C pre bitúmenovú a 12,3 °C pre zelenú strechu, pričom rozdiely medzi minimálnymi a maximálnymi hodnotami boli len zanedbateľné. Štandardná odchýlka ($\approx 9,8$ °C) naznačuje vysokú variabilitu teplotných podmienok počas meraného obdobia, čo odráža výkyvy medzi zimnými a letnými obdobiami.

Relatívna vlhkosť vzduchu vykázala priemerne mierne vyššie hodnoty nad zelenou strechou (76,3 %) v porovnaní s bitúmenovou (75,5 %), čo poukazuje na potenciálny mikroklimatický prínos vegetačného pokryvu, aj keď z grafického zobrazenia neboli veľmi viditeľné. Rozdiely v maximách a minimách vlhkosti boli zanedbateľné, avšak o niečo nižšia štandardná odchýlka nad zelenou strechou (22,7 oproti 23,1) môže indikovať miernejšie kolísanie vlhkosťných pomerov.

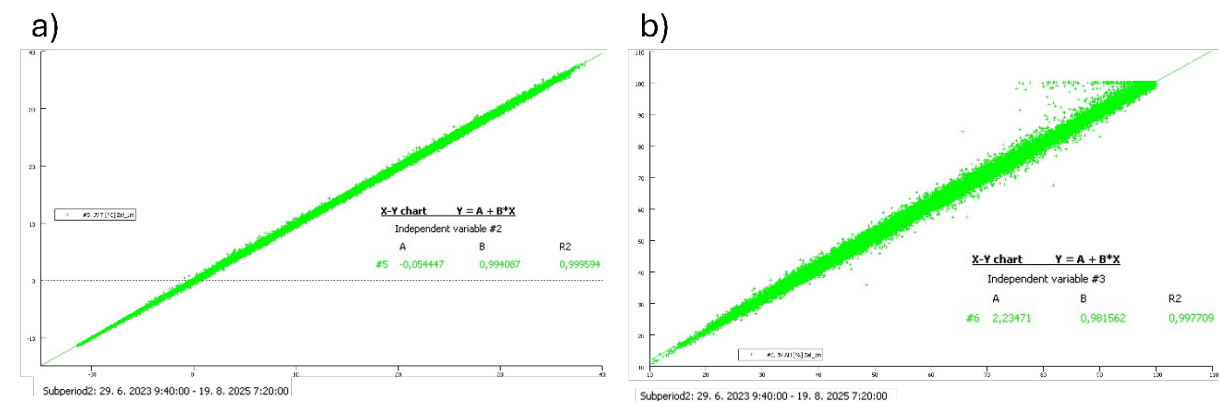
Tieto výsledky naznačujú, že zelená strecha na budove TUZVO, by mohla veľmi málo prispieť k zmene mikroklimatických podmienok, a to najmä vo vzťahu k vlhkosti, pretože priemerné teploty vzduchu sa medzi oboma povrchmi významne nelíšia.

Tab. 1 Štatistické charakteristiky meraní vo výške 1 m nad rôznymi povrchmi striech za celé sledované obdobie

Tab. 1 Statistical characteristics of measurements at 1 m above different roof surfaces for the entire observation period

Interval: 29.6.2023 9:40:00 - 19.8. 2025 7:20:00		Teplota vzduchu/Air temperature [°C]			
Var. description	Min	Max	Priemer	Odchýlka/Std. Dev.	
Bitúmenová strecha	-11,4	38,4	12,4	9,8	
Zelená strecha	-11,5	38,2	12,3	9,8	
		Vlhkosť vzduchu/Air humidity [%]			
Var. description	Min	Max	Priemer	Odchýlka/Std. Dev.	
Bitúmenová strecha	10,6	100	75,5	23,1	
Zelená strecha	11,0	100	76,3	22,7	

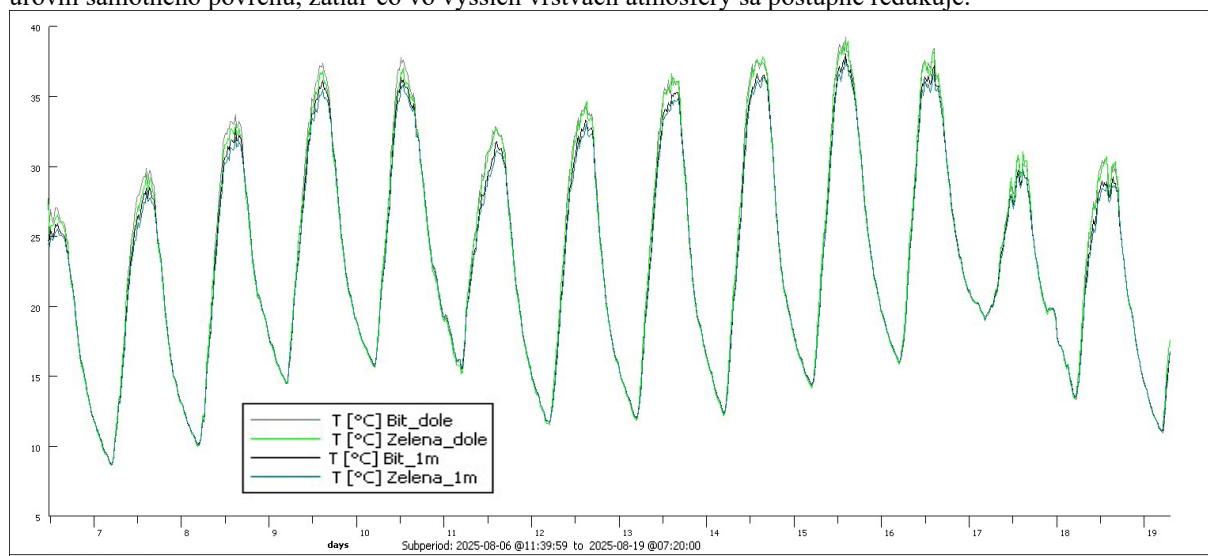
Lineárna regresia teploty a vlhkosti vzduchu (Obr. 4) potvrdzuje veľmi úzku závislosť medzi meraniami nad bitúmenovou a zelenou strechou počas celého sledovaného obdobia. V prípade teploty vzduchu (Obr. a) dosiahol koeficient determinácie $R^2=0,9996$, čo naznačuje prakticky identický priebeh medzi oboma povrchmi s minimálnymi rozdielmi. Podobne, analýza vlhkosti vzduchu (Obr. 4b) vykazuje vysokú mieru zhody s $R^2=0,9977$. Tieto výsledky opäť potvrdzujú, že vo výške 1 m nad strechou sa účinok vegetačného krytu na teplotu a vlhkosť vzduchu prejavuje len veľmi mierne, čo je v súlade s časovými priebehmi prezentovanými na predchádzajúcich grafoch.



Obr. 4 Lineárna regresia pre a) teplotu vzduchu a b) vlhkosť vzduchu za celé sledované obdobie

Fig. 4 Linear regression for a) air temperature and b) air humidity over the entire observation period

Pre detailnejšie posúdenie rozdielov sledovaných parametrov boli merania rozšírené aj o prízemnú časť v tesnom kontakte s povrchom strechy. Dáta boli zaznamenávané počas obdobia výrazne teplých letných dní (6.–19. 8. 2025). Výsledky ukázali, že povrch bitúmenovej strechy (Obr. 5, svetlosivá krivka Bit_dole) dosahoval v prvých dňoch sledovania vyššie teploty v porovnaní so zelenou strechou, pričom najvýraznejšie rozdiely sa prejavovali v popoludňajších hodinách. Zelená strecha vykazovala nižšie maximálne teploty a mierne oneskorený nástup denných teplotných vrcholov (svetlozelené krivky Zel_dole). Nočné teploty sa na oboch typoch striech vyrovnávali, čo potvrdzuje, že rozdiely sa najviac uplatňovali počas intenzívneho slnečného žiarenia. Merania vo výške 1 m ukázali podstatne menšie rozdiely medzi oboma typmi striech, čo naznačuje rýchlu tepelnú homogenizáciu vzduchu v blízkosti povrchu. Tento výsledok poukazuje na skutočnosť, že efekt zelenej strechy sa prejavuje predovšetkým na úrovni samotného povrchu, zatiaľ čo vo vyšších vrstvách atmosféry sa postupne redukuje.

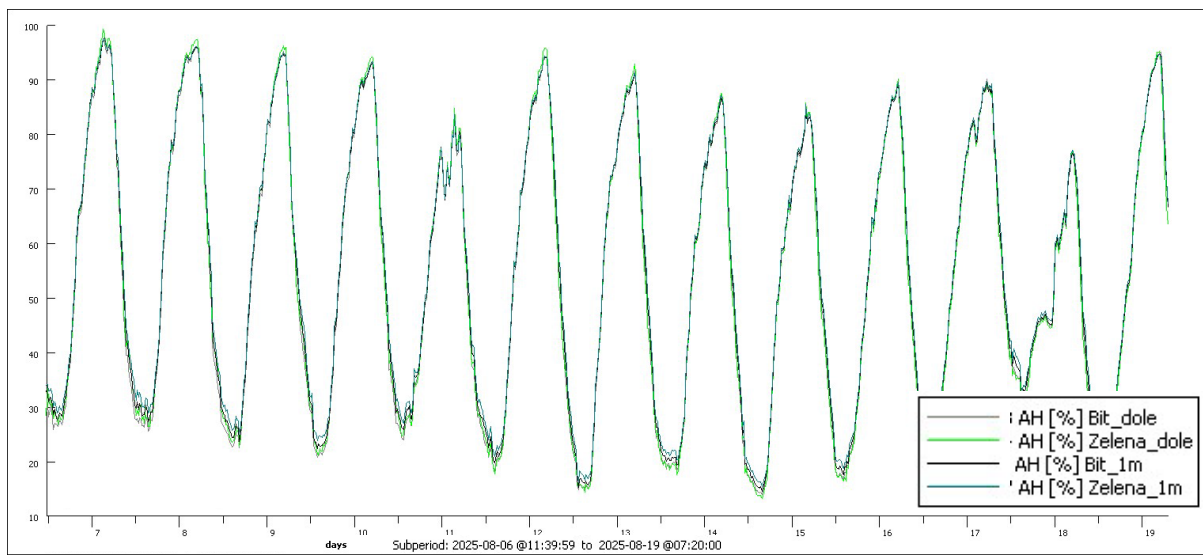


Obr. 5 Priebeh teploty vzduchu (°C) počas vybraných horúcich letných dní (6.-19.8.2025); bit = bitúmenová strecha, Zelena = zelená strecha, dole = meranie tesne pri povrchu strechy, 1m = meranie v 1 metri nad povrchom

Fig. 5 Air temperature (°C) during selected hot summer days (6–19 August 2025); Bit = bitumen roof, Zelena = green roof, dole = measurement close to the roof surface, 1 m = measurement 1 meter above the roof surface

Graf na Obr. 6 zachytáva vývoj vlhkosti vzduchu (%) meraných v dvoch výškových úrovniach počas horúcich letných dní v auguste 2025. Výsledky ukazujú výrazné denné cykly vlhkosti vzduchu, s maximami počas nočných a ranných hodín (často nad 90 %) a minimami popoludní (13,9 – 15,5 %), čo je typické pre horúce letné dni s vysokým výparom. Zelená strecha dosahovala v porovnaní s bitúmenovou mierne vyššie hodnoty vlhkosti v blízkosti povrchu počas dňa, čo možno pripísať evapotranspirácii rastlinného krytu.

Rozdiely medzi klasickou a zelenou strechou sú najviac badateľné v obdobiach s intenzívnym slnečným žiarením, kedy zelená strecha vykazuje schopnosť udržať mierne vyššiu vlhkosť vzduchu.



Obr. 6 Priebeh vlhkosti vzduchu (°C) počas vybraných horúcich letných dní (6.-19.8.2025); bit = bitumenová strecha, Zelena = zelená strecha, dole = meranie tesne pri povrchu strechy, 1m = meranie v 1 metri nad povrchom

Fig. 6 Air humidity (%) during selected hot summer days (6–19 August 2025); Bit = bitumen roof, Zelena = green roof, dole = measurement close to the roof surface, 1 m = measurement 1 meter above the roof surface

Počas sledovaného obdobia extrémne teplých letných dní sa ukázalo, že teplotné podmienky na oboch typoch striech boli veľmi podobné, pričom zelená strecha vykazovala mierne nižšie priemerné teploty (Tab. 2). Priemerná teplota vzduchu vo výške 1 m dosiahla 22,98 °C nad bitúmenovou strechou a 22,9 °C nad zelenou strechou, zatiaľ čo v tesnej blízkosti povrchu boli hodnoty vyššie (23,4 °C vs. 23,3 °C). Minimálne rozdiely medzi strechami sa prejavili v maximálnych hodnotách, kde bitúmenová strecha dosiahla až 39,2 °C, kým zelená strecha 39 °C. V prípade relatívnej vlhkosti vzduchu sa rozdiely medzi oboma povrchmi taktiež ukázali ako malé. Nad bitúmenovou strechou dosahovala priemerná hodnota 54,5 % vo výške 1 m a 53,6 % pri povrchu, zatiaľ čo nad zelenou strechou boli hodnoty mierne vyššie, 55,3 % v 1 m a 53,8 % pri povrchu. Najvyššie hodnoty vlhkosti sa zaznamenali práve nad zelenou strechou (až 99,4 %).

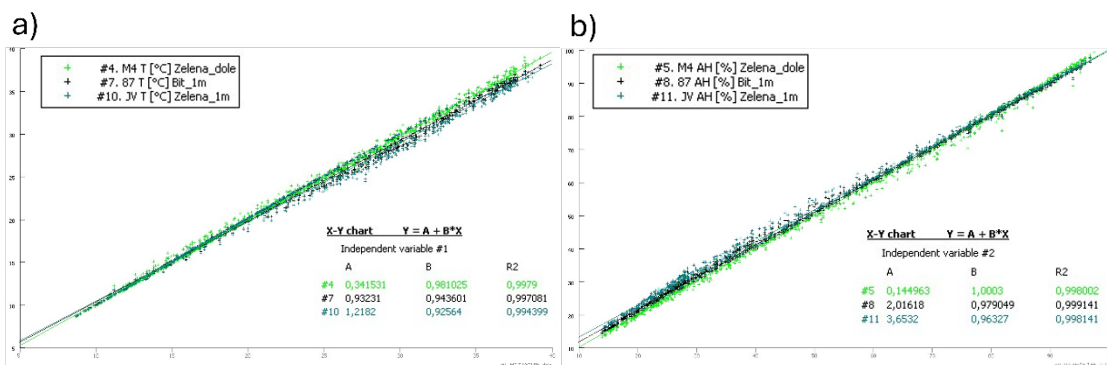
Tieto výsledky naznačujú, že aj v období horúcich letných dní sa efekt zelenej strechy prejavil len minimálne, miernym znížením maximálnych teplôt a zvýšením vlhkosti vzduchu. Avšak celkové rozdiely zelenej strechy oproti bitúmenovej streche zostali relatívne malé.

Tab. 2 Štatistické charakteristiky meraní vo výške 1 m a tesne nad povrchom striech počas horúcich letných dní

Tab. 2 Statistical characteristics of air measurements at 1 m and near the roof surfaces during hot summer days

Interval: 6. 8. 2025 11:40:00 - 19. 8. 2025 7:20:00		Teplota vzduchu / Air temperature [°C]			
	Výška merania	Min	Max	Priem./Avg	Odch./Dev.
Bitúmenová strecha	1 m	8,8	38	23	7,4
	Pri povrchu	8,7	39,2	23,4	7,8
Zelená strecha	1 m	8,7	37,6	22,9	7,3
	Pri povrchu	8,6	39	23,3	7,7
		Vlhkosť vzduchu / Air humidity [%]			
	Výška merania	Min	Max	Priem./Avg	Odch./ Dev.
Bitúmenová strecha	1 m	14,6	97,8	54,5	24,4
	Pri povrchu	14	97,6	53,6	24,9
Zelená strecha	1 m	15,5	97,6	55,3	24
	Pri povrchu	13,2	99,4	53,8	24,9

Lineárna regresná analýza (Obr. 7) potvrdila veľmi silné korelácie medzi meraniami teploty a aj vlhkosti vzduchu ($R^2 > 0,99$). Teploty zaznamenané nad zelenou a bitúmenovou strechou vykazujú veľmi silné lineárne korelácie ($R^2 > 0,99$). Najvyššia zhoda bola identifikovaná vo výške 1 m nad oboma typmi striech ($R^2 = 0,998$), čo poukazuje na homogenizáciu teplotného prostredia v tejto úrovni bez ohľadu na typ povrchu (viď taktiež Obr. 4). V prípade meraní bližšie k povrchu sa prejavili mierne rozdiely, ktoré súvisia s rozdielnou tepelnou dynamikou povrchov. Podobne aj pri vlhkosti vzduchu boli zaznamenané vysoké hodnoty $R^2=0,998-0,999$.

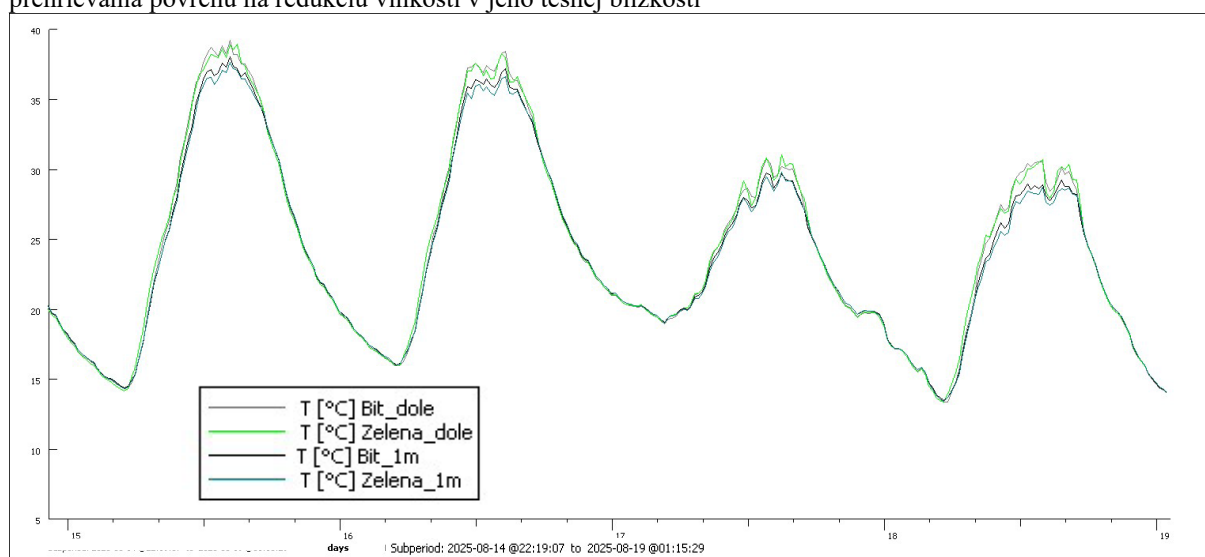


Obr. 7 Lineárna regresia a) teploty vzduchu a b) vlhkosti vzduchu pre rôzne povrchy strechy a výšky meraní nad povrchom; bit = bitumenová strecha, Zelena = zelená strecha, dole = meranie tesne pri povrchu strechy, 1m = meranie v 1 metri nad povrchom

Fig. 7 Linear regression of a) air temperature and b) air humidity across roof surface types and measurement heights); Bit = bitumen roof, Zelena = green roof, dole = measurement close to the roof surface, 1 m = measurement 1 meter above the roof surface

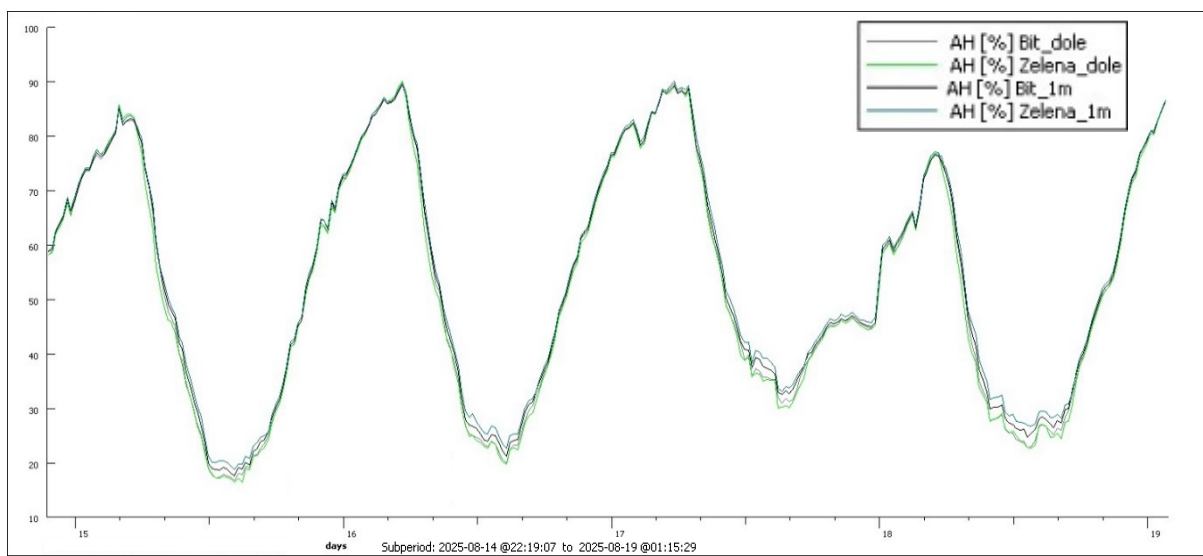
Pre lepšie zobrazenie minimálnych rozdielov v priebehu teplôt a vlhkosti vzduchu sme si vybrali 4 augustové dni na ktorých vidieť v priemere veľmi malé rozdiely ($<0,5^{\circ}\text{C}$) medzi bitúmenovou a zelenou strechou (Obr. 8 a Obr. 9). Výraznejšie tieto rozdiely vidieť v extrémoch. Bitúmenová strecha dosiahla najvyššiu maximálnu teplotu ($39,2^{\circ}\text{C}$) a zelená strecha mala o niečo nižšie denné maximum (39°C) (viď Tab. 3). Povrch strechy (aj bitumenový aj s vegetačným krytom) sa počas dňa prehrieva najmä v tesnej blízkosti povrchu, kde bitumenový povrch dosahoval len o niečo málo vyššie hodnoty ako zelená strecha. Nočné teploty boli na oboch povrchoch podobné, pričom v niektorých prípadoch boli hodnoty pri povrchu bitumenovej strechy mierne nižšie. Graf na Obr. zobrazuje denný cyklus teplôt vzduchu s maximami počas dňa (okolo 12:00–15:00) a minimami počas noci (okolo 4:00–6:00).

Podobne, výraznejší rozdiel pri vlhkosti vzduchu je zrejmy najmä 1 m nad zelenou strechou. Tam sa udržiava mierne vyššia vlhkosť najmä počas slnečnej časti dňa. Denné minimum zostáva na úrovni 16–18 % a nočné maximum dosahuje 89–90 %. Pri porovnaní výškových úrovní je zrejme, že vo výške 1 meter nad povrchom sú hodnoty vlhkosti vzduchu mierne vyššie než priamo pri povrchu strechy, čo poukazuje na vplyv intenzívneho prehrievania povrchu na redukciiu vlhkosti v jeho tesnej blízkosti



Obr. 8 Detailnejší priebeh teploty vzduchu za vybrané obdobie (15.-19.8.2025); bit = bitumenová strecha, Zelena = zelená strecha, dole = meranie tesne pri povrchu strechy, 1m = meranie v 1 metri nad povrchom

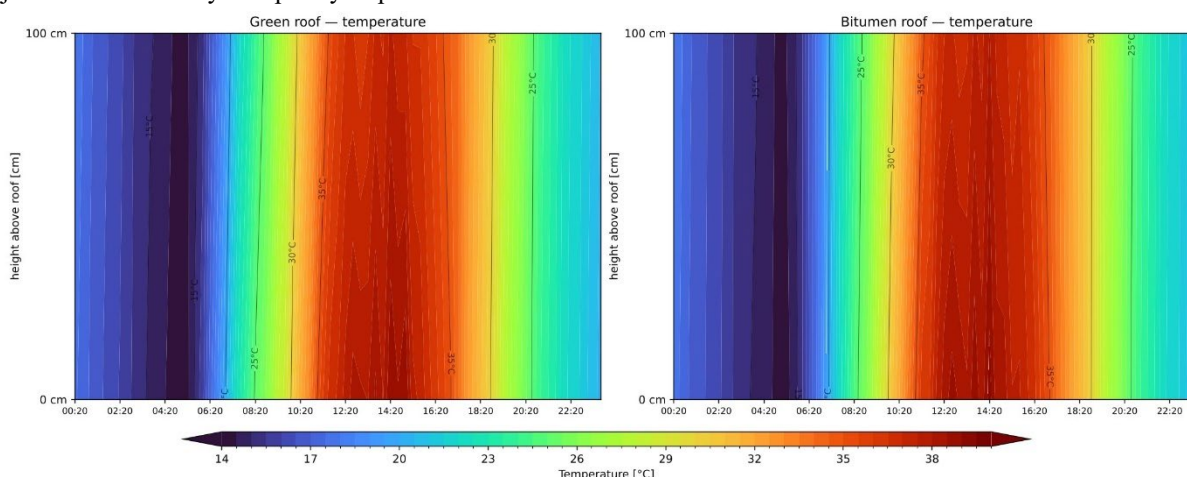
Fig. 8 Detail to air temperature ($^{\circ}\text{C}$) course during selected hot summer days (15–19 August 2025); Bit = bitumen roof, Zelena = green roof, dole = measurement close to the roof surface, 1 m = measurement 1 meter above the roof surface



Obr. 9 Detailnejší priebeh vlhkosti vzduchu (%) za vybrané obdobie (15.-19.8.2025); bit = bitumenová strecha, Zelena = zelená strecha, dole = meranie tesne pri povrchu strechy, 1m = meranie v 1 metri nad povrchom

Fig. 9 Detail to air humidity (%) course during selected hot summer days (15–19 August 2025); Bit = bitumen roof, Zelena = green roof, dole = measurement close to the roof surface, 1 m = measurement 1 meter above the roof surface

Analýza dát z dňa 15. 8. 2025 ukázala, že hoci štatistické testy potvrdili významný rozdiel medzi teplotami vo výške 1 m nad zelenou a bitúmenovou strechou ($p < 0,001$), rozdiel v priemere ($0,1^{\circ}\text{C}$) je prakticky zanedbateľný a pravdepodobne nemá ekologický význam. Obr. 10 znázorňuje časovú závislosť teploty na rôznych výškach nad povrchom strechy počas 24-hodinového cyklu. V oboch prípadoch sa prejavuje výrazný denno-nočný cyklus s maximami v popoludňajších hodinách (okolo 14:00–16:00) a minimami počas noci (okolo 04:00). Rozdiely medzi typmi striech sú veľmi malé, pričom maximálne hodnoty dosahujú približne $38\text{--}39^{\circ}\text{C}$ a minimá okolo 14°C . V tesnej blízkosti povrchu možno pozorovať mierne vyššie hodnoty nad bitúmenovou strechou, avšak vertikálny teplotný gradient je v oboch prípadoch podobný. Ak rozdiel existuje, ide len o veľmi jemne viditeľný efekt: zelená strecha má o niečo hladší teplotný prechod a mierne nižšie maximum v popoludňajších hodinách. Výsledky tak naznačujú, že chladiaci účinok zelenej strechy sa v tomto prípade prejavuje skôr miernym tlmením extrémov než jednoznačne odlišnými teplotnými profilmi.



Obr. 10 Termoizoplety zo dňa 15.8.2025

Fig. 10 Thermaisoplets from 15 August 2025

Vo svetle klimatických zmien, ktoré vedú k častejším a intenzívnejším vlnám horúčav môžu zelené strechy predstavovať adaptívne opatrenie, avšak ich účinnosť závisí od rozsahu, typológie a technologickej vyspelosti systému. Výsledky nášho dlhodobého merania mikroklimatických podmienok nad zelenou a bitúmenovou strechou na budove TUZVO poukazujú na skutočnosť, že účinok vegetačného krytu na teplotu a vlhkosť vzduchu je vo výške 1 meter nad povrchom strechy relatívne nízky. Priemerné teploty vzduchu, ako aj hodnoty relatívnej vlhkosti sa medzi zelenou a pôvodnou strechou líšili len minimálne – v priemere o $0,13^{\circ}\text{C}$ v prípade teploty a o $0,84\%$ v prípade relatívnej vlhkosti. Tieto hodnoty sa zhodujú s poznatkami z literatúry, ktorá poukazuje na lokalizovaný

charakter chladiaceho efektu zelených striech, prevažne obmedzený na ich bezprostredné okolie (KREBS *et al.*, 2017).

Na základe analýzy denných cyklov počas extrémne teplých letných dní (6.–19.8.2025) možno konštatovať, že zelená strecha na budove TUZVO dokáže znížiť maximálne teploty vzduchu v blízkosti povrchu v popoludňajších hodinách o 0,2–0,3 °C v porovnaní s bitúmenovou strechou. Tento rozdiel je síce štatisticky malý, avšak termálne izoplety (Obr. 10) jednoznačne potvrdzujú oneskorený nástup teplotného maxima nad zelenou strechou a mierne pomalšie ochladzovanie po západe slnka, čo svedčí o tepelnom tlmení vplyvom vegetačnej vrstvy.

Tento mierny chladiaci efekt je možné pripísať evapotranspirácii vegetačného krytu, ako aj akumuláčnej schopnosti substrátu. Počas dňa sa na zelenej streche zároveň udržala mierne vyššia vlhkosť vzduchu – predovšetkým pri povrchu, čo bolo obzvlášť badateľné v čase maximálneho slnečného žiarenia. Tento jav je v súlade so zisteniami MOGHBELA & SALIMA (2017), ktorí pozorovali vyššie hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu v okolí zelených striech práve v dôsledku zvýšenej evapotranspirácie. Vyššia vlhkosť môže zároveň prispieť k zníženiu tepelných stresov v mestskom prostredí, hoci v našom prípade sa rozdiely medzi povrchmi pohybovali len v rádoch 1–1,5 %. Relatívne malý chladiaci efekt sledovanej zelenej strechy možno vysvetliť špecifickým typom vegetačného pokryvu, ktorý bol tvorený najmä rozhodníkovým zárastom (*Sedum spp.*). Tento typ vegetácie je síce mimoriadne odolný voči extrémnym podmienkam – toleruje dlhé obdobia sucha aj intenzívne zrážky, ako aj veľmi chladné zimy (KSIAZEK-MIKENAS & KÖHLER, 2018), no na streche TUZVO vidieť jeho vysychanie. Jeho schopnosť prispievať k evapotranspiračnému ochladzovaniu je obmedzená v porovnaní s rozmanitejšími a štruktúrne bohatšími vegetačnými spoločenstvami. Hoci tieto strechy majú výhody v nízkej potrebe údržby a v dlhej životnosti vegetačného krytu, ich ekologická hodnota a potenciál výrazne ovplyvniť mikroklimu zostávajú relatívne nízke (KÖHLER & KAISER, 2019). Naopak, vo výške 1 m nad strechami sa namerané hodnoty teploty a vlhkosti veľmi rýchlo homogenizovali, pričom lineárna regresná analýza preukázala extrémne vysokú koreláciu medzi oboma typmi striech ($R^2 > 0,998$). To potvrdzuje, že vo vyššej vrstve atmosféry nad strechou sa mikroklimatické rozdiely znižujú vplyvom turbulentného miešania vzduchu a väčšej expozície okolitému prostrediu. Zistenia sa zhodujú s prácou KIM & PARK (2024), kde sa uvádza, že chladiaci efekt malých zelených striech sa často neprejaví dostatočne, ak nie je pokrytá väčšia plocha alebo chýba efektívny systém závlahy. V tejto súvislosti sa čoraz častejšie uplatňuje koncept „blue-green infraštruktúr“, ktoré kombinujú vegetačné systémy s vodnými zásobníkmi a dokážu tak zefektívniť chladiace mechanizmy cez intenzívnejšiu evapotranspiráciu (TALEGHANI *et al.*, 2019; KÖHLER & KAISER, 2019).

Na základe našich výsledkov môžeme konštatovať, že extenzívna zelená strecha na budove TUZVO síce prispela k zníženiu extrémnych teplôt a udržaniu mierne vyššej vlhkosti vzduchu v tesnej blízkosti povrchu, avšak celkové rozdiely sú relatívne malé a nemusia predstavovať výrazný mikroklimatický prínos vo vyšších výškach.

ZÁVER

Vedecké štúdie o zelených strechách odhaľujú významné zlepšenia mestskej mikroklimy vrátane zníženia teploty a zvýšeného tepelného komfortu. Zelené strechy tiež prispievajú k zlepšeniu kvality ovzdušia filtrovaním znečisťujúcich látok a redukciou častíc. Ich úloha pri adaptácii na zmenu klímy je evidentná zvýšenou odolnosťou voči vlnám horúčav a manažmentu dažďovej vody. Tieto výhody podporujú zelené strechy ako účinné opatrenia na udržateľnosť miest. Avšak na základe vykonaných meraní teploty a vlhkosti vzduchu nad zelenou a bitúmenovou strechou na budove TUZVO možno konštatovať, že rozdiely medzi oboma typmi striech boli počas celého sledovaného obdobia pomerne malé. Priemerné hodnoty teploty aj vlhkosti vzduchu sa vo výške 1 m nad povrchom strechy líšili len minimálne, čo naznačuje rýchlu homogenizáciu mikroklimatických podmienok v tejto výškovej úrovni. Mierne rozdiely sa prejavili najmä v tesnej blízkosti povrchu počas horúcich letných dní, kedy bitúmenová strecha dosahovala vyššie maximálne teploty a zelená strecha mierne vyššiu vlhkosť vzduchu, pravdepodobne v dôsledku evapotranspirácie.

Termoizoplety a časové priebehy nameraných údajov zároveň ukázali, že mikroklimatický efekt vegetačného krytu sa najviac prejavuje pri extrémnych denných podmienkach, pričom počas nočných hodín sa teploty i vlhkosť medzi povrchmi vyrovnávajú. Lineárna regresná analýza potvrdila veľmi silné korelácie medzi údajmi z oboch typov striech ($R^2 > 0,99$), čo opäť poukazuje na veľmi podobný priebeh klimatických charakteristík, najmä vo výške 1 m.

Celkovo možno konštatovať, že zelená strecha v tomto konkrétnom prípade má len obmedzený vplyv na zlepšenie mikroklimatických podmienok, ktorý sa prejavuje prevažne v blízkosti povrchu strechy počas slnečných dní. Na výraznejšie zmeny teplotného a vlhkosťného režimu by pravdepodobne bolo potrebné rozsiahlejšie vegetačné pokrytie, zložitejšiu skladbu strechy alebo doplnkový závlahový systém.

Napriek tomu možno konštatovať, že zelené strechy plnia viacero doplnkových funkcií, ktoré môžu byť z hľadiska udržateľného rozvoja budov významné – predovšetkým izolačnú funkciu, spomalenie odtoku zrážkových vôd, či potenciálne zníženie prenikania hluku a prachu do interiérov. Okrem toho predstavujú vizuálne atraktívny prvok pre používateľov budovy, najmä na najvyšších podlažiach, čím môžu pozitívne ovplyvniť psychickú pohodu pracovníkov a študentov.

Z pohľadu inštitucionálnej politiky a environmentálnych cieľov možno inštaláciu zelenej strechy vnímať ako krok správnym smerom v napĺňaní stratégií klimaticky zodpovednej a zelenej univerzity, hoci z hľadiska vplyvu na mikroklima je potrebné realisticky očakávať len limitované efekty pri strechách podobného typu a rozsahu.

PodĎakovanie

Autori ďakujú za podporu projektu Agentúry na podporu výskumu a vývoja č. APVV-21-0224 BIOFLUX. Taktiež Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR a SAV za podporu projektom VEGA 1/0392/22.

LITERATÚRA

ATELIÉR TOMAN, 2022. Dostupné online: <https://www.ateliertoman.sk/portfolio-2/#cbp=https://www.ateliertoman.sk/portfolio/strechy-na-technickej-univerzite-vo-zvolene/> (použité 20.8. 2025)

ABUSEIF, M. 2023. Exploring influencing factors and innovative solutions for sustainable water management on green roofs: A systematic quantitative review. *Architecture*, 3 (2), 294-327. <https://doi.org/10.3390/architecture3020017>

DAVID, B. 2024. Influence of green roofs on urban heat island mitigation in canada. *Journal of environment*, 4 (4), 25-37. <https://doi.org/10.47941/je.2413>

FENG, Y., WANG, J., ZHOU, W., LI, X., & YU, X. 2022. Evaluating the cooling performance of green roofs under extreme heat conditions. *Frontiers in Environmental Science*, 10 null, . <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.874614>

FORESTWEATHER. Informačná karta meteorologickej stanice Areál Technickej univerzity vo Zvolene. Dostupné na: https://www.emsbrno.cz/loc.axd?s=%2Floc%2FTUZVO%2FL_Are%C3%A1l%20TUZVO.LocalityMore.sk&p=1&h=BSol1q%2FFph6dKwVQA%2FcLw%2BajI2n0Q1U5Q8l6LL0Pq8AY%3D

GAGLIANO, A., DETOMMASO, M., NOCERA, F. 2017. Assessment of the Green Roofs Thermal Dynamic Behavior for Increasing the Building Energy Efficiencies. In. LITTLEWOOD, J., SPATARU, C., HOWLETT, R., JAIN, L. (eds) *Smart Energy Control Systems for Sustainable Buildings. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 67. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52076-6_2

H. YIN, F. KONG, I. DRONOVA, A. MIDDEL, P. JAMES 2019. Investigation of extensive green roof outdoor spatio-temporal thermal performance during summer in a subtropical monsoon climate, *Sci. Total Environ.* 696 (2019) 133976, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133976>

HEUSINGER, J., WEBER, S. 2017. Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements, *Sci. Total Environ.* 577 (2017) 220–230, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.168>.

JOSHI, M. Y., & JOSHI, M. Y. 2024. Assessing urban heat island mitigation potential of realistic roof greening across local climate zones: A highly-resolved weather research and forecasting model study. *Science of The Total Environment*, 173728-173728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173728>

KSIAZEK-MIKENAS, K.; KÖHLER, M. 2018. Traits for stress-tolerance are associated with long-term plant survival on green roofs. *Journal of Urban Ecology, Journal of Urban Ecology*, Volume 4, Issue 1, <https://doi.org/10.1093/jue/juy016>

KIM, S.-H., & PARK, C. 2024. Investigation of Urban Heat Mitigation and Thermal Maladaptation Potential from Small-Scale Green Roofs: A Case Study in Seoul. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-15922>

KÖHLER, M., & KAISER, D. 2019. Evidence of the Climate Mitigation Effect of Green Roofs—A 20-Year Weather Study on an Extensive Green Roof (EGR) in Northeast Germany. *Buildings*, 9(7), 157. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS9070157>

LAPIN, M., FAŠKO, P., MELO, M., ŠTASTNÝ, P., TOMLAIN, J. 2002. 27. Klimatické oblasti. Climatic regions. In *Atlas krajiny Slovenskej republiky*. 1. vyd. Bratislava: Ministerstvo životného prostredia SR, Banská Bystrica: SAŽP, 2002, s. 95.

MIHALAKAKOU, G., SOULIOTIS, M., PAPADAKI, M., MENOUNOU, P., DIMOPOULOS, P., KOLOKOTSA, D., PARAVANTIS, J. A., TSANGRASSOULIS, A., PANARAS, G., GIANNAKOPOULOS, E., & PAPAETHIMIOU, S. 2023. Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 180 null, 113306-113306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>

MOGHBEL, M., & SALIM, R. E. 2017. Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. *Urban Climate*, 20 null, 46-58. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2017.02.012>

SOHAILI, J., YAN, L. K., MUNIYANDI, S. K., & MOHAMAD, S. S. 2018. Urban heat island mitigation using green roof approach. *Jurnal Teknologi* 80 (3) <https://doi.org/10.11113/JT.V80.10577>

SPEAK, A., ROTHWELL, J. J., LINDLEY, S., & SMITH, C. 2013. Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate* 3 null, 40-55. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2013.01.001>

VOURDOUBAS, J. 2024. Review of the benefits of green roofs. *International Journal of Current Science Research and Review*, 07 (09), . <https://doi.org/10.47191/ijcsrr/v7-i9-48>

ZHANG, X., SOE, A. N., DONG, S., CHEN, M., WU, M., & HTWE, T. Z. 2024. Urban resilience through green roofing: A literature review on dual environmental benefits. *E3S web of conferences*, 536 null, 01023-01023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453601023>