

Hospodaření s vodou v krajině 2024

Recenzovaný sborník příspěvků
z mezinárodní konference



Česká
bioklimatologická
společnost

Český
hydrometeorologický
ústav



Sborník příspěvků

HOSPODAŘENÍ S VODOU V KRAJINĚ

mezinárodní konference

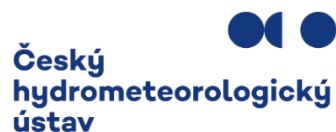
10.–11. 9. 2024 Třeboň

Brno 2024


Český
hydrometeorologický
ústav

Pořádající organizace

Český hydrometeorologický ústav



Ústav šlechtění a množení zahradnických rostlin
Zahradnické fakulty Mendelovy univerzity v Brně



Česká bioklimatologická společnost, z. s.



Výzkumný ústav monitoringu a ochrany půdy, v.v.i.



Asociace pro vodu v krajině České republiky, z. s.



Slovenská bioklimatologická spoločnosť



Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.



Ústav hydrológie SAV, v. v. i.



CREA Hydro&Energy, z. s.



Obsah

Úvodní slovo	5
Data a vývoj klimatu	6
Ladislav Budík	
Rizika vod 40.....	32
Jan Čermák	
Vývoj klimatu, půdních charakteristik a odtoku tří malých povodí na Šumavě	43
Martin Černý, Jan Procházka	
Problematika a možnosti vyhodnocení měření vlhkosti půdy v ČHMÚ	53
Petr Hora	
Dlouhodobý vývoj půdních a přízemních teplot v jarních měsících na stanici Troubsko.....	61
Jaroslav Lang, Tomáš Vymyslický	
Vlhkostní a teplotní poměry pod různě udržovanými travními porosty	70
Tomáš Litschmann, Petr Salaš, Jana Burgová, Irena Drobiličová, Jindřiška Jeřábková	
Fyziologická reakcia <i>Pinus</i> sp. na stres zo sucha	81
Lenka Malovcová, Jana Kurjaková	
Vplyv meniacich sa podmienok prostredia na vodný režim buka a smreka v jedľovo-bukovom lesnom vegetačnom stupni	90
Paulína Nalevanková, Peter Popadič, Katarína Střelcová, Jaroslav Vido	
Srážkové poměry oblasti Malé Hané a jejich vliv na pěstování silážní kukuřice.....	104
Pavel Nerušil, Jaroslav Rožnovský, Miroslav Jurka, Ladislav Menšík st., Ladislav Menšík ml.	
Změny v rozdělení srážek na území Česka a Šumavy.....	115
Jan Procházka, Veronika Šustková, Pavel Lipina, Miroslav Tesař	

Srážkové poměry Klementina 128

Jaroslav Rožnovský, Milan Palát

**Přehled finančních možností v oblasti vědy aneb využijte
grantové možnosti naplno 134**

Eva Stehnová

**Nebadané dôsledky: vplyv hlbinej ťažby hnedého uhlia na dynamiku pôdneho
vodného potenciálu v oblasti bane Cígel' (okres Prievidza)..... 142**

Jaroslav Vido, Paulína Nalevanková

Úvodní slovo

Vážené dámy a vážení pánové, tento sborník obsahuje články z konference, která nese název „Hospodaření s vodou v krajině“. Pod tímto, stále stejným názvem, se skrývá velmi závažná problematika, mnoho otázek a současně snaha najít vhodná řešení, aby voda v naší krajině nechyběla. Jde totiž o to, že se nejedná jen o nás, obyvatele této země, ale celou přírodu, zemědělství a průmysl. Ne všichni si uvědomují, že otázka vody není dána jen poměry republiky, ale týká se celé naší planety. Musíme neustále vysvětlovat, že vývoj podnebí její dostupnost stále více snižuje. Že oběh vody je velmi složitý proces, s vazbami, které v určitých částech dobře neznáme, ale i tam, kde je známe, nejednáme správně. Tedy nectíme charakter našeho podnebí, jeho zákonitosti. Jako kdybychom nevěděli, že jediný zdroj vody pro naše území jsou srážky, navíc velmi proměnlivé jak v čase, tak i v prostoru.

Někdy se zdá, že pojem změna klimatu je uváděna, ale její podstata a dopady nejsou respektovány. Proto je konání nejen této, ale i mnoha dalších obdobně zaměřených konferencí velmi potřebné. Jistě, že základem pro hospodaření s vodou v krajině je znalost, kolik vody nám srážky přinesou. Proto jsou uváděny články hodnotící dynamiku a vývoj našeho podnebí. Bohužel z těchto analýz vyplývá, že přes velmi dynamické srážkové projevy jsou v dlouhodobém hodnocení úhrny bez významného trendu. Je ovšem omyl předpokládat, že tedy vody je v naší krajině dost. Proto jsou vítány poznatky o vazbách v rámci meteorologických a následně klimatických procesech. Statisticky prokazatelně rostoucí teplota vzduchu znamená zvyšování evapotranspirace, a stále častěji deficitní vláhovou bilanci. Zde sehrávají svou roli extrémní projevy výskytu srážek, které jsou zvláště v letních obdobích častější. Vysoké srážkové úhrny však mají často negativní dopady, a to výskyty povodní. Jejich výskyt ale dokládá, že v naší krajině často nehospodaříme vhodně, právě s ohledem na extremitu srážek.

V tomto pohledu nastupuje problematika retence vody v naší krajině. Musíme si přiznat, že na tuto problematiku nejsou stejné názory. Ale je kladem právě i naší konference, že se o těchto záležitostech hovoří, že hledáme argumenty pro vhodná opatření. A u těchto nejde jen o technickou stránku, ale také o vhodné umístění a zvláště stanovení jejich kapacity. Najdeme v tomto sborníku v podstatě nový pojem, „předvídání“. Tedy stanovení vhodných postupů s využitím všech dostupných znalostí v dlouhodobém pohledu.

Určitě je mnoho otázek, na které v tomto sborníku nenajdete odpověď. Budeme rádi, když je budeme dále společně hledat na další konferenci v roce 2025.

V Brně 30. srpna 2024

Jaroslav Rožnovský jménem organizátorů

Data a vývoj klimatu

Data and Climate Evolution

Ladislav Budík

Český hydrometeorologický ústav, Oddělení hydrologie, Kroftova 43, 664 51, Brno, ladislav.budik@chmi.cz

Abstrakt

Tento příspěvek se opírá o dlouhodobá pozorování teplot na meteorologických stanicích. Základní otázkou bylo, zda existuje způsob, jak hodnotit účinky změn ve složení atmosféry a dalších environmentálních parametrů. Cílem studie bylo ověřit, zda lze identifikovat a kvantifikovat vliv těchto změn na klima, a to zejména ve vztahu k dlouhodobému oteplování planety. Analýza zahrnovala prokládání teoretických křivek překročení, zkoumání časových změn maximálních, minimálních a průměrných teplot a schématické odhady energetického chování klimatu v průběhu roku. Důraz byl kladen na hodnocení vlivu CO₂ a dalších faktorů, jako jsou sluneční cykly a čistota atmosféry. Výsledky ukazují, že oteplování planety je při nižších teplotách pravděpodobně primárně způsobeno zvýšenou koncentrací CO₂. Během vegetačního období se naopak oteplování zdá být více ovlivněno slunečním cyklem a vyčištěním atmosféry od exhalací, což vedlo ke zvýšení její průhlednosti. Analýza ukazuje, že změny klimatu nelze jednoznačně považovat za negativní. Historické údaje naznačují, že některé změny mohou být pro naši civilizaci dokonce přínosné. Doba ledová by pro lidstvo představovala větší hrozbu, a je otázkou, zda bychom byli schopni se s ní vypořádat lépe než se současnými výzvami.

Klíčová slova: globální oteplování, emise CO₂, analýza teplot, rozdělení LN5 a mLN5, sluneční cykly

Abstract

This paper is based on long-term temperature observations at meteorological stations. The primary question was whether there is a way to assess the effects of changes in atmospheric composition and other environmental parameters. The aim of the study was to verify whether it is possible to identify and quantify the impact of these changes on the climate, particularly in relation to long-term global warming. The analysis included fitting theoretical exceedance curves, examining temporal changes in maximum, minimum, and average temperatures, and schematic estimates of the climate's energy behavior throughout the year. The focus was on evaluating the influence of CO₂ and other factors such as solar cycles and atmospheric clarity. The findings suggest that global warming at lower temperatures is likely primarily driven by increased CO₂ concentrations. In contrast, during the growing season, warming appears to be more influenced by the solar cycle and the clearing of the atmosphere from emissions, which has led to increased transparency. The analysis indicates that climate changes cannot be unequivocally considered negative. Historical data suggest that some changes may actually be beneficial for our civilization. An ice age would pose a greater threat to humanity, and it is questionable whether we would be better equipped to handle it than the current challenges.

Keywords: global warming, CO₂ emissions, temperature analysis, LN5 and MLN5 distributions, solar cycles

1. Úvod

Pro analýzu hydrologických dat a tvorbu křivek překročení byl vyvinut postup prokládání dat teoretickou křivkou, který je založen na zobecnění logaritmicko-normálního rozdělení LN3 na pětiparametrické rozdělení mLN5 (viz Budík 2018, Budík 2019) s vektorem parametrů $\theta = (a, b, \mu, \sigma, y_0)$. Tento přístup přinesl zajímavé výsledky. Ukázalo se, že je aplikovatelný nejen na různě asymetrická data, ale také na symetrická data a dokonce i na data s velkým množstvím nulových hodnot, typicky denní srážky.

Při analýze některých dat, jako jsou denní průměrné průtoky, denní úhrny srážek nebo průměrné denní teploty, se ukázalo jako vhodné přidat další dva parametry, označené jako c a d , které popisují odlišný typ ohybu křivky překročení u vysokých hodnot. Toto rozšíření umožnilo získat nové poznatky, které budou dále popsány.

Zpracování dat bylo prováděno jak za celá měřená období, tak i po jednotlivých měsících. Tím se odhalily další zajímavé výsledky týkající se vlivu lidské činnosti na klima, a také aspekty, které zřejmě nemůžeme ovlivnit, a které jsou závislé na aktivitě Slunce. V závěru popíšeme některé pozorovatelné důsledky v chování naší přírody.

2. Metodika

Metodika je podrobně popsána v několika příspěvcích na konferencích APLIMAT (Budík 2018; Budík 2019; Budík, Budíková 2020) a část je v článku přijatém do tisku (Budíková a kol.). V uvedeném článku jsou odvozeny i statistické vlastnosti rozdělení jak LN5 tak mLN5. Je tam popsána i trojúhelníková metoda optimalizace proložení teoretické křivky měřenými daty. Tato metoda předpokládá nepřesnosti nejen v datech, ale i v určení pravděpodobnosti překročení. Minimalizuje tedy sumu rozdílů mezi polohou průmětu bodů teoretické křivky na křivku měřených dat podél osy y i podél osy x s využitím Pythagorovy věty.

Vztah pro transformaci veličiny X s normálním rozdělením s parametry μ, σ na veličinu Y s rozdělením LN5 s parametry a, b, μ, σ, y_0 :

$$Y = a \exp(\operatorname{sgn} X \cdot |X|^b) + y_0$$

Vztah pro transformaci veličiny X s normálním rozdělením s parametry μ, σ na veličinu Y s rozdělením mLN5 s parametry a, b, μ, σ, y_0 :

$$Y = a \exp(\operatorname{sgn} X \cdot |X|^b) + y_0, |X| \geq I,$$

$$Y = a \exp(\operatorname{sgn} X \cdot |X|^{b+(1-b)(1-|X|)}) + y_0, |X| < I,$$

Trojúhelníková metoda optimalizace teoretické křivky spočívá v minimalizaci funkcionalu

$$K(y, \theta) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i - u_{ti}}{u_{ti}} \right) + \sum_{i=1}^n (p_i - p_{ti})^2,$$

kde $p_i = \frac{i}{n+1}$ je empirická pravděpodobnost překročení měřené hodnoty y_i ,

$p_{ti} = F(y_i)$ je teoretická pravděpodobnost překročení měřené hodnoty y_i , přičemž F je distribuční funkce rozdělení LN5 nebo mLN5,

u_i je inverzní transformace měřené hodnoty y_i na hodnotu se standardizovaným normálním rozložením,

$u_{ti} = \Phi^{-1}(p_i)$ je transformace empirické pravděpodobnosti p_i , přičemž Φ je distribuční funkce standardizovaného normálního rozložení.

Metoda prokládání pomocí mLN5 rozdělení se ukázala jako přesnější než dosud používané způsoby pro analýzu hydrologických a klimatologických dat. Navíc byla prokázána vyšší přesnost trojúhelníkové metriky ve srovnání s jinými běžně používanými postupy, a to u všech testovaných teoretických křivek. Tato tvrzení jsou podložena výsledky publikovanými ve vědeckých článcích a prezentovanými na odborných konferencích.

Nyní několik poznámek k dodatečným parametrům c a d viz obrázky křivek překročení v příloze. Jejich zavedení bylo motivováno zjištěním, že při prokládání denních průměrných průtoků se u velkých povodí objevují odchylky mezi teoretickou a naměřenou křivkou, a to zejména u vysokých průtoků. Tyto odchylky směřují k nižším hodnotám, což může být způsobeno rozlivy při vysokých průtocích. Naopak u menších povodí se rozdíly projevovaly směrem k vyšším hodnotám. Odchylka empirické křivky směrem k nižším průtokům naznačovala souvislost s transformací vysokých průtoků podél toku.

Parametr d označuje přibližnou hodnotu průtoků, při které k této změně dochází, zatímco parametr c určuje velikost této změny. Znaménko parametru pak indikuje, zda změna směřuje k nižším nebo vyšším hodnotám. Ukázalo se, že použití

parametrů c a d je užitečné nejen pro průtoky, ale také pro srážky a teploty. Doporučuje se aplikovat tyto parametry na normální rozdělení ještě před jeho transformací na mLN5 rozdělení, a nikoliv až na transformovaná data.

Potom pro $X > d$ je

$$X' = (X - d) \cdot c + X$$

$$Y = a \exp(\operatorname{sgn} X' \cdot |X'|^b) + y_0, |X| \geq I,$$

$$Y = a \exp(\operatorname{sgn} X' \cdot |X'|^{b+(1-b)(1-|X|)}) + y_0, |X| < I,$$

Aplikace parametrů c a d na denní hodnoty srážek ukázala, že parametr c je vždy kladný u všech zkoumaných stanic v celé České republice. Tento kladný výsledek se odráží i u menších ploch povodí, kde dochází k minimální transformaci velkých průtoků, což umožňuje zachování extrémních jevů, jako jsou tzv. superbouře, v odtokových datech.

Dalším zajímavým postřehem je tvrzení fyziků, že úsek spektra, jehož vyzařování mimo planetu může ovlivnit CO_2 , je již nasycen, a tudíž se další zvyšování zpětného odrazu tepla nemůže nadále zvyšovat. Jde o kvantový jev, při kterém se molekula CO_2 excituje kvantem záření určité vlnové délky a následně toto kvantum po krátkém čase vyzáří náhodně v jakémkoli směru do prostoru. V době, kdy toto kvantum molekula vlastní, další již přijmout nemůže. To je rozdíl např. oproti klasickému útlumu hluku stěnou, kdy se pohlcení zvyšuje při rostoucím hluku až do mechanického rozrušení stěny. Každé dané množství molekul může pohltnout jen určité množství kvant záření. Pokud se počet molekul nezvyšuje, nemůže být za jednotku času zachyceno více kvant.

Tím se otevírá otázka, kolik kvant může naše atmosféra obsahující CO_2 zachytit a zda je těchto kvant více nebo méně vzhledem k množství molekul skleníkových plynů. Pokud se množství energie dodávané Sluncem nezvyšuje, nemělo by se v důsledku činnosti skleníkových plynů (při ostatních neměnných vlastnostech planety) se stoupající teplotou zvyšovat ani množství energie vyzařované zpět do vesmíru. Pokud by se však teplota zvyšovala a rostlo množství vyzařované energie, naznačovalo by to, že příčinou je vyšší příjem energie z vnějšího prostoru.

Tuto hypotézu můžeme zkusit ověřit tak, že sečteme rozdíly mezi minimálními a maximálními teplotami měřenými ve stejných termínech po co nejdelší dobu v průběhu jednotlivých měsíců. Vzhledem k rozdílným teplotám mezi měsíci bychom měli zaznamenat, kde se s růstem teplot zvyšuje zpětné vyzařování energie atmosférou a kde nikoliv. K odhadu vyzářené energie můžeme využít Stefan-Boltzmannův vyzařovací zákon: součtem čtvrtých mocnin teplot v Kelvinech získáme hodnotu úměrnou vyzářené energii. Její absolutní velikost pro tuto analýzu není podstatná. Důležité jsou vzájemné poměry. Teplota prostoru, do něž vyzařujeme, je asi 4K.

V prvním přiblížení použijeme pro odhad poměru vyzářené energie průběh denních teplot ve tvaru sinusovky. Součtem čtvrtých mocnin teplot v Kelvinech v několika bodech sinusovky získáme odhad vyzařované energie. Pokud by tyto rozdíly klesaly nebo zůstávaly stejné se zvyšující se teplotou, znamenalo by to, že dochází k většímu zadržování tepla na planetě. Pokud by naopak rostly, příčinou by mohl být vyšší výkon Slunce nebo větší příjem energie díky čistšímu ovzduší. Výsledky analýz pro stanici Praha, Klementinum jsou v příloze.

Skutečnost, že je dnes ovzduší čistší a průhlednější, lze snadno ověřit. Stačí porovnat, jak vypadaly západy Slunce v 50. letech minulého století (kdy bylo Slunce pozorovatelné až do okamžiku, kdy zmizelo za obzorem, a před deštěm se ani nevytvářely červánky), s 80. lety, kdy Slunce často mizelo už asi 10° nad obzorem a samotný západ nebyl viditelný vůbec. Dnes je obloha často sytě modrá a západy Slunce jsou velmi jasné a čisté. Pro tento závěr nemusíme mít ani měření z čistoty ovzduší, které to potvrzují, s tím, že ale nemáme měření z 50. let minulého století. Bohužel, je pro to nutný dostatečný věk pozorovatele nebo existence záznamů.

Nakonec také doplníme průměrné teploty jednotlivých měsíců v závislosti na čase.

Další zajímavým aspektem je sledování vývoje ročních srážkových úhrnů v souvislosti s ročními odtoky na povodích, která nejsou významně ovlivněna lidskou činností. Tím můžeme zjistit, zda skutečně roste podíl vypařené srážkové vody.

Vegetace je zjevně tmavěji zelená, což naznačuje vyšší obsah chlorofylu. To může vést k intenzivnější asimilaci, ale zároveň i k vyššímu zahřívání rostlin, což by mohlo zvyšovat výpar.

Zelenější vegetace je potvrzena nejen lidskou barevnou pamětí (kterou disponuje jen část populace), ale také měřeními z družic. Zároveň se zvýšila hustota listového pokryvu, což se projevuje i snížením množství světla v lesích. Tento jev byl zaznamenán například ve Francii, kde byla provedena měření pokryvnosti lesa severně od Paříže již ve 20. letech minulého století a následně i v pozdějších obdobích. Data jasně ukazují nárůst pokryvnosti.

Dva příklady ročních srážkových úhrnů a ročního odtoku od r 1961 jsou v příloze. V obou případech mírně narůstá srážka a klesá odtok. V oblastech s významně poškozenou vegetací (Jizerské hory) je to spíše naopak.

Tato pozorování nám umožňují lépe pochopit, jak vegetace v přirozených podmínkách reaguje na zvýšené koncentrace CO_2 a čistší atmosféru, i když rozlišení vlivů jednotlivých faktorů tímto způsobem pravděpodobně nebude možné.

3. Výsledky

Pro analýzu teplot bylo výše popsáným způsobem zpracováno 12 stanic z různých částí světa. Většina z těchto stanic má ve svých záznamech značné množství chybějících pozorování. Nejkompletnější a nej kvalitnější data poskytuje pražské Klementinum, jehož záznamy jsou nepřetržité od roku 1776 a stanice v Miláně na severu Itálie. Pro pochopení fungování celého klimatického systému by bylo nutné analyzovat všechny dostupné řady, což však přesahuje rozsah této práce. Proto se podrobně zaměříme pouze na Klementinum, které je v příloze 1 doplněno o část souvisejících grafů, zatímco ostatní stanice zmíníme jen stručně. Uvedeme několik grafů křivek překročení pro lepší ilustraci závislosti.

Z analýz uvedených v příloze vyplývá, že část pravdy o fungování klimatického systému mají pravděpodobně všichni, včetně těch, kteří mají protichůdné názory. Je nepochybné, že CO_2 přispívá k zadržování tepla na Zemi. Nicméně, jak uvádějí fyzikové, spektrální pásmo, které může CO_2 ovlivňovat, je zřejmě již plně nasyceno, protože projevy, které by zde měly být, jsou jen v chladnějších měsících – listopad, prosinec, leden, únor. Při vyšších teplotách (zhruba nad 10°C v rámci ČR) není CO_2 zřejmě schopen výrazněji zadržovat další teplo. To znamená, že s rostoucími koncentracemi CO_2 se zvyšují maximální teploty zejména v chladnějších měsících, což je do značné míry důsledkem tepelné setrvačnosti planety, především oceánů.

Z analýz křivek překročení teplot vyplývá, že parametr c je ve všech zkoumaných stanicích různou měrou záporný, s výjimkou těch, které se nacházejí v oblastech s dlouhou polární nocí a dnem. To naznačuje, že planeta disponuje dalším mechanismem pro regulaci teploty – vodou. Voda má nejvyšší známé skupenské teplo výparné ze všech přírodních látek a je jí na Zemi hojně.

Při teplotách přibližně nad $+10^\circ\text{C}$ začíná s rostoucí teplotou významněji narůstat množství vodní páry, kterou může vzduch pojmout. Pokud je k dispozici dostatek vody, rostliny zvyšují svůj výpar (relativní vlhkost vzduchu rychle klesá s rostoucí teplotou) ve snaze ochladit své listy, které se ohřívají při vyšším obsahu CO_2 a čistší atmosféře. Rostoucí koncentrace CO_2 v ovzduší zároveň urychluje zvětrávání podporované kyselinou uhličitou ve srážkách a zvláště v půdní vodě, čímž se zvyšuje dostupnost biogenních prvků. Tyto prvky dále podporují koncentraci chlorofylu v listech rostlin a jejich odolnost vůči suchu. Rostliny tak ukládají značnou část sluneční energie do vodní páry, která se dostává do vyšších vrstev atmosféry. Zde kondenzuje do oblaků, přičemž zhruba polovina skupenského tepla výparného směřuje mimo Zemi a druhá polovina se vrací zpět k povrchu (uvolněné teplo se při kondenzaci šíří všemi směry). Tento proces, na rozdíl od účinku oxidu uhličitého, který pracuje přímo s tepelným zářením, využívá teplo „schované“ ve vodní páře, a tak se rozbíhá přirozená „klimatizace“ Země. Významněji funguje jen za vyšších teplot a při dostatku vody.

Pro existenci života na Zemi je tedy klíčové, aby byl za daných podmínek zajištěn dostatek vody pro maximální výpar, podporovaný co největším pokryvem vegetace. Do tohoto klimatizačního procesu samozřejmě zasahuje i výpar z oceánů. Tento pravděpodobný scénář vyplývá z extrapolací křivek překročení teplot s použitím parametrů c a d .

Pokud by parametr c u průměrných denních teplot byl 0, mohly by maximální průměrné teploty dosahovat až 40 °C.

Vodní pára má sice i oteplovací účinek, ale ten se zřejmě projevuje zejména v noci při kondenzaci rosy, kdy se uvolňuje skupenské teplo výparné. Čím větší je absolutní obsah vody ve vzduchu, tím menší jsou poklesy teplot během jasných nocí.

3.1. Úloha rostlin v „klimatizaci“ planety.

Funkční vlastnosti rostlin s typem asimilace C3, které převažují, hrají v těchto procesech také důležitou roli (Janouš, D. 2010). Až do koncentrace CO₂ okolo 800 ppm v atmosféře se jejich asimilace zvyšuje, což pravděpodobně zvyšuje výpar, čímž se zesiluje klimatizační efekt ve spojitosti s růstem především minimálních teplot způsobeným vyššími koncentracemi CO₂ v atmosféře.

Nárůst koncentrace CO₂ tedy především zvyšuje nízké teploty, a to jak na severu, tak na jihu planety, i ve vyšších nadmořských výškách. Tento jev přispívá k vyrovnávání klimatu na Zemi v prostoru a čase. Pokud dojde k poklesu výkonu Slunce v rámci cyklů, vyrovnávací schopnost CO₂ se kvůli poklesu teplot zeměpisně rozšíří směrem k rovníku. Ale teploty stejně klesnou a dále je sníží větší odrazivost vody v pevném skupenství, pokud se taková začne vyskytovat. Čím menší obsah CO₂ v atmosféře, tím větší pokles. Ten zároveň podporuje i rostoucí rozpustnost CO₂ (a i ostatních plynů) v chladnoucí vodě oceánů.

Při teplotách do asi 18 °C funguje klimatizace pomocí výparu vody pouze minimálně. Při vyšších teplotách (pokud není vegetace významně narušena a má dostatek vody – což v pouštích není zcela splněno) se tento klimatizační efekt výrazně zesiluje a to i tvorbou oblačnosti. Oceán vyrovnává teploty svým výparem neustále, v závislosti na své teplotě, s tím, že pro účinný výpar musí mít volný povrch. Proto studené periody, kdy je hodně vody v pevném skupenství, je nižší výpar i srážky a zpětně zeslabená „klimatizace“. V místech ropných skvrn se však výpar snižuje, což omezuje i tuto klimatizační funkci. Oceán také rozvádí teplo svými proudy do chladnějších oblastí planety a obráceně.

Z výše uvedeného je zřejmé, že je nutné udržovat v atmosféře poměrně vysoký obsah CO₂, aby byla planeta chráněna před ledovou dobou, která by nebyla příznivá pro život. Zároveň je však nezbytné zajistit co nejvyšší výpar vody, abychom se vyhnuli extrémně vysokým teplotám, které by rovněž nebyly příznivé. (Bez výparu by podle extrapolací křivek teplot bez opravných parametrů c a d souvisejících právě s předpokládaným nástupem „klimatizace“ byla maximální teplota na našem území podstatně vyšší než dnes)

Rostliny s asimilací typu C3 při hodnotách CO₂ kolem 150 ppm již mají jen malý asimilační efekt a ten s dalším poklesem jde k nule. Na druhou stranu, rostliny C4 zvládají i velmi nízké koncentrace CO₂, avšak potřebují pro asimilaci teplotu od zhruba 10 °C výše, přičemž jejich optimum leží také výše než u rostlin C3. Navíc C4 rostliny potřebují přímé sluneční světlo, protože jejich asimilace ve stínu je téměř zanedbatelná. Proto většina plevelů, které často patří mezi C4 rostliny, roste jen na volných plochách. Naopak C3 rostliny dokáží asimilovat i ve stínu a jsou schopny asimilace dokonce při záporných teplotách. Z tohoto důvodu nemohou být stromy C4, protože zhruba dvě třetiny jejich listové plochy jsou ve stínu, což by asimilaci C4 rostlin značně omezovalo. Navíc zastínění listů se během dne mění v závislosti na pohybu Slunce po obloze.

Dle analýz vzduchových bublinek v ledových byl během poslední doby ledové obsah CO₂ v atmosféře pod 200 ppm, což jsou hodnoty, při kterých se C3 vegetace již vyvíjí špatně. Hodnoty kolem 150-170 ppm CO₂ jsou pro ni již kritické. Z toho lze vyvodit, že klimatické podmínky, jak je známe z nedávné doby, nejsou ani zdaleka pro život na Zemi optimální a blíží se k dolní hranici, při níž je ještě možná existence života. Zároveň z toho vyplývá, že omezování ploch lesů a zhoršování kvality půd, ke kterému dochází posledních 4000 let, je pro klima škodlivé a může zesilovat jeho výkyvy. Navíc, vzhledem k tomu, že rostliny C3 mají nižší teplotní optimum (15–25 °C), jejich situaci zhoršuje zabetonovávání kontinentů, které zvyšuje teploty a snižuje ochlazování výparem a následně tím i celkové srážky. Nejlépe na tom jsou rostliny s typem asimilace CAM, což je většina sukulentů – kaktusy. Jejich výpar je však velmi malý.

K udržení dostatečné kvality půd je nutné zajistit, aby půda zachytila co nejvíce vláhy nejen pro dobrý růst rostlin, ale také pro „klimatizaci“ – tj. snižování maximálních a zvyšování minimálních teplot a celkové vyrovnávání klimatu.

K tomu, aby toto bylo splněno, je nezbytná přítomnost bioty, organických zbytků, humusu, a jílovitých částic v půdě, které zajišťují drobtovitou strukturu půdy. Biota přispívá k této struktuře svým pohybem a vylučováním lepivých slizů, které společně s bakteriemi spojují půdní částice dohromady. Tyto organismy potřebují jako potravu rostlinný a živočišný odpad, který však často zpracováváme mimo půdy – například na čistírnách odpadních vod, při spalování, skládkování nebo vypouštění do řek, odkud se dostává do moří. Tam však nadměrné koncentrace živin škodí, protože oceánská biota není na takové podmínky vývojově přizpůsobena. Pro půdu, a v důsledku i klima, je tedy nezbytné, aby se do ní dostávala organická hmota, která stále obsahuje energii, a ne jen hmota minerální.

Příroda nám sama naznačuje, jak bychom měli s vodou zacházet. Kde je vody nadbytek, tam rostou rostliny, které dokáží vypařit více vody než volná vodní hladina. Na méně vlhkých půdách, ale stále s dostatkem vody, rostou stálezelené lesy. Dále od moře se nacházejí opadavé lesy, následované lesostepí a stepí – kde se vyskytují rostliny, které musí být připraveny na ztrátu listů kvůli suchu kdykoliv během roku, nejen během jednoho, pravidelně se opakujícího, nepříznivého období jako listnaté dřeviny. Většina těchto rostlin se nesnaží shromažďovat vodu pouze pro sebe, ale vypařují ji k dalšímu použití. Vodou šetřící rostliny se objevují ve větším množství až v polopouštích a pouštích, kde je to pro ně zásadní pro přežití.

Z toho vyplývá, že příroda se snaží uvolnit co nejmenší vody do odtoku, ale pokud možno s co nejmenšími výkyvy, protože ta je tak ztracena pro malý koloběh vody na pevnině a vrací se na začátek procesu, kde ji využívají rostliny s vysokou mírou výparu. Klimatický systém Země tedy zřejmě obsahuje několik zásadních regulačních prvků, kdy selhání kteréhokoli z nich by mohlo vést ke kolapsu celého systému. Z výše popsaného také plyne, že součástí klimatu je celá zeměkoule včetně poslední houby či půdní bakterie. Má-li biologický systém přežít, musí se držet v určitém rozsahu podmínek.

4. Diskuse

4.1. Oxid uhličitý (CO₂) a metan (CH₄)

Množství CO₂ ve sloupci vzduchu nad určitou oblastí přispívá ke zvyšování nejnižších teplot, čímž zmírňuje nepříznivé období pro růst rostlin. CO₂ vrací část energie tepelného záření zpět na Zemi, což vede k oteplování, které se výrazněji projevuje při nižších teplotách a ve vyšších nadmořských výškách. V těchto oblastech je totiž sloupec vzduchu nad povrchem Země nižší než v nížinách a teploty nižší, takže vliv CO₂ je relativně větší.

Podobný efekt lze pozorovat v polárních oblastech, kde je kvůli rotaci Země nižší výška sloupce vzduchu než kolem rovníku. Navíc je zde i primárně nižší množství tepelného záření, které CO₂ může absorbovat. V blízkosti pólů, kvůli menší odstředivé síle způsobené nízkou povrchovou rychlostí rotace, je gravitace silnější. To znamená, že stejný počet molekul vzduchu má v polárních oblastech větší hmotnost, a tudíž je zde pro dosažení stejného tlaku potřeba méně vzduchové hmoty. Tento faktor způsobuje, že množství CO₂ v polárních oblastech může být nižší, avšak jeho nárůst je zde díky kvantovým jevům při absorpci tepelného záření účinnější.

V tropech je účinek zvyšování koncentrace CO₂ zanedbatelný kvůli vysokým teplotám. V těchto oblastech hrají při změnách teplot hlavní roli teplota oceánu a sluneční záření a možnosti ochlazování výparem.

Článek (Liu L., 2010) popisuje, jak v prostředí s nedostatkem kyslíku železo a biota snižují produkci metanu a zvyšují rozklad organické hmoty. Tento proces vede k tomu, že rostliny mají k dispozici více živin, což podporuje jejich růst a následně i zvyšuje vodní výpar.

4.2. Voda a vodní pára

Kapalná voda hraje klíčovou roli při vyrovnávání teplotních výkyvů mezi chladnými a teplými obdobími, avšak nemá nejspíše schopnost měnit celkový planetární teplotní průměr. Toto platí za předpokladu, že se celková plocha vody na Zemi ani její rozmístění globálně nemění.

Voda v pevném skupenství, jako je led a sníh, zvyšuje albedo (odrazivost) povrchu, což vede ke snižování teplot během chladných období. Tento jev například přispívá k intenzifikaci ledových dob. K jejich intenzifikaci přispívá i zvýšená rozpustnost plynů ve vodě při klesající teplotě.

4.3. Přechod vody mezi kapalným a plynným skupenstvím

Při teplotách nad přibližně 18 °C začíná voda významně ovlivňovat teplotu tím, že se rychle zvyšuje schopnost vzduchu pojmout více vodní páry. Přebytečná tepelná energie z vlhkého povrchu se tak může přenášet do vyšších vrstev atmosféry bez zvýšení teploty. V těchto vrstvách pak vodní pára kondenzuje a uvolňuje velkou část energie do vnějšího prostoru. Tento proces zároveň pravděpodobně zvyšuje teploty horních vrstev atmosféry, což by mohlo vést k intenzivnějším bouřkám.

Vyšší obsah vodní páry ve vzduchu také snižuje rozdíl mezi minimální a maximální denní teplotou vlivem tvorby rosy, což přispívá k menšímu kolísání teplot během dne.

Zde může hrát významnou roli tzv. zabetonování planety, protože voda z těchto povrchů většinou přímo odtéká do moře zpět do velkého cyklu a opakovaně se nevypařuje a nevytváří oblaka. V Evropě může být takto postiženo až 11 % plochy.

4.4. Vliv Slunce a klimatické stabilizace

Do výše popsaných procesů zasahuje svou proměnlivou aktivitou také Slunce, a zemské klima se s touto variabilitou vyrovnává pomocí několika stabilizačních mechanismů. S nárůstem energie dodané ze Slunce se zvyšuje výpar z oceánů, což vede ke zvýšení srážek a následně ke zvýšení výparu rostlinami. To je spojeno s nárůstem asimilace a vázání uhlíku v půdách, což celkově posiluje klimatizační efekt.

Tyto procesy mohou být negativně ovlivněny vyšší koncentrací prachu a oxidu siřičitého (SO₂) v ovzduší, které mohou snižovat teplotu i srážky. Vyšší množství menších kapiček vody se totiž udrží v mracích lépe než menší množství větších kapiček v čistější atmosféře. SO₂ ve vzduchu navíc ve spojení s vodou vytváří kyselinu sírovou, která může vyluhovat především stopové prvky z půd a snižovat půdní pH, což negativně ovlivňuje symbiotické houby a celkově poškozuje vegetaci. Tento narušený vegetační pokryv pak ztrácí i svůj klimatizační efekt, což je nahrazeno zvýšenou odrazivostí atmosféry (SO₂ a prach) a snížením množství dopadajícího slunečního záření. Ačkoli se tyto vzájemně protichůdné efekty mohou přibližně vyrovnat, celkový dopad na biotu je jednoznačně negativní.

5. Závěr

5.1. Paleoklimatické souvislosti

Z paleoklimatického hlediska lze vyvodit, že nejprůzračnějšími podmínkami pro biotu byly prvohory až po vznik ediakarské fauny. Tento rozkvět rostlin a živočichů, doprovázený intenzivním zvětráváním, které spotřebovávalo CO₂, a z něhož pochází černé uhlí, vedl k poklesu obsahu CO₂ v atmosféře a následně ke vzniku ledového období během permu. V permu už bylo CO₂ v atmosféře velmi málo, což vedlo k dalšímu ochlazení a nástupu ledové doby, která způsobila vymření ediakarské fauny.

Na konci permu došlo k prudkému nárůstu sopečné činnosti, která uvolňovala velké množství CO₂, SO₂ a sopečného prachu. Prach snížil albedo ledu a sněhu, zatímco CO₂ pomáhal udržovat teploty v chladnějších obdobích, což vedlo k opětovnému rozkvětu bioty (období dinosaurů). Z tohoto období a z třetihor pochází hnědé uhlí, které reprezentuje CO₂ uložené rostlinami. Jak sopečná činnost začala klesat, obsah CO₂ v atmosféře se snižoval, což vedlo k poklesu teplot a nástupu ledových dob na konci terciéru a v kvartéru. Tyto ledové doby byly dále podporovány zvýšenou rozpustností CO₂ v mořské vodě při nižších teplotách, což vedlo k dalšímu poklesu CO₂ v atmosféře.

Ledové doby jsou samozřejmě také ovlivněny cykličností slunečního výkonu. V teplých obdobích (karbon, křída) byl sluneční cyklus také přítomen, ale stabilizační účinky vegetace a složení atmosféry umožňovaly pouze mírné ochlazení, nikoli nástup ledové doby.

5.2. Role CO₂ v současném klimatu

Z výše popsaného vyplývá, že střídání ledových a meziledových dob za současných podmínek sluneční aktivity může být výrazně zmírněno pouze nárůstem CO₂. Zvýšení CO₂ vede ke zvýšení minimálních teplot a omezuje tvorbu ledu a sněhu, které zvyšují albedo během období slabší sluneční aktivity. Vyšší obsah CO₂ rovněž umožňuje zesílení klimatizačního efektu vodní páry prostřednictvím zvýšené aktivity rostlin a jejich výparu na pevnině. Aktivita C3 rostlin by se výrazně zvýšila.

Nárůst CO₂ může nastat buď v důsledku lidské činnosti, nebo podobně jako na konci permu, v důsledku silné sopečné činnosti, jako například při vzniku Dekanské plošiny v Indii.

5.3. Klimatizační efekt výparu vody a jeho podmínky

Klimatizační efekt výparu vody může fungovat pouze tehdy, pokud půdy dokáží zadržet dostatečné množství dešťové vody, včetně té z intenzivních srážek, a pokud rostliny rostoucí na těchto plochách následně tuto vodu převedou na vodní páru. Tento proces vyžaduje zdravou půdu s bohatou mikrofauou, která udržuje a podporuje její strukturu. Pro vykonávání této funkce však mikrofauna potřebuje energii, tedy potravu, kterou zajišťuje dostatečné množství organické hmoty produkované rostlinami a živočichy. Pokud tato podmínka není splněna, půda degraduje na to, co dnes často vidíme na polích – pouhou hlínu s minimem života (ELHOTTOVÁ, D. a kol., 2020-2021).

Podobný problém, ale s ještě závažnějšími důsledky, je zabetonování krajiny a odvádění dešťové vody z těchto ploch zpět do velkého vodního cyklu, tedy řekami zpět do moře. Tento proces způsobuje, že plochy kontinentu po směru převládajícího pohybu vzduchu jsou ochuzeny o dešťové srážky, což má negativní vliv na lokální klima a vegetaci.

5.4. Obavy z vyšší koncentrace CO₂ a vliv na dýchání

Pokud jde o obavy z problémů s dýcháním živočichů v důsledku vyšší koncentrace CO₂ (např. 1 %), tyto obavy se mohou ukázat jako přehnané. Nedávno publikovaný článek (Václavík, J., 2024), založený na experimentech a analýzách dýchání lidí, přinesl zajímavý závěr: většina lidí dýchá nesprávně – buď ústy, horní částí plic, místo bránicí, a příliš rychle. Optimální se ukazuje být rytmus 5,5 až 6 dechů za minutu. Překvapivě se zjistilo, že dostatek CO₂ je nezbytný pro efektivní přenos kyslíku z krve do buněk. Pomalejší dýchání, které zvyšuje koncentraci CO₂ v organismu, tento přechod usnadňuje, a výsledkem je efektivnější zásobování buněk kyslíkem při menším počtu dechů a menším množství volných radikálů v organismu. Tím organismus funguje lépe a je lépe zásobován kyslíkem.

5.5. Nutnost otevřené diskuze o klimatu

Z analýz založených na omezeném, i když rozsáhlém výběru příkladů vyplývá, že každý má pravděpodobně částečně pravdu, pokud jde o fungování klimatického systému, včetně těch, kteří zastávají opačné názory. Je nezbytné vést otevřenou diskuzi, abychom si jako lidstvo ujasnili, co chceme a jak toho dosáhnout. Klíčové je pochopit tyto procesy prostřednictvím vzdělání. Diktatura nepřinese potřebná řešení a války situaci jen zhorší. I kdyby války vedly k likvidaci lidstva, nezaručí to, že zvýšení obsahu CO₂ v atmosféře nebude nezbytné pro budoucí fungování ekosystémů. Pokud vulkanická činnost již není dostatečná pro recyklaci CO₂ kvůli postupnému ochlazování planety, musíme uvažovat, zda zvýšený obsah CO₂ oproti dnešku není nutný pro dlouhodobou stabilitu. Cílem by mělo být, aby chování lidstva bylo užitečné pro veškerý život na Zemi – otázkou zůstává, jak by takové chování mělo vypadat.

Poděkování

Závěrem bych chtěl poděkovat své manželce Marii za stylistické úpravy textu a za rozsáhlé diskuse, i matematické, které jsme kolem těchto věcí mnohokrát vedli.

Literatura

BUDÍK, L., 2018. Hydrological and meteorological data and modifications of statistical distributions - heuristic approach. In 17th Conference on Applied Mathematics, APLIMAT 2018 Proceedings, pages 165–172, Bratislava. STU. ISBN 978-80-227-4765-3.

BUDÍK, L., 2019. Progress in heuristic approach to stochastic modelling of hydrological and meteorological. In 18th Conference on Applied Mathematics, APLIMAT 2019 Proceedings, pages 109–120, Bratislava. STU. ISBN 978-1-5108-8214-0.

BUDÍK, L., BUDÍKOVÁ, M., 2020. Comparison of various methods of parameters estimation of mLN5 distribution using simulation study. In 19th Conference on Applied Mathematics, APLIMAT 2020 Proceedings, pages 170-179. Bratislava. STU. ISBN 978-80-227-4983-1.

BUDÍKOVÁ, M., HOLUB, J., BUDÍK, L., PŘIBYLOVÁ, L., HOROVÁ, I. Five-parameter log-normal distribution and its modification. IDŐJÁRÁS - Quarterly Journal of the HungaroMet Hungarian Meteorological Service. In press.

SHERAMY, T., 2024: Využijte transformační sílu správného dýchání. Dostupné online z: <https://www.epochtimes.cz/2024/07/29/vyuzijte-transformacni-silu-spravneho-dychani/>.

ELHOTTOVÁ, D., CHROŇÁKOVÁ, A., ŠIMEK, M. 2020-21. Živá půda 1–6, časopis Živa, ISSN 0044-4812.

JANOÚŠ, D., 2010. Vliv oxidu uhličitého na růst rostlin. Dostupné online z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/medicina-a-prirodoveda/834-vliv-oxidu-uhliciteho-v-ovzdusi-na-rust-rostlin>.

VÁCLAVÍK, J., 2024. K čemu vedou špatné dechové návyky a jak to změnit. Dostupné online z: <https://doplne.cz/blogs/clanky/k-cemu-vedou-spatne-dechove-navyky-a-jak-to-zmenit>.

LIU, L., NINGGUO, Z., YONGXIANG, Y., ZHAOZHI, Z., HUAIYING, Y., 2024. Soil carbon and nitrogen cycles driven by iron redox: A review, *Science of The Total Environment*, Vol. **918**, 170660, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170660>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972400799X>)

Příloha

Uvedené jsou tyto grafy:

křivky překročení průměrných denních teplot,

graf závislosti průměrných ročních odtoků na ročních srážkách,

průběhy časových řad minimálních měsíčních teplot

průběhy časových řad maximálních měsíčních teplot

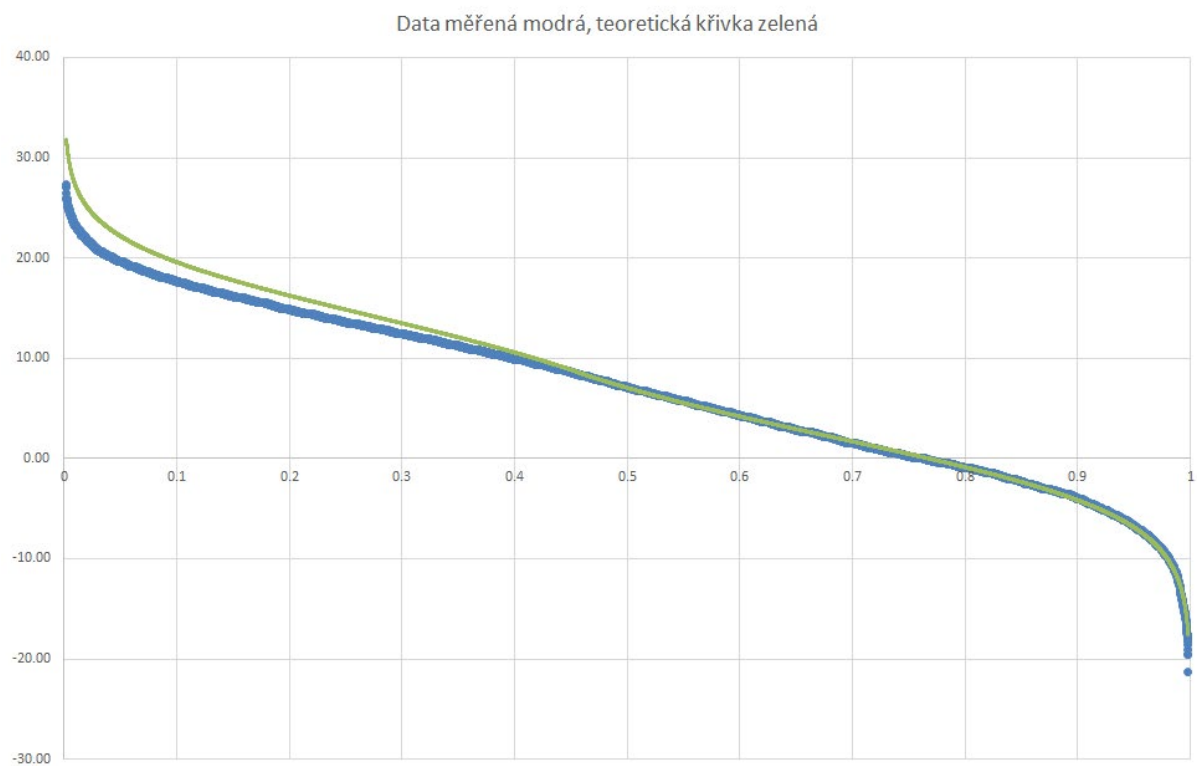
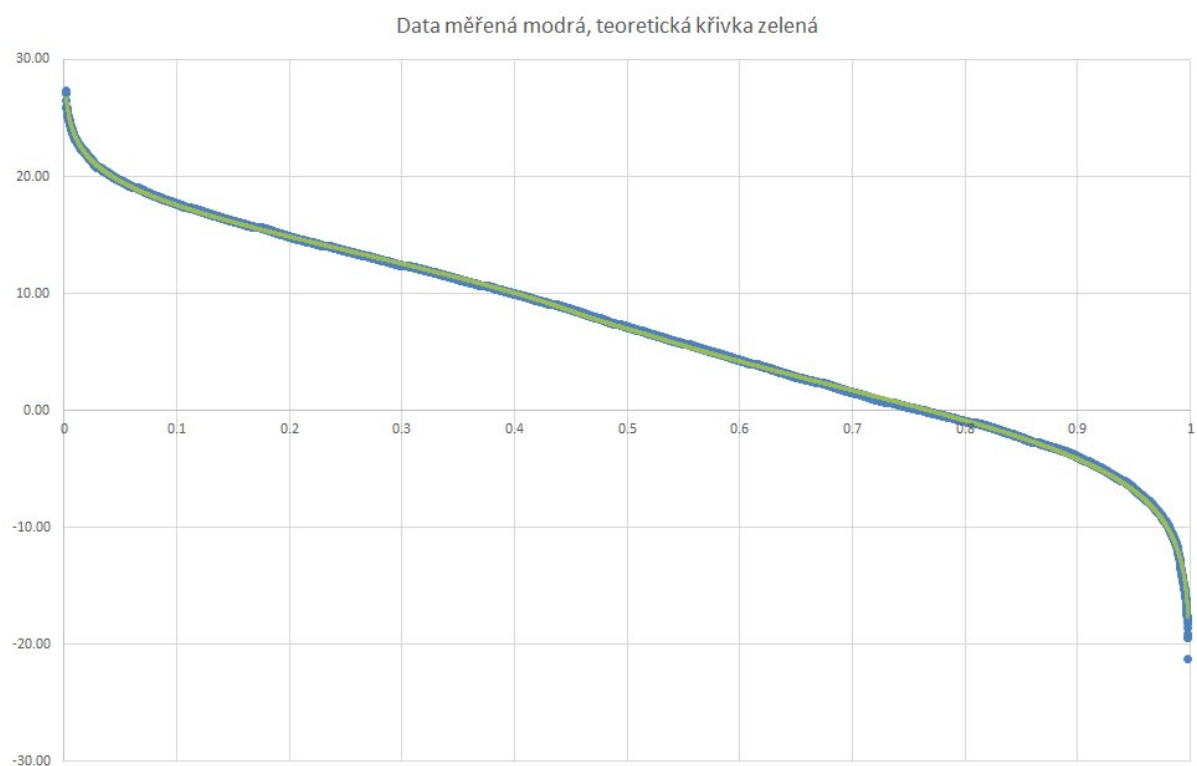
průběhy časových řad průměrných měsíčních teplot

průběhy časových řad rozdílů maximálních a minimálních měsíčních teplot

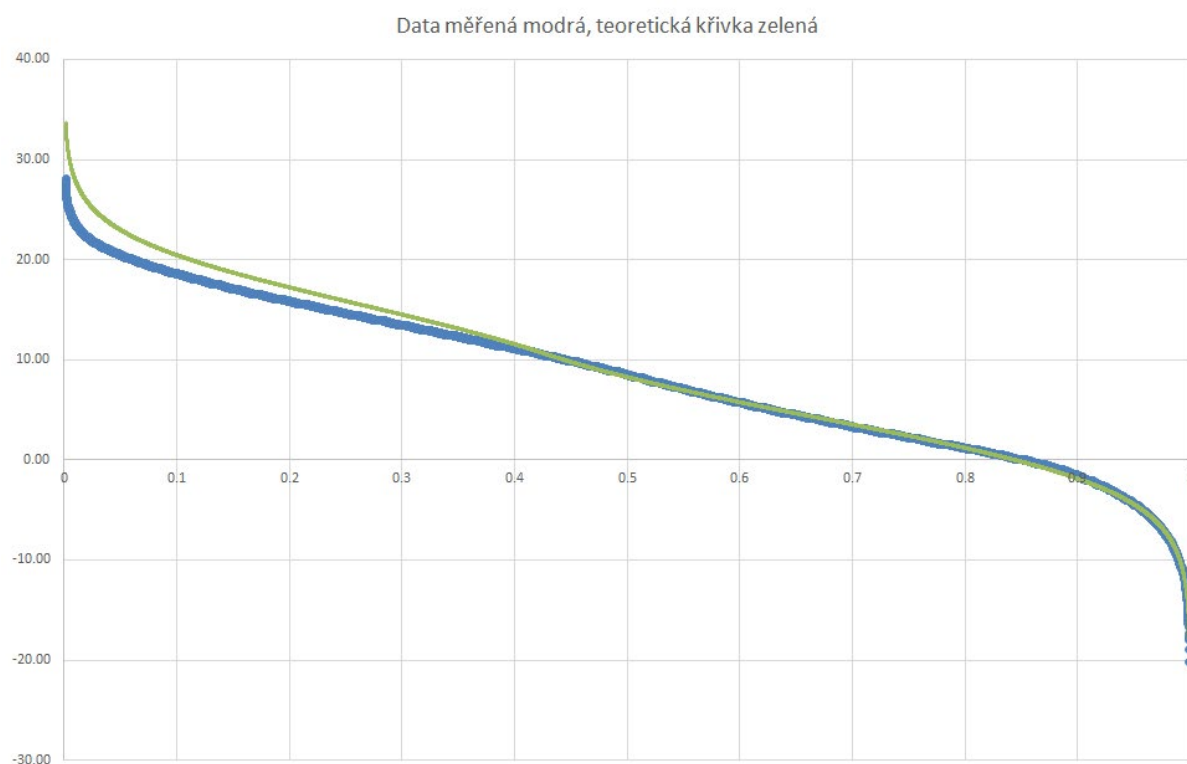
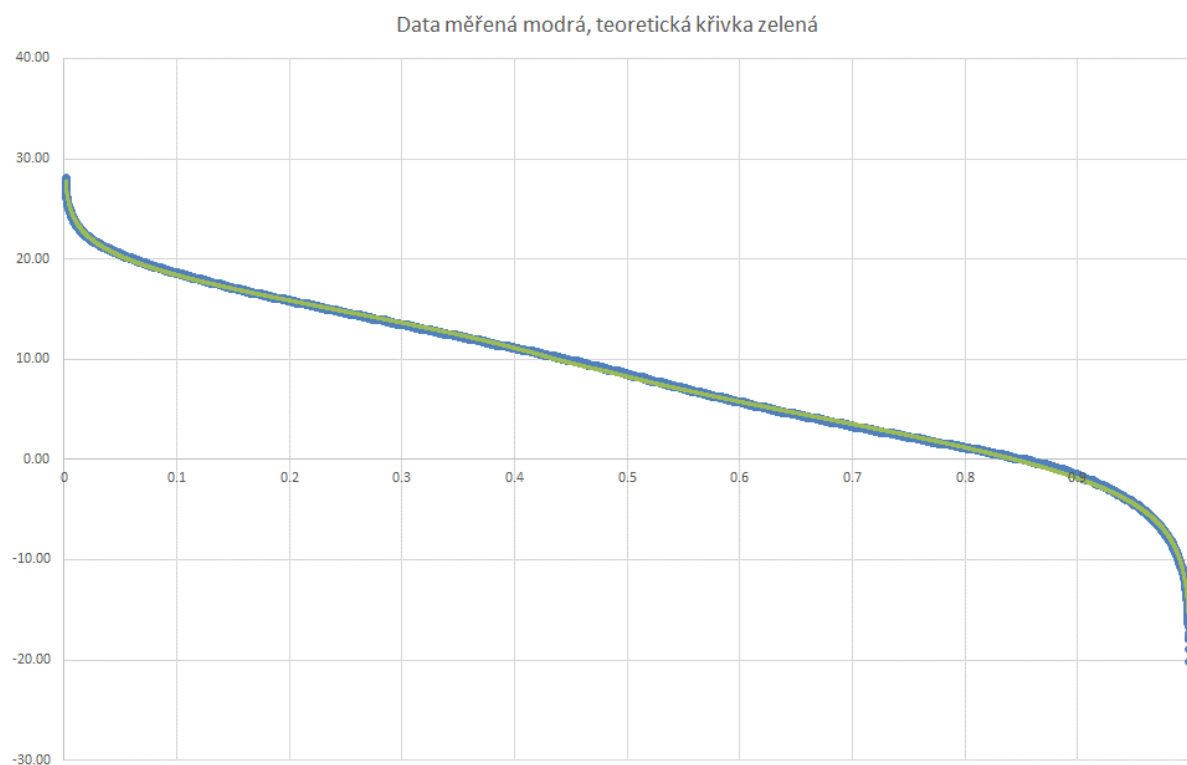
průběh časových řad hodnot úměrných vyzářené energii

Poznámka: V některých grafech průběhů časových řad se objevují nulové hodnoty v podobě čáry na ose x, které do grafu nepatří a z časových důvodů se je nepodařilo odstranit

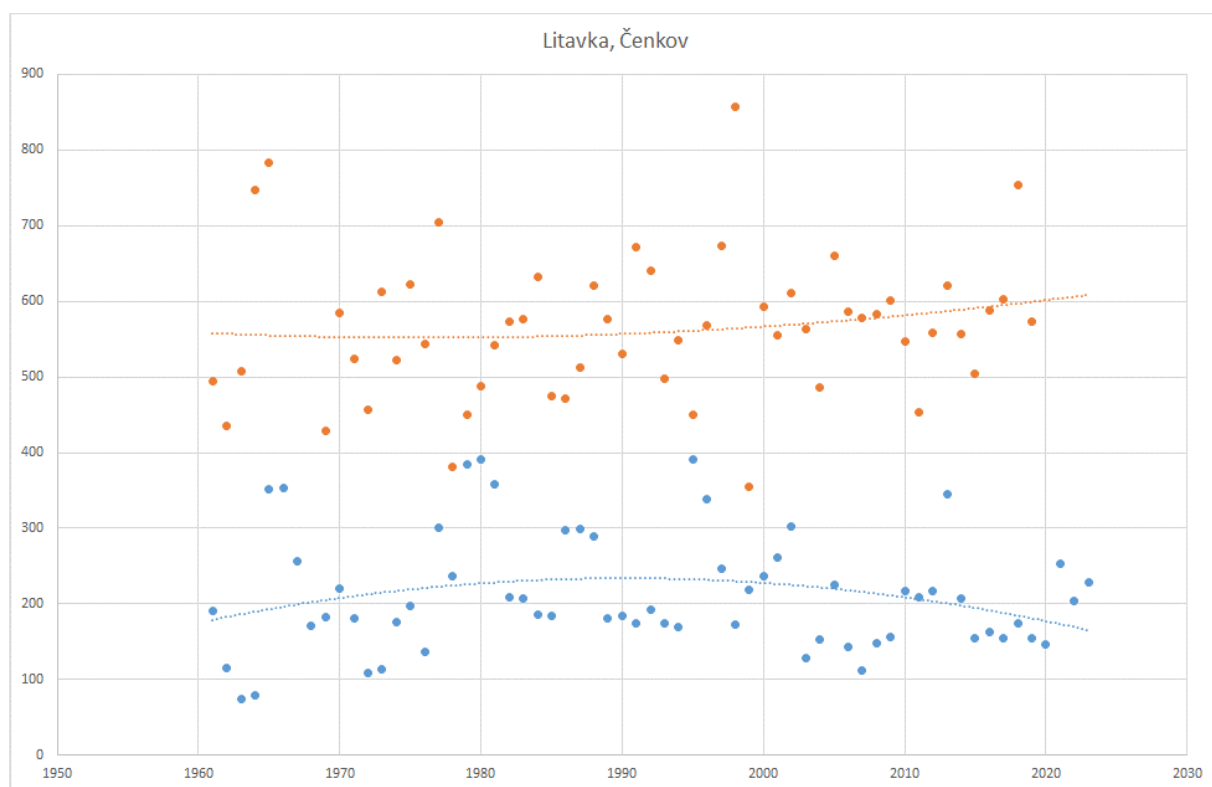
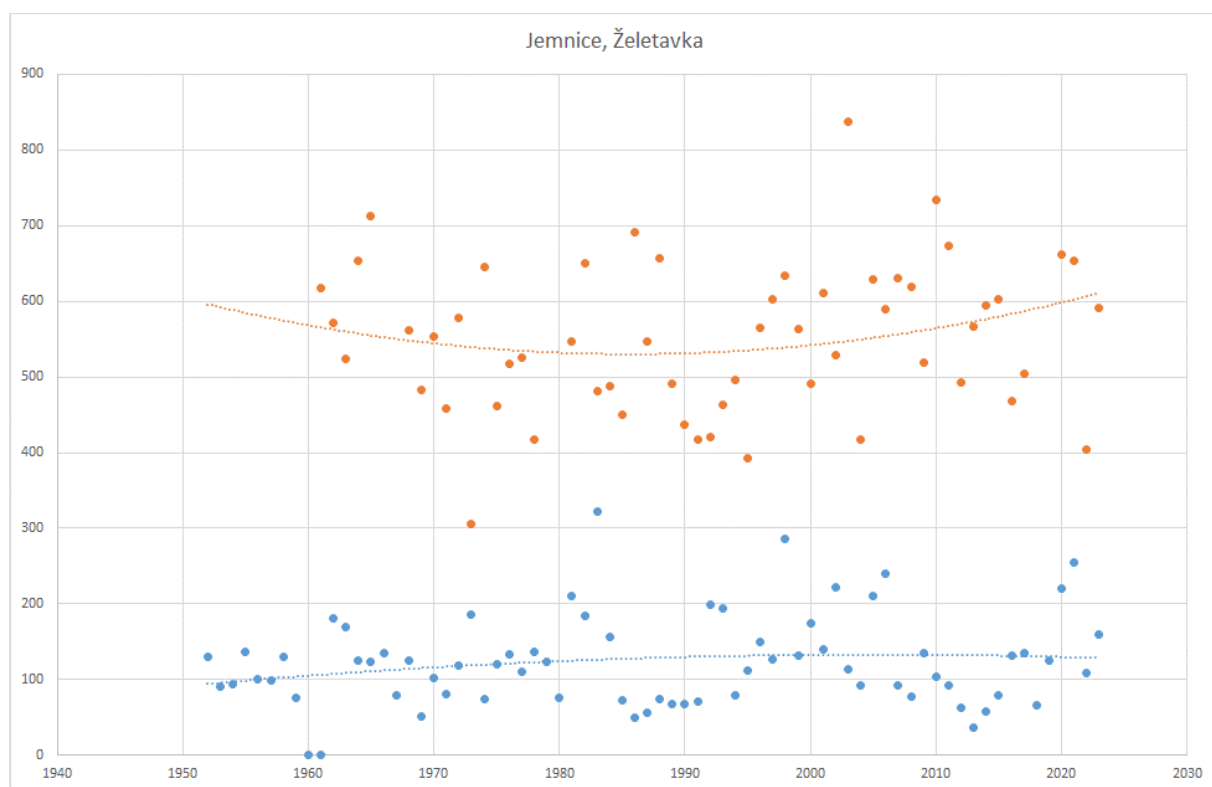
Stanice Bílá Konečná, osa x pravděpodobnosti překročení, osa y průměrná denní teplota. Parametr c použit. Na obrázku dole c = 0.



Stanice Karlovy Vary, osa x pravděpodobnosti překročení, osa y průměrná denní teplota. Parametr c použit. Na obrázku dole c = 0.



Příklady ročních srážkových úhrnů (oranžová) a ročních odtokových výšek (modrá)



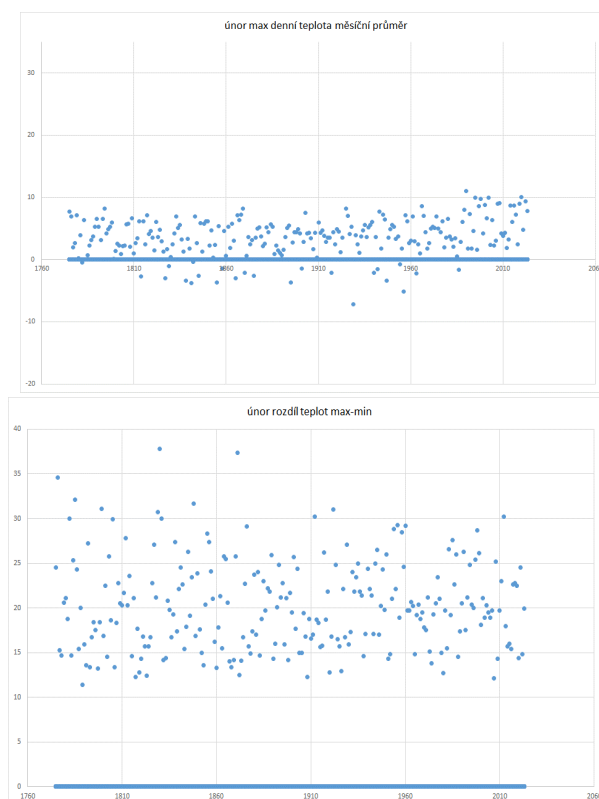
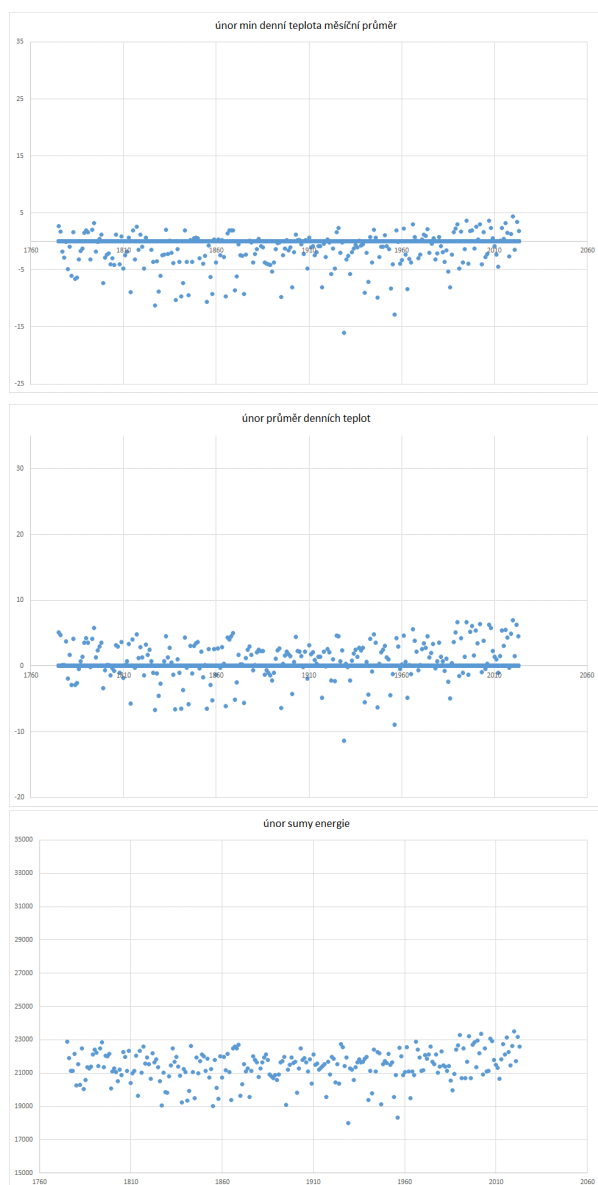
Klimatologická stanice Praha, Klementinum, 1775 - 2023

U všech grafů je na ose x čas v rocích, na ose y hodnoty zmíněné v nadpisu obrázku.



Leden: Minimální i maximální průměrné měsíční teploty vykazují růst, přičemž data naznačují, že minimální teploty rostou o něco rychleji. Tento jev by mohl souviset s účinky CO₂, jak jsou často diskutovány. U všech tří sledovaných teplotních údajů dochází ke snižování rozptylu, zvláště výrazně v poslední době. Současně se také zmenšuje rozdíl mezi maximálními a minimálními průměrnými teplotami za měsíc. Z dat nevyplývá, že by do přibližně roku 1970, i přes pomalý růst teplot, výrazněji narůstalo množství vyzařované energie. Později však tento růst nabírá výrazně prudší charakter. V celém sledovaném období se také snižuje rozptyl jak maximálních, tak minimálních teplot.

Z teorie o zadržování energie prostřednictvím CO₂ a přísunu energie z vnějšku planety vyplývá, že po roce 1970 je nárůst teplot způsoben nejen zadržováním energie, ale také jejím zvýšeným přísunem – pravděpodobně díky postupně čistší atmosféře, která umožňuje větší výměnu energie. Lze tedy předpokládat, že projevy oteplování jsou zřejmě kombinované – zahrnují účinky CO₂, silnější sluneční záření, a možná také vliv čistší atmosféry.

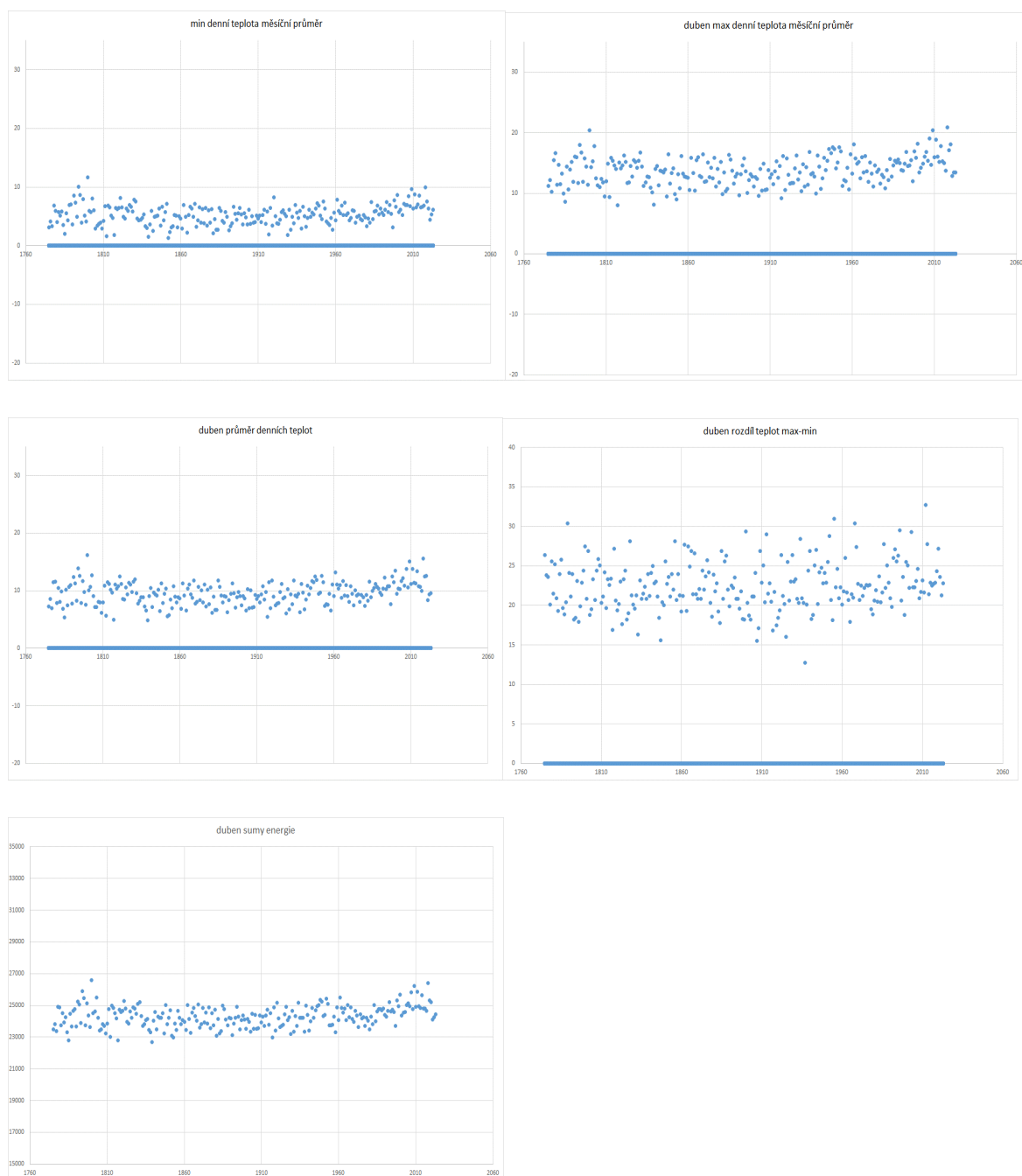


Únor: Situace je podobná jako v lednu, avšak s tím rozdílem, že při klesající teplotě se výrazněji projevují období s velmi nízkými teplotami, které jsou horší než v lednu. To naznačuje, že se vzrůstem teplot v únoru výrazně snižuje riziko extrémních mrazů.



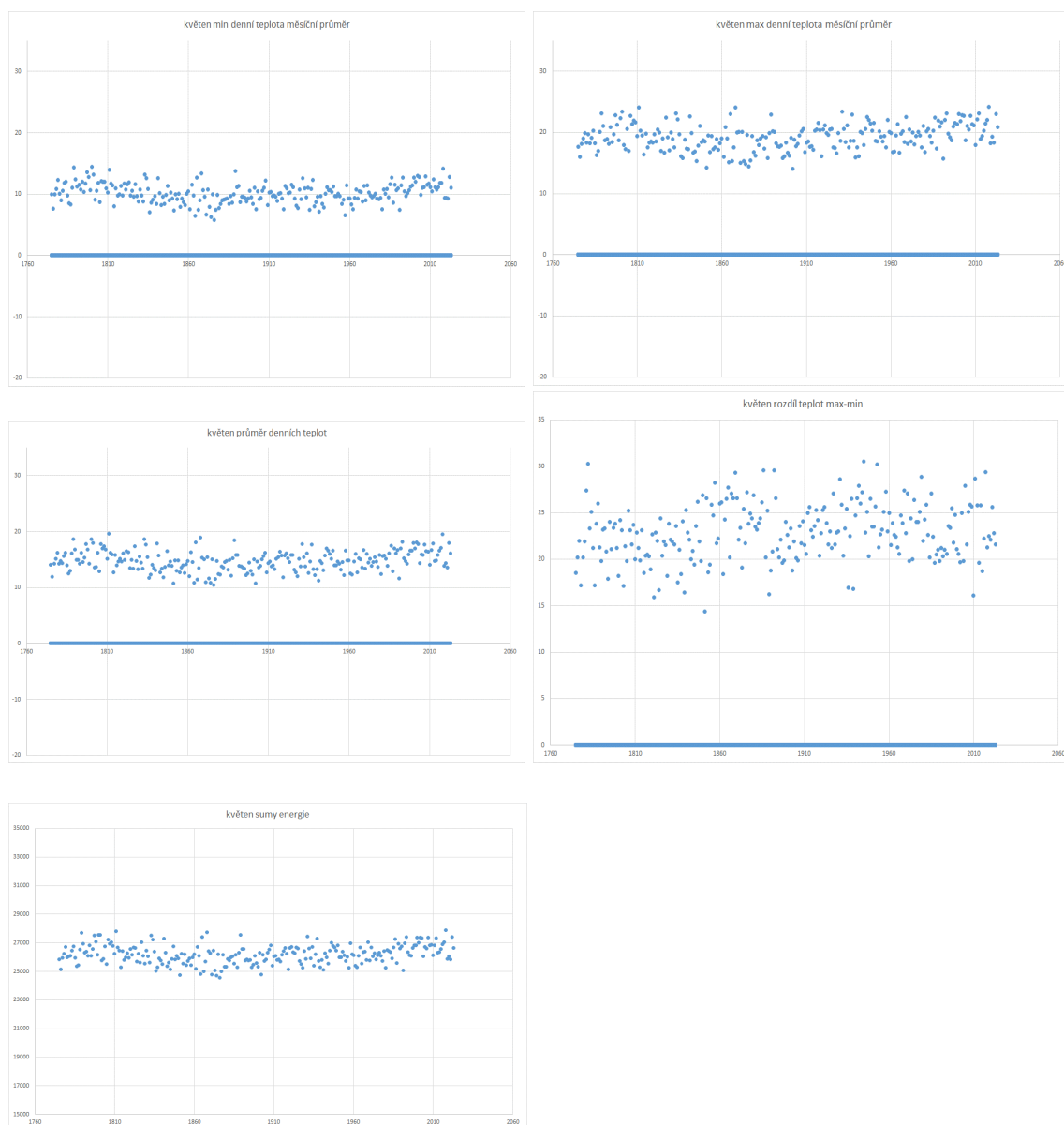
Březen: V tomto měsíci je situace poněkud odlišná. Přibližně po roce 1975 začínají teploty stoupat nad úroveň teplého období na konci 18. století. Rozptýl dat se výrazně nemění, což naznačuje, že vyzařování energie zůstává relativně konstantní. Zdá se, že hlavní roli v oteplování (minimálně ke konci období) hraje zvýšená dodávka energie.

Logicky, se snižováním rozsahu sněhové pokrývky při oteplování ledna a února, se snižuje i albedo, což musí ovlivnit teploty i vyzařovanou energii.

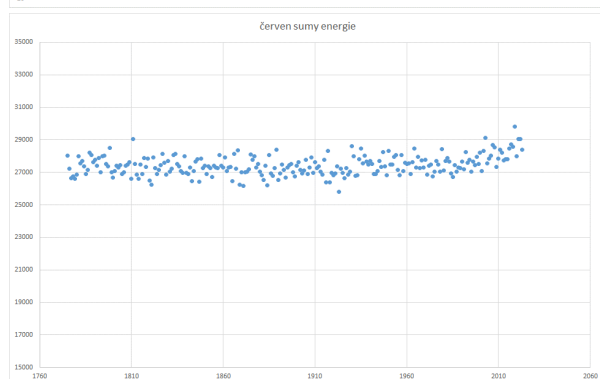
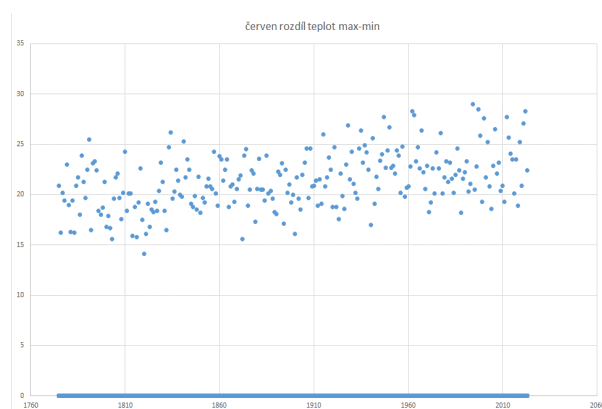
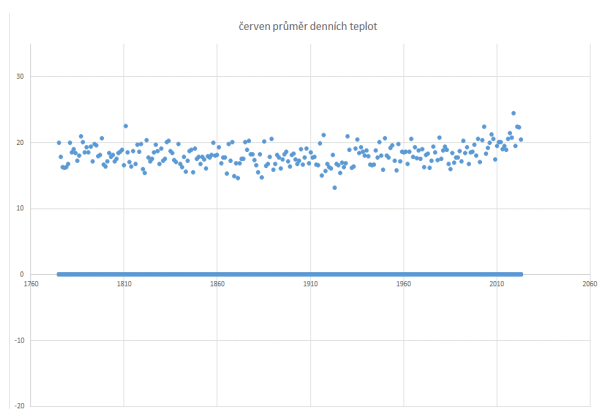
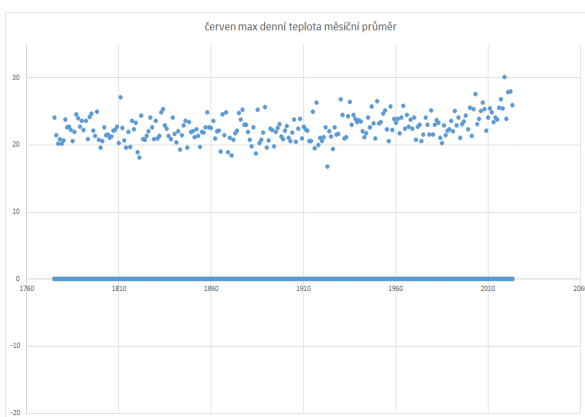
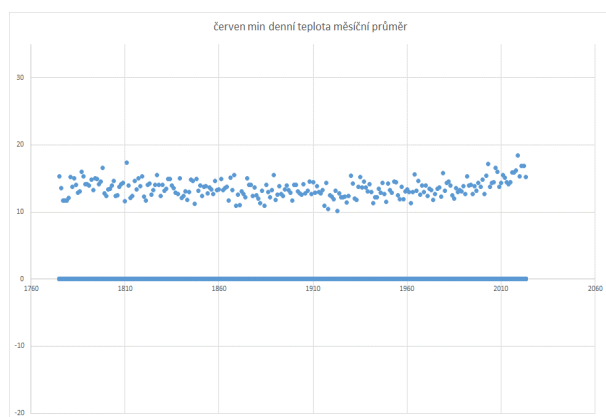


Duben: Situace v dubnu se opět poněkud liší od března. Teploty se od 70. let 20. století zvyšují a jejich rozptyl se snižuje. Současně roste rozdíl mezi maximálními a minimálními teplotami, což naznačuje zvýšený energetický příjem. I když roli může hrát rostoucí zastavěná plocha, podobné tendence jsou ale pozorovatelné i u stanic, kde zastavěná plocha není tak významná. To spíše naznačuje nárůst dodávané energie, přičemž mohou hrát roli i holé plochy.

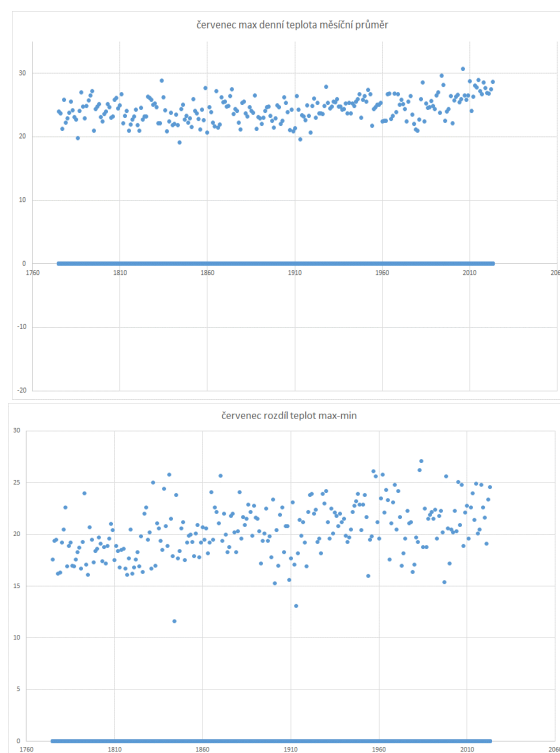
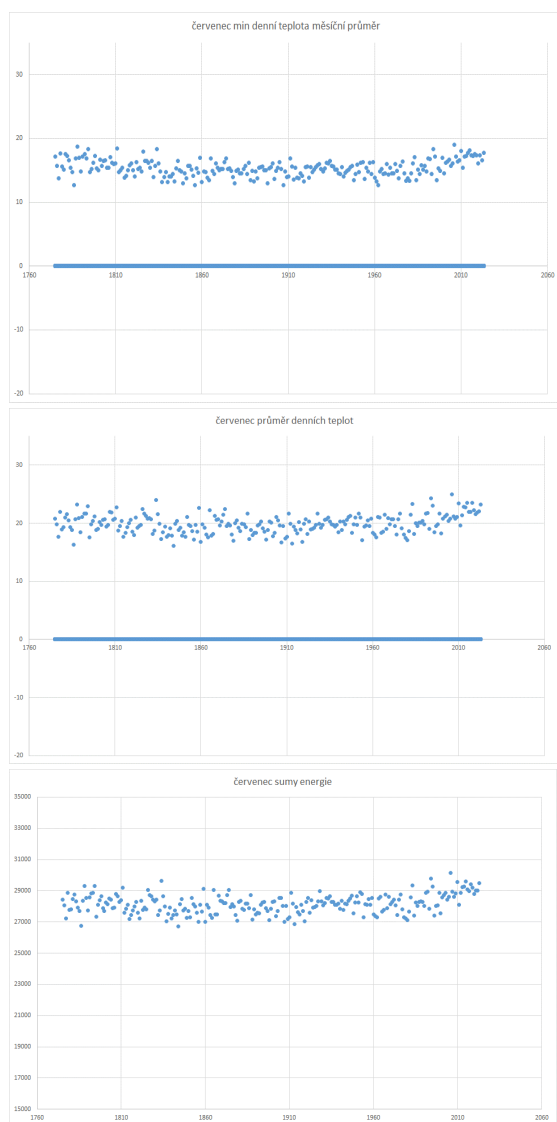
Při srovnání s koncem 18. století je průběh konce grafů podobný, jen s menším rozptylem. Ten může způsobovat jak CO_2 , tak i zjevně menší ochlazení povrchu v průběhu zimy – viz grafy předchozích měsíců.



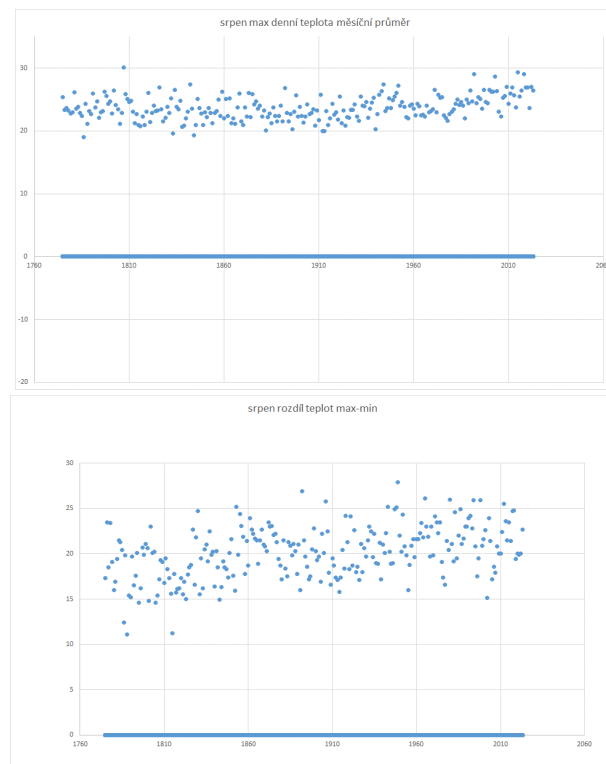
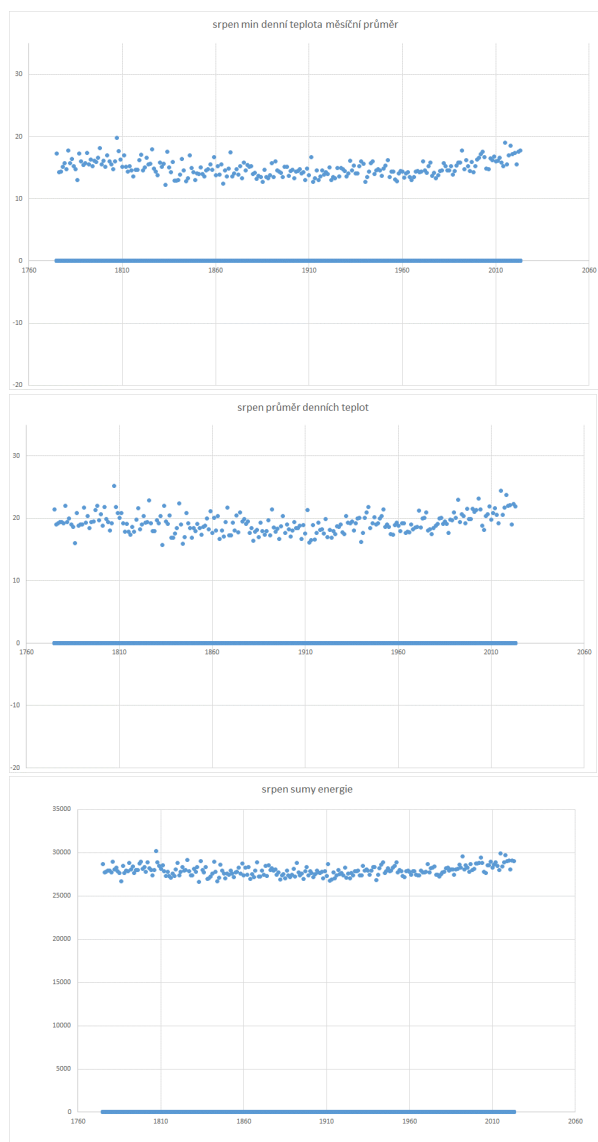
Květen: Teploty zde jasně rostou od poloviny 19. století. Od té doby také skokově narůstá rozdíl mezi minimální a maximální teplotou měsíce (viz též příklad Miláno). Tento nárůst energetického rozdílu mezi minimy a maximy lze přičítat slunečnímu záření. Pokud by byl hlavním vlivem CO_2 , energetický rozdíl by spíše klesal, nežli rostl.



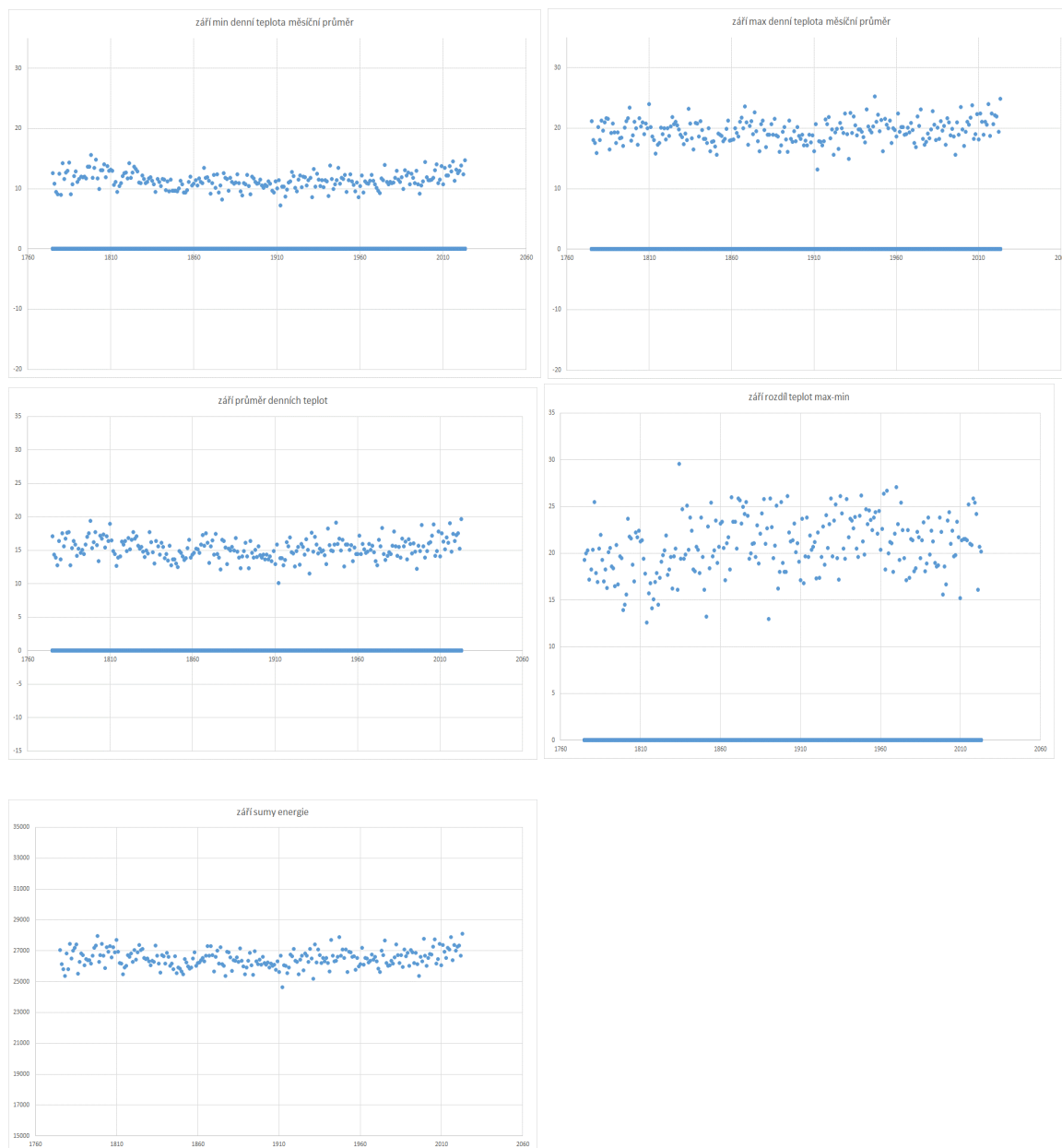
Červen: V tomto měsíci jednoznačně převažuje dodávka energie. Systematicky narůstá rozdíl mezi maximálními a minimálními teplotami s výjimkou 50., 60. a 70. let, kdy byla atmosféra silně znečištěna prachem a SO_2 . V 80. letech Slunce často mizelo při západu ještě vysoko nad obzorem kvůli znečištěné atmosféře.



Červenec: Situace je podobná jako v červnu. Pouze, zřejmě vzhledem k již klesající výšce slunce nad obzorem, je méně výrazný nárůst teplot ke konci pozorovaného období.

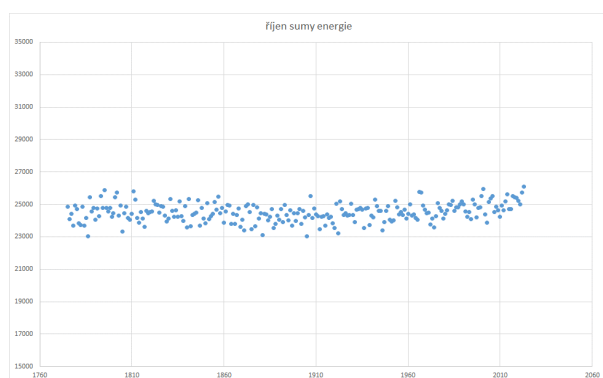
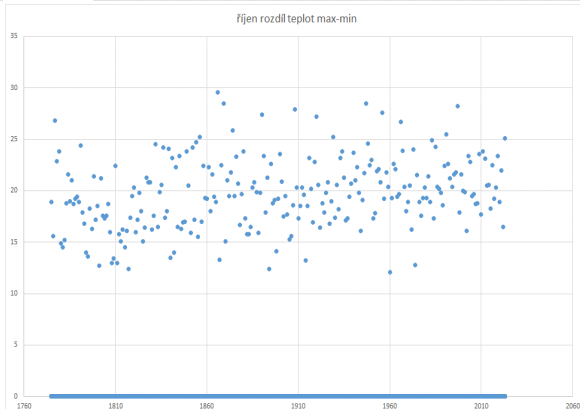
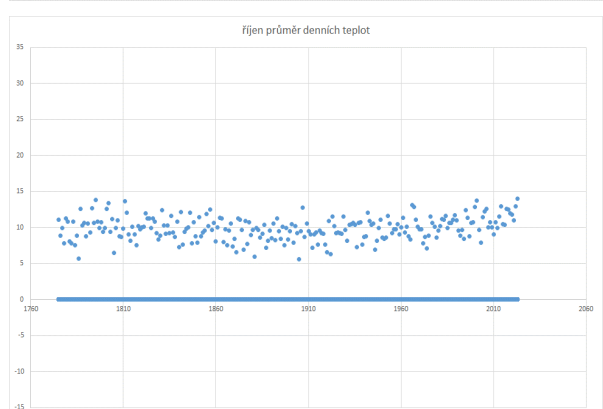
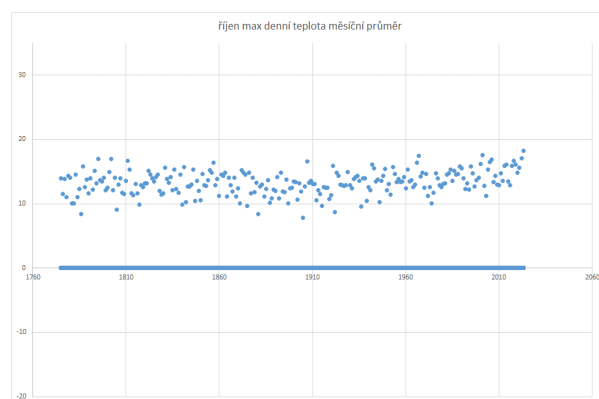
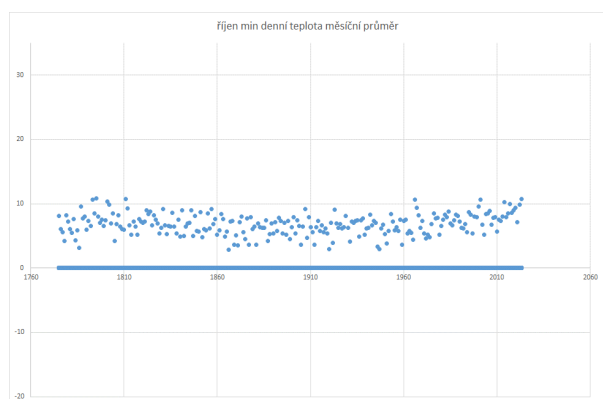


Srpen: Situace je podobná jako v červnu a červenci s tím rozdílem, že teploty ani vyzařovaná energie již nerostou tak rychle.

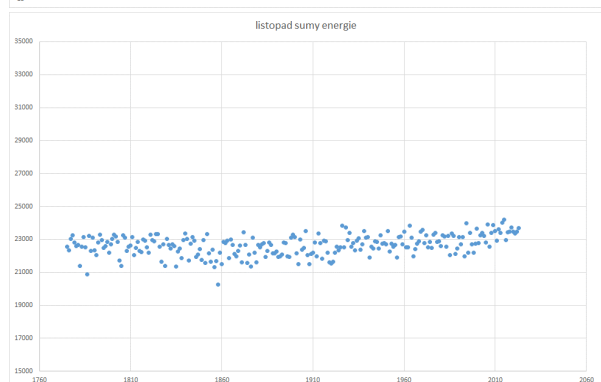
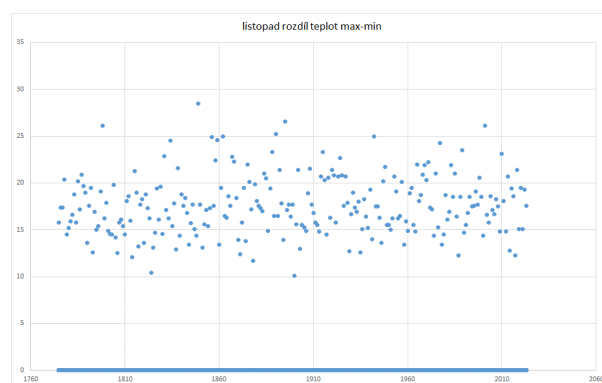
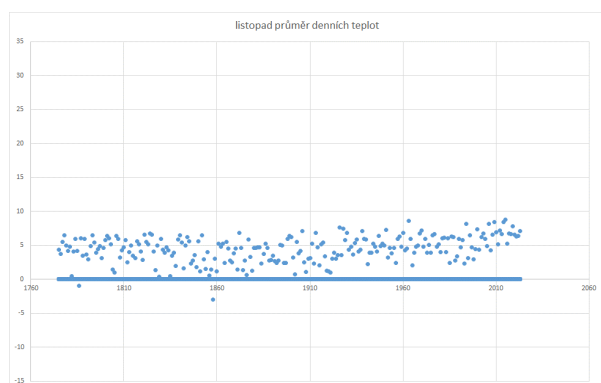
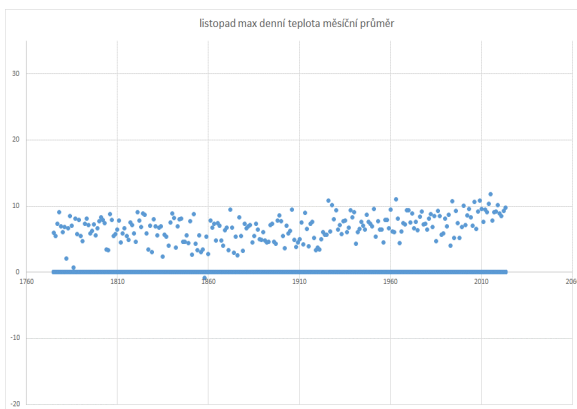
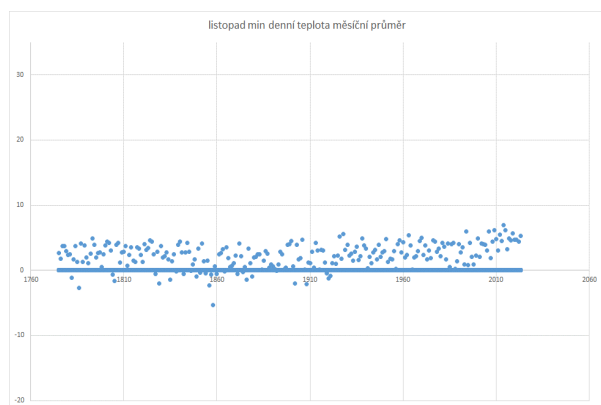


Září: V tomto měsíci se již průběhy sledovaných veličin začínají odlišovat od průběhu v předešlých letních měsících. Po předchozím poklesu teplotní charakteristiky od poloviny 19. století opět narůstají, a to výrazněji od začátku odprašování a odsiřování atmosféry v 80. letech 20. století. Tento nárůst výměny energie mezi místem pozorování a okolím i Zemí může být spojen s postupným vyčišťováním atmosféry. Možný zvýšený vliv CO_2 již může být pozorovatelný na poklesu rozdílů maxim a minim ke konci grafu a zároveň mírnější vzestup vyzářených energií.

Podobně jako v předchozích měsících je zde zaznamenán rychlý nárůst rozdílu mezi teplotními minimy a maximy.



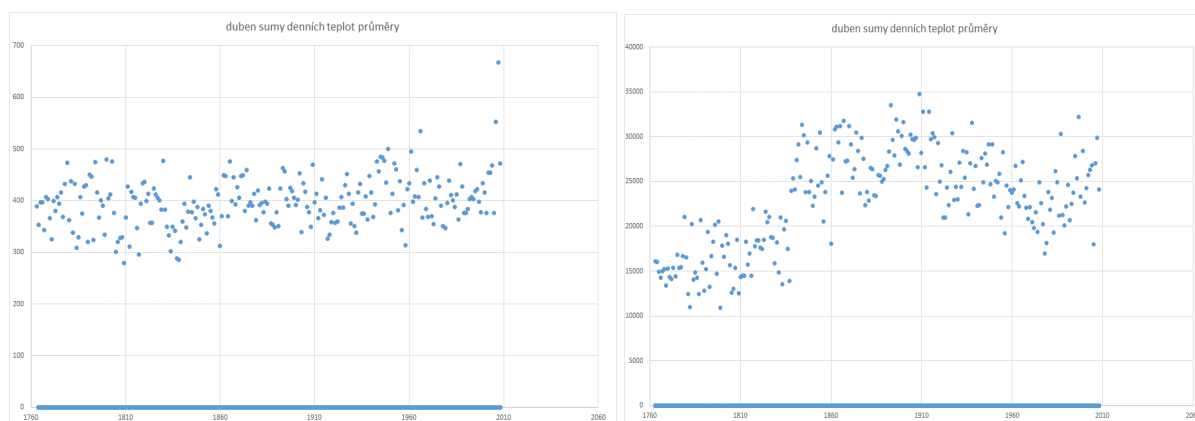
Říjen: Průběhy sledovaných veličin jsou podobné jako v září, včetně nárůstu rozdílu mezi maximálními a minimálními teplotami. Nárůst teplot dosahuje úrovně konce 19. století. Pokud zde CO₂ hraje nějakou roli, rozhodně nepřevládá.



Listopad: Stejně jako v jiných měsících je zde pozorován výrazný nárůst maximálních a minimálních teplot, což vede i k nárůstu průměrných teplot, nikoli však k rozdílům mezi minimem a maximem. Výměna energie také roste, i když již existují slabé tendence ke snižování rozdílu mezi nejvyššími a nejnižšími teplotami měsíce. To spíše nasvědčuje vlivu zvýšeného CO_2 než jen výrazněji zvýšené dodávky energie ze Slunce.



Prosinec: Stejně jako v jiných měsících je zde pozorován výrazný nárůst maximálních, minimálních a průměrných teplot, nikoli však rozdílů mezi minimálními a maximálními teplotami, které se zmenšují. Výměna energie roste méně, což naznačuje možnou účinnost zadržování většího množství tepelného záření atmosférou spojeného s nárůstem koncentrací CO₂.



Miláno: Data obsahují relativně mnoho chybějících hodnot, přičemž průměrná teplota je počítána na základě měření v 7 a 14 hodin. Prudký nárůst teplot v současnosti lze vysvětlit pouze změnou převažujícího proudění vzduchu, což je výrazné i ve střední Evropě. Západní a severozápadní proudění téměř vymizelo, zatímco převažuje jihovýchodní až jihozápadní proudění. To by v Miláně mohlo znamenat výraznější proudění ze severní Afriky, což by vedlo k nárůstu teplot a sucha.

Prudká změna mezi maximální a minimální teplotou po roce 1830 je pozorovatelná, i když slabší, také v Klementinu. Proto se nezdá, že by se jednalo o chybu. V této době také končil pokles teplot po maximu na konci 18. století a začalo postupné oteplování. Z obou stanic je rovněž patrné, že při oteplování je vyšší pravděpodobnost poškození plodin jarními mrazy – je větší rozdíl mezi minimální a maximální teplotou v měsíci, než v době ochlazování. Kvůli celkově vyšším teplotám je také zřejmě dřívější nástup vegetace, což pravděpodobnost poškození ještě zvyšuje.

Rizika vod 40

Water risks 40

Jan Čermák

Asociace pro Asociace pro vodu v krajině České republiky, z.s.

Abstrakt

V současné době není ve vodním hospodářství ČR aplikován holistický a multioborový přístup v analýze budoucích rizik. Nejsou zpracovávány scénáře ani celostní strategie ochrany vodních zdrojů ve střednědobém horizontu. Není využíván v EU obvyklý foresight. Vytvoření předpokladů pro nápravu těchto nedostatků je cílem připravovaného návrhu projektu Rizika vod 40. Projekt bude zejména vycházet z analýzy zahraničních poznatků a přístupů. Dalším zdrojem informací budou cílené polostrukturované dotazníky, zpracované respondenty z různých souvisejících oborů. Významné budou také poznatky z českých i zahraničních výzkumných a inovačních projektů. Projekt Rizika vod 40 bude organicky navazovat na předchozí projekt, zpracovaný pro úřad vlády ČR pod názvem FUTURE PRO. Projekt Rizika vod 40 má ambici vytvořit předpoklady pro holistický přístup v managementu ochrany půdy a vody, který bude zahrnovat integrované řízení povodí, technologické inovace, udržitelné zemědělské praktiky, politickou a legislativní podporu i relevantní opatření v oblasti vzdělávání a osvěty. Tento přístup bude vyžadovat spolupráci mezi výzkumníky s inovátory, zemědělci, vládou a komunitami. Iniciátorem návrhu projektu Rizika vod 40 je Asociace pro vodu v krajině České republiky, z.s.

Klíčová slova:

Abstracts

At present, a holistic and multidisciplinary approach in the analysis of future risks is not applied in the water management of the Czech Republic. There are no scenarios or holistic strategies for the protection of water resources in the medium term. Foresight, which is common in the EU, is not used. Creating the prerequisites to remedy these shortcomings is the aim of the forthcoming Water Risks 40 project proposal. In particular, the project will be based on an analysis of foreign knowledge and approaches. Another source of information will be targeted semi-structured questionnaires, prepared by respondents from various related fields. Findings from research and innovation projects will also be relevant. The project will organically build on a previous project developed for the Government Office of the Czech Republic called FUTURE PRO. The Water Risks 40 project has the ambition to create the preconditions for a holistic approach in soil and water conservation management, which will include integrated watershed management, technological innovation, sustainable agricultural practices, policy and legislative support as well as relevant education and awareness raising measures. This approach will require collaboration between researchers with innovators, farmers, government and communities. The initiator of the project proposal Water risks 40 is the Association for Water in the Landscape of the Czech Republic, registered society.

Keywords:

1. Úvod

Počátkem druhého tisíciletí byla péče o vodní zdroje v České republice podle tehdejších kritérií na vysoké úrovni. Byly zavedeny důležité právní předpisy, jako je zákon o vodách a zákon o vodovodech a kanalizacích, které významně přispěly k ochraně a správě vodních zdrojů. Kvalita povrchových a podzemních vod se zlepšovala díky eliminaci velmi silně znečištěných vodních toků a nádrží. Byla také zavedena opatření ke zmírnění škodlivých účinků povodní, včetně preventivních protipovodňových opatření a stanovování záplavových území. Systematický posun v kvalitě stavu útvarů povrchové vody byl zahájen v prosinci 2003, kdy byla do české legislativy začleněna Směrnice 2000/60/ES, známá jako

Rámcová směrnice o vodě, stanovující rámec pro ochranu a zlepšování kvality vody v Evropské unii. Jaký byl stav ve VH před čtvrt stoletím a čeho jsme dosáhli, ilustruje zpráva, kterou pod názvem - OSN ocenila český pokrok v hospodaření s vodou, zveřejnil 18. 7. 2004 Vzdělávací a informační portál VODARENSTVI.cz. Výňatek textu sdělení: *Za posledních 20 let došlo v České republice k enormnímu zlepšení ochrany vod, hospodaření s vodou v obcích a městech i ke snížení znečištění řek, zaznělo na Politickém fóru na vysoké úrovni pro udržitelný rozvoj (HLPF) v New Yorku. Česká republika byla s Jordánskem a Kambodžou mezi třemi zeměmi, které OSN ocenila za významný pokrok v přístupu k hospodaření s vodou. Češi navíc v Americe získali „vodního Oscara“. „Je to pro Českou republiku úspěch. Opravdu mě těší, že jsme mezi třemi státy na světě, které získaly uznání za tak velký pokrok.....“ říká ministr životního prostředí Petr Hladík.... OSN podle něj také ocenila, že si obce uvědomují význam vody a že máme dobře nastavenou legislativu, která je kontinuální, nepodléhá politickým tlakům. „OSN si dále povšimla toho, že přestože cena vody pomalu stoupá, podařilo se nám udržet její dostupnost pro spotřebitele,“ pokračuje ministr. Česko také sdílí zkušenosti z vodního hospodářství se zeměmi, jako jsou Etiopie, Irák nebo Lisabon. Projekty probíhají prostřednictvím OSN i EU. Výsledkem aktivit, realizovaných v období 2000 – 2024 je současné pojetí ochrany vodních zdrojů v České republice, jehož hlavním cílem je zajistit udržitelné hospodaření s vodními zdroji a ochranu jakosti a množství povrchových i podzemních vod. Nástrojem jsou Ochranná pásma vodních zdrojů, stanovená podle § 30 vodního zákona, mající za cíl chránit vydatnost a jakost vodních zdrojů před znečištěním. Obecně je ochrana vodních zdrojů v ČR řízena komplexním souborem legislativních opatření, která stanovuje rámec pro činnost v oblasti vodní politiky. Ministerstva životního prostředí a zemědělství každoročně předkládají vládě zprávu o stavu vodního hospodářství, která hodnotí jakost a množství vod. V současné době se různá výzkumná pracoviště VaVaI zabývají řešením řady projektů, zaměřených na různé aktuální dílčí problémy VH. Základním nástrojem podpory rozhodovací činnosti v oblasti vodního hospodářství je databáze všech ochranných pásem vodních zdrojů v ČR, kterou spravuje Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.M., v.v.i. Průběžně narůstající potřeba informatiky v oblasti s vodou bezprostředně souvisejících vědních oborů je náplní také Výzkumného ústavu monitoringu a ochrany půdy, v.v.i.*

Asociace pro vodu v krajině České republiky, z.s. (AVK ČR) dlouhodobě považuje tento stav za nedostatečný, není brán zřetel na mnohé další faktory, které mohou být budoucími riziky udržitelnosti a odolnosti vodních zdrojů v ČR. Důsledkem je neexistence holisticky pojedené strategie VH ČR. AVK ČR považuje za nezbytné systematické uplatnění celostního a multioborového přístupu ve vodním hospodářství ČR, protože umožní zabezpečit

- a) Komplexnost vodních systémů: Vodní zdroje jsou ovlivňovány mnoha faktory, včetně klimatických změn, urbanizace, zemědělství a průmyslu. Celostní přístup umožňuje zohlednit všechny tyto faktory a jejich vzájemné vztahy.
- b) Udržitelnost: Multioborový přístup zahrnuje spolupráci odborníků z různých oblastí, jako je hydrologie, ekologie, ekonomie a sociologie. To vede k udržitelnějším a vyváženějším řešením, která zohledňují ekologické, ekonomické a sociální aspekty.
- c) Předvídání budoucích výzev: Metoda foresight umožňuje identifikovat a analyzovat možné budoucí scénáře a výzvy. To pomáhá při plánování a přijímání preventivních opatření, která mohou minimalizovat negativní dopady na vodní zdroje.
- d) Adaptace na změny: Celostní přístup a využití metody foresight umožňuje také lépe se přizpůsobit jak změna klimatu a tak i řadě dalších vlivů – trendů/megatrendů.
- e) Efektivní využití zdrojů: Multioborový přístup podporuje efektivní využití finančních, lidských a přírodních zdrojů, což vede k lepším výsledkům a vyšší efektivitě.

AVK ČR se dlouhodobě snaží o prosazování výše uvedeného celostního a multioborového vnímání vodních zdrojů ve VH ČR. Tento přístup ale doposud nenacházel na institucionální úrovni výraznější podporu. V poslední době se ale vnímání potřeby nových přístupů významně mění, změna je důsledkem projektu FUTURE PRO, který byl v roce 2021 zpracován pro Radu vlády pro výzkum vývoj a inovace (RVVI). Tento projekt uvádí jako možné návazné kroky také využití metody foresight pro identifikaci možných budoucích hrozeb v různých národohospodářských oblastech a následné zpracování scénářů, dopadových analýz a strategií. Na základě výše uvedených doporučení projektu FUTURE PRO připravuje AVK ČR projekt Rizika vod 40. Nástin okolností a některých možných trendů tohoto projektu je předmětem následujícího textu.

Východiska a principy projektu Rizika vod 40

1. Vybrané zdroje informací o trendech ve VH ve světě, v EU, které budou také použity pro přípravu návrhu projektu Rizika vod 40.

Podle Světové banky došlo za posledních 55 let k poklesu obnovitelných vodních zdrojů na obyvatele v celé EU o 17 %1. I když je to částečně způsobeno růstem počtu obyvatel, tlak hospodářské činnosti a změny klimatu rovněž prohlubuje sezónní a celoroční nedostatek vody v některých částech EU. V Evropě je největším spotřebitelem vody průmysl, který spotřebuje ročně 45 procent, dalšími odběrateli jsou zemědělství –30 % a obce –26 %. Ze zpráv OSN o světovém rozvoji vody vyplývá, že v jiných částech světa je největším spotřebitelem vody zemědělství, průmyslové odběry vody činí v zemích s vysokými příjmy v průměru 17 % celkové spotřeby, ale v zemích s nízkými příjmy pouze 2 %. Průměr v jižní Asii zemědělství spotřebuje z 91 %, průmysl pouze 7 % a obce 2 %. Celosvětově se spotřeba vody za posledních 40 let zvyšuje zhruba o 1 % ročně, přičemž většina tohoto nárůstu se soustředí do zemí se středními a nižšími příjmy. Odhaduje se, že celosvětová poptávka po vodě se bude i nadále zvyšovat ročním tempem cca + 1 %. Budoucí růst poptávky po vodě bude do značné míry záviset na opatřeních zavedených ke zlepšení efektivity využívání vody.

Konference o vodě OSN 2023: Akční program pro vodu

Bylo konstatováno, že cca 25% obyvatel planety nemá přístup k čisté pitné vodě a téměř polovina nemá přístup k bezpečně řízeným hygienickým zařízením. Je také uvedeno, že nezbytné řešení globální vodní krize není jen o ochraně lidského zdraví – ale má zásadní význam pro světovou ekonomiku a mnoho dalších aspektů agendy udržitelného rozvoje. Résumé konference: Současný stav je znepokojivý, zvyšuje se poptávka po vodě v důsledku rychlého růstu populace, urbanizace a rostoucího tlaku zemědělství, průmyslu a energetiky. Desetiletí špatného hospodaření s vodními zdroji a nadměrné těžby zvýšily nedostatek vody, je proto zapotřebí zdvojnásobit tempo zlepšování vodohospodářských postupů.

UNESCO – Oceňování vody (21. září 2023)

V mnoha regionech světa je voda pro produkci potravin hlavní hnací silou zhoršování životního prostředí, včetně vyčerpávání vodonosných vrstev podzemních vod, snižování průtoků řek, degradace stanovišť volně žijících živočichů a planě rostoucích rostlin a znečištění toků. Při oceňování vody pro výrobu potravin by mělo být bráno v úvahu nejen přímé, ekonomicky prospěšné využívání vody, také je zapotřebí akceptovat hospodářské, sociokulturní nebo environmentální přínosy spojené s vodou, které příliš často zůstávají nezohledněny. Mezi tyto přínosy patří i zabezpečení potravinami a zlepšení kvality výživy přizpůsobením se změnám ve spotřebních vzorcích. Důležité je také vytváření pracovních míst a zajištění existenční odolnosti zejména pro drobné zemědělce.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) – Světová podnikatelská rada pro udržitelný rozvoj

Světová podnikatelská rada pro udržitelný rozvoj zpracovala studii VIZE 2050, v níž zkoumá nové myšlení, diagnostikuje minulá selhání a navrhuje vodní ekosystémy, podporující potravinářství, energetiku a veřejné zdraví. Uplatňované principy:

- a) Jsou široce implementovány integrované přístupy. Voda, půda a související zdroje jsou spravovány koordinovaným způsobem v kontextu s produkcí potravin a se zemědělstvím a ochranou ekosystémů.
- b) Všemi je respektována skutečná hodnota vody.
- c) Kvalitní hospodaření s vodou probíhá mezioborově.
- d) Oběhové hospodaření s vodou je samozřejmou normou. Odpadní vody jsou stále více oceňovány jako potenciální zdroj energie, živin a kovů.
- e) Spolehlivé sanitární a hygienické služby jsou dostupné pro všechny.
- f) Společným úsilím jsou současně regenerovány ekosystémy založené na vodě.
- g) Je odbouráváno nekontrolované znečištění bodovými zdroji.

European Economic and Social Committee (EESC) – Evropský hospodářský a sociální výbor Evropský hospodářský a sociální výbor (EHSV)

EHSV je v podstatě poradní sbor. Výbor se skládá ze zástupců různých hospodářských a sociálních složek organizované občanské společnosti. Má roli poradce Evropského parlamentu, Rady Evropské unie a Evropské komise. Tento Výbor vypracoval Sdělení Komise „Zajištění naší budoucnosti“ (30. 5. 2024). Tento materiál je primárně podrobně zaměřen na dekarbonizaci a v této souvislosti se ale také zabývá zemědělstvím. Není to pohled vodohospodářský, při přípravě návrhu projektu Rizika vod 40 je ale zapotřebí jej v rámci holistického přístupu akceptovat. Podle tohoto Sdělení byly emise ze

zemědělství v letech 2000–2010 poměrně stabilní, vhodnými postupy ale mohou být sníženy a zemědělci tak mohou zajistit pohlcování uhlíku jeho ukládáním do země. EHSV navrhuje, aby byl orientační cíl snížení emisí pro zemědělsko-potravinářské odvětví stanoven v úzkém dialogu se zemědělci a dalšími zúčastněnými, založeném na vědeckých znalostech.

Joint Research Centre EU (JRC) – evropské Společné výzkumné centrum

Společné výzkumné centrum EU (ERC) konstatuje, že změna klimatu s vyššími průměrnými teplotami a častějšími a extrémnějšími povětrnostními jevy (včetně sucha) způsobuje nedostatek sladké vody v EU. Zajištění dostatku vody v EU do roku 2040 je komplexní výzva, která zahrnuje několik klíčových strategií a opatření:

- a) Efektivní využívání vody: EU plánuje zavést přísnější pravidla pro efektivní využívání vody v zemědělství a průmyslu. To zahrnuje modernizaci zavlažovacích systémů a podporu technologií, které snižují spotřebu vody.
- b) Ochrana vodních zdrojů: Členské státy budou muset stanovit cíle pro ekologický průtok vodních toků, aby zajistily dostatek vody pro ekosystémy i společenské potřeby.
- c) Infrastruktura a technologie: Investice do infrastruktury pro zachycování a ukládání vody, jako jsou nádrže a retenční systémy, budou klíčové. Rovněž se očekává rozvoj technologií pro odsolování mořské vody a recyklaci odpadních vod.
- d) Klimatická opatření: Snížení emisí skleníkových plynů a adaptace na změnu klimatu jsou nezbytné také pro udržení stabilních vodních zdrojů, což je zahrnuto do závazku EU k dosažení klimatické neutrality do roku 2050.
- e) Spolupráce a legislativa: Spolupráce mezi členskými státy a zavedení jednotných legislativních rámců pro správu vodních zdrojů jsou klíčové pro efektivní řízení a ochranu vody. Předpokládá se, že tato opatření pomohou zajistit dostatek vody pro všechny obyvatele EU i v roce 2040.

Water Europe – evropská vodní platforma.

Společnosti Water Europe funguje od r. 2004, kdy byla založena Evropskou komisí jako evropská technologická platforma (ETP) s cílem čelit výzvám souvisejícím s vodou na celém kontinentu. Water Europe prosazuje vybudování bezpečné, udržitelné a odolné společnosti Water-Smart v celé Evropě i mimo ni, ve které

- a) Je uznávána a realizována skutečná hodnota vody jako podmínka její bezpečnosti, udržitelnosti a odolnosti.
- b) Všechny dostupné vodní zdroje jsou spravovány tak, aby nedocházelo k jejich nedostatku a/nebo znečišťování.
- c) Vodní smyčky a smyčky zdrojů jsou z velké části uzavřené, aby tak bylo podpořeno oběhové hospodářství a optimální účinnost zdrojů
- d) Vodní systém je odolný vůči dopadům klimatických a demografických změn.
- e) Do zajišťování udržitelné správy vodních zdrojů jsou zapojeny všichni relevantní partneři. V současné době má Water Europe cca 250 členů z 27 zemí.

Asociace pro vodu v krajině České republiky, z.s. je od roku 2013 aktivním členem Water Europe.

Evropské partnerství Water smart Territories (WST)

WST je iniciativa zaměřená na posílení inovační kapacity evropských regionů v oblasti udržitelného hospodaření s vodními zdroji. Bylo založeno v roce 2019 a jeho hlavním cílem je podporovat nové investice a technologie pro efektivní správu vody. WST vychází z předpokladu, že udržitelné hospodaření s vodou je zásadní pro evropská klíčová odvětví:

- a) cestovní ruch
- b) zemědělství,
- c) energetika,
- d) chemický, papírenský a potravinářský průmysl.

Očekává se, že v rámci rostoucího celosvětového trendu spotřeby vody se poptávka po vodě v zemích OECD stabilizuje směrem k roku 2050 (350 km³/rok v EU), a přesto se evropská společnost a ekonomika na různých územích musí vypořádat s následujícími trendy, které budou určovat konkurenceschopnost evropských zemí:

- a) vodárenský průmysl: posílení odolné infrastruktury,
- b) digitalizace,

- c) cirkulární ekonomika,
- d) umožnění vícestranného řízení.

Hlavními cíli partnerství Water smart Territories (WST) je

- a) posílit inovační kapacitu evropských regionů v efektivnějším využívání vodních zdrojů,
- b) usnadnit nové investice, založené na otevřené inovační infrastruktuře a nových technologiích pro udržitelné hospodaření s vodou v regionálních ekosystémech prostřednictvím klastrů.

Užší a mezioborová spolupráce partnerských regionů a regionálních klastrových organizací bude reagovat na výzvy v oblasti vodního průmyslu pomocí pokročilých technologických řešení. V souladu s tím bude WST věnovat zvláštní pozornost podpoře meziodvětvové spolupráce v odvětví vodního hospodářství a ICT a zdůrazňovat nejslibnější inovace. Výměna zkušeností v meziregionálních hodnotových řetězcích, investičních kanálech a investičních platformách posílí průmyslový dialog a umožní rozvoj inovativních technologií a služeb. V důsledku toho budou nové projekty a společné aktivity pohánět regionální spolupráci ve zdokonalování současného stavu techniky. WST se zaměřuje na několik klíčových oblastí:

- a) Odolná infrastruktura: Řešení problémů se stárnoucí infrastrukturou a nízkými investicemi do údržby.
- b) Digitalizace: Využití moderních technologií, jako jsou senzory, big data a virtuální realita, pro zlepšení správy vodních zdrojů.
- c) Cirkulární ekonomika: Podpora recyklace a opětovného využití vody a dalších zdrojů.
- d) Multi-stakeholderová správa: Do řešení dopadů změny klimatu musí být do zapojení všichni relevantní účastníci, tj. zemědělci, průmysloví a městští spotřebitelé atd. Jedním z českých regionů zapojených do této platformy a zaměřuje se na problémy jako úbytek podzemních vod, koncentrace pesticidů a retence vody v krajině je také Liberecký kraj.

Nedostatek vody v roce 2040 může v EU způsobit několik závažných rizik:

- a) Zemědělství: Nedostatek vody může výrazně ovlivnit zemědělskou produkci, což povede k nižším výnosům a vyšším cenám potravin.
- b) Průmysl: Průmyslové sektory, které jsou závislé na vodě, na příklad energetika a potravinářství, ztratí v důsledku vysoké ceny vody konkurenceschopnost.
- c) Zdraví: Nedostatek vody může vést k horší hygieně a zvýšenému riziku šíření nemocí.
- d) Ekosystémy: Přírodní ekosystémy, jako jsou řeky a jezera, mohou být vážně poškozeny, což ovlivní negativně biodiverzitu a kvalitu vody.
- e) Sociální napětí: Nedostatek vody může vést k sociálnímu napětí a konfliktům mezi regiony a státy. EU již nyní pracuje na strategiích, jak těmto rizikům čelit.

V roce 2040 bude v EU a také v ČR hrát v zajišťování potravinové bezpečnosti a udržitelnosti významnou roli vertikální zemědělství. Klíčové aspekty jeho využívání:

- a) Efektivní využití prostoru: Vertikální farmy umožní pěstování plodin ve více vrstvách, což výrazně sníží potřebu rozsáhlých pozemků.
- b) Snížení spotřeby vody: Díky technologiím jako hydroponie a aeroponie bude možné výrazně snížit spotřebu vody ve srovnání s tradičním zemědělstvím
- c) Blízkost k městům: Vertikální farmy budou často umístěny blízko měst, což sníží náklady a emise spojené s přepravou potravin
- d) Kontrola prostředí: Plně kontrolované prostředí umožní pěstování plodin po celý rok bez ohledu na venkovní klimatické podmínky
- e) Udržitelnost: Vertikální zemědělství přispěje k dosažení cílů EU v oblasti obnovy přírody a udržitelného rozvoje. Tento přístup nejenže zvýší produktivitu, ale také pomůže snížit ekologickou stopu zemědělství a zajistit stabilní dodávky potravin i v době klimatických změn.

Změnu nároků na vodní zdroje v roce 2040 ovlivní v EU i v ČR také nové trendy v potravinářství

- a) Udržitelnost a ekologické zemědělství: Zvýšený důraz na udržitelné zemědělské praktiky a ekologické produkty bude pokračovat. Spotřebitelé budou stále více preferovat potraviny, které jsou šetrné k životnímu prostředí a mají nízkou uhlíkovou stopu.
- b) Technologické inovace: Pokročilé technologie, jako jsou umělá inteligence, robotika a biotechnologie, budou hrát klíčovou roli v optimalizaci produkce potravin, i ve zlepšení jejich kvality a bezpečnosti a snížení jejich plýtváním.
- c) Alternativní zdroje bílkovin: S rostoucí poptávkou po udržitelných potravinách se zvýší zájem o alternativní zdroje bílkovin, jako jsou rostlinné bílkoviny, hmyzí bílkoviny a laboratorně pěstované maso.
- d) Personalizovaná výživa: Díky pokrokům v genetice a zdravotnických technologiích bude možné nabízet personalizované stravovací plány, které budou přizpůsobeny individuálním potřebám a zdravotnímu stavu každého jedince.
- e) Zkrácení dodavatelských řetězců: Lokální produkce a spotřeba potravin se stanou běžnějšími, což povede ke zkrácení dodavatelských řetězců a snížení emisí spojených s dopravou.
- f) Redukce potravinového odpadu: Inovace v balení a skladování potravin, stejně jako lepší plánování a řízení zásob, pomohou výrazně snížit množství potravinového odpadu. Tyto trendy budou formovat budoucnost potravinářského průmyslu a přispějí k vytvoření udržitelnějšího a zdravějšího potravinového systému

2. Současné poznatky a trendy v ČR – nástin témat, která mohou být také předmětem řešení návrhu projektu Rizika vod 40

Aktuálně čelí Česká republika několika hlavním rizikům v oblasti hospodaření s vodami:

- a) Sucho a nedostatek vody: Klimatické změny vedou k delším obdobím sucha, což způsobuje nedostatek vody pro zemědělství, průmysl i domácnosti.
- b) Povodně: Intenzivní srážky a přívalevé deště povedou k povodním, ohrožujícím majetek a životy lidí.
- c) Znečištění vod: Průmyslové a zemědělské činnosti mohou znečišťovat povrchové i podzemní vody, což má negativní dopad na ekosystémy a kvalitu pitné vody.
- d) Nedostatečná infrastruktura: Staré a nevyhovující vodohospodářské infrastruktury mohou zhoršovat problémy s vodou, jako jsou její úniky.
- e) Urbanizace: Rychlá urbanizace vede k zvyšování nepropustných ploch, což snižuje schopnost krajiny zadržovat vodu a zvyšuje riziko povodní. Tyto a další problémy vyžadují komplexní přístup, spolupráci mezi státní správou, odborníky a veřejností k nalezení udržitelných řešení.

Komplexní a celostní přístup jsou základní atributy připravovaného návrhu projektu Rizika vod 40.

V roce 2040 mohou být rizika pro zdraví vod v České republice ovlivněna několika faktory:

- a) Klimatické změny: Zvýšené teploty mohou podporovat růst choroboplodných zárodků, toxických řas a sinic, což může negativně ovlivnit kvalitu pitné vody i vod napájecích a koupacích.
- b) Znečištění: Průmyslové a zemědělské znečištění může vést k vyšším koncentracím chemických látek ve vodních zdrojích, např. pesticidů, těžkých kovů a dalších toxických látek.
- c) Infekční onemocnění: Znečištěná voda může být zdrojem infekčních onemocnění, jako jsou gastrointestinální infekce způsobené bakteriemi, viry a parazity.
- d) Nedostatek vody: S rostoucími teplotami a změnami srážkových vzorců může dojít k nedostatku vody, což může vést k vyšší koncentraci znečišťujících látek ve zbývajících vodních zdrojích.
- e) Recyklace vody: Používání recyklované vody může přinášet rizika, pokud není správně ošetřena a monitorována, zejména pokud dojde k neúmyslnému propojení systémů pitné a užitkové vody.

V roce 2040 by mělo být ve vodním hospodářství ČR lépe zabezpečeno:

- a) Integrované řízení povodí: Tento přístup bude zahrnovat komplexní plánování a řízení vodních zdrojů, které zohlední všechny aspekty ekosystému, půdy, vody, vegetace a lidských aktivit.
- b) Technologické inovace: Klíčovou roli budou hrát pokročilé technologie, jako jsou senzory pro monitorování kvality vody a půdy, drony pro sledování eroze a využití umělé inteligence pro predikci a optimalizaci zemědělských postupů apod.
- c) Udržitelné zemědělské praktiky: Zemědělci budou muset přijmout šetrnější metody hospodaření, jako je střídání plodin, agroforestry a využívání krycích plodin, aby byla minimalizována eroze a zlepšována kvalita půdy.
- d) Politická a legislativní podpora: Vláda bude muset zavést a prosazovat politiku a legislativu, podporující udržitelné hospodaření s půdou a vodou, včetně finančních pobídek pro zemědělce/správce půdy.
- e) Vzdělávání a osvěta: Zvýšené povědomí a vzdělávání o důležitosti ochrany půdy a vody bude klíčové pro zapojení všech zainteresovaných stran, včetně zemědělců, komunit a průmyslu. Tento holistický přístup bude vyžadovat spolupráci mezi vědci, zemědělci, vládami a komunitami, aby bylo možné efektivně chránit a spravovat naše přírodní zdroje pro budoucí generace.

Ztráta vody evapotranspirací – její výše bude v roce 2040 ovlivněna uplatněním nových technologií:

- a) Digitalizace a automatizace: Technologie jako drony, senzory a robotika budou běžně využívány pro monitorování plodin, zavlažování a aplikaci hnojiv. Chytré systémy budou schopny analyzovat data v reálném čase a optimalizovat zemědělské postupy.
- b) Precizní zemědělství: Tento přístup umožní přesné dávkování hnojiv a pesticidů, což sníží náklady a minimalizuje negativní dopady na životní prostředí. Farmáři budou mít detailní přehled o stavu jednotlivých rostlin a půdy.
- c) Udržitelnost a ekologické zemědělství: Zvýší se tlak na snižování používání chemických přípravků a ochranu biodiverzity. Ekologické zemědělství bude podporováno jak legislativně, tak finančně, což povede k rozšíření ekologických farem.
- d) Genetické šlechtění a biotechnologie: Pokroky v genetickém inženýrství umožní vývoj odrůd odolných vůči suchu, škůdcům a chorobám. To pomůže zvýšit výnosy a snížit závislost na chemických prostředcích.
- e) Regenerativní zemědělství: Tento přístup se zaměřuje na obnovu půdní úrodnosti a udržení uhlíku v půdě. Použití mezplodin, kompostování a minimalizace orby budou běžnými praktikami

Změna nároků na potřebu vody pro zemědělství vyplne v roce 2040 z nových klíčových trendů:

- a) Technologické inovace: Zemědělství bude stále více využívat moderní technologie, jako jsou drony, senzory, robotika a umělá inteligence. Tyto technologie umožní precizní zemědělství, které zlepší efektivitu a sníží náklady.
- b) Udržitelnost a ekologické zemědělství: Zvýší se důraz na udržitelné a ekologické postupy. To zahrnuje snižování používání chemických hnojiv a pesticidů, ochranu biodiverzity a zlepšování kvality půdy.
- c) Vertikální a městské farmy: S rostoucí urbanizací a nedostatkem půdy se zvýší význam vertikálních a městských farem. Tyto farmy umožní pěstování plodin v kontrolovaném prostředí s minimálním využitím půdy a vody.
- d) Agrolesnictví a agroekologie: Tyto přístupy kombinují zemědělství s lesnictvím a ekologickými principy, což pomůže zlepšit zadržování vody v půdě, zvýšit biodiverzitu a snížit erozi.
- e) Produkce alternativních potravin: Zvýší se produkce alternativních potravin, jako je maso pěstované v laboratořích a rostlinné náhražky masa. Tyto produkty budou hrát důležitou roli v uspokojování rostoucí poptávky po potravinách a snižování ekologické stopy.

Změna klimatu – dopad na produkci ryb v ČR do roku 2040:

- a) Zvýšení teploty vody: Teplota vody v rybnících a řekách roste, což může vést ke snížení množství rozpuštěného kyslíku ve vodě
- b) Ztráta vhodného prostředí: studie ukazují, že v důsledku změn klimatu a užívání krajiny může dojít ke ztrátě vhodného prostředí pro ryby – např. v povodí Labe může dojít ke ztrátě až 94 kilometrů vhodného prostředí pro různé druhy ryb.

c) Změny v rozložení druhů: Různé druhy ryb se budou muset přizpůsobit novým podmínkám, což může vést k přesunu některých druhů do jiných oblastí. Například ryby žijící v nížinných tocích se mohou přesouvat směrem po proudu, zatímco ryby z pramenných oblastí se budou přesouvat dále proti proudu.

d) Zhoršení kvality vody: Vyšší teploty vody mohou také přispět ke zhoršení kvality vody, což může komplikovat tradiční chov ryb a vést k úbytku některých druhů. Reakcí na výše uvedené okolnosti bude zavádění recirkulačních akvakulturních systémů (RAS), které pravděpodobně budou v ČR hrát v produkci ryb klíčovou roli.

Změny, které budou v roce 2040 uplatněny pomocí moderních technologií

a) Robotika a automatizace: Zemědělské roboty budou běžně využívány pro různé úkoly, jako je setí, sklizeň, odplevelování a monitorování plodin. Tyto roboty budou schopny pracovat autonomně a efektivně, což sníží potřebu lidské práce.

b) Drony a senzory: Drony vybavené pokročilými senzory budou monitorovat stav plodin a půdy v reálném čase. Budou schopny detekovat choroby, škůdce a nedostatky živin, což umožní přesné a cílené zásahy.

c) Precizní zemědělství: Tento přístup bude zahrnovat využití GPS, GIS a dalších technologií pro optimalizaci zemědělských postupů. Farmáři budou mít k dispozici detailní mapy svých polí a budou schopni přesně dávkovat hnojiva a pesticidy.

d) Autonomní traktory a stroje: Traktory a další zemědělské stroje budou vybaveny autonomními systémy, které jim umožní pracovat bez lidského zásahu. Tyto stroje budou schopny provádět různé úkoly s vysokou přesností a efektivitou.

e) Udržitelné technologie: Zvýší se důraz na udržitelnost a ekologické zemědělství. Mechanizační prostředky budou navrženy tak, aby minimalizovaly negativní dopady na životní prostředí, například snížením spotřeby paliva a emisí.

Diverzní aktivity mohou ve významném měřítku ohrozit zdravotní nezávadnost pitné vody kdykoliv. Diverzní aktivity zahrnují úmyslné znečištění vodních zdrojů chemickými, biologickými nebo radiologickými látkami, což může vést k vážným zdravotním rizikům:

a) Chemické látky: Mohou zahrnovat toxické chemikálie, které mohou způsobit akutní nebo chronické zdravotní problémy, jako jsou otravy nebo dlouhodobé nemoci.

b) Biologické látky: Patří sem patogeny, jako jsou bakterie, viry nebo paraziti, které mohou vyvolat infekční onemocnění.

c) Radiologické látky: Mohou zahrnovat radioaktivní materiály, které způsobí radiační otravu a zvýšit riziko rakoviny. Ochrana spočívá v monitorování kvality vody, zabezpečení vodních zdrojů a rychlou reakci na jakékoli podezřelé aktivity.

V ČR novým kritériem bude v rámci návrhu projektu Rizika vod 40 také virtuální voda. Virtuální voda je objem pitné vody použité k výrobě produktu je měřen v místě, kde byl výrobek skutečně vyroben. Virtuální obchod s vodou a virtuální vodní toky

a) odráží virtuální vodu obchodovanou mezi zeměmi, když obchodují s komoditami, zbožím a službami

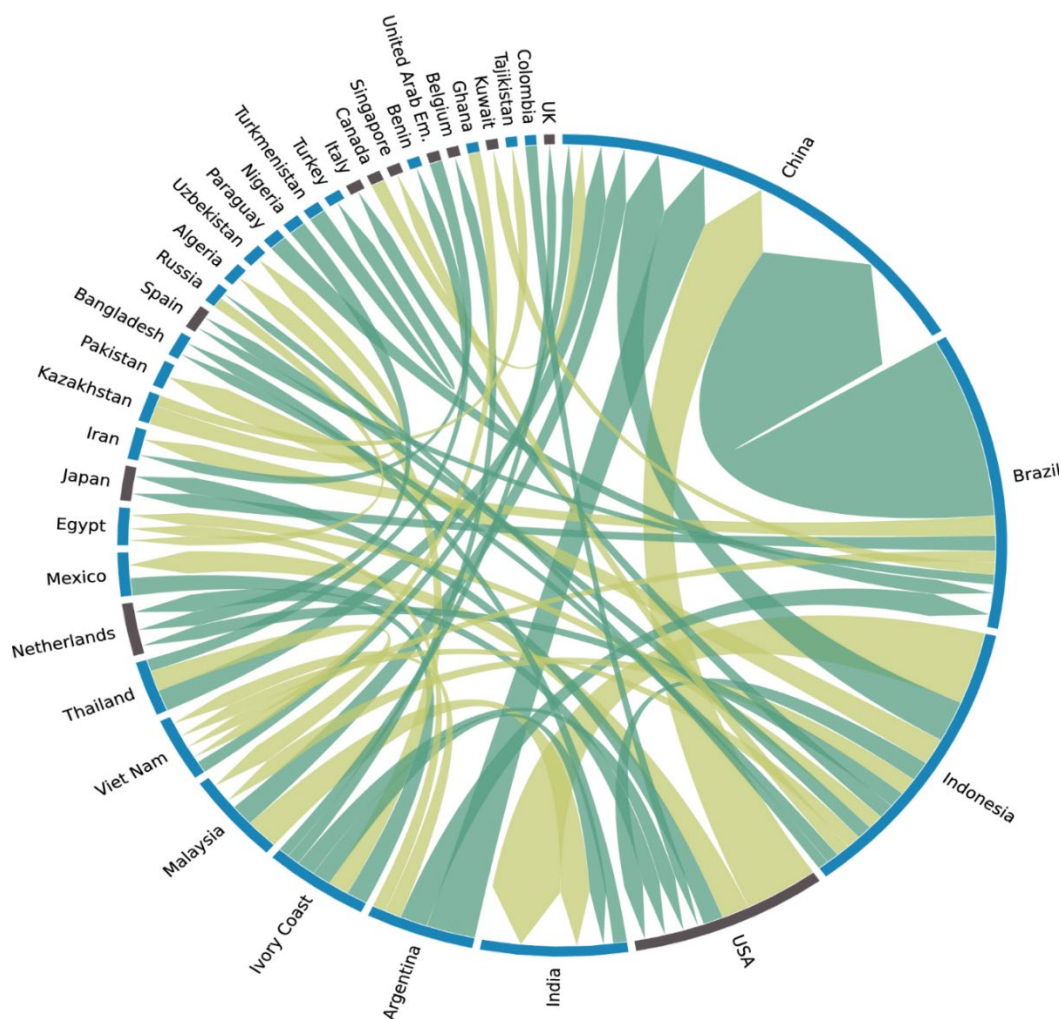
b) poskytuje Informace, jak jsou vodní zdroje v jedné zemi využívány k podpoře spotřeby v jiné zemi.

Vodní stopa pomáhá zmapovat závislosti z různých zemí na dovozu virtuální vod

Voda je kritickým vstupem do globální ekonomiky, proto mapování virtuálních vodních toků bude stále důležitější pro bezpečnost potravin, ekonomiku a diplomacii.

Příklady spotřeby vody na	1 litr mléka obsahuje	1000 litrů
	1 kg pšenice potřebuje	1350 litrů
	1 kg rýže obsahuje	3000 litrů
	1 šálek kávy	140 litrů

Obchod s virtuální vodou v globální potravinové síti - „nespravedlivé“ toky (jsou ty, nichž má vyvážející země vyšší složený index nedostatku než dovozce) jsou zbarveny tmavě zeleně; - „spravedlivé toky“ jsou světle zelené.

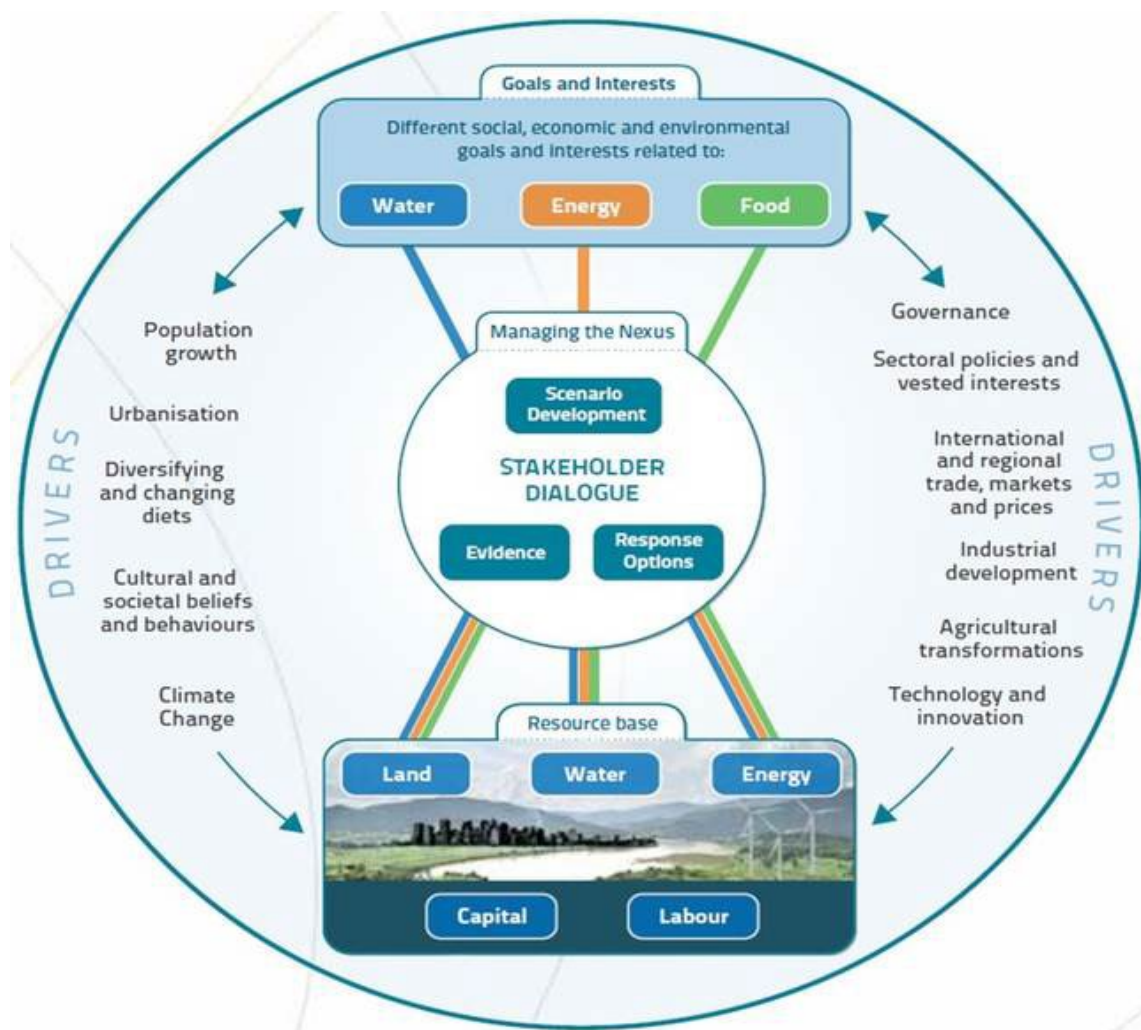


Novým přístupem – NEXUS – mezioborové propojení různých faktorů

Metoda NEXUS se zaměřuje na propojení a vzájemné ovlivňování vody, energie a potravinových systémů. Její využití přináší několik významných výhod:

- Efektivní využívání zdrojů:** Metoda NEXUS podporuje integrované řízení zdrojů, což vede k efektivnějšímu využívání vody, energie a půdy. To může snížit plýtvání a zvýšit produktivitu.
- Zlepšení udržitelnosti:** Díky propojení různých sektorů pomáhá metoda NEXUS identifikovat a implementovat udržitelná řešení, která minimalizují negativní dopady na životní prostředí.
- Adaptace na změnu klimatu:** Metoda NEXUS umožňuje lépe se připravit na změny klimatu tím, že podporuje adaptivní řízení a zvyšuje odolnost systémů vůči extrémním klimatickým jevům.
- Podpora rozhodování:** Poskytuje komplexní pohled na vzájemné vztahy mezi vodou, energií a potravinami, což usnadňuje informované rozhodování na politické i praktické úrovni.
- Zlepšení kvality života:** Efektivnější a udržitelnější využívání zdrojů může vést ke zlepšení kvality života obyvatel, například prostřednictvím lepší dostupnosti vody a potravin. **Metoda NEXUS tedy představuje komplexní přístup, který může přinést významné výhody pro vodní hospodářství, zemědělství a ochranu životního prostředí.**

FAO zkoumá, jak může propojení voda, energie a potraviny podpořit potravinovou bezpečnost a udržitelné zemědělství na celém světě.



2. Závěry

Česká republika musí sledovat a nejistoty ve vývoji budoucího stavu a rizik nejen vlastních ale zejména také světových vodních zdrojů. Aby bylo možné vypracovat vhodné adaptační strategie na změnu klimatu, potřebují plánovači spolehlivé projekce budoucích scénářů, vycházejících z multidisciplinární a celostního přístupu.

Uvedené principy jsou základními přístupy, jimiž se bude řídit návrh projektu Rizika vod 40, jehož cílem je vytvoření podmínek pro snížení rizik spojených s vodními zdroji v České republice do roku 2040. Dosažení tohoto cíle vyžaduje komplexní a integrovaný přístup, který umožní nalezení multioborového a multikriteriálního managementu vodních zdrojů. Mezi klíčové strategie a aktivity patří také implementace principů cirkulární ekonomiky, efektivní využívání a recyklace vody, modernizace a údržba vodovodní a kanalizační infrastruktury, prevence povodní a sucha, udržitelné hospodaření s vodními zdroji, koordinovaný výzkum a inovace, vzdělávání a osvěta. Tyto strategie jsou součástí širšího rámce, který zahrnuje spolupráci mezi různými sektory a zainteresovanými stranami, včetně vládních institucí, průmyslu, akademické sféry a neziskových organizací.

Uplatnění holistického přístupu zajišťuje vzájemné propojení všech aspektů vodního hospodářství jsou vzájemně propojeny, podporuje spolupráci mezi různými sektory a zainteresovanými stranami a také klade důraz na dlouhodobou udržitelnost. Důležité je také, že holistický přístup podporuje inovace a adaptaci nových technologií a postupů, které mohou přispět k efektivnějšímu a udržitelnějšímu hospodaření s vodními zdroji.

Návrh projektu Rizika vod 40 bude jako nástroj využívat metodu foresight, jejíž využití přinese pro zpracování strategie vodních zdrojů v České republice do roku 2040 přináší několik významných výhod, jimiž jsou také proaktivní plánování, zapojení širokého spektra zainteresovaných stran, což zajišťuje, že návrh projektu Rizika vod 40 bude komplexní a bude reflektovat rozmanité perspektivy a potřeby. Použití foresightu přinese schopnost identifikovat inovativní technologie a inovativní přístupy a pomůže také vytvářet strategie, které budou udržitelné z dlouhodobého hlediska.

V návrhu projektu budou plně respektovány mezioborové vazby (nexus), bude identifikováno nejnovější světové i domácí poznání (state of the art). Zejména budou sledovány a hodnoceny rychle se rozvíjející oblast modelů, založených na umělé inteligenci – AI. Budou také hodnocena cloudová řešení správy vodohospodářských dat, bude sledován rozvoj technologií opětovného využití vody apod. Předpokládané iniciování nového přístupu k hodnocení a navrhování politik pro udržitelnost primárních zdrojů, jako je voda a orná půda, bude východiskem pro zpracování středně až dlouhodobých perspektivy. Důraz bude také kladen i na čistý vývoz virtuální vody, který může v budoucnu způsobit nevratné ztráty. S rostoucím nedostatkem vody v některých státech EU se virtuální obchod s vodou může stát důležitým prvkem vodní udržitelnosti ČR. Úspěšnost připravovaného návrhu projektu závisí na kvalitě i pozici partnera, který je v současné době zabezpečován i na kompetencích členů řešitelského ad hoc týmu.

Vývoj klimatu, půdních charakteristik a odtoku tří malých povodí na Šumavě

Development of climate, water characteristics and runoff of three small catchments in Šumava Mts

Martin Černý, Jan Procházka

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta zemědělská a technologická, Studentská 1668, 370 05, České Budějovice, cernym11@fzt.jcu.cz, prochazkaj@fzt.jcu.cz

Abstrakt

Předkládaný příspěvek hodnotí rozdíly v hydrologických, půdních a klimatických charakteristikách tří malých experimentálních povodí v oblasti jihovýchodní Šumavy. Dlouhodobý komplexní monitoring zde dobře zachycuje vlastnosti každého povodí a změny jeho parametrů v důsledku stále probíhající klimatické změny v podmínkách České republiky. Výsledky ukazují nárůst průměrné roční teploty vzduchu za období 1998–2023 o 0,4 °C za dekádu, globálního slunečního záření téměř o téměř 7 W.m² za dekádu, zatímco průměrný roční úhrn srážek zůstává podobný.

Povodí se i přes svou blízkost a podobné podmínky liší. Především ve způsobu obhospodařování krajiny, které jsou zde konzistentní a neměnné od počátku monitorování: a) plochy Mlýnského povodí lze charakterizovat odvodněnými pastvinami, b) v Bukovém povodí dominuje sekundární smrkový les a c) v Horském povodí lze nalézt krajinnou mozaiku lesa, mokřadů a luk. Tyto způsoby hospodaření tak dále ovlivňují vlastnosti zdejší půdy, zejména pak obsah půdního organického uhlíku (SOC). Mlýnské povodí vykazuje nejnižší obsah SOC a nejvýraznější pokles v průběhu času, zatímco v povodí Horského potoka je obsah SOC nejvyšší a vykazuje minimální změny napříč roky.

Struktura krajinného pokryvu a využití území dále výrazně ovlivňují objem a kvalitu odtékající vody z jednotlivých povodí. Bukové povodí má průměrný koeficient odtoku 0,33 díky lesnímu pokryvu, Horské povodí s různorodou krajinou má koeficient 0,38 a Mlýnské povodí, charakterizované odvodněnými pastvinami, má nejvyšší koeficient 0,59. Variabilita průtoků je vyšší během intenzivních srážkovo-odtokových epizod, ale po delších obdobích sucha jsou průtoky v povodích srovnatelné. Celkový odtok vykazuje mírně klesající trend ve všech povodích. Tato experimentální povodí na Šumavě slouží nejen k monitoringu a výzkumu, ale také podporují vzdělávací aktivity v oboru hydrologie, ekologie a klimatologie na univerzitní úrovni.

Klíčová slova: experimentální povodí, odtok, půda, kvalita vody, klimatická změna

Abstract

This study investigates the differences in hydrological and soil characteristics of three small experimental catchments in the Šumava Mountains, located in southwest Czech Republic. Long-term complex monitoring highlights both the distinct characteristics of each catchment and the parameter changes due to ongoing climate change. Average annual air temperature increase approximately 0.4 °C per decade and a rise in global solar radiation by 7 W/m² per decade, while annual precipitation remains stable.

The catchments, despite their close proximity and similar conditions, differ primarily in landscape management, which has been consistent over 25 years: a) Mlýnský catchment features drained pastures, b) Bukový catchment is dominated by secondary spruce forest, and c) Horský catchment comprises a mosaic of forests, wetlands, and meadows. These management practices influence soil properties like soil organic carbon (SOC). Mlýnský catchment exhibits the lowest SOC levels and the most significant decrease over time, while Horský catchment shows the highest SOC content with minimal changes.

Landcover and land use significantly affect bulk of water runoffs and their characteristics. The Bukový catchment has an average runoff coefficient of 0.33 due to forest properties, the Horský catchment, with its mosaic landscape, has a coefficient of 0.38, and the Mlýnský catchment, characterized by drained pastures, has the highest coefficient at 0.59. Flow variability is higher during intense precipitation-runoff events, yet flows across catchments are comparable following prolonged droughts. Overall, runoff exhibits a slightly decreasing trend across all catchments. These experimental catchments in the Šumava Mountains not only facilitate monitoring and research but also support educational activities in hydrology, ecology and climatology at the university level.

Keywords: experimental catchments, runoff, soil, water quality, climate change

1. Úvod

V roce 1997 byla pro účely dlouhodobého srovnávacího monitoringu vybrána tři malá povodí horských potoků: Bukový, Horský a Mlýnský v oblasti jihovýchodní části Šumavy. Přesněji se tyto potoky nachází mezi přehradní nádrží Lipno a státní hranicí s Rakouskem, kde se nepředpokládala ani do budoucna výrazná změna ve využití území. Po počátečním vymezení a úvodních měřeních zde probíhá soustavný komplexní monitoring řady biotických a abiotických faktorů, jako je například: stav a způsob hospodaření, vývoj vegetačního pokryvu a nadzemní biomasy rostlin, půdních vlastností, hydrologických a hydrochemických parametrů (srážky, odtok, kvalita vody) nebo některých meteorologických prvků (Procházka et al., 2019, 2023b). Pozorování jsou zde kontinuálně prováděna v rámci výzkumných aktivit Fakulty zemědělské a technologické, Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích (FZT JU).

V kontextu klimatické změny a rostoucí potřeby efektivního sdílení dat z výzkumu experimentálních povodí je nezbytné posílit komunikační platformy a podporovat rozšířenou výměnu informací mezi výzkumnými organizacemi (Holzmann, 2018). Na území České republiky bylo proto vytvořeno několik souborů experimentálních povodí, jejichž charakter a zaměření odpovídají specifickým cílům monitoringu a výzkumu jednotlivých institucí (Kráš et al., 2023; Vokoun et al., 2023). Evropská síť vybraných experimentálních povodí, kterou koordinuje organizace ERB (Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins) je příkladem iniciativy zaměřené na podporu mezinárodní spolupráce a sdílení vědeckých dat (Penna, 2023). Proto jsou výsledky výzkumu na třech šumavských experimentálních povodích prezentovány v odborných časopisech a konferencích.

Rozdílné způsoby hospodaření jinak geograficky blízkých povodí ovlivňují řadu vlastností místní krajiny, což má významný dopad na kvalitu životního prostředí. Podle Ripla (1995) je potřeba krajinu a její části sledovat jako velmi heterogenní celek složený ze specifických ekosystémů, které jsou vždy ve vzájemné interakci a vykazují různou dynamiku. V návaznosti na tento koncept je pro komplexní monitoring povodí využíván tzv. holistický přístup, který klade důraz na pochopení vzájemného propojení jednotlivých složek krajiny a jejich funkcí v závislosti na schopnostech disipace sluneční energie a způsobu zacházení s vodními a látkovými toky (Procházka et al., 2019).

Experimentální povodí s různým typem krajinného pokryvu, srovnatelnými podmínkami a rozlohou, ve stejné oblasti bez předpokládaných dlouhodobých změn ve využití, se proto ukázala jako nejvhodnější pro dokumentaci těchto rozdílů. V současnosti se jedná již o 27 let kontinuálního komplexního monitoringu. Experimentální povodí zároveň slouží při praktické výuce studentů a nových potencionálních vědeckých pracovníků.

Cílem tohoto příspěvku je prezentovat vliv rozdílného krajinného krytu a využití území na zmíněné charakteristiky měřené na třech experimentálních povodích, a to i v souvislosti s probíhající klimatickou změnou.

2. Metodika

2.1 Charakteristika tří experimentálních povodí

Experimentální povodí, která se nachází ve vzájemné blízkosti, mají rozlohu přibližně 2 km². Jsou situována v podobných geologických a geografických podmínkách (Obr. 1, Tab. 1), výrazně se ale liší ve způsobu využití území. Povodí potoka Bukový je téměř úplně zalesněné a převládá zde sekundární smrkový hospodářský les. Přibližné stáří lesa lze odhadovat na 80 let. Povodí Mlýnského potoka je využíváno pro účely zemědělství a dominují zde pastviny a louky. V 80. letech prošlo povodí systematickým odvodněním, což výrazně ovlivnilo jeho hydrologické vlastnosti a strukturu zdejší půdy.



Obr. 1 Specifikace experimentálních povodí (Procházka et al., 2019).

Povodí Horského potoka lze popsat jako krajinnou mozaiku kombinující hospodářský a přirozený les, mokřadní biotopy a nevyužívané louky (lada). Tento rozmanitý typ území přispívá k vysoké biodiverzitě a variabilitě ekologických podmínek v povodí. Všechna povodí se nachází v nadmořské výšce v rozmezí 780 až 1 035 m nad mořem, průměrná roční teplota vzduchu se zde pohybuje mezi 5 a 6 °C. Průměrný roční úhrn srážek v oblasti činí 1 000 až 1 100 mm. Využití všech povodí se od začátku monitorování nezměnilo. Hydrologicky povodí spadají do úmoří Černého moře a jsou součástí povodí Große Mühl a jeho přítoků Kleine Mühl, s hydrologickým pořadím 4-04-02.

Tab. 1 Základní charakteristiky povodí.

Povodí	Bukový	Horský	Mlýnský
Rozloha [km ²]	2,21	2,06	2,13
Průměrná sklonitost [°]	7,1	6,5	6,2
Průměrná teplota [°C]	5,8	5,8	5,8
Průměrný úhrn srážek [mm]	1080	1080	1060
Podloží, půdy	Granit, kambisol, podzoly, kryptopodzoly		
Hlavní biotop	Jehličnatý les	Mokřady, les, louky	Odvodněné pastviny

2.2 Metody monitoringu

Pro sledování hydrologické bilance byly na závěrných profilech jednotlivých povodí nainstalovány měrné profily osazené registračními jednotkami, které automaticky zaznamenávají výšku vodního sloupce, teplotu a elektrickou vodivost odtékající vody. K určení průtokových křivek byla provedena hydrometrická měření při různých vodních stavech (hydrometrování).

Vzorky odtékající vody jsou pravidelně odebírány v měsíčních intervalech, laboratorní analýzy jsou následně zajišťovány v laboratořích Katedrou aplikované ekologie FZT JU a společností ENKI o. p. s. sídlící v Třeboni. Povodí Mlýnského a Horského potoka jsou zároveň vybavena automatickými meteorologickými stanicemi, které zaznamenávají teplotu, vlhkost, srážky, směr a rychlost větru, stejně jako globální sluneční záření a čistou radiaci (net radiometer) nebo teplotu a vlhkost půdy. V povodí Bukového potoka, vzhledem k jeho úplnému zalesnění a blízkosti k povodí Horského potoka jsou z meteorologického hlediska zaznamenávány pouze doplňkově u závěrného profilu teplota vzduchu a úhrn srážek.

Všechny automatické hydrologické a meteorologické zařízení a stanice zaznamenávají data v 10 minutových intervalech a prostřednictvím přenosu dat je odesílají dále na server. Kontrola měření, odběry vzorků a další související monitoring probíhají in-situ jednou měsíčně. Při měsíčních odběrech vzorků jsou přístrojem YSI ProDSS – Digital Sampling System dodatečně měřeny aktuální hodnoty elektrické vodivosti, teploty vody, pH a rozpuštěného kyslíku nebo obsah chlorofylu v odtékající vodě. Stav měření výšky vodní hladiny je kontrolován pomocí stabilního vodočtu a měřením vzdálenosti ultrazvukového čidla od hladiny vody. Data z měření, ať již odeslaná na server, změřená v terénu nebo analyzovaná v laboratoři, jsou pravidelně kontrolována, zpracovávána a vyhodnocována.

Monitoring zdejších půd probíhá od roku 1998, kdy byly odebrány první vzorky a analyzovány základní půdní vlastnosti jako např.: zrnitost, objemová hmotnost, pH, obsah půdní organické hmoty (SOM), obsah půdního organického uhlíku (SOC) nebo stupeň nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty. Poslední odběrová kampaň půdních vzorků byla uskutečněna v roce 2023. Síť odběrových míst se skládá z celkem 15 stanovišť (vždy 5 stanovišť připadá na jedno povodí, kde jsou stanoviště rovnoměrně rozprostřena). Při odběru se na jednom stanovišti nejprve odstraní travní drn nebo opadová vrstva a pomocí pedologické sondážní tyče se provedou tři vpichy do tří hloubek (hloubka A= 0–10 cm; hloubka B= 10–25 cm; hloubka C= 25–40 cm). Celkem tak v jednom roce dojde k odebrání 135 vzorků. Toto číslo je dáno vlastnostmi zdejšího terénu z hlediska přiměřené reprezentativnosti a časové proveditelnosti.

3. Výsledky

3.1 Vývoj klimatu

Pro účely tohoto příspěvku jsou zde uvedeny výsledky týkající se stavu a vývoje klimatu v dotčené oblasti. Ty jsou prezentovány trendem průměrné roční teploty vzduchu a ročního úhrnu srážek za období let 1998–2023 a nárůstem sumy dopadajícího slunečního záření na povrch za období let 2009–2023. Získané výsledky dokládají změnu klimatu v sledovaném prostředí. Klima se zde v průběhu let prokazatelně mění, průměrná teplota vzduchu se zvyšuje o 0,4 °C za dekádu. Zvětšuje se i množství dopadajícího slunečního záření na povrch o téměř 7 W.m⁻² za dekádu (Obr. 2). Další klimatické jevy jako například extrémní srážkové události nebo suché periody jsou tak méně předvídatelnější a často intenzivnější v kratších časových intervalech.



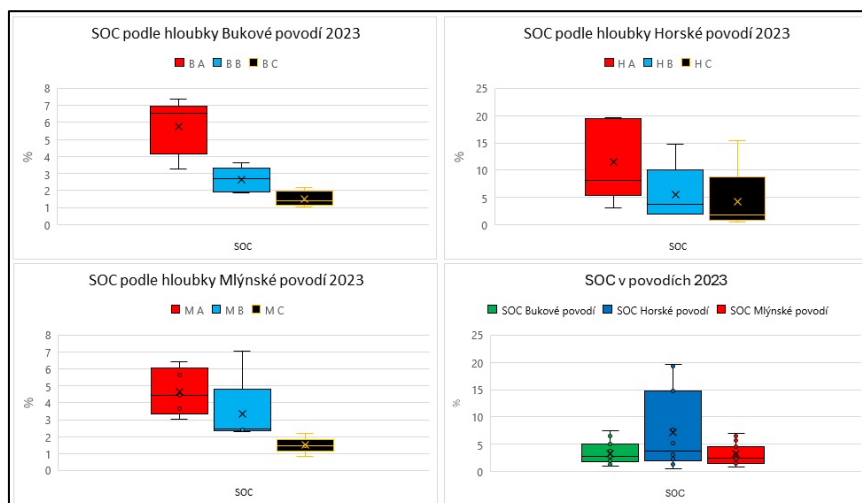
Obr. 2 Lineární trend vývoje klimatických vlastností a průměrného úhrnu srážek.

V prvním desetiletí (1998–2007) byla ve sledované oblasti naměřena průměrná teplota vzduchu 5,5 °C (Procházka et al., 2023b), naopak v posledním desetiletí (2014–2023) zde již průměrná teplota vzduchu činí 6,3 °C. To koresponduje i s celorepublikovým průměrem zachycující vývoj teplot vzduchu na našem území (Orság et al., 2022). Průměrné hodnoty ročního úhrnu srážek se ale napříč roky v této oblasti JV Šumavy příliš nemění, resp. vykazují nevýznamný trend růstu o necelých 10 mm za dekádu (Obr. 2).

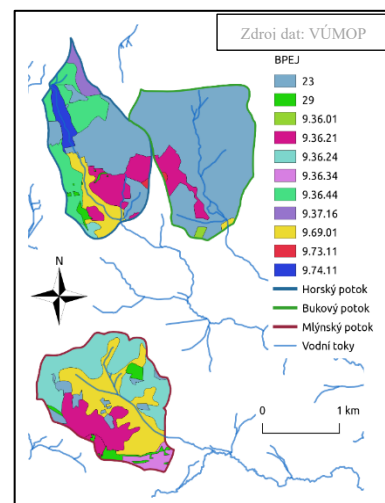
3.2 Pedologické vlastnosti

Půdní organická hmota, včetně půdního organického uhlíku, hraje klíčovou roli nejen v růstu vegetace, ale také pokud jde o fyzikální vlastnosti půdy. To se ve výsledku projevuje jako jeden z faktorů ovlivňující vodní a látkovou bilanci v krajině. Z výsledků analýz z let 1998 a 2023 je patrné, že zásoby SOC v půdách povodí Horského a Bukového potoka jsou vyšší než v odvodněném povodí Mlýnského potoka, zjištěné průměrné hodnoty SOC se navíc v průběhu let v povodích snížily (Obr. 3).

Největšími zásobami SOC disponují neutužené lesní a mokřadní půdy. Kambizemě Horského povodí, průměrně obsahují 7,9 % SOC. Půdy sekundárního smrkového lesa (Bukové povodí), které jsou tvořeny hlavně podzoly a kryptopodzoly disponují 3,3 % SOC a kambizemě odvodněných pastvin, které lze charakterizovat značným utužením a chabou kořenovou soustavou 3,16 % SOC. Zároveň se shodně obsah SOC s hloubkou ve všech sledovaných povodích snižuje. Všechna povodí se nachází na stejném podloží tvořeném granitem (ten je součástí Českého masivu) a jako hlavní půdní typy lze zde nalézt především kambizemě dystrické a podzoly. Největší půdní rozdíly lze spatřit v rámci BPEJ kódu (bonitovaná půdně ekologická jednotka), kdy největší diverzita půdních typů se vyskytuje v krajinné mozaice Horského povodí (viz Obr. 4).

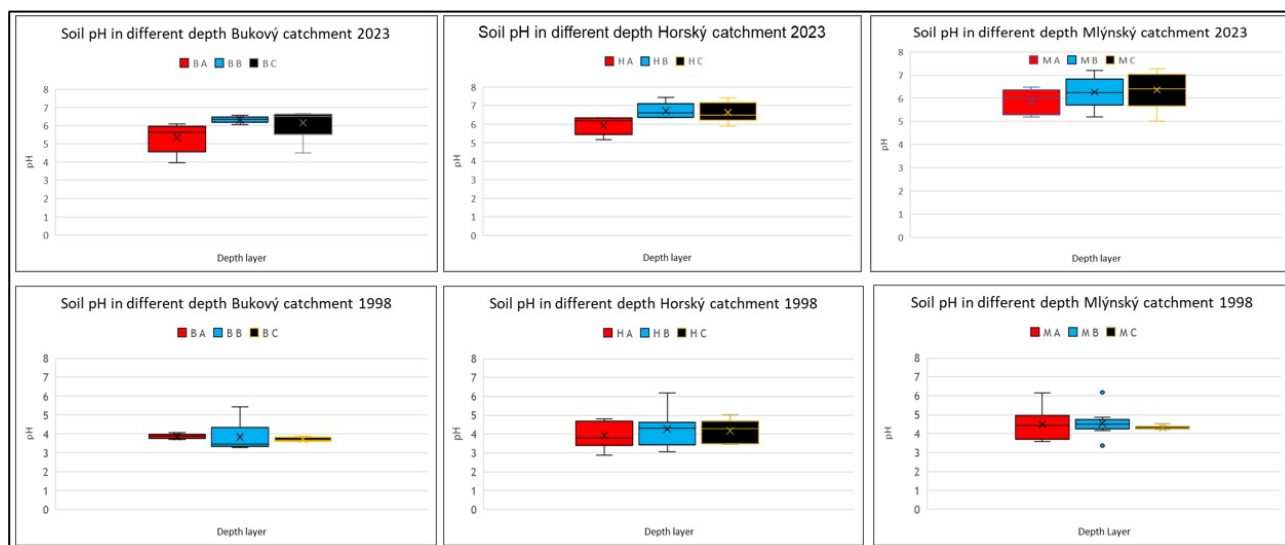


Obr. 3 Obsah SOC v půdách podle jednotlivých povodí a hloubky.



Obr. 4 BPEJ kódy půd v povodích.

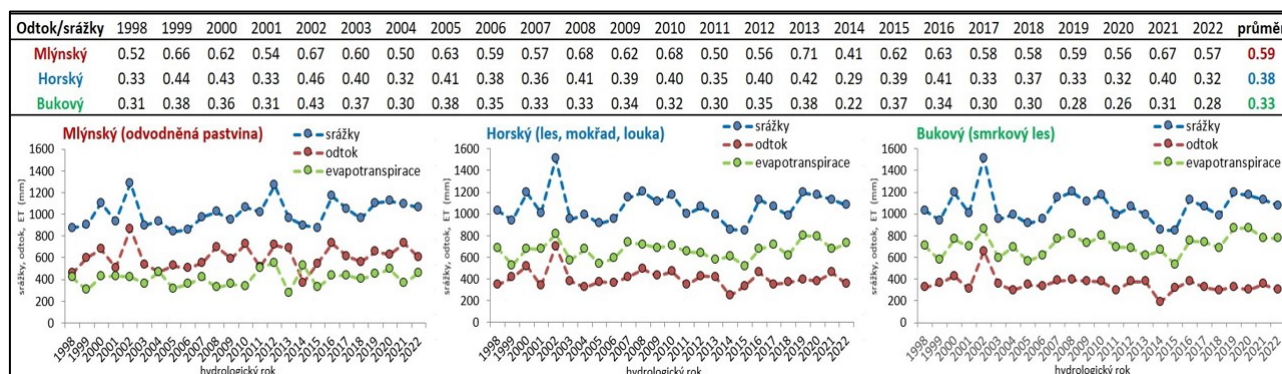
Dalším projevem změn je vývoj pH zdejších půd, které se v průběhu let zvýšilo a nyní je lze charakterizovat jako slabě kyselé (viz Obr. 5). Současné průměrné hodnoty pH půd jednotlivých povodí jsou: Bukový potok 6,2; Horský potok 6,4; Mlýnský potok 6,3.



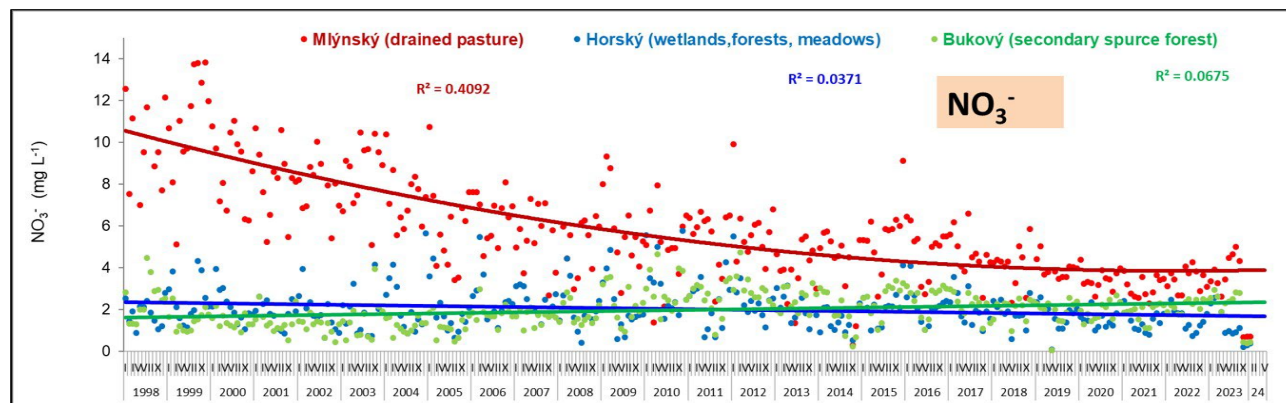
Obr. 5 Porovnání pH půd 1998 a 2023.

3.3 Hydrologická bilance a kvalita vody

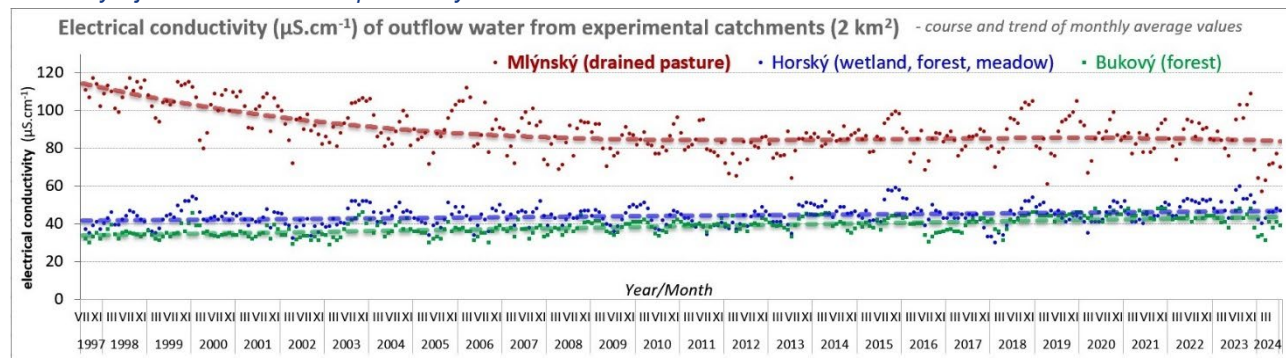
Hydrologická bilance vyjádřená jako poměr srážek a odtoku za období 1998–2022 potvrzuje, že z povodí Mlýnského potoka, kde převažují systematicky odvodněné pastviny, odtéká téměř 59 % srážkové vody (viz Obr. 6). Naopak povodí Bukového potoka (smrkový les) a Horského potoka (mozaika lesa, luk a mokřadů) ztrácejí menší podíl srážkové vody (33 %, resp. 38 %) a vykazují vyrovnanější povrchové teploty. Průtok měřený na závěrných profilech povodí dokládá dlouhodobý denní průměr na Mlýnském potoce 40 l.s⁻¹ na Horském potoce 26 l.s⁻¹ a na Bukovém potoce 23 l.s⁻¹. Průtoky i teploty vody zde pravidelně vykazují větší kolísání, přičemž z odvodněné půdy se ztrácí více rozpuštěných látek. Průměrné hodnoty elektrické vodivosti, které ukazují vývoj a množství rozpuštěných látek v odtékající vodě, se v povodích s lesní a mozaikovou krajinou pohybují okolo 40 μS.cm⁻¹. Naopak v Mlýnském potoce, který odvádí vodu z odvodněných pastvin, jsou hodnoty vodivosti zpravidla více než dvojnásobné (Obr. 7). Podobné rozdíly jsou patrné i u koncentrací dusičnanů (Obr. 8): v lesních a mozaikových povodích je průměrná koncentrace kolem 2 mg.l⁻¹, zatímco v Mlýnském potoce jsou koncentrace o poznání vyšší, přestože zde během sledování významně poklesly.



Obr. 6 Hydrologická bilance jednotlivých povodí.



Obr. 7 Vývoj elektrické vodivosti povrchových odtoků během let 1997–2024.



Obr. 8 Vývoj obsahu dusičnanů v povrchových odtocích 1998–2024.

V současnosti průměrně odtéká z Mlýnského povodí $3,9 \text{ mg.l}^{-1}$ dusičnanů. Naopak, obsah v odtékajících vodách z lesních a mokřadních povodí zůstává stabilní napříč sledovanými roky. V roce 2024 z Horského potoka odtéká průměrně $1,6 \text{ mg.l}^{-1}$, zatímco z Bukového potoka $2,5 \text{ mg.l}^{-1}$.

4. Diskuze

Půda obsahuje největší aktivní zásobu suchozemského organického uhlíku, který má potenciál zmírňovat změny klimatu. Důležitou roli zde hraje i vegetace, která je schopna atmosférický uhlík sekvestrovat a zadržovat v půdě (Post et Kwon, 2000). Malé změny v zásobě uhlíku v půdě tak mají za následek významný dopad na koncentraci CO_2 v atmosféře. Tok půdního uhlíku se mění v závislosti na řadě faktorů (Stockmann et al., 2013). Významná je například antropogenní činnost, konkrétně zemědělství. Vegetace je díky své různé kořenové soustavě hlavním determinantem vertikálního rozložení uhlíku v půdě (Lehmann et al., 2020).

Povodí Mlýnského potoka s omezeným množstvím nadzemní biomasy rostlin (pastva) a ovlivněným vodním režimem (systematické odvodnění) se vlivem dopadajícího slunečního záření na povrch snadněji přehřívá (Procházka et al., 2019). Což se dále odráží na chemismu z něho odtékajících vod nebo na složení zdejších půd, ve kterých se díky vyšším teplotám okolního prostředí urychluje proces mineralizace. Naopak mokřadní a lesní plochy Horského a Bukového potoka s bohatší strukturou vegetačního pokryvu a větším objemem zadržované vody se s dopadajícím slunečním zářením lépe vypořádávají (Kašpárek et al., 2022). Vliv rozdílné povrchové teploty lze pozorovat i na projevu evapotranspirace monitorovaných území, jejíž množství se odvíjí od různé krajinné struktury a managementu (Hesslerová et al., 2019). Evapotranspirace na plochách povodí s lesním a mokřadním vegetačním pokryvem, dostatkem vody a příkonem sluneční energie dosahuje v měsíci květnu až 6 mm.den^{-1} , zatímco na plochách odvodněných pastvin Mlýnského potoka ve stejném období přibližně 3 mm.den^{-1} (Procházka et al., 2019). I přes zvyšující se průměrné teploty vzduchu a množství dopadajícího slunečního záření zůstává roční úhrn srážek v této oblasti s neprokazatelným rostoucím trendem za období 1998 až 2023.

Přes podobné srážkové poměry jsou však dokumentovány výrazné rozdíly v odtoku vody ze tří povodí, jež jsou ovlivněny také stavem a změnami půdních podmínek. Nejmenší rozdíly v rámci jednotlivých hloubek jsou patrné v přírodě nejbližším prostředí lesních a mokřadních ploch Horského povodí, což lze přisuzovat stálým, dobře strukturovaným půdám s rozvinutou kořenovou soustavou a zejména největším podílem půdní organické hmoty a SOC, který velmi efektivně zadržuje vodu a další živiny v krajině (Yamashita et al., 2021). Největší změny v pH jsou patrné v Mlýnském a Bukovém povodí, zde se půdy původně projevily jako nejvíce kyselé. To lze přičítat zdejším kyselým kryptopodzolům, kyselejší depozici v minulosti a opadu jehličí, který ovlivňuje především svrchní opadovou vrstvu a svrchní část půdy (hloubka A, 0–10 cm) (Křeček et al., 2017). V prvních letech sledování byly půdy ještě v důsledku kyselých depozic z minulosti označeny jako kyselé, zatímco v posledním období je lze již označit jako slabě kyselé, a to ve všech sledovaných povodích.

Zřetelné rozdíly a vývoj byly zaznamenány v kvalitě odtékající vody. U Mlýnského potoka došlo k poklesu hodnot elektrické vodivosti vody z hodnot kolem $110 \text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$ na hodnoty kolem $90 \text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$, zatímco u Horského a Bukového potoka jsou poloviční a příliš se za hodnocené období nezměnily. Z grafu vývoje el. vodivosti (Obr. 7) jsou patrné rozdíly mezi povodím Mlýnského potoka (odvodněná pastvina) a povodími s lesem a mokřady (Bukový a Horský potok). V povodí Mlýnského potoka je viditelný pokles vodivosti během minimálně poloviny sledovaného období, což naznačuje jistou regeneraci povodí spojenou s útlumem zemědělské činnosti po roce 1989. Nepatrný nárůst hodnot vodivosti v Horském a Bukovém potoce v posledním desetiletí je spojen s vlivem suché periody (2014–2019), poklesem hladiny podzemní vody a intenzivnějším vyplavováním látek v důsledku mineralizace půdního profilu. Tento vliv na uvolňování látek potvrzují i autoři Zelíková et Šípek (2023) ve své práci. Povodí horských a podhorských potoků jsou klíčová pro místní ekosystémy a fungují jako citlivé indikátory znečištění a klimatických změn. Zvyšující se teploty a častější přívalové deště vedou k významným změnám v biochemickém složení vod a jejich kolísání (Fraindová et al., 2023). U povodí Mlýnského potoka je také zřejmý nejvyšší rozptyl hodnot vodivosti, zatímco v Horském a Bukovém potoce je kolísání hodnot nižší. Podobně je tomu u koncentrace jednotlivých iontů. Zvýšené koncentrace dusičnanů v počátečním období ($10,6 \text{ mg.l}^{-1}$) poklesly na méně než polovinu. V současnosti průměrně odtéká z Mlýnského povodí $3,9 \text{ mg.l}^{-1}$ dusičnanů. Naopak, obsah v odtékajících vodách z lesních a mokřadních povodí zůstává poměrně vyrovnaný po celé období. V roce 2024 z Horského potoka odtéká průměrně $1,6 \text{ mg.l}^{-1}$, zatímco z Bukového potoka $2,5 \text{ mg.l}^{-1}$. Fang et al. (2015) uvádí, že lesní a mokřadní ekosystémy jsou hlavními zdroji ukládání dusíku v méně úrodných horských oblastech.

Ouhele et al. (2021) potvrzují, že omezení ztrát dusíku v lesních ekosystémech zlepšuje růst makrofyt a vegetace a zároveň snižuje vyplavování půdního organického uhlíku a dalších živin pryč z prostředí.

Ztráty látek se do značné míry odvíjí od hydrologické bilance povodí, resp. schopnosti krajiny hospodařit s vodou a reagovat na extrémy. Nejvyšší kolísání průtoku na závěrných profilech jednotlivých povodí je pravidelně zaznamenáváno u Mlýnského potoka. Zatímco minimální zaznamenané denní průtoky se po delším bezesrážkovém období příliš neliší: 6,7 l.s⁻¹ Mlýnský potok, 7,1 l.s⁻¹ Horský potok a 6,8 l.s⁻¹ pro Bukový potok, při srážkovo-odtokových epizodách a v průměrném ročním odtoku jsou rozdíly významné. Z dlouhodobého kontinuálního monitoringu vyplývá, že z povodí s převažujícími odvodněnými pastvinami odtéká v průměru 59 % veškeré spadlé vody ve srážkách, z lesního povodí odteče 33 % a z povodí tvořeného mokřady, lesem a loukami v průměru 38 % (Procházka et al., 2019). Tyto odlišné odtoky lze přisuzovat rozdílnému krajinnému pokryvu a způsobu hospodaření, který se v jednotlivých povodí uplatňuje (Siegwald et De Jong., 2020). Antropogenně nejvíce pozměněné prostředí s převahou lučních biotopů hůře zadržuje vodu a živiny obsažené v odvodněných a utužených půdách. Naopak lesní a mokřadní plochy s lépe rozvinutou kořenovou soustavou, půdní strukturou, větší biodiverzitou a obsahem půdní organické hmoty (SOM) lépe zadržují vodu a látky v krajině (Lehmann et al., 2020).

5. Závěr

Rozdílné způsoby hospodaření v krajině vedou k rozdílným v hydrologické bilanci, kvalitě odtékající vody nebo teplotních projevů povrchu. To potvrzuje dlouhodobý monitoring tří malých experimentálních povodí na JV Šumavy. Dotčené oblasti se od roku 1998 oteplují v průměru o 0,4 °C za dekádu, narůstá suma globálního záření a výrazně se nemění roční úhrn srážek. Sledovaná povodí se liší svým krajinným pokryvem a využitím území, potažmo měřenými parametry a pozorovanými projevy. Zatímco povodí Mlýnského potoka s převahou odvodněných pastvin vykazuje nižší obsah organické hmoty v půdě, zvýšený odtok vody, větší kolísání průtoku nebo vyšší koncentrace rozpuštěných látek v odtékající vodě, v povodích Bukového a Horského potoka s lesním a mokřadním pokryvem jsou projevy a změny v hodnocených parametrech vyrovnanější. Vyšší zjištěné zásoby půdního organického uhlíku v lesních a mokřadních půdách přispívají k lepší schopnosti zadržování vody a živin, což má pozitivní dopad na kvalitu povrchových vod. Naopak, odvodněné pastviny vykazují nižší zásoby organického uhlíku v půdě a vyšší hodnoty elektrické vodivosti odtékající vody, které odrážejí vyšší vyplavování látek z krajiny. V meziročním porovnání došlo za více než 25 let u všech povodí ke snížení obsahu půdní organické hmoty a nárůstu hodnot pH půdy, nejvíce v povodí Mlýnského potoka. Zde došlo za stejnou dobu i k největším změnám kvality odtékající vody v podobě snížení hodnot elektrické vodivosti a koncentrací rozpuštěných látek. Přesto jsou tyto koncentrace i několikrát vyšší než v odtékající vodě z povodí Horského a Bukového potoka, kde je naopak v posledních letech pozorován mírný nárůst hodnot. Ten by mohl být způsoben postupným oteplováním a zvýšenou evapotranspirací, které mají za následek pokles hladiny podzemní vody a možné vyplavování látek z půdního profilu.

Tři šumavská experimentální povodí prostřednictvím komplexního monitoringu potvrzují zásadní vliv typu krajinného pokryvu a způsobu využití území na mnohé funkční parametry krajiny a dokumentují i jejich vývoj v měnících se klimatických podmínkách. Výsledky sledování potvrzují také nenahraditelnou úlohu přírodních ekosystémů pro lepší udržitelnost hospodaření s vodou v krajině a kvality životního prostředí.

Literatura

- FANG, Y., KOKA, K., MAKABAE, A., 2015. Microbial denitrification dominates nitrate losses from forest ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences.*, č. **112**, s. 1470-1474. ISSN 0027-8424
- FRAINDOVÁ, K., MATOUŠKOVÁ M., KLIMENT, Z., 2022. Headwaters biogeochemistry focused on different rainfall-runoff conditions, and the role of waterlogged areas: a comparative study of Czech mountains. *Hydrological Sciences Journal*, s. 588-612. In: Hnilicová, S., Tesař, M. (ed.): *Hydrologie malého povodí 2023*. Sborník příspěvků z konference. 30. 5. – 1. 6. 2023, Praha, Ústav pro hydrodynamiku AVČR, v. v. i., s. 169-176. ISBN 978-80-87117-22-4.

- HESSLEROVÁ, P., POKORNÝ, J., HURYNA, H., HARPER, D., 2019. Wetlands and Forests Regulate Climate via Evapotranspiration. In: *Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use. Ecological Studies*, č. 238. Springer, s. 63–69 Cham. ISBN 978-3-030-14861-4-4
- HOLZMANN, H., 2018. Status and perspectives of hydrological research in small basins in Europe. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, č. 44. s. 601-614. ISSN 1697-9540
- KAŠPÁREK, L., KOŽÍN, R., DATEL, J. a PELÁKOVÁ, M., 2022. Odhad přírodních zdrojů podzemní vody v hydrogeologických rajonech v České republice v měnících se klimatických poměrech 1981–2019. In: *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2022, č. 64, s. 4–13. ISSN 0322-8916.
- KRÁM, P., LAMAČOVÁ, A., YU, X., 2023. Hydrologický monitoring povodí Lysina (1990-2022) a modelování odtoku pod vlivem klimatické změny 21. století. In: Hnilicová, S., Tesař, M. (ed.): *Hydrologie malého povodí 2023*. Sborník příspěvků z konference. 30. 5. – 1. 6. 2023, Praha, Ústav pro hydrodynamiku AVČR, v. v. i., s. 67–70. ISBN 978-80-87117-22-4.
- KŘEČEK, J.; HAIGH, M.; HOFER, T.; KUBIN, E.; PROMPER, C., 2017. Ecosystem Services of Headwater Catchments; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, s. 257–269. ISBN 3-319-57945-2.
- LEHMANN, J., HANSEL, C.M., KASIER, C., 2020. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nat. Geosci.* č. 13, s. 529–534. ISSN 1752-0894
- OULEHLE, F., GOODALE, L. C., D EVANS, C., CHUMAN T., HRUŠKA, J., KRÁM, P., NAVRÁTIL, T., TESAŘ, M., AČ, A., 2021. Dissolved and gaseous nitrogen losses in forests controlled by soil nutrient stoichiometry. *Environmental Research Letters*, roč. 16 č. 6: 064025. ISSN 1748-9326
- ORSÁG, M., FISCHER, M., TRNKA, M., BROTON, J., POZÍNKOVÁ, G., ŽALUD, Z., 2022. Trends in Air Temperature and Precipitation in Southeastern Czech Republic, 1961-2020. *Acta Universitatis Agriculturae. In: Silviculturae Mendelianae Brunensis* č. 70, s. 283–294. ISSN 1211-8516.
- PENNA, D., 2023. Erb-network [online]. Euro-Mediterranean Network of Experimental and Representative Basin [cit. 2024-08-09]. Dostupné z WWW: <https://erb-network.simdif.com/>
- POST, M., KWON, C., 2000 Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global change biology*, roč. 6 č.3, s. 317–327. ISSN 1354-1013
- PROCHÁZKA, J., ČERNÝ, M., TESAŘOVÁ, B., VÁCHA, A. 2023a: Experimentální povodí s různým způsobem využití – 25 let monitoringu vodních a látkových toků na Šumavě. In: Hnilicová, S., Tesař, M. (ed.): *Hydrologie malého povodí 2023*. Sborník příspěvků z konference. 30. 5. – 1. 6. 2023, Praha, Ústav pro hydrodynamiku AVČR, v. v. i., s. 320–328. ISBN 978-80-87117-22-4.
- PROCHÁZKA, J., ČERNÝ, M., 2023b. Funkce vegetačního pokryvu v malém povodí. Distribuce sluneční energie, bilance vody a látek – 25 let monitoringu tří experimentálních povodí: odvodněná pastvina, mokřady, les. In: *Biomasa v trvale udržitelné krajině – digitální technologie, aktuální trendy a výzvy ve výuce*. Elektronický sborník ve formátu .pdf. České Budějovice 370 05, Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, s. 27–32. ISBN 978-80-7694-050-5.
- PROCHÁZKA, J., POKORNÝ, J., VÁCHA, A., NOVOTNÁ, K., KOBESOVÁ, M., 2019. Land cover effect on water discharge, matter losses and surface temperature: Results of 20 years monitoring in the Šumava Mts. *Ecological Engineering*, s. 220-234. ISSN 09258574
- RIPL, W., 1995. Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: the energy-transport-reaction (ETR) model. *Ecological modelling*, č. 78.1–2, s. 61–76. ISSN 034-3800
- SIEGWALD, L., DE JONG, C., 2020. Anthropogenic impacts on water quality in a small, forested mountain catchment: A case study of the Seebächle, Black Forest, Southern Germany. *Sustainability*, s. 12–21: 9022. ISSN 2071-1050
- STOCKMANN, U., ADAMS, A., M., CRAWFORD, W., FIELD, J., HENAKAARCHCHI, N., et al., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, č. 164, s. 80-99. ISSN 01678809

VOKOUN, M., JURAS, R., MORAVEC V., 2023. Vliv změny vegetačního krytu na odtokové poměry malých povodí na Šumavě. In: Hnilicová, S., Tesař, M. (ed.): *Hydrologie malého povodí 2023*. Sborník příspěvků z konference. 30. 5.–1. 6. 2023, Praha, Ústav pro hydrodynamiku AVČR, v. v. i., s. 359–367. ISBN 978-80-87117-22-4.

YAMASHITA, Y., KOJIMA, D., YOSHIDA N., SHIBATA, H., 2021. Relationships between dissolved black carbon and dissolved organic matter in streams. *Chemosphere*. č. 271:129824. chemosphere. ISSN 00456535

ZELÍKOVÁ, N., ŠÍPEK, V., 2023. Kam a kolik vody odvádí stromy? Modelování vlivu smrkových a bukových porostů na odtoky vody v půdě během extrémních klimatických podmínek. In: Hnilicová, S., Tesař, M. (ed.): *Hydrologie malého povodí 2023*. Sborník příspěvků z konference. 30. 5.–1. 6. 2023, Praha, Ústav pro hydrodynamiku AVČR, v. v. i., s. 337–343. ISBN 978-80-87117-22-4.

Problematika a možnosti vyhodnocení měření vlhkosti půdy v ČHMÚ

Problems and possibilities of evaluation of soil moisture measurement in ČHMÚ

Petr Hora

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

Abstrakt

Na vybraných klimatologických stanicích ČHMÚ probíhají měření půdní vlhkosti čidlem VIRRIB od firmy AMET v hloubkách 0–10 cm, 10–50 cm a 50–100 cm. Vlhkost půdy je udávána jako objemová vlhkost v %. Měření poskytuje často spíše relativní údaje než údaje absolutně přesné. S pomocí vhodných metod lze nicméně absolutní údaje s určitou přesností odhadnout. V případě vyhodnocení půdní vlhkosti je důležité znát půdní hydrolimity, polní kapacitu a bod vadnutí. Ty udávají maximální a minimální hodnoty, v nichž by se měla vlhkost půdy na dané lokalitě pohybovat. Tyto údaje mohou posloužit právě pro kalibraci původních ne zcela správně naměřených vlhkostí půdy. Pomocí půdních hydrolimitů lze nicméně naměřenou půdní vlhkost přepočítat na procenta využitelné vodní kapacity, zjistit kolik vody dostupné rostlinám se v půdě nachází a případně i odhadnout adekvátní závlahovou dávku. Správné hodnoty půdní vlhkosti v kombinaci s naměřenými srážkami dokáží vyčíslit i aktuální evapotranspiraci.

Klíčová slova: vlhkost půdy, VIRRIB, hydrolimity, evapotranspirace, oprava dat

Abstract

At selected climatological stations of the ČHMÚ, soil moisture is measured with the VIRRIB sensor from the AMET company at depths of 0–10 cm, 10–50 cm and 50–100 cm. Soil moisture is given as volume moisture in %. The measurements often provide relative rather than absolutely accurate data. However, with the help of suitable methods, absolute data can be estimated with some accuracy. When evaluating soil moisture, it is important to know soil hydrolimits, field capacity and wilting point. These indicate the maximum and minimum values in which the soil moisture should vary in a given location. These data can be used for the calibration of the original not quite correctly measured soil moisture. Using soil hydrolimits, however, the measured soil moisture can be converted into percentages of usable water capacity, find out how much water available to plants is in the soil and, if necessary, estimate the adequate irrigation dose. Correct soil moisture values in combination with measured precipitation can also calculate current evapotranspiration.

Keywords: soil moisture, VIRRIB, hydrolimits, evapotranspiration, data correction

1. Úvod

Český hydrometeorologický ústav zajišťuje meteorologická a hydrologická měření v souladu s metodikou WMO. V oblasti agrometeorologie jsou důležité údaje nejen o klasických meteorologických prvcích, ale také o půdním prostředí. Obecně lze na dostupnost vody pro rostliny usuzovat ze srážkových úhrnů, které však zcela nevyjadřují obsah vody v půdě. Proto je vhodné přímo měřit vlhkost půdy.

Objemová vlhkost půdy je míra obsahu vody v půdě vyjádřená jako poměr objemu vody k celkovému objemu půdy.

Rozmezí hodnot, ve kterých se vlhkost půdy pohybuje, je předurčeno půdními hydrolimity (Havlíček et al. 1986). Plná vodní kapacita (nasákivost, pórovitost) je vlhkost půdy, kdy jsou všechny póry zaplněny vodou. Je to dočasná vlhkost bezprostředně po dešti. Vlhkost půdy nemůže tuto hranici teoreticky překročit. Retenční vodní kapacita (polní kapacita)

je množství vody, které je půda schopna zadržet po odtoku volné vody. Nad touto mezí by se tedy vlhkost půdy neměla vyskytovat v bezsrážkovém období. Bod vadnutí je vlhkost půdy, kdy již voda není přístupná pro rostliny. Přítomná voda je pevně vázána na částice půdy. Půdní vlhkost by pod tuto hranici již neměla být schopna poklesnout. Výjimkou je povrchová vrstva půdy, kde vlivem sluneční radiace může dojít k většímu vysušení půdy. Po většinu roku by se tedy vlhkost půdy měla pohybovat mezi bodem vadnutí a retenční vodní kapacitou. Jen krátkodobě po deštích se vlhkost půdy může dostat až k hranici plné vodní kapacity.

2. Metodika

Na vybraných klimatologických stanicích ČHMÚ probíhají měření půdní vlhkosti čidlem VIRRIB (AMET) v hloubkách 0–10 cm, 10–50 cm a 50–100 cm. Vlhkost půdy je udávána jako objemová vlhkost v %. V současnosti (rok 2024) lze v databázi ČHMÚ Clidata nalézt aktuální údaje z 34 stanic. Na rozdíl, od většiny ostatních klimatologických prvků, jejichž měření je u dobrovolnických stanic spravováno pobočkami ČHMÚ a u profesionálních stanic oddělením profesionální staniční sítě, jsou půdní vlhkosti spravovány výlučně oddělením biometeorologických aplikací. Snímače VIRRIB měří půdní vlhkost pomocí elektromagnetického signálu transmisní fázovou metodou – snímače využívají závislosti fázové rychlosti nanosekundových impulsů na vlhkosti okolního prostředí. Vlastní čidlo se skládá ze dvou soustředných kruhů z nerezové oceli, spojených v tělese snímače, kde je umístěna elektronická část. Pro monitorování vlhkosti půdy v přízemní vrstvě půdy jsou snímače instalovány ve vodorovné poloze, vlhkost půdy je pak měřena v tenké vrstvě silné okolo 5 cm. Ve svislé poloze je tloušťka monitorované vrstvy přibližně 40 cm. Mezi výhody měření patří rychlost odezvy na změnu vlhkosti prostředí. Hlavní nevýhodou je ne vždy zcela stoprocentní dodržení standardizace při výrobě, která klade zvýšené nároky na kalibraci snímačů (Možný 1999).

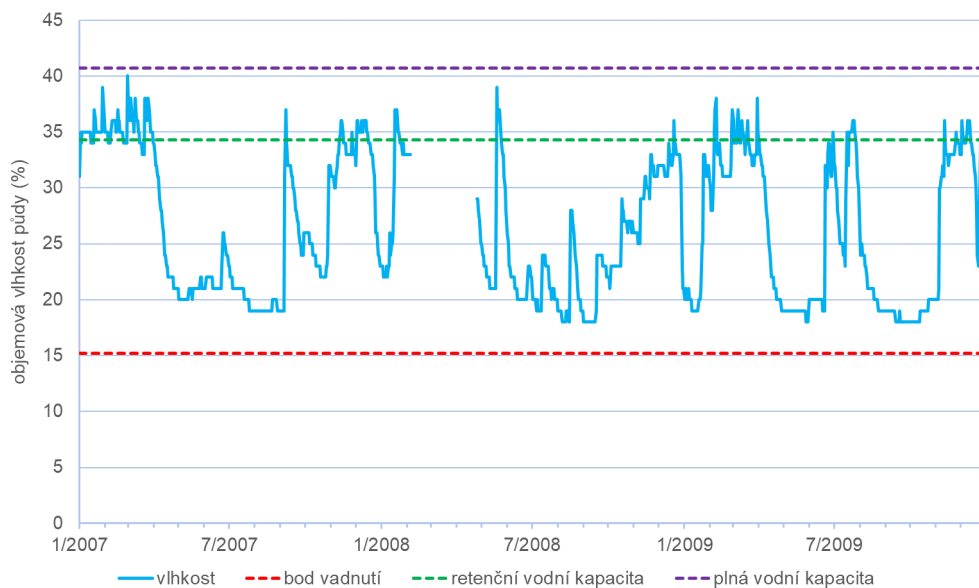
Jednou z nejstarších a nejpresnějších metod určení vlhkosti půdy je gravimetrická metoda. Při ní se odebere vzorek půdy, který se zváží, poté se vysuší a znovu zváží. Rozdíl mezi váhou před a po vysušení určuje obsah vody, který se pak přepočítá na objemovou vlhkost.

Kromě udávání celkové objemové vlhkosti v půdě lze uvádět jen vlhkost půdy přístupnou rostlinám. Což je vlhkost půdy, od níž se odečte bod vadnutí. Toto se ale většinou neuvádí přímo v jednotkách procent objemové hmotnosti půdy, ale v mm, případně v procentech využitelné vody v půdě. Využitelná voda v půdě je právě rozdíl mezi retenční vodní kapacitou a bodem vadnutí. Je-li vlhkost půdy rovna bodu vadnutí, je zásoba využitelné vody v půdě 0 %. Je-li vlhkost rovna retenční vodní kapacitě, je zásoba využitelné vody v půdě 100 %. Krátkodobě, po deštích, může být zásoba využitelné vody v půdě vyšší než 100 %. Tato zásoba vody v půdě se rovněž dá vyjádřit v mm, kdy uvažujeme vodu v půdě pouze v jednom, vertikálním, rozměru. Pro půdní profil o určité hloubce je možné obsah vody v půdě vyčíslit v rozměru délky. Je-li například retenční vodní kapacita 25 % a bod vadnutí 10 %, bude využitelná voda v půdě 15 %. V případě půdního profilu 100 mm je 15 % 15 mm. V případě profilu o hloubce 1000 mm, je 15 % 150 mm. Pro půdní profil o hloubce 500 mm bude využitelná voda v půdě 75 mm. Znalost využitelné vody v půdě je nutná pro modelové výpočty půdní vlhkosti (Allen et al. 1998).

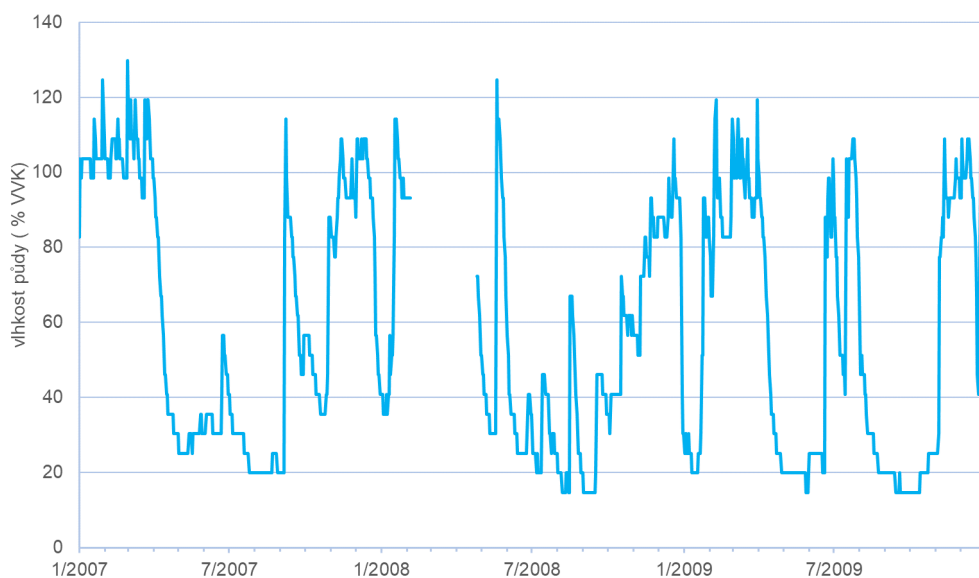
3. Výsledky

Vlhkosti půdy naměřené přístroji VIRRIB, ať už v rámci pravidelného měření na ČHMÚ, tak i speciálních měření v nejrůznějších projektech, nejsou vždy kompatibilní s údaji zjištěnými gravimetrickou metodou. A to jak samotnou aktuální půdní vlhkostí i půdními hydrolimity.

Pedologický průzkum prováděný na stanicích ČHMÚ vyčíslil pro půdní profil 0–10 cm bod vadnutí v Brně-Tuřanech zhruba na 15 %, retenční vodní kapacitu na 34 % a plnou vodní kapacitu na 41 %. V letech 2007–2009 (obr. 1) se naměřené vlhkosti půdy pohybovaly mezi 18 a 45 %. V případě vysokých vlhkostí je kompatibilita mezi údaji velmi dobrá, v případě nízkých vlhkostí se zdá, že přístroje VIRRIB udávají bod vadnutí trochu výše, zhruba na svých 18 %. K dispozici v tomto případě nejsou údaje o aktuálních půdních vlhkostech zjištěných gravimetrickou metodou. Přepočtené vlhkosti na procenta využitelné vodní kapacity by se v případě respektování obou zdrojů dat pohybovaly mezi 18 a 130 % (obr. 2).



Obr. 1 Objemová vlhkost půdy v Brně-Tuřanech v hloubce 0–10 cm v letech 2007–2009.



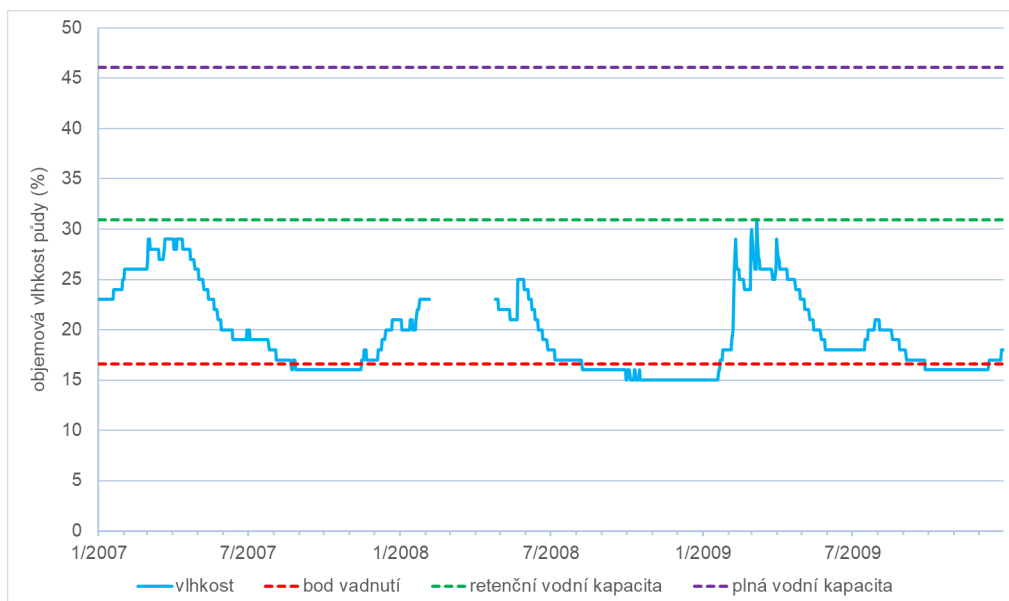
Obr. 2 Zásoba využitelné půdní vody v Brně-Tuřanech v hloubce 0–10 cm v letech 2007–2009.

V půdním profilu 50–100 cm (obr. 3) udává pedologický průzkum bod vadnutí zhruba 17 %, minimální vlhkosti půdy naměřené přístroji VIRIRB v letech 2007–2009 ale zaznamenaly vlhkosti až 15 % (v jednom roce) a 16 % ve dvou letech). Maximální vlhkosti půdy (neúplné údaje) byly naměřeny přístroji VIRIRB 31 %, když 31 % měla být hodnota retenční vodní kapacity a 46 % hodnota plné vodní kapacity. V tomto případě se tedy zdá, že hydrolimity kompatibilní s měřením přístroji VIRIRB by měly být trochu nižší, než ukázal pedologický průzkum.

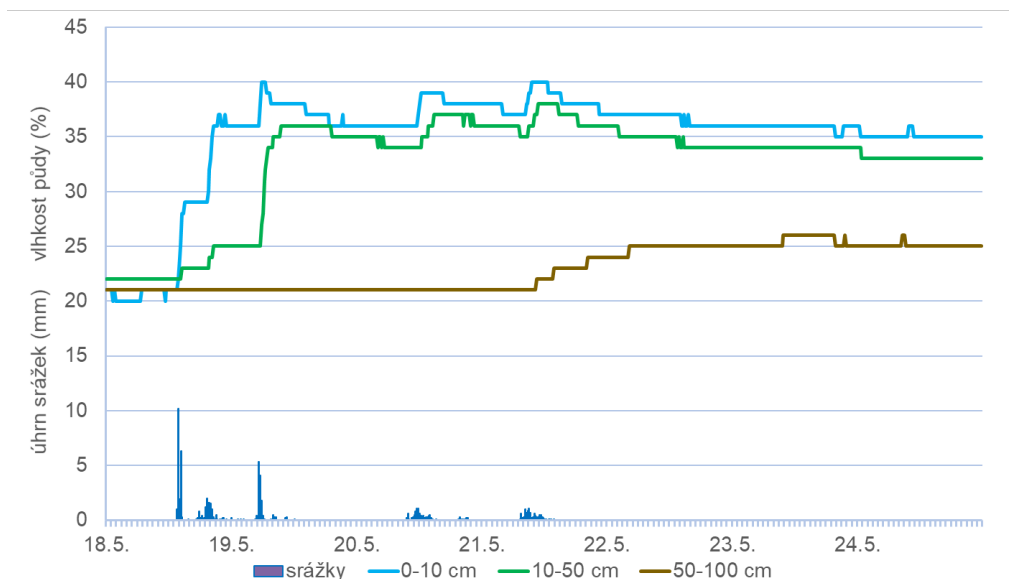
Obecně lze ale v tomto případě říci, že půdní vlhkosti naměřené přístroji VIRIRB celkově dobře odpovídají laboratorně zjištěným hydrolimitům.

Na případu z května 2008 lze vidět, jak půdní vlhkost reagovala na srážky (obr. 4). Jedná se o data v 15minutovém kroku. Na počátku byly vlhkosti půdy ve všech hloubkách nízké. Děšť 18. května se projevil hlavně na zvýšení vlhkostí v profilu 0–10 cm. V hloubce 10–50 cm se vlhkosti zvýšily jen mírně a to hlavně až v době, kdy byla využitelná vodní kapacita profilu 0–10 cm naplněna. Srážky 19. května zvýšily vlhkost půdy v profilu 0–10 cm už jen mírně a dočasně, tedy přesně

tak, jak očekáváme při vlhkosti půdy nad retenční vodní kapacitou. Vlhkost v hloubce 10–50 cm se zvýšila rovněž již k hranici retenční vodní kapacity. Vlhkost v hloubce 50–100 cm zůstávala stále ale konstantní. Teprve až srážky 21. května dokázaly způsobit zvýšení půdní vlhkosti i v profilu 50–100 cm.



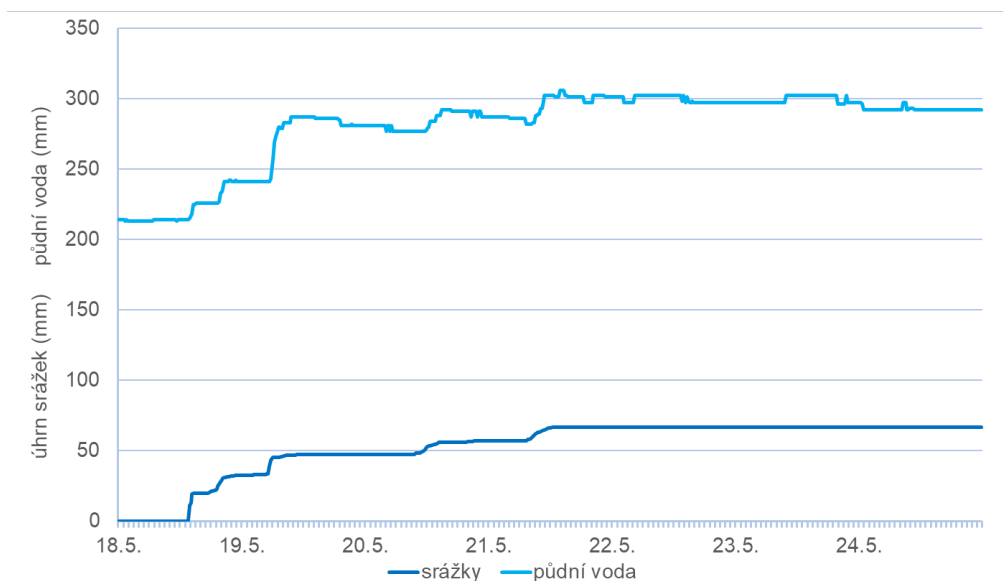
Obr. 3 Objemová vlhkost půdy v Brně-Tuřanech v hloubce 50–100 cm v letech 2007–2009.



Obr. 4 Vlhkost půdy a úhrn srážek v Brně-Tuřanech v květnu 2008.

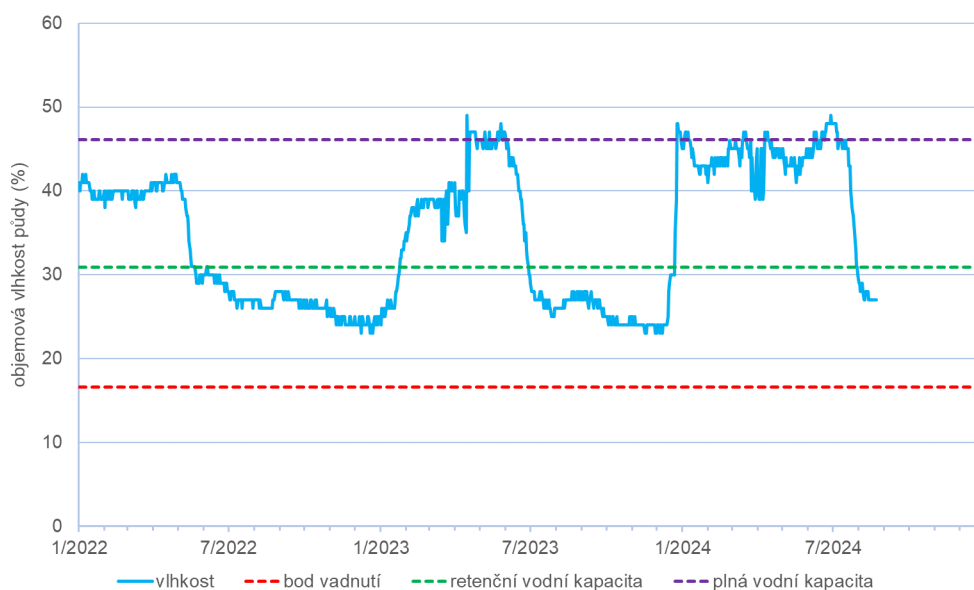
Jak již bylo vysvětleno výše, objemovou půdní vlhkost můžeme přepočítat na množství vody v půdě v jednotkách délky. Pro půdní profil 100 cm lze srovnat obsah půdní vody vypočtený z tří měření VIRIB se srážkovým úhrnem změřeným srážkoměrem (obr. 5). Obsah vody v půdě v profilu 100 cm se během sledovaného období zvýšil z 213 na 292 mm (v maximu 306 mm). Srážkový úhrn za sledované období byl 67 mm. Případné modelované zvýšení vlhkosti vody v půdě by tedy mělo být maximálně 67 mm. Bylo by nicméně menší o hodnotu evapotranspirace. Teoreticky by mohlo být menší ještě o množství vody, co by prosákla do hlubších vrstev, ale k tomu v našem případě nemohlo dojít. Případný povrchový přítok a odtok vody neuvažujeme, což je na rovinatém pozemku reálný předpoklad. Přístroje VIRIB ukazují na zvýšení

vody v půdě o 79 mm mezi začátkem a koncem, respektive na 93 mezi začátkem a maximem. To je tedy poněkud více než by odpovídalo srážkám 67 mm.



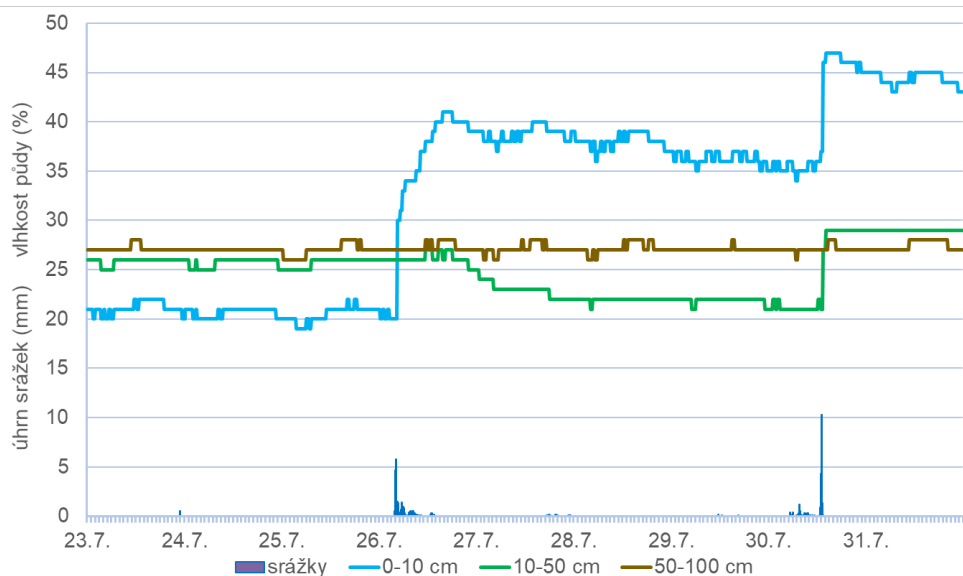
Obr. 5 Půdní voda a úhrn srážek v Brně-Tuřanech v květnu 2008.

V časových řadách půdní vlhkosti měřené přístroji VIRRIB lze občas najít zlom, po němž se naměřené hodnoty změní, aniž by k tomu byl důvod. V případě řady ze stanice Brno-Tuřany nemáme v databázi uloženy žádné informace, že by se na stanici s těmito přístroji cokoli dělo. U přístrojů v hloubce 0–10 cm a 10–50 cm je zřetelný nárůst naměřených vlhkostí půdy od roku 2015, u přístroje v hloubce 50–100 cm už od roku 2012. Na měření v profilu 50–100 cm posledních tří let je vidět, jak se naměřené vlhkosti půdy nalézají velkou část roku nad hydrolimitem retenční vodní kapacita (obr. 6). Lze rovněž vidět, že se vlhkosti ještě skokově změnily i v tomto období. Zatímco v roce 2022 a začátku roku 2023 byly maximální vlhkosti půdy dle měření kolem 40 %, v dubnu 2023 vzrostly až k 46 % a tam se nacházely i v roce 2024. Je zcela zřejmé, že tyto údaje o vlhkosti půdy jsou nekompatibilní s hydrolimity dříve zjištěnými. Současné hydrolimity by musely u této půdy být mnohem vyšší.

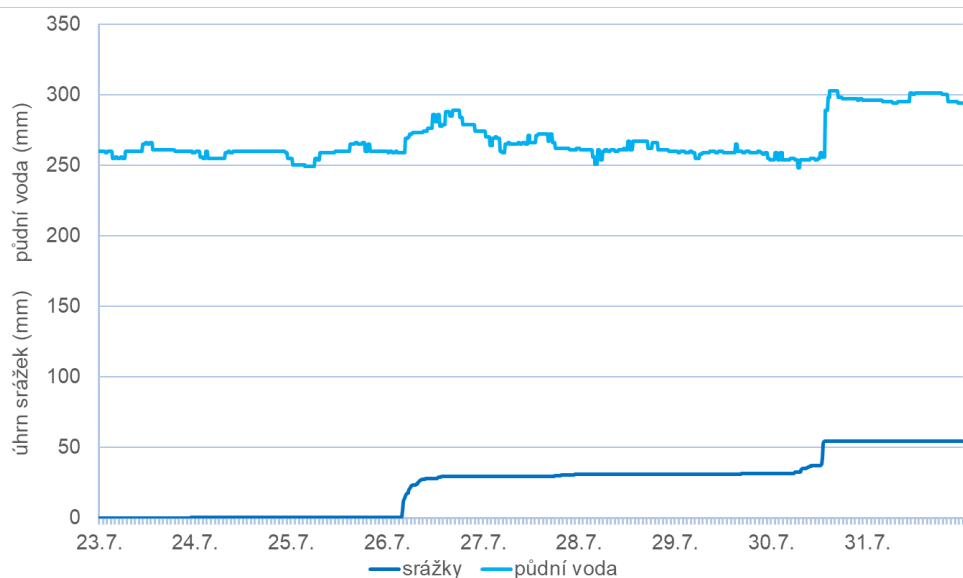


Obr. 6 Objemová vlhkost půdy v Brně-Tuřanech v hloubce 50–100 cm v letech 2022–2024.

Na příkladu z července 2023 vidíme, jak vlhkost půdy v jednotlivých hloubkách reaguje na srážkové úhrny (obr. 7). Na srážku 26. července zareagovala pouze vlhkost v profilu 0–10 cm. Až při srážce 30. července došlo k nárůstu vlhkosti půdy v profilu 10–50 cm). Celkový obsah půdní vody v tomto případě v profilu 0–100 cm nereflektuje srážkové úhrny tak dobře, jak to bylo v na příkladu z května 2008 (obr. 8). Rozdíl v zásobě vody na začátku a na konci období ale srážkovému úhrnu naopak odpovídá lépe.



Obr. 7 Vlhkost půdy a úhrn srážek v Brně-Tuřanech v červenci 2023.



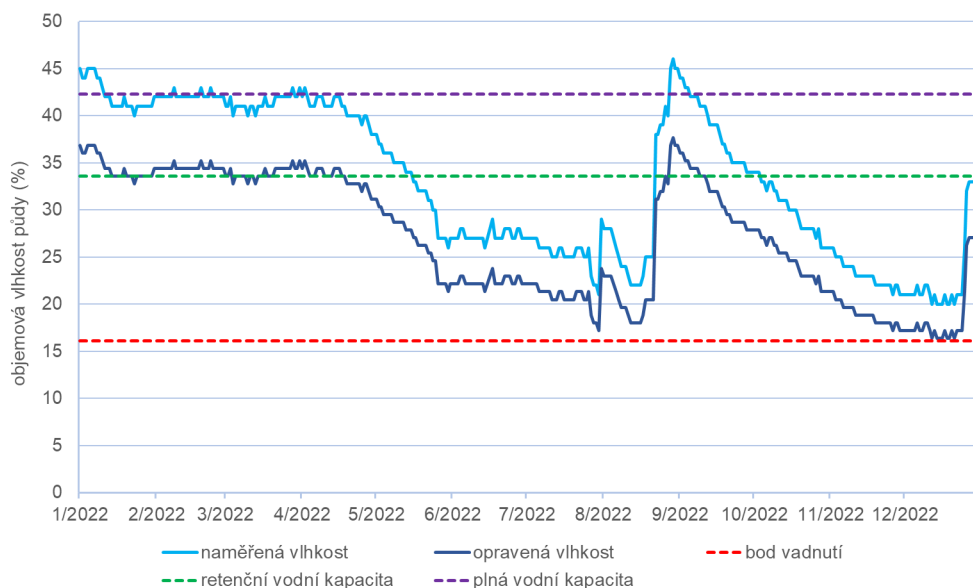
Obr. 8 Půdní voda a úhrn srážek v Brně-Tuřanech v červenci 2023.

4. Diskuze

U dat naměřených přístroji VIRRIB vystává otázka, zdali jimi naměřené vlhkosti půdy vždy odpovídají realitě. U těchto přístrojů je uvedeno, že je velmi důležitá kalibrace. V praxi se v časových řadách občas objeví skokové změny neodpovídající meteorologickým podmínkám. Po těchto změnách se zdá, že se změnila hydrolimity v dané půdě. Z praxe je známo, že dělá-li se u gravimetrické metody více odběrů pro laboratorní šetření, mohou se jejich výsledky dosti lišit. Pokud se podle snímačů VIRRIB odhadované hydrolimity liší od hydrolimitů zjištěných gravimetrickou metodou, je nutné zjistit, která z těchto měření jsou správně a která ne. Vhodné je, když se příležitostně zjišťuje vlhkost půdy i jinou metodou, s deklarovanou řádově větší přesností. Ideálně několikrát za rok a vždy na více místech kolem snímačů VIRRIB. Rovněž je potřeba, aby se tato měření konala jak v době vyšších tak nižších vlhkostí půdy. Čím více měření, tím větší jistoty lze v následném usuzování na kvalitu dat VIRRIB získat.

Pokud se přijme závěr, že se hodnoty naměřené přístroji VIRRIB odchylují od skutečnosti, existuje možnost pokusit se o jejich nápravu. Ta je různá podle dat, která jsou k dispozici. Pokud je k dispozici časté sekundární měření půdní vlhkosti jinou metodou, o níž jsme přesvědčeni, že poskytuje správná data, pak je pro období homogenních dat naměřených čidly VIRRIB možné získat přepočtené hodnoty. To je možné ale jen tehdy, že jsou paralelní měření prováděna v celém rozsahu půdních vlhkostí, tedy jak v době sucha, tak vlhka.

Pokud nejsou sekundární měření půdní vlhkosti k dispozici, ale jsou k dispozici správně zjištěné hydrolimity, pak lze data VIRRIB přepočítat tak, aby s těmito hydrolimity byla kompatibilní. Zde existuje metoda, že se přepočet děje jen podle hydrolimitu retenční vodní kapacity. Pokud například VIRRIB signalizuje retenční vodní kapacitu 40 % a gravimetrická metoda říká, že tento hydrolimit je 30 %, přepočítají se všechna data VIRRIB násobkem 30/40. Vlhkost by se na úrovni retenční vodní kapacity měla vyskytovat pár dnů po vydatných deštích, které plně nasatí půdu, což v nižších horizontech půdy nastává převážně na jaře. Hodnoty v zimě při zmražené půdě není dobré uvažovat. V druhé metodě se pro přepočet použije vedle retenční vodní kapacity i bod vadnutí. Oprava půdní vlhkosti v profilu 10–50 cm v roce 2022 poskytla stejné výsledky při použití metody jednoho i dvou hydrolimitů (obr. 9).



Obr. 9 Naměřené a opravené objemové vlhkosti půdy v Brně-Tuřanech v hloubce 10–50 cm v roce 2022.

Takto opravené hodnoty půdní vlhkosti jsou pak kompatibilní se zjištěnými hydrolimity. Pokud tedy máme jistotu, že gravimetricky určené hydrolimity jsou správné, je tato úprava dat smysluplná. Při této úpravě dojde velmi často ke změně amplitudy dat. Podstatné nejsou absolutní hodnoty vlhkosti půdy, ale její změny. Ty vypovídají o tom, jak se vlhkost půdy mění. A pokud jsou tato data o změně korektní, musí být kompatibilní s údaji o srážkách a pak lze získat i informaci o velikosti evapotranspirace.

5. Závěr

Půdní vlhkosti naměřené přístroji VIRRIB poskytují dobrou informaci o relativní změně půdní vlhkosti. Při srovnání s jinými metodami zjišťování aktuální půdní vlhkosti a půdních hydrolimitů se ale často vyskytnou zřetelné rozdíly. Data měření VIRRIB neposkytují vždy zcela přesné absolutní hodnoty. V případě, kdy jsou k dispozici spolehlivá data o půdní vlhkosti z jiného měření, byť třeba jen v určitých časových úsecích, lze data měření VIRRIB upravit, aby byla se spolehlivým měřením kompatibilní. Vedle samotného srovnání naměřených aktuálních vlhkostí půdy lze ke kalibraci využít spolehlivě stanovených půdních hydrolimitů. Znalost půdních hydrolimitů, zvláště retenční vodní kapacity je zcela zásadní pro jakoukoli práci s půdními vlhkostmi. Teprve srovnáním aktuální vlhkosti půdy s hodnotami půdních hydrolimitů lze říci, jestli je půda suchá nebo vlhká. Každá půda má odlišné hodnoty půdních hydrolimitů a tedy pouhé srovnání jednotlivých hodnot aktuální půdní vlhkosti mezi různými půdami nedává velký smysl. Proto se často nepracuje přímo s naměřenou půdní vlhkostí, ale s hodnotami zásoby využitelné vody. Pro její správné určení je ale bezpodmínečně nutné znát přesné hodnoty aktuální vlhkosti i půdních hydrolimitů.

Půdní vlhkost lze vyjadřovat různým způsobem a jednotlivé metody nelze zaměňovat. Jak objemovou půdní vlhkost, hmotnostní půdní vlhkost, tak i zásobu využitelné vody v půdě vyjadřujeme v %, přesto se jedná o odlišné údaje.

Půdní vlhkost spolu se srážkovými údaji může poskytnout informaci o evapotranspiraci. Tu lze ze spolehlivých dat v případě měření v rovinném terénu velmi dobře spočítat v době výskytu půdních vlhkostí nižších než je retenční vodní kapacita. Při překročení retenční vodní kapacity dochází v půdě k odtoku do spodních úrovní a samotnou evapotranspiraci již nelze pro řešený půdní profil vypočítat. Při znalosti aktuální půdní vlhkosti a retenční vodní kapacity lze snadno vypočítat případnou závlahovou dávku.

Dočasná měření půdní vlhkosti se velmi často používají pro vývoj a kalibraci matematického modelu počítajícího evapotranspiraci a půdní vlhkost.

Měření půdní vlhkosti poskytuje velmi cenné údaje o půdní vodě. Poskytuje je ale jen tehdy, pokud jsou data měření spolehlivá. Proto je vždy nejdůležitější částí práce s naměřenými daty jejich kritické zhodnocení, otestování, zdali tato data správně reflektují srážkové úhrny a evapotranspiraci. Ideální je vedle tohoto kontinuálního měření mít k dispozici občasné měření půdní vlhkosti a zjištění půdních hydrolimitů řádově přesnější metodou.

Literatura

MOŽNÝ, M., 1999. Zkušenosti s měřením vlhkosti půdy snímači VIRRIB. In: *Meteorologické zprávy*, **52**, 1999, č. 5, ČHMÚ, s. 140–143. ISSN 0026-1173.

HAVLÍČEK, V. et al., 1986. Agrometeorologie. Praha: Státní zemědělské nakladatelství.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. & SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

AMET. Snímač objemové vlhkosti půdy VIRRIB [online]. AMET [cit. 25. 8. 2024]. Dostupné z WWW: <http://www.amet.cz/virribcz.html>.

Dlouhodobý vývoj půdních a přízemních teplot v jarních měsících na stanici Troubsko

Long-term development of soil and surface temperatures in the spring months at the Troubsko station

Jaroslav Lang, Tomáš Vymyslický

Zemědělský výzkum, spol. s r. o., Zahradní 1, 664 41 Troubsko
lang@vupt.cz

Abstrakt

Článek se zabývá hodnocením průměrných denních teplot, minimálních přízemních teplot a teplotami půdy v pěti centimetrech hloubky v měsících únor až květen v souvislé časové řadě od roku 2005 do roku 2023. Z naměřených dat byly vyvozovány závislosti a tendence průběhu teplot, ze kterých by mohly být vytvořeny predikce využitelné v zemědělské výrobě. Z teplotních analýz bylo zjištěno, že průměrná denní teplota v měsících únor a březen v čase stoupá, v dubnu a květnu dochází k poklesu. Naměřené hodnoty ale mají v letech značný rozptyl a nelze spolehlivě predikovat a kvantifikovat jejich další výskyt v nadcházejících letech. Dále bylo zjištěno, že průměr minimálních přízemních teplot se v únoru mírně zvyšuje, v měsíci březnu a květnu dochází k poklesu teplot. Výjimku tvoří měsíc duben, ve kterém dochází k výraznému nárůstu počtu dní s teplotami pod bodem mrazu, a tedy k poklesu průměrných minimálních přízemních teplot. Ohledně průběhu teplot půdy bylo z analýz zjištěno, že v únoru i březnu dochází k výraznému snížení počtu dní, ve kterých průměrná teplota půdy klesá pod bod mrazu. Celkově ze zjištěných trendů pohybu teplot nelze usuzovat, že existuje významná lineární závislost mezi měřenými parametry teplot s přibývajícími roky.

Klíčová slova: přízemní teplota, teplota půdy, přízemní mrazíky, průměrná denní teplota

Abstract

The article deals with the evaluation of average daily temperatures, minimum surface temperatures and soil temperatures five centimetres deep in the months of February to May in a continuous time series from 2005 to 2023. From the measured data, dependencies and tendencies of the course of temperatures were deduced, from which predictions usable in agricultural production could be made. From the temperature analyses, it was found that the average daily temperature in February and March increases over time, and decreases in April and May. However, the measured values have considerable variance over the years and it is not possible to reliably predict and quantify their further occurrence in the coming years. Furthermore, it was found that the average of the minimum ground temperatures increases slightly in February, while the temperatures decrease in March and May. The exception is April, in which there is a significant increase in the number of days with temperatures below freezing, and therefore a decrease in average minimum ground temperatures. Regarding the course of soil temperatures, it was found that in February and March there is a significant reduction in the number of days in which the average soil temperature drops below the freezing point. Overall, it cannot be concluded from the observed temperature trends that there is a significant linear dependence between the measured temperature parameters over the years.

Key words: ground temperature, soil temperature, ground freezers, average daily temperature

1. Úvod

Střídání ročních období a průběh počasí zásadním způsobem ovlivňuje zemědělskou výrobu. Zemědělská produkce je výhradně závislá na průběhu počasí a znalost klimatických podmínek stanoviště je klíčovým faktorem k úspěšné produkci

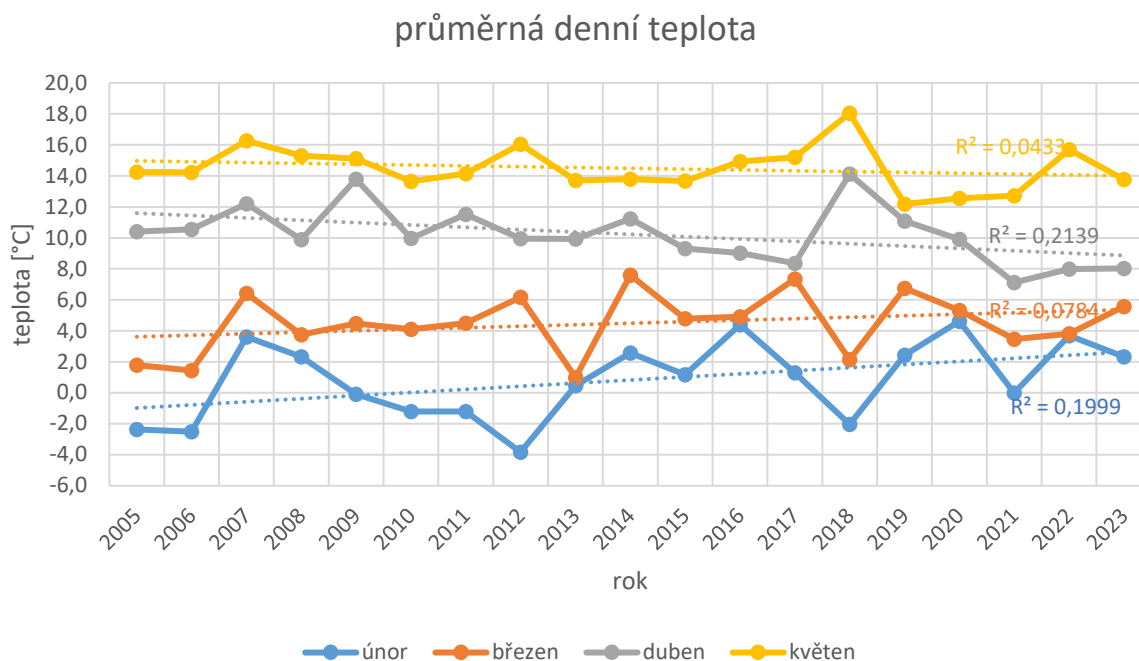
krmiv a potravin. V závislosti na počasí se odvíjí zemědělské práce, ať už se jedná o zpracování půdy, či vlastní zemědělskou produkci. V průběhu roku se vlivem počasí zemědělec potýká se situacemi, které mohou negativně ovlivnit produkci. Jedná se zejména o problémy spojené s nedostatkem nebo nadbytkem vody, s vysokými teplotami, nebo naopak chladem ve vegetačním i nevegetačním období. Na některé situace se lze připravit a poměrně rychle reagovat (závlahy, výběr druhů a odrůd vhodných pro lokalitu), některé situace ale nelze ovlivnit ať už z technologických, nebo jiných, i ekonomických důvodů.

Článek je zaměřený na pozorování průběhu teplot ve dvou nevegetačních a dvou vegetačních měsících. Jedná se o měsíce únor až květen. V těchto měsících je pozorována souvislá řada denních průměrných teplot, teplot minimálních přízemních a teplot v pěti centimetrech půdy. Jedná se o dlouhodobou souvislou řadu pozorování a sledování vývoje teplotních trendů v čase. Vývoj zimních i jarních teplot je důležitý z hlediska přezimování ozimých plodin a ovlivňuje také vzcházení a růst plodin setých brzy na jaře. Jednou ze základních ozimých plodin je například řepka ozimá (*Brassica napus var. napus*), která v dobrém zdravotním stavu snáší mrazy -15 až -20 °C, pod sněhovou pokrývkou ještě nižší. Nicméně již v únoru a březnu déletrvajícím mrazem okolo -8 až -10 °C doprovázeným suchým větrem, ničí všechny slabé rostliny (Venclová, 2023). Pokud působí jen holomrazy, stačí i kratší období s teplotami blízkými se k -18 °C, aby došlo k rychlému promrznutí vrchní vrstvy ornice a k poškození hypokotylové části rostlin řepky mrazem (Venclová, 2021). Podobně dochází při této teplotě k poškození odnožovacích uzlů obilnin. Největší škody způsobené vyzimováním nevznikají v letech s extrémně nízkými teplotami, ale v letech s častými změnami teplot v zimě, a to zejména v předjaří (Venclová, 2023). Na jarní mrazy jsou náchylné i některé plodiny, které se sejí brzy z jara. Patří sem například různé druhy jetelů a vojtěška, jejichž vzcházející rostliny mohou být vážně poškozeny jarními mrazy. Jarním mrazům, nebo vlivu nízkých teplot se nevyhne ani později setá kukuřice. Například v roce 2016 byla kukuřice poškozená působením nízkých teplot na území Severní Moravy a Slezska. Kukuřice poškozená mrazem na jaře zpomalí růst, na rostlinách dojde ke ztrátě turgoru, mohou se objevit i nekrózy listů. Chladné počasí může u kukuřice také způsobit zablokování příjmu některých živin, například fosforu (Bittner, 2016).

2. Metodika

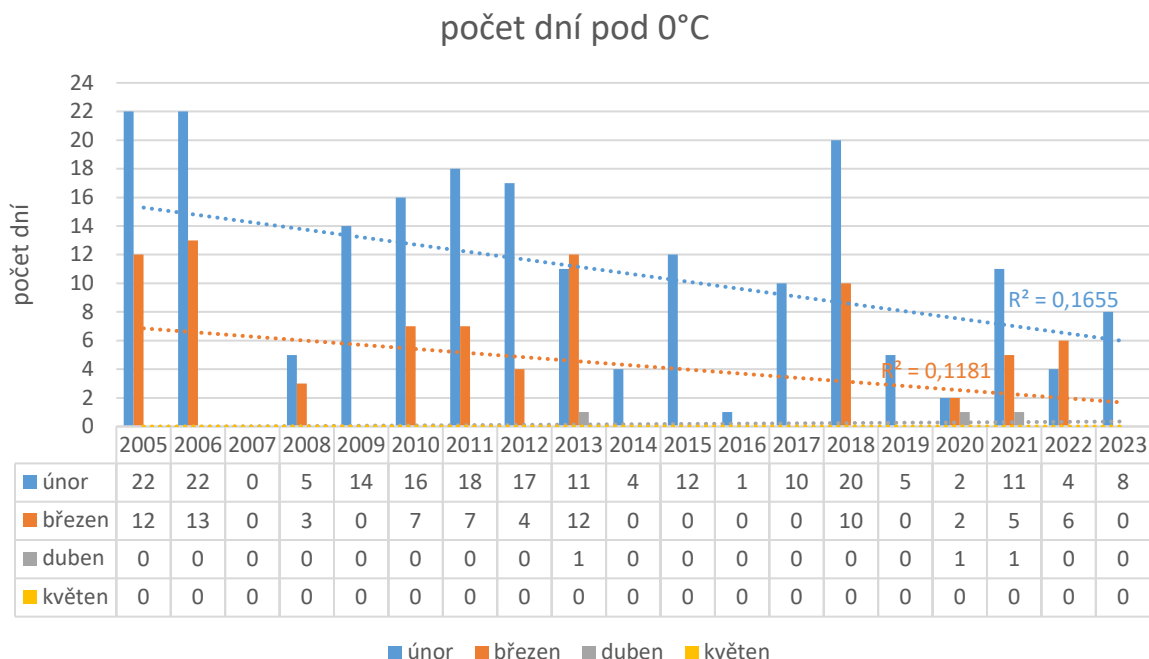
V článku jsou zpracovány naměřené hodnoty chodu průměrné denní teploty, přízemní teploty a teploty v 5 cm půdy v jarních měsících, resp. v měsících únor, březen, duben a květen od roku 2005 do roku 2023, celkem tedy 19 let. Průměrná denní teplota vzduchu a průměrná teplota půdy v 5 cm jsou počítány jako průměr teplot v klimatických termínech 7, 14 a 21 h místního středního slunečního času, přičemž večerní termín se počítá dvakrát. Přízemní teplota je minimální přízemní teplota vzduchu měřená v 5 cm nad povrchem od 21:00 předchozího dne do 7:00 dnešního dne. Data pro výpočet obou normálů jsou pořízena z meteorologické stanice Troubsko, kterou provozuje pobočka ČHMÚ Brno. Ve výsledkové části jsou použity dva typy grafů. První typ (spojnicové grafy) udává chod teplot (průměrných, resp. minimálních) v letech, jednotlivé měsíční teploty jsou proloženy lineární spojnici trendu a je zde uveden koeficient determinace R^2 , který vyjadřuje, jaký podíl variability závisle proměnné (teploty) model vysvětluje. Po vynásobení stem získáme, zjednodušeně řečeno, procento pravdivosti modelu závislosti průběhu teplot v letech. Druhý typ (sloupcové grafy) vyjadřuje počet dní v daném měsíci, ve kterých teplota klesla pod 0 °C. Troubsko patří, dle Quittovy klasifikace (1971), do mírně teplé oblasti MT 11, charakterizované jako: jaro je mírně teplé a krátké, léto je dlouhé, teplé a suché, podzim je mírně teplý a krátký, zima je mírně teplá, velmi suchá a krátká s krátkým trváním sněhové pokrývky. Suma srážek ve vegetačním období je 350–400 mm (Hruban, 2019). Lokalita Troubsko se nachází jihozápadně od Brna, v severní části Panonského termofytika, patří do řepařské výrobní oblasti, s nadmořskou výškou 270 m, průměrnou roční teplotou 9,6 °C, ve vegetaci (duben–září) 16,2 °C. Roční suma srážek činí 504,9 mm, ve vegetaci 334,2 mm.

3. Výsledky



Graf č. 1 Průměrné denní teploty v měsících únor až květen v hodnocených letech 2005–2023.

Graf č. 1 ukazuje průběh průměrných denních teplot v měsících únor až květen v letech 2005–2023. Vzhledem k problematice řešené v článku mají průměrné denní teploty pouze doplňující význam, i přesto jsou důležitou součástí celku. V grafu nás budou zajímat zejména lineární spojnice trendu a hodnoty koeficientu determinace. Lineární spojnice trendu v nevegetačních měsících únor a březen ukazují, že se teploty v průběhu let zvyšují. Hodnoty koeficientů determinace v grafu č. 1 jsou u všech studovaných měsíců nízké na to, abychom mohli uvažovat o přímé závislosti teplot na přibývajících letech. Nejvyšší hodnota koeficientu determinace je u měsíce duben s hodnotou 0,2139. To znamená, že z 21 % je pohyb (nárůst nebo pokles) teplot v letech způsoben přibývajícími roky, ze 79 % je pohyb teplot způsobený jinými vlivy. Nicméně korelační koeficient v únoru $r = 0,45$ představuje střední sílu korelace, v březnu $r = 0,28$ představuje slabou sílu korelace. Naopak, ve vegetačních měsících duben a květen dlouhodobě dochází k poklesu teplot s korelačním koeficientem v dubnu $r = -0,46$ (střední síla korelace), v květnu $r = -0,21$ (slabá síla korelace). Z dřívějších analýz víme, že průměrná roční teplota, hodnocená od roku 1961 do roku 2020 na troubské lokalitě statisticky průkazně stoupá (Lang, Vymyslický, 2022).



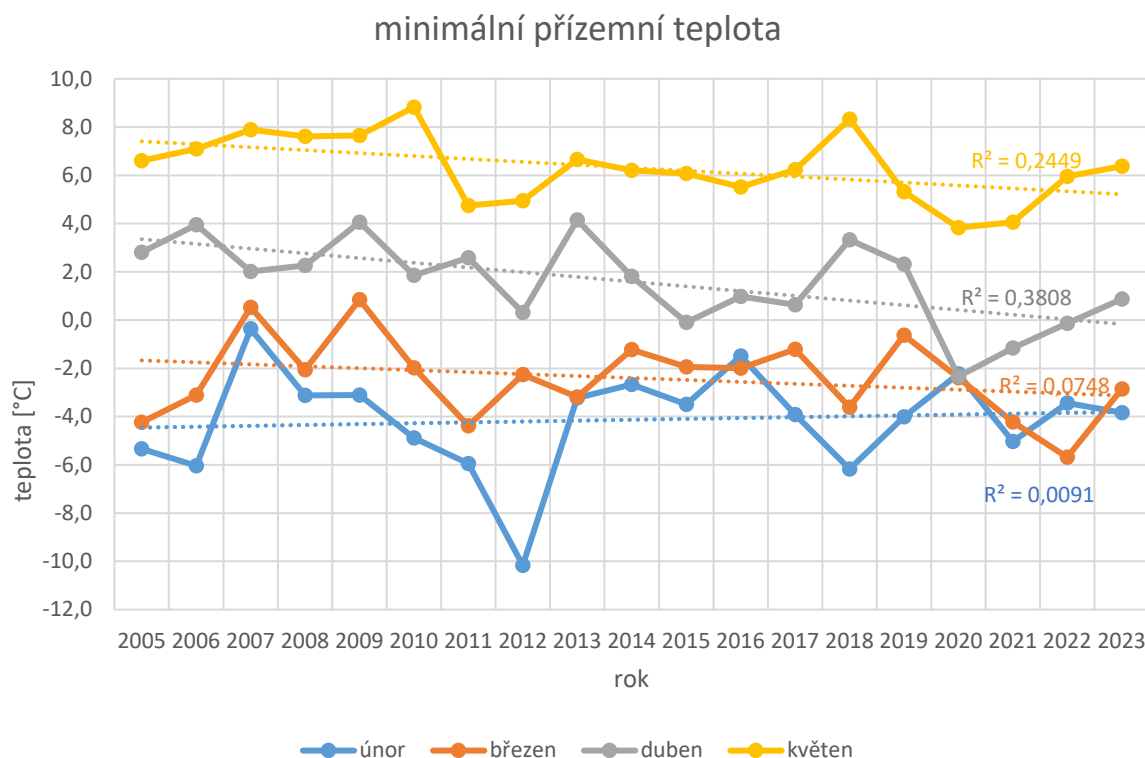
Graf č. 2 Počet dní v měsících únor až květen s průměrnou denní teplotou pod 0 °C v letech 2005–2023.

Detailnější teplotní situaci znázorňuje graf č. 2. Ten ukazuje počet dní v měsíci v daném roce, kdy klesla průměrná denní teplota pod 0°C. Situace je zobrazena jak graficky, tak pro lepší přehled i číselně v tabulce v grafu. V nevegetačních měsících únor a březen spojnice trendu ukazují sestupný charakter, to znamená, že mrazových dnů ubývá ($r = -0,41$ – střední, resp. $-0,34$ – slabá síla korelace). Měsíc duben vykazuje mírně vzestupný charakter ($r = 0,32$), a z tabulky a grafu vyplývá, že se od roku 2013 začínají objevovat dny s průměrnou denní teplotou pod 0 °C. V měsíci květnu nebyl ani jeden den v pozorovaných letech s průměrnou denní teplotou nižší jak 0 °C. Je potřeba zdůraznit, že se jedná o průměrné denní teploty a neznamená to, že se v daném dni nemohly vyskytovat teploty pod 0°C. Hodnoty koeficientů determinace v grafu č. 2 jsou opět natolik nízké, že nelze uvažovat o lineární závislosti mezi počtem dní pod 0 °C a zvyšující se řadou let, nicméně síla korelačních vztahů změny v počtu mrazových dnů dokazuje. Sestupný charakter spojnic trendu v grafu č. 2 v únoru a březnu a vzestupný charakter spojnice trendu v dubnu potvrzuje spojnice trendu v grafu č. 1. V únoru a březnu dochází dlouhodobě k nárůstu průměrných teplot, a tedy ke snižování počtu mrazových dní. V dubnu je tomu naopak.

Pokud si rozdělíme sledované roky na dvě části, přičemž předělem je rok 2013, který se nachází zhruba v polovině časové řady, zjistíme, že od roku 2005 do roku 2013 včetně (tj. za devět let) bylo 125 únorových dní s průměrnou denní teplotou pod bodem mrazu. Ve druhé polovině sledovaného období v letech 2014–2023 (tj. deset let) bylo těchto dní už pouze 77. V březnu se vyskytlo v první polovině časové řady 58 dní s průměrnou denní teplotou pod bodem mrazu, ve druhé polovině už pouze 23 dní. V obou nevegetačních měsících počet mrazových dní klesá, a to může představovat riziko předčasného nástupu vegetace. Duben vykazuje v první polovině časové řady jeden den s průměrnou teplotou pod bodem mrazu, ve druhé polovině časové řady pak dva dny. Květen nevykazuje žádný takový den.

Graf č. 3 vyjadřuje minimální přízemní teploty naměřené v 5 cm nad povrchem půdy od 21:00 hodin do 7:00 následujícího dne. Podobně, jako tomu bylo v předchozím případě u průměrných teplot, jsou hodnoty regresních koeficientů nízké na to, abychom zde hledali přímou závislost mezi zvyšováním/snižováním teploty v závislosti na přibývajících letech. Spojnice trendu v měsíci únoru vykazuje sice nárůst přízemních teplot, ale s velmi slabou korelační silou ($r = 0,10$). V měsících březnu, dubnu a květnu dochází v průběhu let k poklesu teplot. Korelační koeficient pro měsíc březen ($-0,27$) vykazuje slabou negativní závislost, duben ($r = -0,62$) vykazuje silnou negativní závislost a zde je i nápadně vysoká hodnota

regresního koeficientu, a to 0,3808. Měsíc květen potom vykazuje střední negativní závislost ($r = -0,49$). Jak již bylo zmíněno výše, pokles teplot je způsoben z velké většiny jinými faktory, než linearitou přibývajících let. Březen je jediný měsíc, kdy dochází ke zvyšování průměrné denní teploty a zároveň dochází ke snižování minimální přízemní teploty. Takové situace mohou být nebezpečné zejména pro ozimé plodiny. Ty začnou být vlivem vyšší teploty vzduchu fyziologicky aktivní, sníží toleranci k mrazům a může docházet k jejich poškození. Taktéž se zvýší potřeba živin, které mohou být vlivem nízkých přízemních teplot omezeně, nebo vůbec dostupné. Další sledované měsíce vykazují stejný nárůst či pokles jak v průměrné denní, tak v minimální přízemní teplotě.

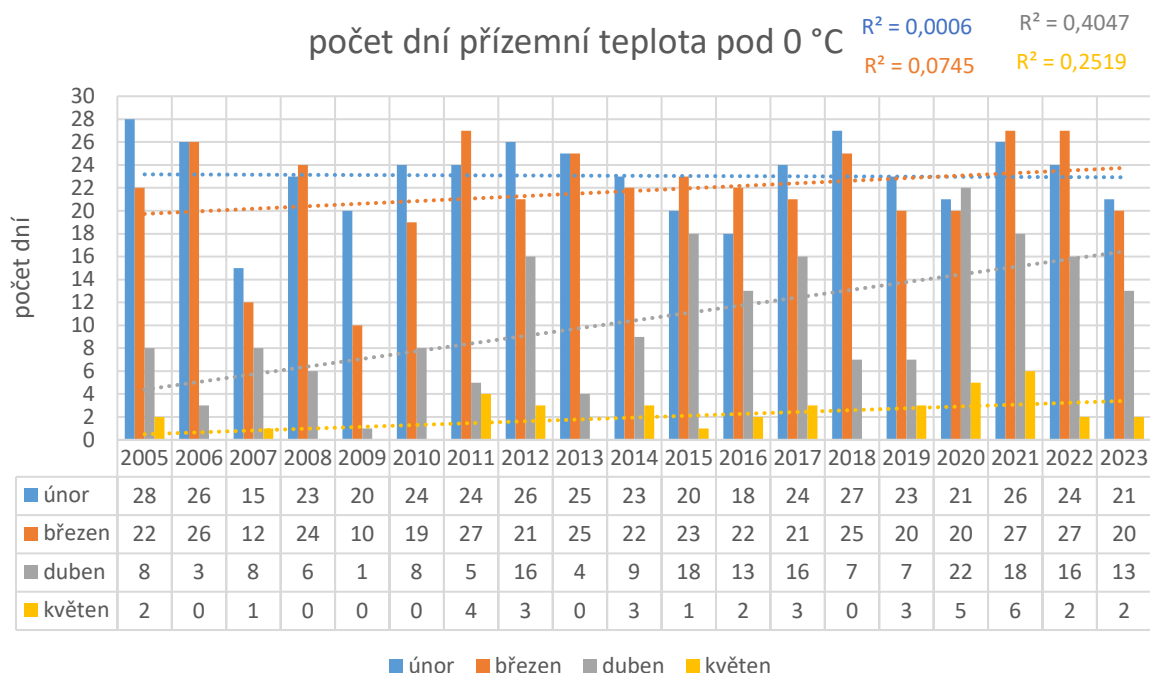


Graf č. 3 Minimální přízemní teplota v měsících únor až květen naměřená od 21:00 hodin do 07:00 hodin následujícího dne v pěti cm nad povrchem země.

Detailnější data přináší graf č. 4, který udává počet dní v měsících ve sledovaných letech, kdy přízemní teplota klesla pod 0 °C. Pro snadnější přehled je opět uvedena číselná tabulka. V měsíci únoru má spojnice trendu sice sestupný charakter, což se v tomto měsíci děje i v případě počtů dní s průměrnou denní teplotou pod 0 °C (graf č. 2), nicméně síla korelace je velmi slabá ($r = -0,02$), stejně tak i koeficient lineární regrese a z těchto ukazatelů vyplývá, že k žádným výrazným změnám nedochází.

Naproti tomu, a v souladu s grafem č. 3 (minimální přízemní teploty), v březnu dochází dlouhodobě k navýšení počtu dní s teplotou pod 0 °C, což může být obecně stále v zemědělské výrobě žádoucí, resp. mohlo by docházet k prodloužení vegetačního klidu, ale záleží na více faktorech a to zejména: na průběhu teplot v předchozím období, na hodnotě teplot pod bodem mrazu, na obsahu vody v půdě a na sněhové pokrývce. Regresní koeficient a síla korelace jsou ale nízké ($r = 0,27$, slabá závislost). Bohužel k podobné situaci dochází i ve vegetačních měsících duben a květen se silnou, resp. střední korelační závislostí ($r = 0,64$, resp. $0,50$). To je již v zemědělské praxi nežádoucí, protože dlouhodobý teplotní průměr na troubské lokalitě v dubnu je 10,1 °C a v květnu 14,7 °C a teplotní maxima například v roce 2024 dosahovala v obou měsících 25 °C (nepublikovaná data), a to už je nástup vegetace ve všech směrech. Hodnoty regresních koeficientů u měsíců únor, březen a květen jsou relativně nízké (0,0091; 0,0748; 0,2449), ale duben vykazuje poměrně vyšší hodnoty

a to 0,4047, resp. 40 % případů poklesu teplot je spojeno s přibývajícím roky, a tedy tento trend se dá očekávat se čtyřicetiprocentní pravděpodobností i do budoucna.

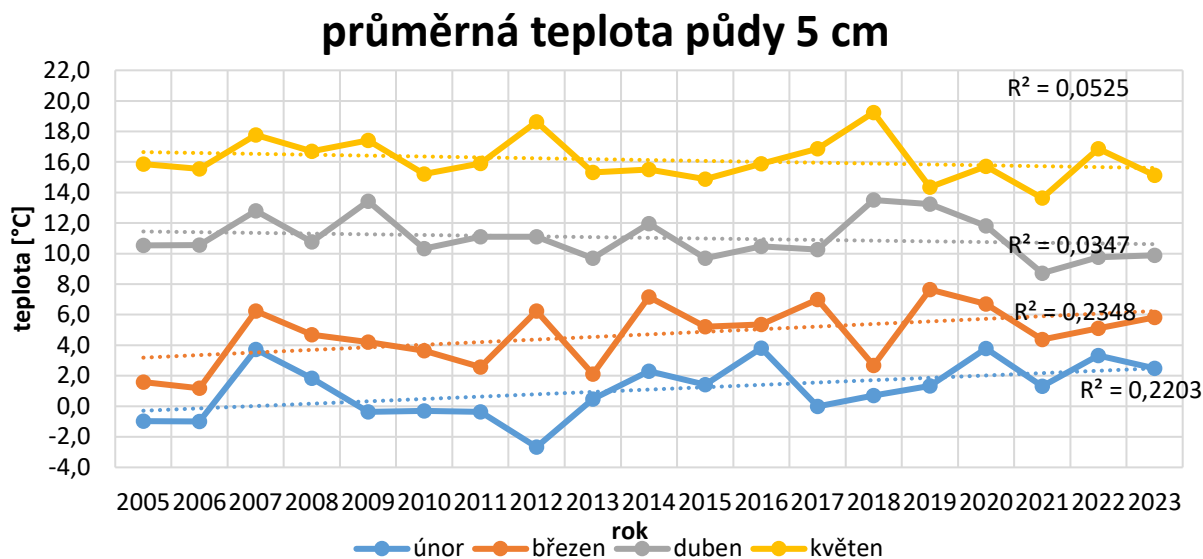


Graf č. 4 Počet dní, ve kterých klesla minimální přízemní teplota v měsících únor až květen pod 0 °C.

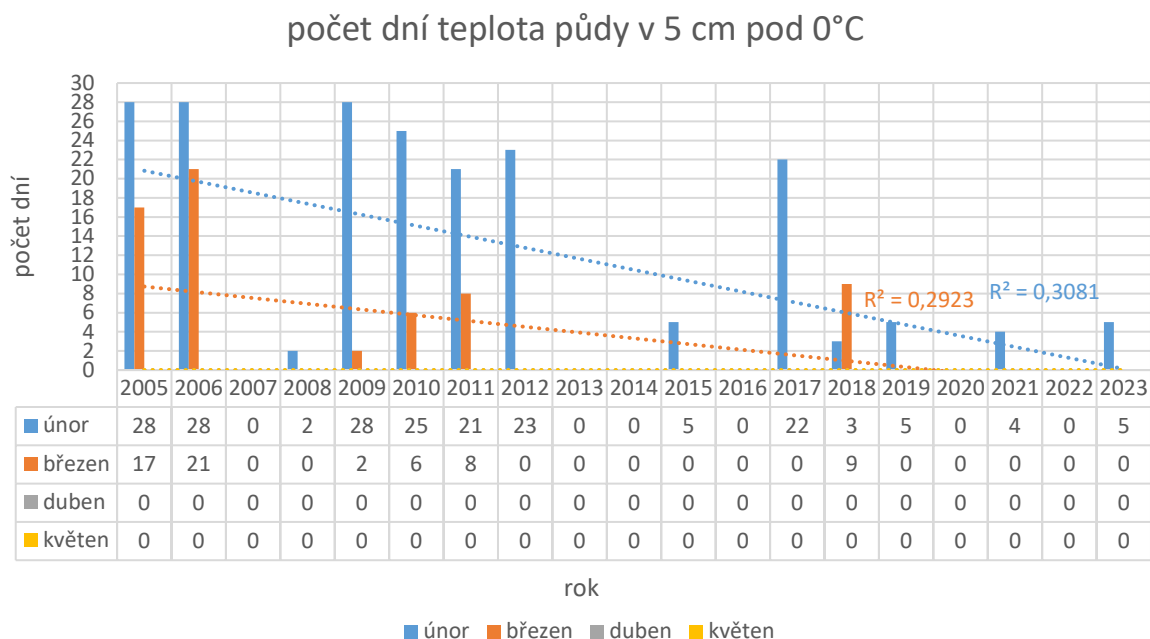
Pokud si opět uděláme analýzu s rozdělením sledovaného období na dvě části, zjistíme následující: od roku 2005 do roku 2013 (tj. devět let) včetně bylo 211 únorových dní s přízemní teplotou pod bodem mrazu (tj. průměrně 23 dní v každém roce). V druhé polovině v letech 2014–2023 (tj. deset let) bylo těchto dní 227 (tj. průměrně 23 dní v každém roce). To znamená, že v zásadě nedochází ke změnám, a to nekoreluje s průběhem průměrných denních teplot, kdy ve druhé únorové polovině bylo o 48 dní méně dní s průměrnou denní teplotou pod 0 °C, než v polovině první (graf č. 2). V březnu je v první polovině řady 186 dní s přízemní teplotou pod bodem mrazu, ve druhé polovině ale 227 dní. Počet březnových dní s přízemní teplotou pod 0 °C narůstá, minimální přízemní teplota v čase logicky klesá (graf č. 3), ale průměrná denní teplota stoupá (graf č. 1). Prakticky to znamená, že průměrná denní teplota v únoru i březnu narůstá, ale přízemní mrazy přetrvávají. To může přispět k poklesu zimuvzdornosti ozimých porostů i k dřívějšímu počátku šíření chorob a škůdců. Duben vykazuje v první polovině 59 dní, ve druhé polovině je to 139 dní, rozdíl činí celých 80 dní. Květen vykazuje v první polovině 10 dní, ve druhé polovině je to 27 dní. Jestliže v nevegetačních měsících únoru a březnu průměrná denní teplota postupně stoupá a ve vegetačních měsících dochází k nárůstu počtu s přízemní teplotou pod 0 °C, hrozí riziko mrazového poškození vegetace. Zejména ve vegetačních měsících, s přihlédnutím na průběh denních teplot, je tento trend v zemědělství nežádoucí a způsobuje poškození jak u ozimých, tak některých jarních plodin (jeteloviny, kukuřice). Bohužel, z analýzy průběhu teplot nelze vysledovat žádnou periodicitu a dlouhodobě předpovídat pravděpodobnost výskytu nebezpečných mrazových jevů.

Graf č. 5 znázorňuje průběh teplot měřených v pěti centimetrech půdy v měsících únor až květen. Jak je patrné z lineárních spojnic trendů, tak v nevegetačních měsících únor a březen v průběhu let teplota půdy stoupá s korelačním koeficientem v únoru 0,47 a v březnu 0,48, v obou případech se jedná o středně silnou závislost. Regresní koeficienty spojnice trendu nabývají hodnot v únoru 0,2203 a v březnu 0,2348. Ve vegetačních měsících duben a květen dochází podle dlouhodobého lineárního modelu k mírnému poklesu teplot s regresními koeficienty linearit velmi nízkými, a s negativním korelačním koeficientem v dubnu s velmi slabou (–0,19) a v květnu se slabou korelační silou (–0,23). Průměrná teplota půdy neklesá ve vegetačních měsících takovou rychlostí jako průměrná denní teplota (hlavně v dubnu) (graf č. 1) a teplota přízemní (graf č. 3). Protože teplota půdy společně s teplotou okolního prostředí ovlivňuje klíčení a vzcházení jarních plodin a také ovlivňuje počátek vegetace u plodin ozimých, tak můžeme konstatovat, že z hlediska

výkyvů teplot je půdní prostředí stabilnějším prvkem než teplota okolního prostředí. Nicméně v grafu č. 6, který vyjadřuje počet dní, ve kterých teplota půdy klesla pod 0 °C, v obou nevegetačních měsících únor a březen má lineární křivka rychlý pokles se střední silou korelace ($r = -0,56$, resp. $-0,54$) s regresními koeficienty $R^2 = 0,3081$, resp. $0,2923$. V měsíci únoru od roku 2005 do roku 2013 bylo celkem 155 dnů s teplotou pod 0 °C, od roku 2013 do roku 2023 to bylo 44 dní. V březnu potom v první části sledování do roku 2013 bylo 54 dní, v další polovině 9 dní. Tento pokles počtu dní v nevegetačních měsících znamená v zemědělské výrobě rizika spojená s předčasným vystoupením ozimých plodin z vegetačního klidu. V souvislosti se stoupajícími průměrnými denními teplotami (graf č. 1) a klesajícím počtem dní pod bod mrazu (graf č. 2) hrozí riziko poškození mrazem. Ve vegetačních měsících dubnu a květnu ve sledovaném období nenastala situace, kdy by průměrná teplota půdy klesla pod 0 °C.



Graf č. 5 Průměrné teploty v pěti centimetrech půdy v měsících únor až květen v hodnocených letech.



Graf č. 6 Počet dní, ve kterých klesla teplota půdy pod 0 °C v pěti centimetrech v měsících únor až květen.

Tabulka č. 1. vyjadřuje korelační vztah mezi půdní teplotou měřenou v pěti centimetrech hloubky a mezi průměrnou denní teplotou a teplotou přízemní. Na základě korelačních koeficientů můžeme konstatovat, že na vývoj půdních teplot v měsících únor až květen mají větší vliv průměrné denní teploty, než minimální přízemní. Korelační vztahy mezi půdní teplotou a průměrnou denní teplotou jsou ve všech měsících velmi silné, a i průměrný korelační koeficient u sledovaných měsíců je $r = 0,91$ (velmi silná korelace). Korelační vztahy mezi půdní teplotou a minimální přízemní teplotou jsou nesourodé, v únoru je síla korelace vyjádřená jako velmi silná (což souvisí i s průměrnou denní teplotou), v březnu jako střední, v dubnu a květnu jako slabá. Průměrný korelační koeficient je $r = 0,52$ (střední korelace). Zjištěné hodnoty korelací jsou v souladu s hodnotami v uvedených grafech.

Tab. č. 1 korelační vztahy mezi průměrnou teplotou půdy v 5 cm, průměrnou denní teplotou a teplotou přízemní

	únor			březen			duben			květen		
	denní	přízemní	půda	denní	přízemní	půda	denní	přízemní	půda	denní	přízemní	půda
půda	0,93	0,82	1,00	0,92	0,50	1,00	0,88	0,38	1,00	0,92	0,39	1,00

4. Závěr

Článek se zabývá hodnocením průběhu teplot od roku 2005 do roku 2023 na lokalitě Troubsko v předjarních a jarních měsících, v souvislosti s působením jarních mrazů na zemědělskou produkci. Cílem práce bylo popsat průběh teplot průměrných denních, minimálních přízemních a teplot půdních v 5 cm pod povrchem v relativně dlouhé časové ose – a to v devatenácti po sobě jdoucích letech. Z toho lze vysledovat možné periodicity a souvislosti, a vytvořit model možných předpovědí dřívějšího nástupu vegetační doby a souvisejícím výskytu jarních mrazů.

Zde můžeme konstatovat, že průměrná denní teplota v pozorovaných letech 2005–2013 v únoru a březnu pomalu narůstá, v dubnu a květnu dochází naopak k teplotním poklesům. Při náhledu do jednotlivých let nebyly ale zjištěny žádné významné závislosti nebo periodicity. Obecně z dlouhodobého hlediska na této lokalitě platí, že v letech dochází k postupnému zvyšování teplot, což jsme potvrdili v jiné práci zabývající se hodnocením teplot od roku 1961 do roku 2020.

U minimálních přízemních teplot platí, že z dlouhodobého hlediska dochází v únoru k mírnému nárůstu průměrných hodnot, nicméně pravidelnost, nebo závislost na průběhu let zde chybí a jednotlivé roky vykazují velkou teplotní variabilitu. V dalších měsících březen a květen dochází k poklesu průměrných hodnot, nelze ale vyvozovat závěry, že by k těmto poklesům docházelo s určitou pravidelností s přibývajícím řadou let. Výjimkou je v tomto ohledu měsíc duben, ve kterém dochází k poklesům průměrných minimálních teplot se silnou korelační závislostí, a s 38 % pravděpodobností můžeme očekávat v dalších letech průměrné dubové minimální teploty, které budou pod bodem mrazu.

Je obecně známo, že půda má teplotní tlumivou schopnost a průběh půdních teplot je odlišný nežli průběh teplot vzduchu. Ne jinak tomu je i v tomto případě. Nicméně v měsících únoru a březnu dochází v čase k mírnému nárůstu průměrných půdních teplot, ale výrazně ubývá dnů s průměrnou teplotou pod bodem mrazu, což značí v zemědělské výrobě určité riziko s předčasným probouzením se plodin ze zimního klidu. Tento trend zvyšování průměrné teploty půdy lze očekávat i nadále, ovšem téměř bez určité pravidelnosti. Naopak v měsících dubnu a květnu dochází k pozvolnému snižování průměrných teplot půdy, tento trend má velmi slabé korelační závislosti. Také zatím nic nenasvědčuje tomu, že by se teplota půdy měla výrazně klesnout, pohybovat kolem bodu mrazu, nebo pod tímto bodem.

Na základě získaných údajů a definovaných závěrů nelze ve většině případů předpovědět, jaký bude teplotně následující rok. Z naměřených a analyzovaných dat nelze usuzovat, že existuje lineární závislost mezi měřenými parametry teplot a průběhem let.

Průběh teplot do značné míry ovlivňuje i zásobu vody v půdě. Proto zemědělcům doporučujeme velmi pečlivě sledovat průběh počasí, jeho předpověď, výhled a také aktuální zásobu vody v půdě. Na základě těchto informací je potřeba rychle a včas zareagovat a zvolit vhodnou agrotechniku, ať už při zpracování půdy, nebo volby termínu setí. V současné době dochází k přesunu termínů setí u píce z časně jarních do časně podzimních, a to hlavně z důvodů chybějící jarní vláhy. Pokud je dostatek půdní vláhy po zimě, nic nebrání tomu, využít termíny jarních výsevů. Vzhledem k tomu, že na jaře

většinou velmi rychle půdní vláhly ubývá, je potřeba set brzy, jakmile to počasí dovolí. Z druhé strany ale hrozí riziko poškození náchylných druhů (například vojtěšky a jetele) mrazem. Takže zemědělec musí neustále lavírovat a přizpůsobovat se klimatickým podmínkám, s určitým výhledem, zkušenostmi, mnohem víc než v minulosti. Jiné postupy, vzhledem k nestabilním klimatickým podmínkám zatím nejsou. Samozřejmě je potřeba využívat odrůdy/hybridy, které jsou odolnější, například méně náchylné k teplotním výkyvům, nebo jsou více mrazuvzdorné, méně náchylné k nedostatku vody a podobně. Ke vzniku takových odrůd/hybridů výrazně přispívají a urychlují proces šlechtění nové a stále se vyvíjející a zdokonalující šlechtitelské metody.

Poděkování

Výsledek vznikl s institucionální podporou Ministerstva zemědělství ČR v rámci Dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace Zemědělský výzkum, spol. s r. o. Třeboň.

Literatura

BITTNER, V.: Poškození polních plodin v roce 2016. Agromanual, 29. 11. 2016 [on-line] [cit. 2024-07-13]. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/ochrana-obecne/poskozeni-polnich-plodin-v-roce-2016>

HRUBAN, ROBERT 2019: Klimatické oblasti dle Evžena Quitta (1971) [on-line] [cit. 202-07-15]. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/klima/klimaticke-oblasti-dle-e-quitta-1971/>

LANG, J., VYMYLSICKÝ, T.: Dlouhodobý pohled na vývoj teplot a srážek na Jižní Moravě. In: *Hospodaření s vodou v krajině 2022*. Str. 26–29. Mezinárodní konference Třeboň, 13.–14. 9. 2022. ISBN 978-80-7653-045-4.

VENCLOVÁ, B.: Přezimování řepky a jarní regenerace. Úroda, 14. 3. 2023 [on-line] [cit. 2024-07-13]. Dostupné z: <https://uroda.cz/prezimovani-repky-a-jarni-regenerace/>

VENCLOVÁ, B.: Stav porostů ozimů po mrazivém období. Úroda, 28. 2. 2021 [on-line] [cit. 2024-07-13]. Dostupné z: <https://uroda.cz/prezimovani-repky-a-jarni-regenerace/>

Vlhkostní a teplotní poměry pod různě udržovanými travními porosty

Moisture and temperature conditions under differently maintained grasslands

Tomáš Litschmann¹, Petr Salaš², Jana Burgová², Irena Drobiličová², Jindřiška Jeřábková²

¹AMET, Moravský Žižkov, ²Zahradnická fakulta Mendelovy univerzity v Brně

Abstrakt

V článku jsou shrnuty výsledky několikaletých měření teploty a vlhkosti půdy pod travními porosty s různou úrovní údržby (častěji sečený trávník, méně často sečený trávník, holá půda bez travního porostu). Zjistilo se, že půdní vlhkosti pod sečeným a nesečeným trávníkem do hloubky 50 cm se příliš neliší, ve svrchní vrstvě 5–25 cm jsou pod nesečeným porostem v měsíčních průměrech obvykle nižší, naopak v hlubší vrstvě 30–50 cm vyšší. Vyšší zásoby vláhy v půdě byly zaznamenány pod holou půdou bez travního porostu. Zásakovací schopnosti při vydatnějších deštích byly pod oběma vegetačními variantami přibližně stejné, neprokázalo se, že by různý stupeň údržby měl vliv na infiltraci srážkových vod. Nesečeným porostem jsou však výrazně ovlivněny teploty půdy, tato skutečnost se projevuje jak v měsíčních průměrech, tak i za jednotlivých dnů s intenzivním slunečním svitem, kdy je půda pod nesečeným porostem při dosažení maxima v hloubce 10 cm až o 8 °C chladnější než pod častěji sečeným porostem anebo černým úhorem. Tyto rozdíly jsou do určité míry ovlivněny i půdní vlhkostí, při vyšších vlhkostech jsou přibližně poloviční.

Klíčová slova: trávníky, sečení, vlhkost půdy, teplota půdy

Abstract

The paper summarizes the results of several years of measurements of soil temperature and moisture under grasslands with different levels of maintenance (more frequently mowed lawn, less frequently mowed lawn, bare soil without grass cover). It was found that soil moisture levels under mown and unmown grass to a depth of 50 cm do not differ much, but are usually lower in the upper layer of 5–25 cm under unmown grass in monthly averages, whereas they are higher in the deeper layer of 30–50 cm. Higher soil moisture reserves were recorded under bare soil without grass cover. Water infiltration capacity under heavier rainfall was approximately the same under both vegetation variants, and the different levels of maintenance did not appear to have an effect on rainfall infiltration. However, soil temperatures are significantly affected by uncut vegetation, both in monthly averages and on individual days with intense sunshine, when the soil under uncut vegetation is up to 8 °C cooler than under more frequently cut vegetation or black fallow when reaching a maximum depth of 10 cm. These differences are also influenced to some extent by soil moisture, which is approximately half as great at higher moisture levels.

Keywords: lawn, mowing, soil moisture, soil temperature

1. Úvod

Po poslední epizodě sucha, která na našem území probíhala přibližně v letech 2015 – 2019, se začaly ve veřejném prostoru objevovat názory, že by bylo možno ve městech travní porosty sekat nebo mulčovat méně často a nechat je vyrůst do větších výšek, což by kromě předpokládaných jasných benefitů, jako je úspora nákladů, zlepšení podmínek pro rozmnožování hmyzu apod. mělo mít údajně za následek i zlepšení vláhových poměrů půdy, jelikož vyšší travní porosty by spotřebovávaly méně vláhy, zlepšovaly zasakování srážek do půdy a celkově přispívaly ke zlepšování mikroklimatu dané lokality. Jedinou relevantní informaci na toto téma u nás lze nalézt v práci Stehlíka (2020), který prováděl v roce 2019 opakované měření půdní vlhkosti na sečeném a nesečeném trávníku v Praze Libuši do hloubky 6 cm. Výsledkem

těchto měření je závěr, že „Efekt odolnosti nesekaného trávníku vůči suchu se neprojevil, pokud byly předchozí srážky příliš nízké, a to na úrovni 20–30 mm za měsíc“. Při měsíčních úhrnech srážek vyšších než 50 mm, „Zadržení vody bylo v nesekaném trávníku po týdnu bez srážek o 1 litr na čtvereční metr vyšší.“ Lze jen připomenout, že 1 litr na čtvereční metr představuje 1 mm srážek, tedy při jejich úhrnu více jak 50 mm se jedná o cca 2 %. Ze zahraničních pramenů se podobnému tématu, byť s jiným cílem, zaměřeným na stanovení potřeby vody na závlahu při různých výškách trávníku, věnoval Poro et al (2017) a došel k závěru, že nízko střížené golfové trávníky mají crop coefficient K_c , sloužící k výpočtu vláhové potřeby na základě potenciální evapotranspirace, v rozmezí 0,9–1,0, zatímco u vyšších rekreačních trávníků se tento koeficient pohybuje od 1,15 do 1,25. Logicky by tak s rostoucí výškou porostu měla stoupat i jejich spotřeba vody. Lerman a Contosta (2019) na základě měření mj. i půdní vlhkosti a teploty půdy na 16-ti parcelách rezidenčních trávníků s různou frekvencí sečení (jednou týdně, jednou za 2 týdny a jednou za 3 týdny) ve Springfieldu, Massachusetts, USA nezjistili statistické rozdíly pro jednotlivé frekvence sečení v hodnotách půdních vlhkosti a půdní teploty.

S nástupem vlhčího období již v průběhu roku 2019 a letech následujících tyto diskuse a snahy o prosazení méně častého sekání trávníků ve městech postupně utichly. S cílem zjistit skutečný efekt méně častého sekání trávníků (ať již z důvodů estetických, finančních, podpora hmyzích populací apod.) na vlhkostní a teplotní režim půd pod těmito porosty, byl v roce 2019 založen pokus v areálu Zahradnické fakulty MENDELU v Lednici zaměřený na tyto parametry.

2. Metodika

Pokus byl založen v srpnu roku 2019 v areálu Zahradnické fakulty MENDELU v Lednici na pozemku po předcházejícím pokusu se závlahou trávníku, takže travní porost již byl vyvinut. Parcela o rozměrech 3,6 x 5,0 m byla podélně rozdělena na tři stejně velké části 1,2 x 5,0 m), přičemž na jedné probíhalo méně časté kosení, na druhé byl udržován po většinu doby krátce střížený trávník. Mezi těmito částmi se nacházel černý úhor o stejných rozměrech jako zatravněné dílčí parcelky. Celkový pohled na pokusnou parcelu je na Obr. 1.



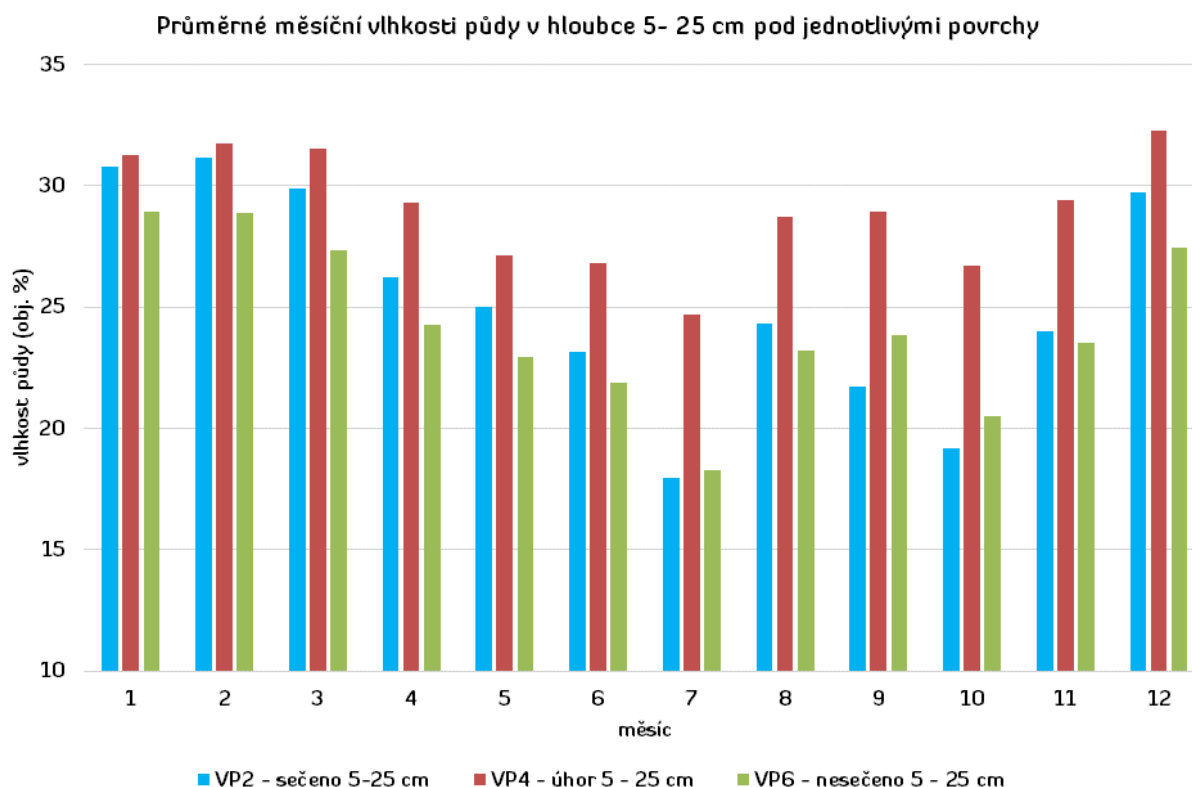
Obr. 1 Pohled na pokusnou parcelu ze dne 28. 6. 2023. V popředí častěji sečená varianta, uprostřed černý úhor s monitorovacími stanicemi a za ním nesečená varianta

Na jednotlivých parcelkách byla těsně po založení pokusu nainstalována měřicí stanice, zaznamenávající v každé variantě teplotu v hloubce 10 cm a vlhkost půdy do hloubky 30 cm. V říjnu roku 2020 byla doplněna o další měřicí stanici, monitorující v každé variantě podrobnější průběh teploty v hloubkách 10 a 20 cm a vlhkosti půdy ve vrstvě 5–25 cm a 30–50 cm. Měření je prováděno každých 15 minut a naměřené údaje se přenášejí na webový server. V rámci tohoto příspěvku jsou zpracovány především údaje z této stanice. Pro větší přehlednost byly z naměřených údajů stanoveny průměrné měsíční hodnoty za celé měřené období, tj. od 15. 10. 2020 do 9. 7. 2024 jak pro půdní vlhkosti, tak i pro teploty půdy v jednotlivých hloubkách. Kromě toho jsou prezentovány i některé epizodní situace zaměřené na zasakovací schopnosti v jednotlivých variantách a průběh teplot za extrémních situací.

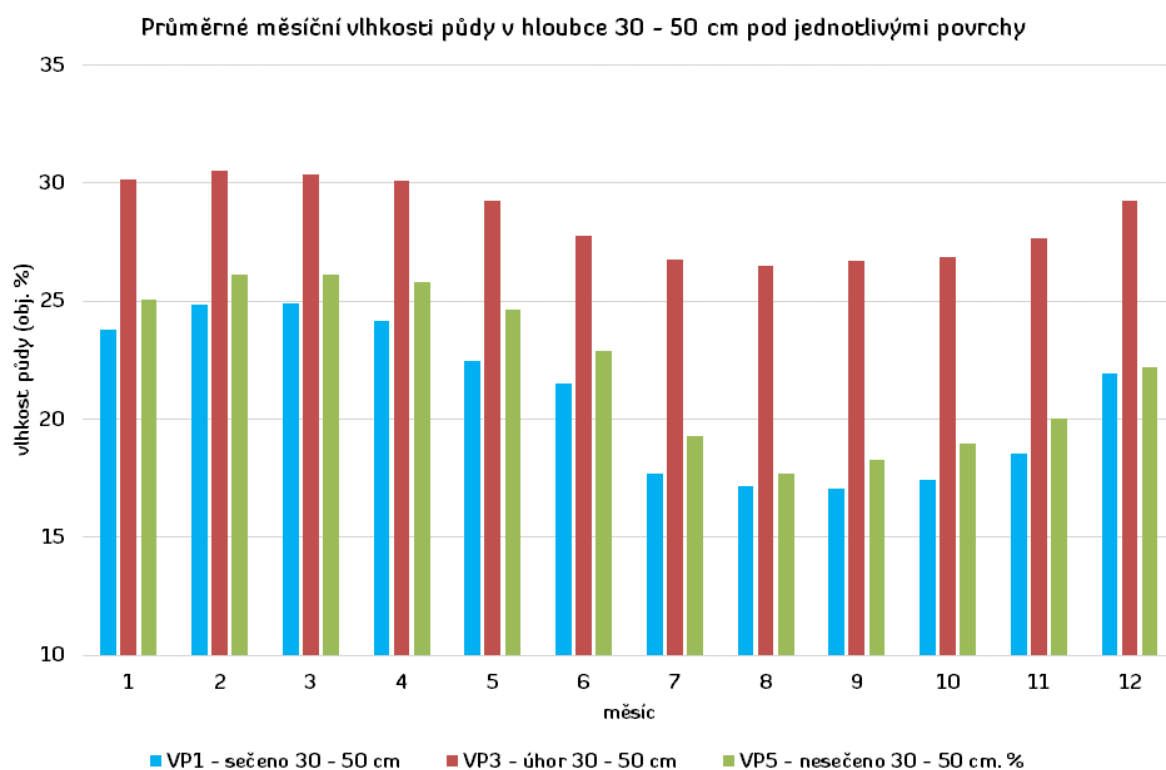
3. Výsledky

3.1 Průměrné měsíční vlhkosti půdy

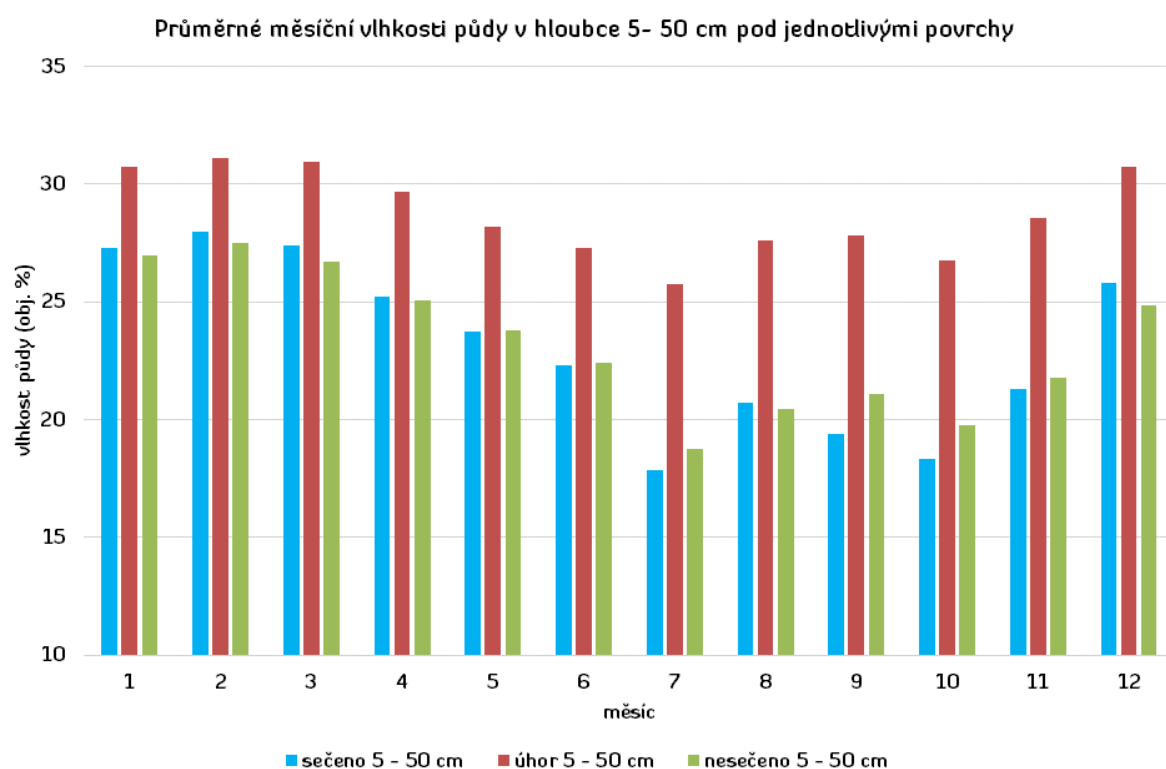
Průměrné měsíční hodnoty vlhkosti půdy za celé zpracované období jsou na Obr. 2 až 4. Na Obr. 5 jsou pro srovnání i údaje ze starší meteostanice za delší období, avšak pouze do hloubky 30 cm. Ve vrstvě 5–25 cm jsou vlhkosti půdy v nekosené variantě ve většině měsíců o něco nižší než v kosené variantě, výjimku tvoří červenec, kdy jsou hodnoty půdních vlhkostí téměř totožné a dále pak měsíce září a říjen, v nichž byly vlhkosti v nekosené variantě vyšší. Naproti tomu v hlubší vrstvě 30–50 cm (Obr. 3) byla vlhkost pod nekosenou variantou ve všech měsících o cca 1–2 obj. % vyšší. Zprůměrováním obou vrstev dostaneme Obr. 4, z něž je patrné, že vlhkosti v obou variantách ve vrstvě 5–50 cm se liší jen velmi málo v mezích přesnosti měření. Varianta bez přítomnosti vegetačního pokryvu (černý úhor) vykazuje ve všech měsících vyšší hodnoty, zejména pak v hlubší vrstvě, jelikož ke ztrátě vody dochází pouze evaporací, která je limitována prostupem vodních par přes půdní profil. Neznalému pozorovateli se tak může zdát, že je povrch holé půdy vyprahlý, avšak v hlubší vrstvě tomu tak není. Výsledky delších měření (Obr. 5) v profilu do hloubky 30 cm opět nenaznačují, že by docházelo k výraznějším rozdílům v půdních vlhkostech mezi jednotlivými vegetačními variantami.



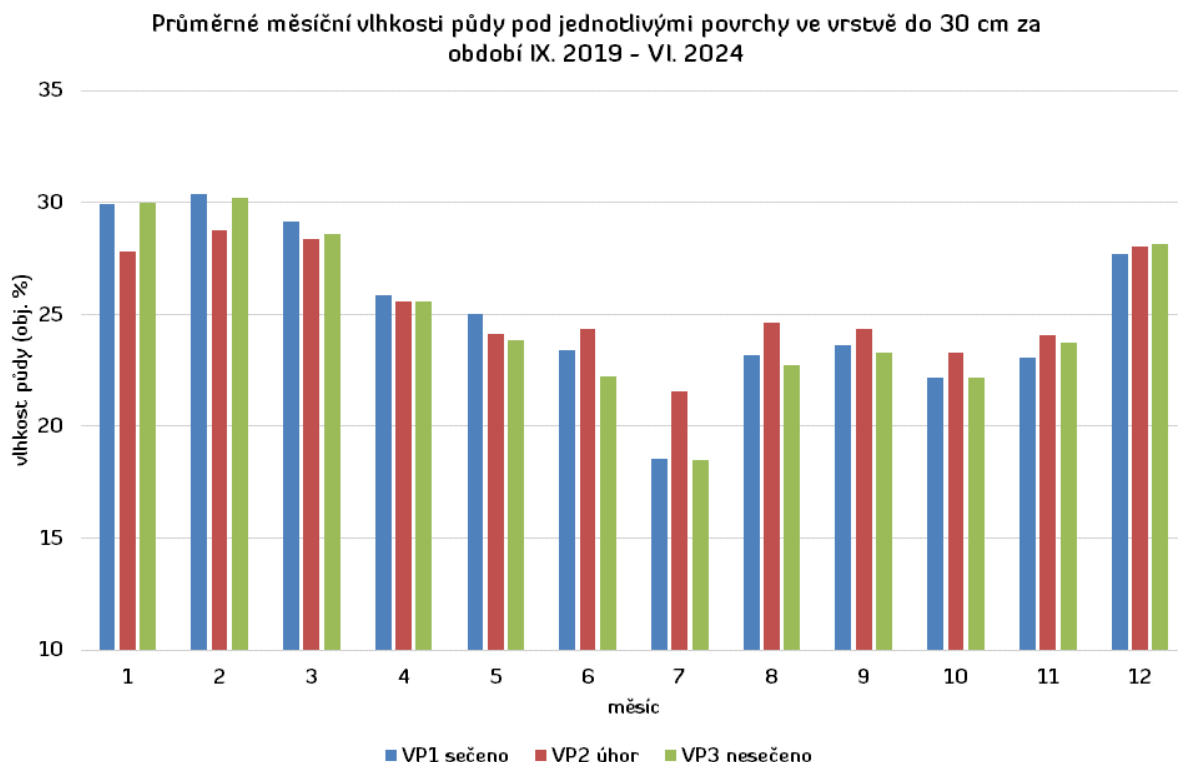
Obr. 2 Průměrné měsíční hodnoty vlhkosti půdy ve vrstvě 5–25 cm za období 15. 10. 2020 do 9. 7. 2024



Obr. 3 Průměrné měsíční hodnoty vlhkosti půdy ve vrstvě 30–50 cm za období 15. 10. 2020 do 9. 7. 2024.



Obr. 4 Průměrné měsíční hodnoty vlhkosti půdy ve vrstvě 5–50 cm za období 15. 10. 2020 do 9. 7. 2024.



Obr. 5 Průměrné vlhkosti půdy ve vrstvě do 30 cm za období IX. 2019 – VI. 2024 – starší stanice.

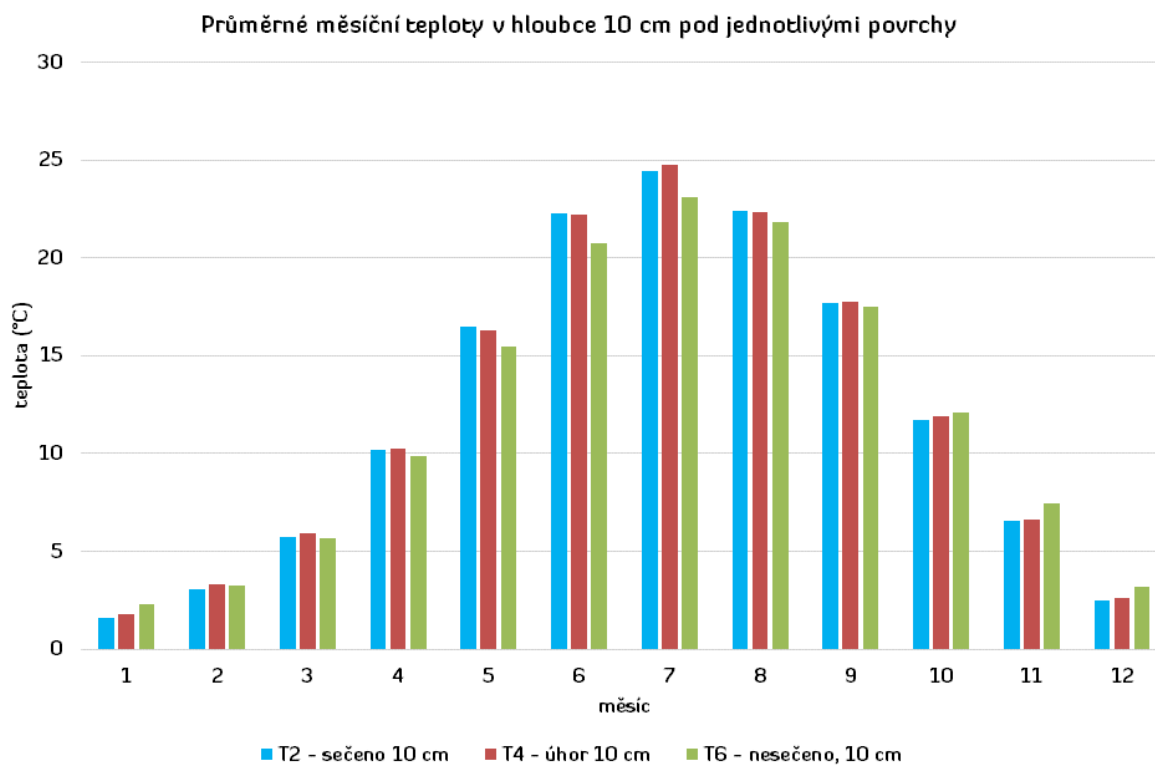
3.2 Průměrné měsíční teploty půdy

Pokud jde o teplotu povrchových vrstev půdy (Obr. 6 a 7), zde je nutno připustit, že vyšší travní anebo bylinný porost zastíňuje povrch půdy více než pravidelně kosený travník, což se následně projeví i v nižších teplotách těchto vrstev, především za jasných dnů a za situací, kdy je povrch půdy suchý a nemůže se ochlazovat evaporací. Projevuje se to i v průměrných měsíčních teplotách půdy v hloubkách 10 a 20 cm, které jsou zejména v červnu až srpnu o jeden až 2 °C nižší pod nekosenou variantou oproti kosené variantě, popřípadě černému úhoru, přičemž rozdíly v průměrných měsíčních teplotách mezi kosenou variantou a černým úhorem jsou v průběhu celého roku zanedbatelné.

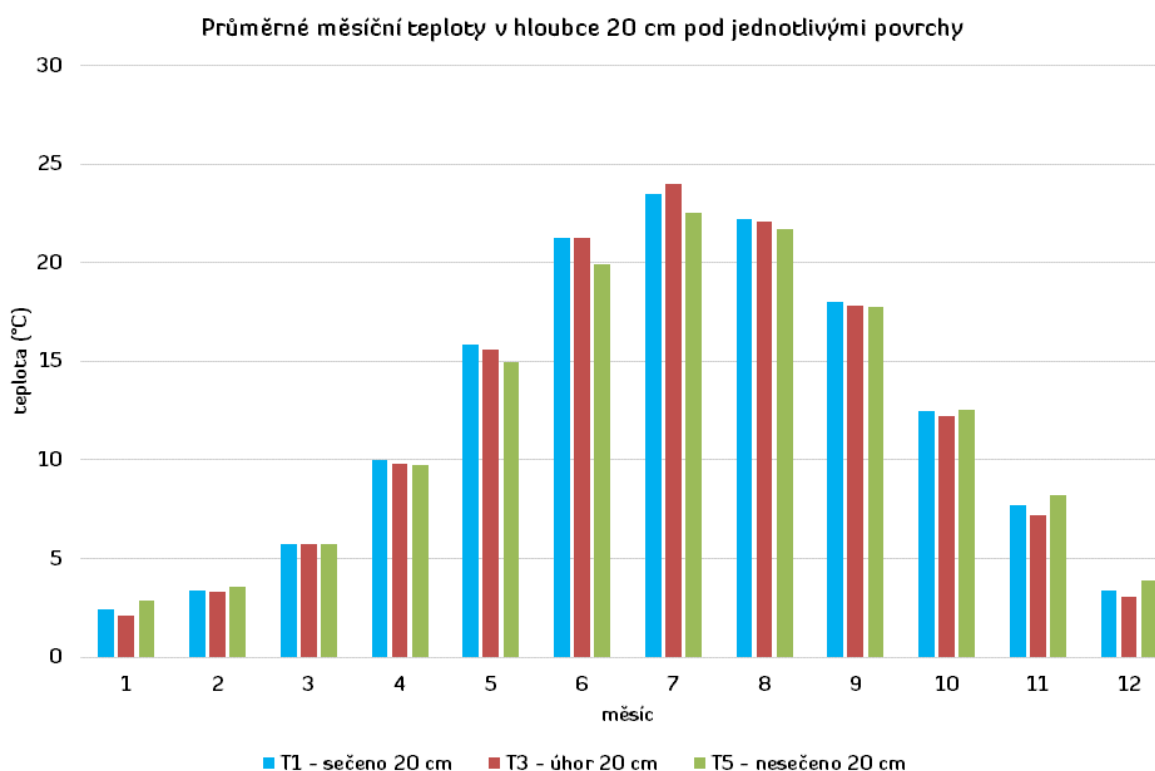
3.3 Zasakování srážek pod jednotlivými povrchy

Často se lze setkat s tvrzením, že méně často sečený travník zvyšuje zasakovací schopnost půdy při vydatnějších srážkách. Vybrali jsme proto několik epizod s vydatnějšími úhrny srážek a porovnali množství zachycené vody ve vrstvě 5–50 cm pod jednotlivými povrchy. Méně vydatnější srážky o celkovém úhrnu několika mm většinou neproniknou do půdy hlouběji než několik cm a neprojeví se tudíž na měřených půdních vlhkostech od 5 cm hlouběji, proto není možné je použít k vyhodnocení zasakování. Při přívalových srážkách od večerních hodin 21. 8. 2022 spadlo do ranních hodin následujícího dne 35 mm srážek a jak lze vypořádat z Obr. 8, postupně zasakovaly pod všemi povrchy přibližně stejně, pouze u černého úhoru se množství zachycené vody v této vrstvě během 22. 8. 2022 snižovalo, což bylo způsobeno dosažením nasycení, jelikož počáteční vlhkost před příchodem deště byla vyšší než u povrchů s vegetací.

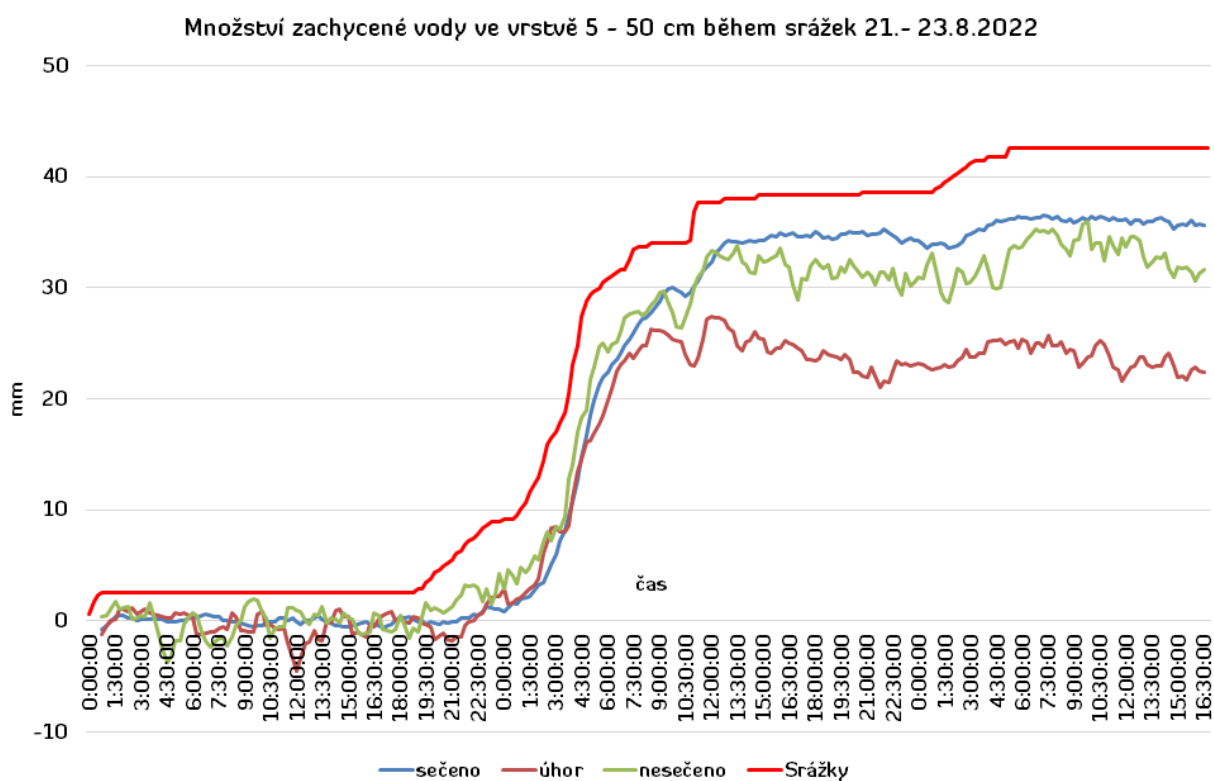
Obdobně tomu bylo i za situace ve dnech 15. – 16. 6. 2024 (Obr. 9), kdy za nižších úhrnů srážek bylo zachycené množství vody po několika hodinách po dešti přibližně stejné. Nelze proto zřejmě tvrdit, alespoň v podmínkách prováděného pokusu, že by u nesečených porostů docházelo k výrazně lepšímu zasakování srážkové vody, a to ani při intenzivních deštích.



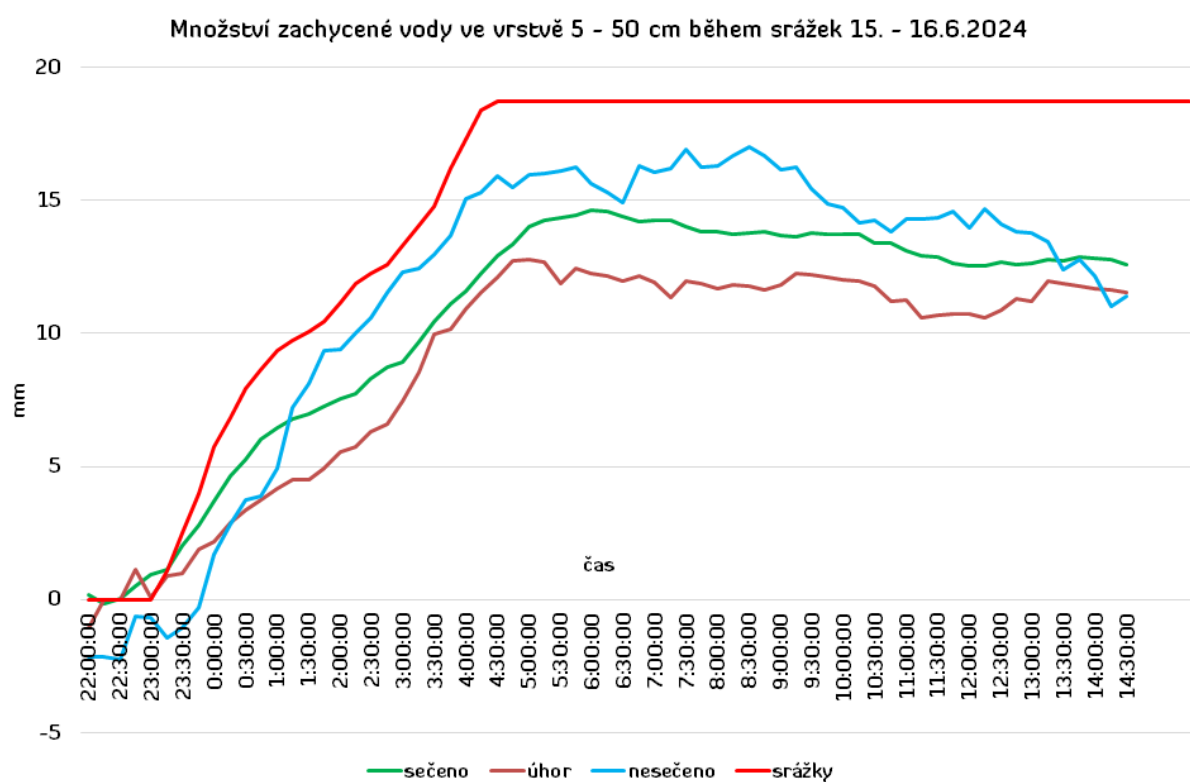
Obr. 6 Průměrné měsíční teploty půdy v hloubce 10 cm za období 15. 10. 2020 do 9. 7. 2024.



Obr. 7 Průměrné měsíční teploty půdy v hloubce 20 cm za období 15. 10. 2020 do 9. 7. 2024.



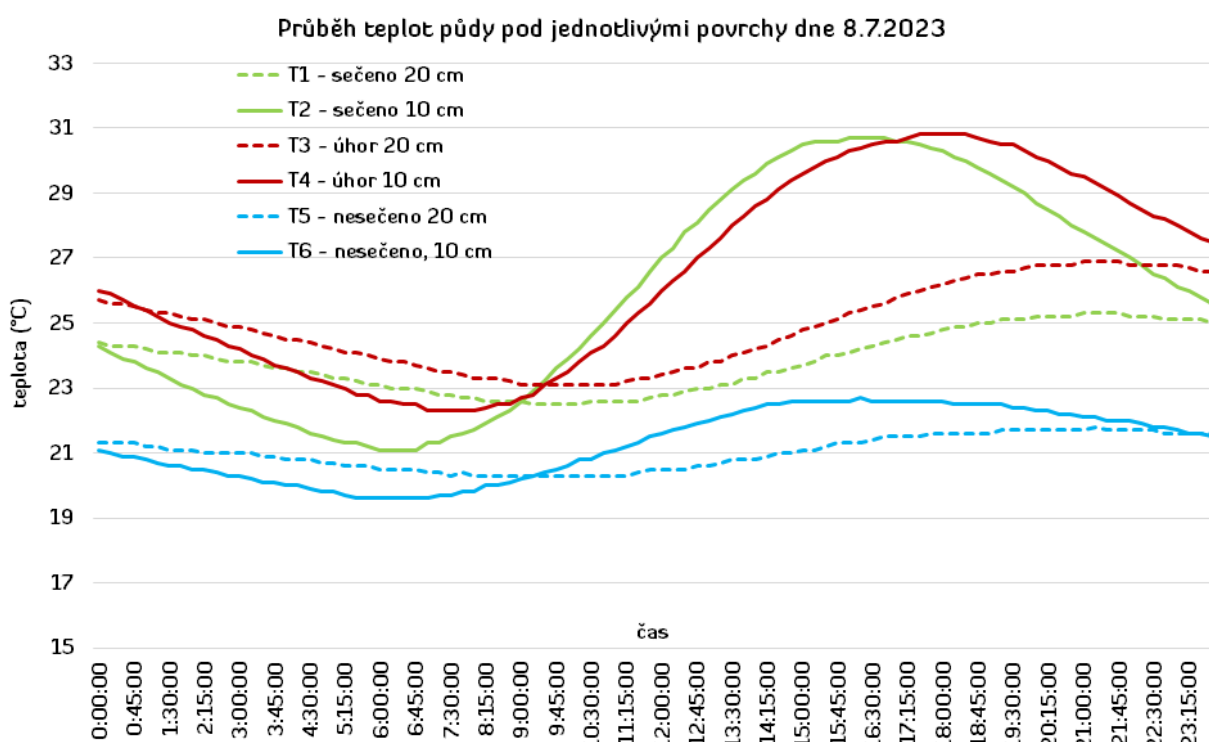
Obr. 8 Množství vody zachycené ve vrstvě 5–50 cm během srážek 21.–23. 8. 2022.



Obr. 9 Množství vody zachycené ve vrstvě 5–50 cm během srážek 15.–16. 6. 2024.

3.4 Průběhy teploty půdy ve vybraných dnech

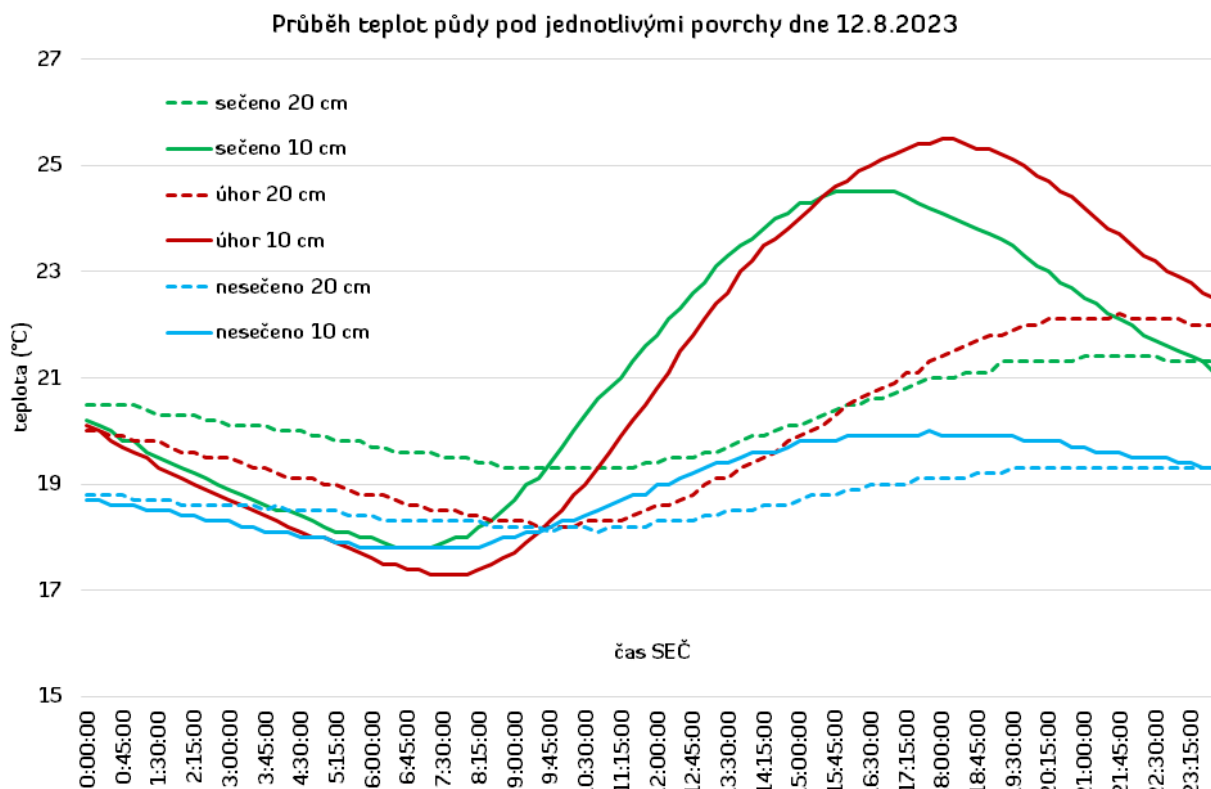
Vlivem pohlceného slunečního záření dochází k transformaci této energie na teplo, které zvyšuje v závislosti na albedu příslušných povrchů a dalších členů rovnice energetické bilance jejich teplotu. Při pravidelně sečeném trávníku je povrch půdy částečně odhalen a dochází tak k transformaci zářivé energie přímo na něm, což zvyšuje jeho teplotu. Na Obr. 10 je znázorněn průběh teplot půdy v jednotlivých variantách dne 8. 7. 2023 za situace, kdy byly zásoby půdní vláhly po předchozím období beze srážek na nízké úrovni, bylo slunečno a maximální denní teplota dosáhla 31,7 °C. Teplota půdy pod sečenou variantou v hloubce 10 cm byla při dosažení maxima cca o 8 °C vyšší než pod nesečenou variantou. Směrem do hloubky tyto rozdíly klesaly a v hloubce 20 cm byly již jen několik °C. U nesečené varianty byly rozdíly v teplotách v hloubce 10 a 20 cm poměrně malé a pohybovaly se kolem 1 °C, u sečené varianty a u černého úhoru dosáhly velikosti 5–6 °C. Větší gradient teplot je zároveň indikátorem i vyššího toku tepla do půdy.



Obr. 10 Průběh teplot půdy pod jednotlivými povrchy dne 8. 7. 2023 – nízká vlhkost půdy

V případě, že je vyšší zásoba půdní vláhly po dešti, jsou rozdíly za podobných situací menší (Obr. 11), část energie se spotřebovává na výpar z povrchu holé půdy a transpiraci, proto i dosažená maxima teploty půdy v hloubce 10 cm jsou nižší. Dne 12. 8. 2023 bylo rovněž slunečno celý den, avšak s ohledem na roční dobu byly hodnoty globálního záření cca o 15 % nižší než v předchozím případě, maximální denní teplota byla 29,3 °C.

Zajímavý je v obou případech posun v době výskytu maxima a minima teplot v hloubce 10 cm u variant s rostlinným pokryvem oproti černému úhoru. U černého úhoru je maximum dosahováno v obou případech přibližně o 2 hodiny později.



Obr. 11 Průběh teplot půdy pod jednotlivými povrchy dne 12. 8. 2023 – vysoká vlhkost půdy.

4. Diskuze

Na základě znalostí z rostlinné fyziologie a mezinárodně uznávaných postupů výpočtu vláhové potřeby nejen travních porostů neexistuje žádný důvod, proč by méně často sečené, a tudíž vyšší, travní porosty měly mít menší vláhovou potřebu než častěji sečené, které jsou nižší. U extenzivních trávníků je však nutno počítat s tím, že s postupem času se v nich začnou vyskytovat i jiné než původně vyseté rostlinné druhy, především pak dvouděložné rostliny z náletů z okolního prostředí. Na zdrojích těchto semen pak záleží, jakou skladbu bude mít porost ve svém klimaxovém stádiu. Pokud se v okolí vyskytují většinou ruderální plevely, je jen velmi malá pravděpodobnost, že v takovém porostu vznikne kopretinová loučka. Při méně častých sečích se navíc v těchto porostech mohou uplatňovat druhy, kterým častější sečení neprospívá. V Tab. 1 je uveden seznam rostlinných druhů, vyskytujících se po několikaletém trvání pokus v červnu 2024 na pokusných parcelkách. Tyto rostlinné druhy mohou mít odlišnou spotřebu vody oproti původně vysetým druhům v průběhu jejich vegetace, dochází k zasychání jejich nadzemních částí a tím současně dochází i ke snížení vláhové potřeby v letních a podzimních měsících. Snížení vláhové potřeby je dáno sníženou transpirací těchto rostlin a tím pochopitelně i sníženou spotřebou latentního tepla na výpar. Nelze proto logicky obhájit časté tvrzení, že při méně častých sečích budou tyto porosty ochlazovat okolí zvýšeným výparem vody a zároveň zadržovat větší množství vody v půdě.

Vyšší bylinné porosty přirozeně zastíňují povrch půdy před dopadem slunečních paprsků a transformací krátkovlnného záření na teplo na tomto povrchu. Tomu odpovídají i naměřené teploty pod jednotlivými variantami, jež jsou na zastíněném povrchu v letních měsících nižší a v extrémních případech může rozdíl mezi častěji sečenou a méně často sečenou variantou dosáhnout v hloubce 10 cm až 8 °C, na povrchu samozřejmě více.

Tab. 1 Seznam rostlinných druhů, vyskytujících se v jednotlivých variantách v červnu 2024.

druh		sečená	nesečená
<i>Achillea millefolium</i>	řebříček obecný	x	x
<i>Arrhenatherum elatius</i>	ovsík vyvýšený		x
<i>Bromus tectorum</i>	sveřep střešní		x
<i>Cerastium fontanum</i>	rožec prameništění		x

<i>Cirsium arvense</i>	pcháč rolní	x	x
<i>Convolvulus arvensis</i>	svlačec rolní	x	x
<i>Conyza canadensis</i>	turanka kanadská		x
<i>Crepis setosa</i>	škarda štětinkatá	x	x
<i>Daucus carota</i>	mrkev obecná	x	
<i>Erigeron annuus</i>	turan roční		x
<i>Festuca brevipila</i>	kostřava drsnolistá	x	x
<i>Festuca ovina</i>	kostřava ovčí		x
<i>Festuca rubra</i>	kostřava červená		x
<i>Festuca sp.</i>	kostřavy	x	x
<i>Fumaria officinalis subsp. Officinalis</i>	zemědým lékařský		x
<i>Geranium pusillum</i>	kakost maličký	x	x
<i>Lactuca serriola</i>	locika kompasová		x
<i>Lolium perenne</i>	jílek vytrvalý	x	x
<i>Medicago lupulina</i>	tolice dětelová	x	x
<i>Papaver rhoeas</i>	mák vlčí	x	
<i>Plantago lanceolata</i>	jitrocel kopinatý	x	x
<i>Plantago major</i>	jitrocel větší	x	
<i>Poa pratensis</i>	lipnice luční	x	x
<i>Polygonum aviculare</i>	truskavec ptačí	x	
<i>Sanguisorba minor</i>	krkavec menší	x	
<i>Taraxum officinale</i>	smetanka lékařská	x	x
<i>Trifolium fragiferum</i>	jetel jahodnatý	x	
<i>Trifolium medium</i>	jetel prostřední		x
<i>Trifolium pratense</i>	jetel luční	x	x
<i>Trifolium repens</i>	jetel plazivý	x	x
<i>Vicia cracca</i>	vikev ptačí		x

Vyšší porosty mají za následek snížení množství dopadlého slunečního záření na povrch půdy, tato zářivá energie se však transformuje na teplo na povrchu těchto porostů a pokud nemá porost dostatečnou schopnost se ochlazovat transpirací (zaschlé rostlinné části, nedostatek vláhy v půdě), dochází k jeho zahřívání. Vzduch uzavřený ve vyšším porostu působí jako izolační vrstva a omezuje tok tepla do půdy, takže zachycená energie se předává z větší části turbulentními toky do okolní atmosféry. Litschmann a Hadaš (2003) popisují případ, kdy za příhodných podmínek může při rozsáhlejších porostech vyšších uschlých lučních porostů docházet ke zvyšování maximální teploty vzduchu až o 3 °C oproti sousedním lokalitám.

Nepodařilo se prokázat, že by méně často sečené travní porosty v celkovém úhrnu zadržovaly více vláhy v půdě, v závislosti na fenologickém vývoji dochází k mírným odlišnostem mezi jednotlivými variantami, pod částečně zaschlými vyššími porosty byla naměřena vyšší vlhkost v hlubší vrstvě půdy, naopak po většinu doby byla nižší vlhkost ve svrchní vrstvě, takže v průměru byly rozdíly minimální.

Rovněž zasakování vláhy při vydatnějších deštích bylo u všech variant přibližně stejné, nelze potvrdit, že by častěji sečený porost infiltroval méně vody než vzrostlejší. Je však třeba mít na paměti, že pokusná parcela leží na rovině, takže voda nemůže příliš odtékat mimo toto území. Ve sklonitějším terénu mohou být podmínky odlišné. Zasakování vody je však poměrně komplikovaná záležitost a záleží zde na mnoha faktorech, kolik srážkové vody vsákne. Mohou se uplatňovat vlivy preferenčního proudění, repelence povrchu půdy, složení bylinného pokryvu, druh půdy, její utužení a další, nelze proto tyto výsledky generalizovat.

5. Závěr

Po vyhodnocení výsledků téměř již pětiletých měření na třech parcelkách se nepodařilo prokázat, že by méně časté sečení travních porostů mělo významný vliv na zadržování vláhy v půdě. Pokud jsou tyto rostliny zelené, je jejich vláhová spotřeba stejná anebo větší než u častěji sečeného porostu. Evapotranspirace nesečených porostů při jejich postupném usychání se snižuje a půdní vlhkost zejména v hlubší vrstvě a ke konci léta je vyšší než u pravidelně sečené varianty, takový porost představuje obdobu mulčování. Tento vývoj do značné míry závisí na druhovém složení takto vzniklého porostu, v sušším klimatu se v něm začnou prosazovat xerofytní druhy s nižšími nároky na vláhu, tento proces je však dlouhodobější a nelze jej uskutečnit během jedné vegetační sezóny.

Teplota půdy pod vyšším porostem je nižší, za jasných teplých dnů až o cca 8 °C, tato situace však nastala při nízkých vlhkostech půdy, takže to na aktuální evapotranspiraci mělo minimální dopad. Při vyšších vlhkostech půdy jsou rozdíly přibližně poloviční.

Ve veřejném prostoru se občas objevují tvrzení na podporu některých opatření v rámci nejen diverzifikace krajiny s odůvodněním, že se tím zadrží voda v krajině, zlepší zasakovací schopnosti půdy, lépe využijí srážky apod., bez nějakých relevantnějších podkladů. Tento příspěvek se pokouší uvést na pravou míru některá tvrzení o ovlivnění termického a hydrického režimu půdy pod různě udržovanými travními porosty. Bohužel získání věrohodných výsledků je časově náročnější, a tak v průběhu let, během nichž pokus probíhal, propagace méně častého sečení trávníku ustala a sama města přišla na to, že to není optimální řešení, jelikož posečení vyššího porostu je finančně náročnější, vyšší porost s různými plevelely a uschlými travami nepůsobí příliš esteticky apod. Období od r. 2019 bylo srážkově vydatnější než předchozí roky 2015–2019, takže problematika sucha nebyla tolik aktuální. Lze však předpokládat, že výsledky tohoto výzkumu se stanou opět aktuálními při nejbližší suché periodě a mohou být odborným podkladem při případných debatách na toto téma.

Poděkování

Výzkum byl podpořen projektem CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_017/0002334 Výzkumná infrastruktura pro mladé vědce a dále projektem TA ČR – SS07020449 „Omezení negativních dopadů meteorologických extrémů (teploty, větru a srážek) na veřejné zdraví a životní prostředí ve velkých aglomeracích“.

Literatura

- LERMAN, S. B., CONTOSTA, A. R., 2019. Lawn mowing frequency and its effects on biogenic and anthropogenic carbon dioxide emissions. *Landscape and Urban Planning* 182 (2019) 114–123.
- LITSCHMANN, T., HADAŠ, P., 2003. Mikroklima vybraných porostních stanovišť. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed): Seminář „Mikroklima porostů“, Brno, 26. března 2003, ISBN 80-86690_05-9, str. 59–65.
- PORO, J., EBDON, J. S., DACOSTA, M., BROWN, P. W., 2017. Effects of mowing height of cut and nitrogen on FAO-56 PM crop coefficients for recreational turf in the cool-humid region. *Crop Sci.* 56:1–11.
- STEHLÍK, M., 2020. Sekat, či nesekat? U nás, č. 6, s. 10–11.

Fyziologická reakcia *Pinus* sp. na stres zo sucha

Lenka Malovcová, Jana Kurjaková

Abstrakt

V štúdiu sa zameriavame na porovnanie rôznych druhov borovíc, ktoré môžu mať rozdielne obranné mechanizmy a rôzny potenciál odolávať stresu. Hodnotili sme fyziologické reakcie autochtónnych druhov (*Pinus sylvestris*, *P. cembra*, *P. mugo*) na stres zo sucha. V kontrolovaných podmienkach sme počas periódy sucha merali vodný potenciál, rýchlosť asimilácie CO₂, prieduchovú vodivosť, stratu vody pri zatvorených prieduchoch, morfológické charakteristiky listov a prieduchov a efektívnosť primárnej fázy fotosyntézy. Vodný potenciál rastlín dosahuje negatívne hodnoty, ktoré počas sucha klesajú. Počas silného stresu, aj pri kritických hodnotách takmer -3 MPa, ostávali prieduchy *P. mugo* mierne otvorené. Výsledkom bolo, že sadenice stále transpirovali aj asimilovali CO₂ a turgor sa ďalej znižoval. Takéto správanie môže byť rizikom pri strate kritického množstva vody. Pri *P. sylvestris* sme počas vodného stresu zaznamenali relatívne rýchle uzatváranie prieduchov v snahe vyhnúť sa dehydratácii. V rámci experimentu sme však zistili vysokú hodnotu minimálnej vodivosti ihlič *P. sylvestris*, čo znamená, že po uzatvorení prieduchov sadenice strácali výrazne viac vody než ostatné dva hodnotené druhy (zhruba 3-násobok oproti *P. mugo* a zhruba 6-násobok oproti *P. cembra*), ktoré majú v tomto ohľade funkčnejšie obranné mechanizmy. Špecifická listová plocha bola významne nižšia pri *P. sylvestris* a potenciálny index vodivosti prieduchov bol v porovnaní s ostatnými dvoma druhmi významne nižší pri *P. mugo*. Celkovo sa javí ako najodolnejší druh *P. cembra*: aj pri vysokých hodnotách potenciálnej vodivosti prieduchov sa tieto zavčas a vysoko efektívne zatvárajú. Zistili sme tiež pozitívny vzťah medzi vodným potenciálom nameraným pri takmer úplnom uzatvorení prieduchov a dĺžkou prieduchov, resp. primárnou fotochémiou.

Kľúčové slová: *Pinus* sp., sucho, vodný potenciál, fotosyntéza, minimálna vodivosť, prieduchy

Abstract

Nowadays, Scots pine is endangered in many areas due the progressing climate change, increasing temperatures and often drought periods. Different pines species can have different mechanisms of reaction and different degree of resistance. Therefore, we focused on the evaluation of physiological reaction of multiple autochthonous species of pines (*Pinus sylvestris*, *P. cembra* and *P. mugo*) on drought stress. In control conditions, we measured water potential, assimilation and transpiration rate, water loss at closed stomata, morphological characteristics of stomata and effectivity of light-dependent reactions of photosynthesis during increasing stress. Water potential of trees achieves negative values, decreasing during drought. During the severe stress, even at critical values under -3MPa, stomata of *P. mugo* remained slightly opened. The result was that seedlings continually transpired and assimilated CO₂, and turgor also continuously decreased. This behaviour can be risky at loss of critical water amount. During the water stress we found out that *P. sylvestris* closed its stomata relatively fast, trying to avoid dehydration. However, we found high value of needle minimum conductance for *P. sylvestris*. It means, that seedlings kept losing water significantly faster after closing stomata, than the other two evaluated species (about triple compared to *P. mugo* and 6-times faster than *P. cembra*). *P. cembra* and *P. mugo* have thus more functional defensive mechanisms in this matter. Needles morphology, such as specific leaf area and stomata characteristics of evaluated species, are also important. Specific leaf area was significantly lower in *P. sylvestris* and potential conductance index was significantly lower in *P. mugo* compared to the other two species. *P. cembra* appears to have the highest overall drought resistance: even at high values of potential conductance index, its stomata close earlier and highly effectively. We also found a positive relationship between water potential measured at almost completely closed stomata and stomatal length. Also, correlation between needle water potential causing 90% decrease in assimilation and many parameters characterising effectivity of photochemistry was statistically significant.

Kľúčové slová: *Pinus* sp., sucho, vodný potenciál, fotosyntéza, minimálna vodivosť, prieduchy

1. Úvod

Sucho je stav alebo časový interval, počas ktorého je zaznamenaný deficit vody v pôde, rastline alebo v atmosfére. Výskyt sucha môžeme sledovať z meteorologického, hydrologického a fyziologického hľadiska priamym zisťovaním vody v rastline (KOVALČIKOVÁ et al. 2011). Hlavné abiotické faktory, ktoré ovplyvňujú naše lesy, sú v súčasnosti extrémne suchá a horúčavy, ktoré prispievajú k výraznému zvyšovaniu mortality lesných porastov. Leto 2003 bolo najsuchším rokom za obdobie 1984 až 2016. Ďalšie extrémne sucho bolo zaznamenané v roku 2018 a v roku 2022 sa vyskytlo najextrémnejšie sucho za posledné storočia (KURJAK et al. 2022). Viacerí autori potvrdzujú, že mortalita lesov je často zapríčinená závažnými suchými obdobiami, ktoré sú prejavmi zmeny klímy (LAMY et al. 2014). Do budúcnosti budú pre dreviny určujúce aj ďalšie environmentálne podmienky ako vlhkosť vzduchu, koncentrácia CO₂, žiarenie a pôdne charakteristiky. Taktiež budú dôležité biologické faktory, napr. hustota porastov, zásoba vody v kmeni, hĺbka koreňov, morfológia listov, ich ochlpenie, ale aj mikroskopické pletivové štruktúrne a chemické rozdiely, ako sú charakteristiky prieduchov, hrúbka kutikuly, schopnosť osmotického prispôsobenia apod. Porozumieť fyziológii drevín je kľúčové, pretože rozdiely na úrovni fyziologických procesov môžu v konečnom dôsledku určovať, či stresovaný jedinec odumrie alebo prežije (KURJAK et al. 2022).

V súčasnosti pozorujeme enormnú náchylnosť borovicových porastov na stres zo sucha kvôli postupujúcej klimatickej zmene a častým extrémnym periódam. Súvisí to so zmenou vodného režimu, zníženou schopnosťou asimilovať uhlík, nízkou produktivitou a vitalitou drevín. Preto je sucho kľúčovým faktorom rozpadu borovicových porastov. Borovicové lesy samozrejme odumierajú nielen v dôsledku sucha; oslabené jedince sú tiež náchylnejšie na poškodenie biotickými škodlivými činiteľmi (hmyz, sypavky a pod.).

Fyziologické procesy drevín sú považované za citlivé indikátory stresu v rastlinách rastúcich v extrémnych podmienkach (NALEVANKOVÁ et al. 2018). Deficit pôdnej vody môže vyvolávať redukciiu prieduchovej vodivosti a transpirácie, čo je hlavným environmentálnym faktorom obmedzujúcim fotosyntézu na globálnej úrovni (GAO et al. 2017). Druhy rodu *Pinus* boli v minulosti považované za tolerantné voči suchu, ale výrazný pokles vodného potenciálu pôdy a následne pletív vedie často k dramatickej zmene fyziologických procesov. Fotosyntéza je pritom jeden z najcitlivejších procesov na suchu aj vysoké teploty (ANEV et al. 2016). V extrémnych podmienkach je mimoriadne dôležité nielen včasné, ale tiež efektívne (úplné) uzatváranie prieduchov, ako aj nepriechodnosť kutikuly asimilačných orgánov pre vodné pary. Uzatvorenie prieduchov, ako mechanizmus limitujúci straty vody, znamená hlavne obmedzenie fotosyntézy v podmienkach rastu rastlín, ale tiež obmedzenú reguláciu teploty pri podmienkach sucha a limitovaný príjem minerálnych látok (MARTIN-STPAUL et al. 2017). To môže ďalej nepriamo prehĺbiť stres a negatívne ovplyvniť rýchlosť asimilácie a veľké množstvo čiastkových procesov metabolizmu.

Dreviny môžu mať rôzne mechanizmy odolnosti voči deficitu vody. V tejto práci sa preto zameriavame na kvantifikáciu vplyvu sucha na viaceré fyziologické procesy troch autochtónnych druhov borovíc. Vzhľadom na to, že skúmané druhy okupujú rôzne ekologické niky, je predpoklad, že sa budú v niektorých parametroch odlišovať a budú využívať rozdielne mechanizmy (s rôznou efektívnosťou) na prispôsobenie sa suchu.

2. Materiál a metodika

Opis experimentu

V kontrolovaných podmienkach sme skúmali fyziologické mechanizmy borovíc a ich reakciu na stres zo sucha. Experiment prebiehal medzi 11. augustom a 27. septembrom 2021. Tento pokus teda trval 45 dní, počas ktorých sadenice neboli zalievané. Fyziologické merania sme zisťovali na 11 jedincoch *P. cembra* a na 12 jedincoch *P. mugo* a *P. sylvestris*. Vek sadeníc bol 3 roky. Borovice sme udržiavali v klimatizovaných komorách (EKOCHL 1500P, Agelantoni, Taliansko, obr. 1) v kontrolovaných podmienkach.



Obr. 1 Rastová komora, v ktorej boli umiestnené sadenice.



Meranie vodného potenciálu

Vodný potenciál borovic sme opakovane merali na 11 až 12 jedincoch na druh. Na meranie vodného potenciálu sme použili Scholanderovu tlakovú komoru (Obr. 2). Odobrali sme vzorky ihlíc, urobili na nich jemný rez a vložili sme ich do komory. Potom sme komoru uzavreli a zvyšovali tlak v jej vnútri. S využitím binokulárnej lupy (Obr. 2) sme identifikovali tlak, pri ktorom sa objavila prvá kvapka vody na viditeľnom reze ihlice. Záporná hodnota tohto tlaku je vodný potenciál ihlice.



Obr. 2 Scholanderova tlaková komora s binokulárnou lupou (vľavo) a pozorovanie ihlice zatvorenej v komore (vpravo).

Výmena plynov a fluorescencia chlorofylu

Výmenu plynov sme sledovali na 11 až 12 jedincoch. Merania prebiehali opakovane a paralelne s meraniami vodného potenciálu. Vďaka tomu sme neskôr mohli stanoviť bod (vodný potenciál), kedy došlo k poklesu asimilácie a prieduchovej vodivosti o 90 % oproti maximálnym hodnotám meraným na začiatku pokusu. Pre tieto merania sme využili gazometer (Obr. 3). Gazometrický systém Li6400XT (LICOR, USA) je zariadenie, ktoré využívame na meranie výmeny plynov (CO_2 a vodných pár). Označené ihlice sme bez poškodenia uzavreli do komory a zabezpečili sme potrebný zdroj svetla. Koncentráciu CO_2 sme udržiavali pri stálej hodnote 400 ppm. Namerané hodnoty sme po ukončení pokusu normalizovali na plochu ihlíc, pričom v priebehu pokusu boli opakovane merané vždy rovnaké ihlice.

Na všetkých jedincoch sme merali tiež fluorescenciu chlorofylu (Obr. 3) pomocou fluorimetra Handy PEA (Hansatech, GB). Pred meraním boli na jednotlivé sadenice uchytené 2 zatemňovacie klapky a po 30-minútovej adaptácii na svetlo bola vzorka ožiarená sekundu trvajúcim saturačným impulzom (o vysokej intenzite toku fotónov). Dve hodnoty boli spriemerované a pre analýzy bola využívaná priemerná hodnota fluorescencie chlorofylu na jedinca.

Minimálna vodivosť listu, prieduchové charakteristiky a špecifická listová plocha

Minimálnu vodivosť listu sme stanovili podľa straty hmotnosti odstrihnutých konárikov (mass loss of detached leaves). Odtrhnuté konáriky zo zavlažených sadeníc sme vložili do rastovej komory a opakovane sme merali ich hmotnosť. V klimatizovanej komore sme udržiavali stálu teplotu vzduchu 25 °C a relatívnu vlhkosť 60 % (BLACKMAN et al., 2019; DUURSMA et al., 2019).

Na posúdenie dĺžky a hustoty prieduchov boli odobraté odtlačky pomocou transparentného laku. Z každého odtlačku bol vyhotovený snímok integrovanou kamerou pripojenou k mikroskopu Motic BA210 (Motic Electric, Rakúsko). Na merania dĺžky a hustoty prieduchov bol použitý softvér ImageJ 1.51k. Z nameraných veličín bol stanovený index potenciálnej vodivosti (PCI), ktorý možno použiť ako proxy pre teoretickú maximálnu vodivosť prieduchov pre vodnú paru.

Pre určenie špecifickej listovej (SLA) plochy sme naskenovali plochu ihlíc (skener HP Scanjet G4010; Hewlett Packard, CA, USA). Naskenované ihlice boli vysušené pri 75 °C do konštantnej hmotnosti (približne 48 h). Bola zisťovaná hmotnosť sušiny a následne vypočítaná SLA (ako podiel plochy ihlíc a hmotnosti sušiny).

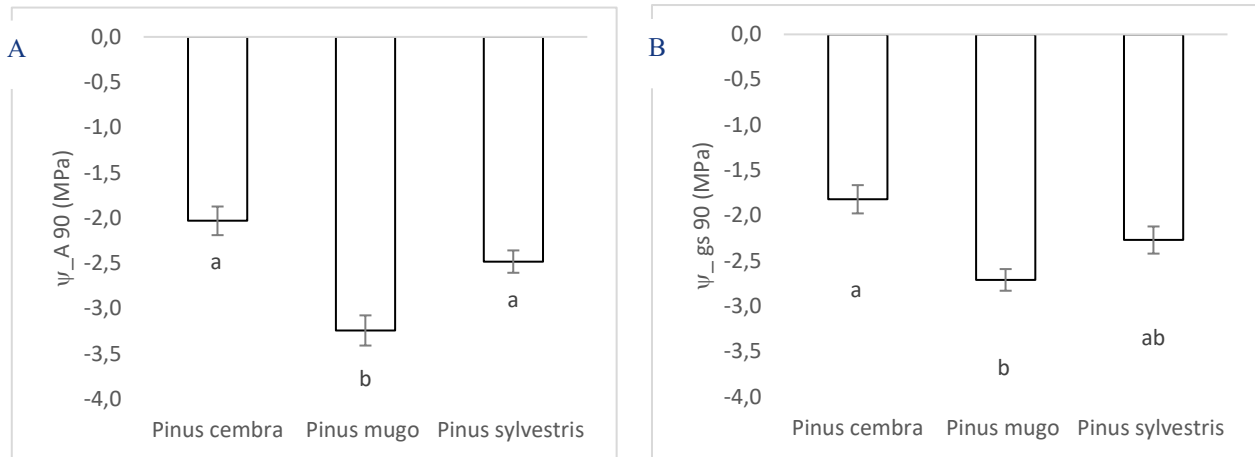


Obr. 3 Systém pre meranie výmeny plynov (vľavo) a fluorimeter na meranie fluorescencie chlorofylu (vpravo).

3. Výsledky

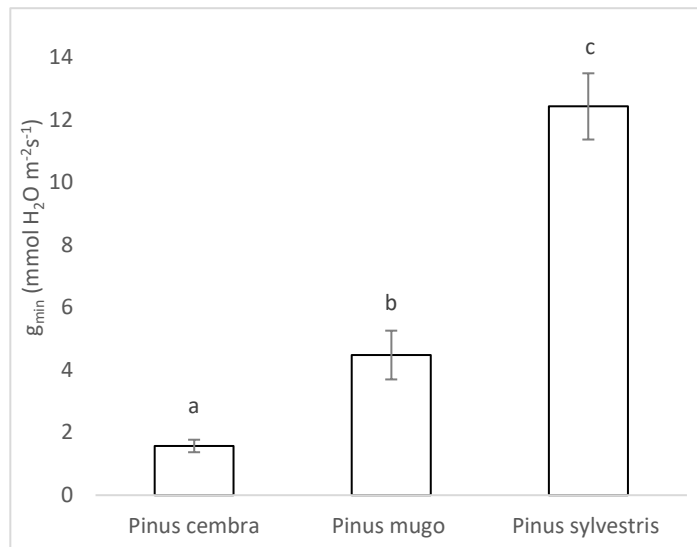
Najvyššiu (najmenej zápornú) hodnotu vodného potenciálu ihlíc, pri ktorej pokles asimilácie dosiahol 90 % (ψ A90), mala *P. cembra* s hodnotou -2,03 MPa. Najnižšiu hodnotu vodného potenciálu ihlíc, pri ktorých pokles asimilácie dosiahol 90 % mala *P. mugo* s hodnotou -3,24 MPa (Obr. 4). *P. mugo* počas suchých období stráca omnoho viac vody a následkom môže byť, že sa v bunkách znižuje turgor. Naproti tomu, *P. cembra* a *P. sylvestris*, sa správali „opatrnejšie“ a prieduchy zatvárali už pri menšom poklese vodného potenciálu.

Najvyššiu hodnotu vodného potenciálu ihlíc, pri ktorých pokles prieduchovej vodivosti dosiahol 90 % (ψ gs90) dosahovala *P. cembra* s hodnotou -1,82 MPa. Najnižšiu hodnotu vodného potenciálu ihlíc, pri ktorých pokles prieduchovej vodivosti dosiahol 90 %, má *P. mugo* s hodnotou -2,71 MPa. *P. cembra* a *P. sylvestris* mali lepšiu schopnosť regulácie uzatvárania prieduchov než *P. mugo*, čím efektívnejšie predchádzajú vysychaniu pletív. Rozdiely sú pri oboch hodnotených parametroch štatisticky signifikantné (Obr. 4). Keď porovnáme hodnoty ψ A90 a ψ gs90, tieto majú podobný priebeh, pričom hodnoty ψ A90 sú o niečo nižšie (Obr. 4), čo indikuje časovo oneskorenú 90%-nú limitáciu fotosyntézy oproti limitácii vodivosti prieduchov. Tento jav je najvýraznejší pri *P. mugo*, kde je relatívna diferenciacia medzi parametrami najväčšia.



Obr. 4 Vodný potenciál, pri ktorom pokles asimilácie dosiahol 90% (a) a vodný potenciál, pri ktorom pokles prieduchovej vodivosti dosiahol 90 % (b). Zobrazená je stredná chyba priemeru ($\pm$); rozdielne písmená označujú štatisticky významný rozdiel ($\alpha=0,05$ %).

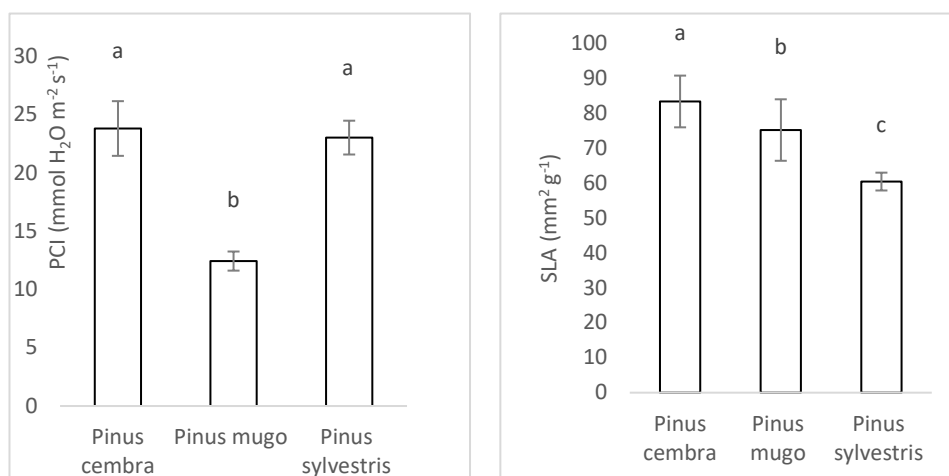
Najnižšiu hodnotu minimálnej vodivosti ihlíc (Obr. 5) dosahovala *P. cembra* ($1,6 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) a najvyššiu hodnotu dosahovala *P. sylvestris* ($12,4 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Z hľadiska štatistickej významnosti sme zaznamenali rozdiel medzi všetkými testovanými druhmi. *P. cembra* má lepšiu schopnosť minimalizácie strát vody v suchých periódach v porovnaní s ďalšími dvoma testovanými druhmi. *Pinus sylvestris* po uzatvorení prieduchov strácala výrazne najväčšie množstvo vody. Bol to zhruba 6-násobok oproti *P. cembra* a 3-násobok oproti *P. mugo*.



Obr. 5 Minimálna vodivosť ihlíc. Zobrazená je stredná chyba priemeru ($\pm$); rozdielne písmená označujú štatisticky významný rozdiel ($\alpha=0,05$ %).

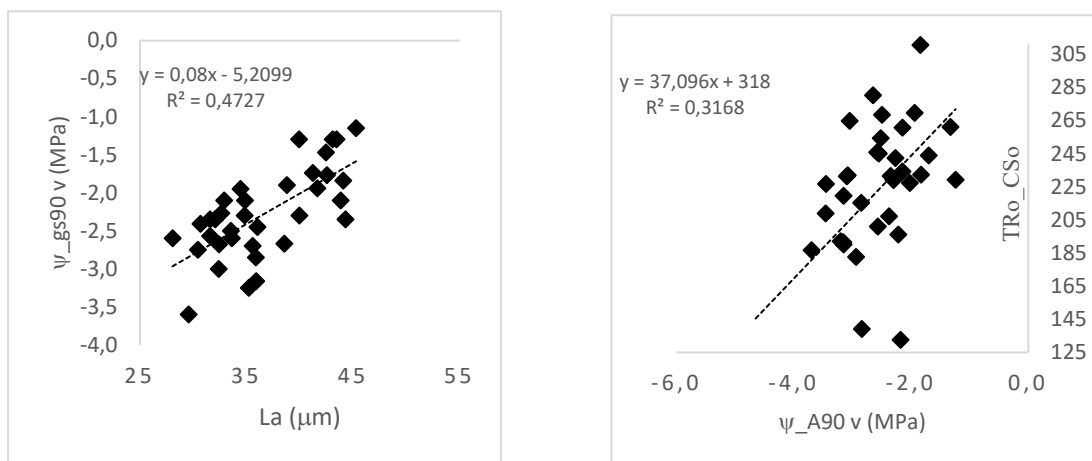
P. mugo dosahuje najnižšiu hodnotu indexu potenciálnej vodivosti prieduchov s hodnotou $12,4 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Obr. 6) a významne sa líši od ostatných dvoch druhov, keďže ihlice *P. mugo* mali nízku hustotu prieduchov. *P. cembra* dosahovala najvyššiu hodnotu indexu potenciálnej vodivosti prieduchov s hodnotou $23,80 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a približne rovnakú hodnotu dosahovala aj *P. sylvestris*.

Najvyššiu špecifickú listovú plochu má *P. cembra* s hodnotou $83 \text{ mm}^2 \text{ g}^{-1}$ a najnižšiu špecifickú listovú plochu mala *P. sylvestris* s hodnotou $60 \text{ mm}^2 \text{ g}^{-1}$ (Obr. 6). Všetky rozdiely medzi testovanými druhmi boli štatisticky významné, ale najvýraznejšie sa s najnižšou priemernou hodnotou odlišuje *P. sylvestris* od *P. cembra*.



Obr. 6 Index potenciálnej vodivosti prieduchov (vľavo), špecifická listová plocha (vpravo). Zobrazená je stredná chyba priemeru ($\pm$); rozdielne písmená označujú štatisticky významný rozdiel ($\alpha=0,05\%$).

Korelácia medzi vodným potenciálom, pri ktorom pokles prieduchovej vodivosti dosiahol 90 % a dĺžkou prieduchov, vysvetľuje 47% variability (koeficient determinácie $R^2 = 0,47$). Čím sú prieduchy menšie, tým hlbší je pokles vodného potenciálu pri ich zatvorení. Zistili sme tiež koreláciu medzi vodným potenciálom, pri ktorom pokles asimilácie dosiahol 90% a prenosom elektrónov do reakčného centra. Tento vzťah vysvetľuje 32% variability (koeficient determinácie $R^2 = 0,32$). Čím je rýchlejší prenos elektrónov, tým viac sa vodný potenciál A90 blíži k nule a naopak; čím je prenos elektrónov pomalší, tým je vodný potenciál A90 nižší (Obr. 7).



Obr. 7 Korelácia medzi vodným potenciálom gs90 a dĺžkou prieduchov (vľavo); korelácia medzi vodným potenciálom A90 a prenosom elektrónov v reakčnom centre (vpravo).

4. Diskusia

Podľa nameraných výsledkov mal *P. mugo* z hodnotených druhov najvýraznejší pokles vodného potenciálu (zhruba - 3 MPa pri dosiahnutí 90 % redukcie prieduchovej vodivosti a rýchlosti asimilácie). Toto správanie je z ekologického

vcelku pochopiteľné, keď uvážime, že kosodrevina rastie vo vysokých polohách, kde býva nedostatok zrážok skôr výnimkou. Navyše, dreviny rastúce vo vysokých polohách (resp. pochádzajúce z vyšších polôh) prejavujú snahu o maximalizáciu fotosyntézy, zrejme vzhľadom na kratšie vegetačné obdobie (JAMNICKÁ et al. 2019, KONÔPKOVÁ et al. 2018). To sa nedá povedať o *P. sylvestris*, ktorá často rastie práve na extrémne suchých stanovištiach a hlboký koreň jej často umožňuje odolávať silnému suchu. *P. cembra* sa správala odlišne a výrazne opatrnejšie ako ďalšie dva druhy. Špecifikom tejto dreviny je prežívanie v podmienkach krátkej vegetácie s minimálnou konkurenciou, kde síce spadne veľké množstvo zrážok, retenčná schopnosť plytkých plôch je však často minimálna. To môže súvisieť s rýchlym uzatváraním prieduchov aj za cenu zníženej rýchlosti asimilácie.

Prieduchy majú dve kľúčové funkcie: zabezpečenie transpirácie, čo umožňuje zásobovanie listov živinami, regulovanie teploty listov, a tiež zabezpečujú vstup CO₂ do listov (MARTIN-STPAUL et al. 2017). Prieduchy sa dynamicky otvárajú a zatvárajú počas sucha, ale taktiež reagujú na zmenu intenzity svetla, vlhkosti vzduchu a koncentrácie CO₂ v okolí listov, resp. vo vnútri listov (DUURSMA et al. 2019). Dreviny sa snažia regulovať stratu vody jednak uzatvorením prieduchov, ale tiež vytvorením kutikuly, aby minimalizovali straty vody počas období sucha (ANFODILLO et al., 2002). Čo sa týka veľkosti prieduchov, tu v literatúre neexistuje úplná zhoda, avšak väčšina prác poukazuje na rýchlejšiu reakciu menších prieduchov (DRAKE et al.). Štúdiá na buku taktiež potvrdila, že suchom stresované jedince buka tvoria menšie prieduchy o menšej hustote (PETRÍK et al. 2020). V prípade borovic to bolo oproti očakávaniam naopak, pričom sa potvrdila korelácia medzi včasnejším zatváraním väčších prieduchov. V tomto ohľade tiež môžeme konštatovať, že *P. cembra* a *P. sylvestris* majú v nestresujúcich podmienkach výrazne väčší potenciál pre rýchlu výmenu vodných pár aj CO₂. To vyplýva z indexu potenciálnej vodivosti, ktorý je kalkulovaný z dĺžky a hustoty prieduchov.

Minimálna vodivosť je prestup vodných pár cez kutikulu alebo cez nekompletné uzatvorené prieduchy a z hľadiska prežívania môže mať kľúčovú úlohu počas extrémnych období sucha (BRODRIBB et al. 2020). Rozdiely v tom to parametre boli markantné, pričom výrazne najvyššiu odolnosť vykazovala *P. cembra* a neefektívnou sa ukázala byť *P. sylvestris*. Opäť pritom platí, že borovica lesná zrejme viac ťaží zo svojho hlbokého koreňa, než z efektívneho narábania s vodou. V prírode poznáme ďalší takýto prípad, ktorým je dub – ten je vo všeobecnosti považovaný za drevinu dobre odolávajúcu suchu, aj keď celkovo sa správa nešetrne, nezatvára zavčas prieduchy a vytranspiruje veľké množstvá vody aj v podmienkach sucha (KUBOV et al. 2020). V našich podmienkach sa doposiaľ v súvislosti so negatívnym vplyvom sucha spomínal najmä smrek, avšak aj vyššie spomínané dreviny sa stávajú čoraz citlivejšie na nedostatok vody, čo často vedie k zvýšenej mortalite celých porastov.

Podľa hodnôt z OJIP krivky sa hodnoty fluorescencie chlorofylu počas stresu menia, čo poukazuje na fotochemickú redukciu primárneho chinónu A (Q_A), ktorý limituje rýchlosť pohybu elektrónov v reakčných centrách vo fotosystéme II (ANTAL et al. 2009). Pri poklese zachytávania svetla anténymi komplexami (ABS/CSo) sa zvyšuje hustota v neaktívnych reakčných centrách. Znížením prenosu elektrónov (TR/CSo, ETo/CSo) sa aktívne reakčné centrá menia na neaktívne a to zapríčiňuje redukciu prenosu elektrónov a pokles výkonnosti fotosystému II. Nízka koncentrácia chlorofylu je charakteristickým znakom napr. oxidatívneho stresu, ktorého následkom toho je zmena kompozície membrán tylakoidov, vysoká degradácia chlorofylu alebo redukcia syntézy chlorofylu (DINIS et al. 2016). V našom prípade sme pozorovali vzťah medzi včasným zatváraním prieduchov a udrzaním vysokej rýchlosti prenosu elektrónov v rámci svetelnej fázy fotosyntézy.

5. Záver

Pri meraní vodného potenciálu A90 a gs90 sme zistili, že *Pinus mugo* v kontrolovaných podmienkach stresu zo sucha aj pri hodnotách okolo -3MPa stále stráca vodu. Na druhej strane *Pinus cembra* a *Pinus sylvestris* nestrácali také množstvo vody ako *Pinus mugo*, skôr sa správali „opatrnejšie“. *P. mugo* má aj počas sucha mierne otvorené prieduchy, stále transpiruje a asimiluje CO₂, čo spôsobuje väčšie riziko straty vody než je tomu pri *P. cembra* a *P. sylvestris*. *Pinus sylvestris* však aj po uzatvorení prieduchov stále strácala relatívne veľké množstvo vody v porovnaní s *P. cembra* a *P. mugo*, čo môže vysvetľovať problémy s odumieraním borovicových porastov napr. na Záhorí. Zaujímavé sú korelácie medzi vodným potenciálom A90/gs90 a parametrami primárnej fotochémiie, resp. dĺžkou prieduchov. Zistili sme pozitívny vzťah medzi vodným potenciálom A90 a prenosom elektrónov do reakčného centra a rýchlejšiu reakciu väčších prieduchov na suchu. Nezodpovedanou ostáva otázka vplyvu dielčích metabolických procesov (enzymatická limitácia, fotorespirácia a pod.) v podmienkach veľkého rozpätia teplôt, v rámci ktorých sa skúmané dreviny vyskytujú.

Podakovanie

Táto práca vznikla s finančnou podporou projektov: APVV-21-0270, APVV-21-0224 a projektu VEGA 1/0392/22.

Použitá literatúra

- ANEV, S. et al., 2016. Stomatal control on photosynthesis in drought-treated subalpine pine saplings. *Genetics and Plant Physiology*, vol. **6**, p. 43–53.
- ANFODILLO T. et al., 2002. Minimum cuticular conductance and cuticle features of *Picea abies* and *Pinus cembra* needles along an altitudinal gradient in the Dolomites (NE Italian Alps). *Tree Physiology*, vol. **22**, i. 7, p. 479–487.
- ANTAL, T. et al., 2009. Probing of photosynthetic reactions in four phytoplanktonic algae with a PEA fluorometer. *Photosynthesis Research*, vol. **102**, p. 67–76.
- BLACKMAN, C. J. et al., 2019. Drought response strategies and hydraulic traits contribute to mechanistic understanding of plant dry-down to hydraulic failure. *Tree Physiology*, vol. **39**, p. 910–924.
- BRODRIBB, T. J. et al., 2020. Hanging by a thread? Forests and drought. *Science*, **368** (6488), 261–266.
- DINIS, L. T. et al., Kaolin-based, foliar reflective film protects photosystem II structure and function in grapevine leaves exposed to heat and high solar radiation. *Photosynthetica*, vol. **54**, no. 1, p. 47–55.
- DRAKE, P. L. et al., 2013. Smaller, faster stomata: scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance. *Journal of experimental botany*, **64** (2), 495–505.
- DUURSMA, R. et al., 2019. On the minimum leaf conductance: its role in models of plant water use, and ecological and environmental controls. *New Phytologist*, vol. **221** no. 2, p. 693–705.
- GAO Y. et al., 2017 Response of water use efficiency to summer drought in a boreal Scots pine forest in Finland. *Biogeosciences*, vol. **14**, p. 4409–4422.
- JAMNICKÁ, G. et al., 2019. Norway spruce (*Picea abies* L.) provenances use different physiological strategies to cope with water deficit. *Forests*, **10** (8), 651.
- KONÔPKOVÁ, A. et al., 2018. Differences in photochemistry and response to heat stress between silver fir (*Abies alba* Mill.) provenances. *Trees*, **32**, 73–86.
- KOVALČÍKOVÁ, D. et al., 2011. Meranie transpirácie sadeníc buka lesného (*Fagus sylvatica* L.) v podmienkach sucha. Středová, H., Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí. Skalní mlýn, 2.–4. 2. 2011.
- KUBOV, M. et al., 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**(11), 2985.
- KURJAK, D. et al., 2022. Mechanizmy pôsobenia sucha na fyziológiu drevín: poškodenie a odolnosť. *APOL*, vol. **3**, no. 2, p. 57–62.
- LAMY, J. B. et al., 2014 Limited genetic variability and phenotypic plasticity detected for cavitation resistance in a Mediterranean pine. *New Phytologist*, vol. **201**(3), p. 874–886.
- MARTIN-STPAUL, N. et al., 2017. Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. *Ecology letters*, vol. **20** no. 11, p. 1437–1447.

NALEVANKOVÁ, P. et al., 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*, vol. **11** no. 6.

PETRÍK, P. et al., 2020. Stomatal and leaf morphology response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances transferred to contrasting climatic conditions. *Forests*, **11**(12), 1359.

Vplyv meniacich sa podmienok prostredia na vodný režim buka a smreka v jedľovo-bukovom lesnom vegetačnom stupni

The Impact of Changing Environmental Conditions on the Water Regime of Beech and Spruce in the Fir-Beech Forest Vegetation Zone

Paulína Nalevanková*, Peter Popadič, Katarína Střelcová, Jaroslav Vido

Katedra přírodního prostředí, Lesnícka fakulta, Technická univerzita o Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, SK, xnalevankova@tuzvo.sk

Abstrakt

Príspevok sa zameriava na posúdenie dynamiky zmien obvodov kmeňa a transpiračného prúdu dreveniny smrek obyčajný (*Picea abies*) a buk lesný (*Fagus sylvatica* L.) v závislosti od vlhkostného režimu pôdy a meteorologických faktorov. Štúdia prebiehala na výskumnej ploche lokalizovanej v blízkosti NPR Dobročský prales, ktorá patrí do 5. jedľovo-bukového LVS. Merania sa realizovali v priebehu vegetačnej sezóny (01. 05 do 31. 10) rokov 2021 a 2022. Zo študovaného obdobia bola práve vegetačná sezóna 2022 charakteristická priemernými teplotami výrazne prevyšujúcimi normál (okrem septembra). V danej vegetačnej sezóne bol zároveň zaznamenaný vysoký zrážkový deficit (196 mm), ktorý sa prejavil výskytom období so zníženou dostupnosťou pôdnej vody. Stres suchom sa prejavil v limitácii procesu transpirácie, kedy v sezóne 2022 napríklad celková transpirácia u smreka bola o 52 % menšia ako v predošlej sezóne. Deficit pôdnej vody sa prejavil tiež vo vodnom statuse stromov pozorovanom prostredníctvom zmien obvodu kmeňa a z nich odvodených parametrov. Zo študovaných drevín citlivejšie reagoval smrek, u ktorého sme okrem výraznejšieho zmršťovania (zosýchania) obvodu kmeňa detegovali aj vyššie hodnoty kumulatívneho vodného deficitu kmeňa a tiež výraznejší pokles celkového sezónneho prírastku na obvode. Oslabenie jedincov smreka pôsobením sucha malo za následok napadnutie porastu podkôrnym hmyzom a jeho následné vyťaženie v roku 2023. Sucho tu zohralo rolu významného predispozičného faktora. Analýzou údajov sme ďalej potvrdili štatisticky významný vplyv faktorov prostredia na mieru transpiračného prúdu, pričom sme však v roku 2022 oproti roku 2021 zaznamenali pokles v tesnosti týchto vzťahov. Daný jav pripisujeme práve abnormálnym podmienkam prostredia nastoleným v roku 2022 – enormný deficit zrážok, vysoké teploty a evaporačné požiadavky ovzdušia. Všeobecne, výška transpirácie bola u dreveniny buk násobne vyššia ako u smreka. Pri ideálnych podmienkach pretranspiroval buk 250 l/deň, pričom zaznamenané maximum smreka bolo 56 l/deň.

Kľúčové slová: transpiračný prúd, zmeny obvodu kmeňa, buk, smrek, faktory prostredia, sucho

Abstract

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.

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

1. 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 rastlinám, dreviny nevyhnutne spôsobujú stres, ktorý ovplyvňuje životne 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. V súčasnosti 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 ekonomickej a ekologickej významných drevín na meniace sa poveternostné podmienky a rôzne úrovne zásobovania 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 predloženom príspevku sa zameriavame na transpiračný prúd a zmeny obvodov kmeňov smreka (*Picea abies*) a buka (*Fagus sylvatica* L.), našich najrozšírejších, ekonomickej a ekologickej najvýznamnejších drevín a ich reakcie na podmienky prostredia s dôrazom na výskyt epizód so zníženou dostupnosťou pôdnej vody. Odozvu vodného statusu hodnotíme na vzorníkoch dospelých stromov vybraných v ochrannom pásme Dobročského pralesa, na experimentálnej ploche, v rámci ktorej je monitorovaný aj vodný potenciál pôdy a meteorologické faktory.

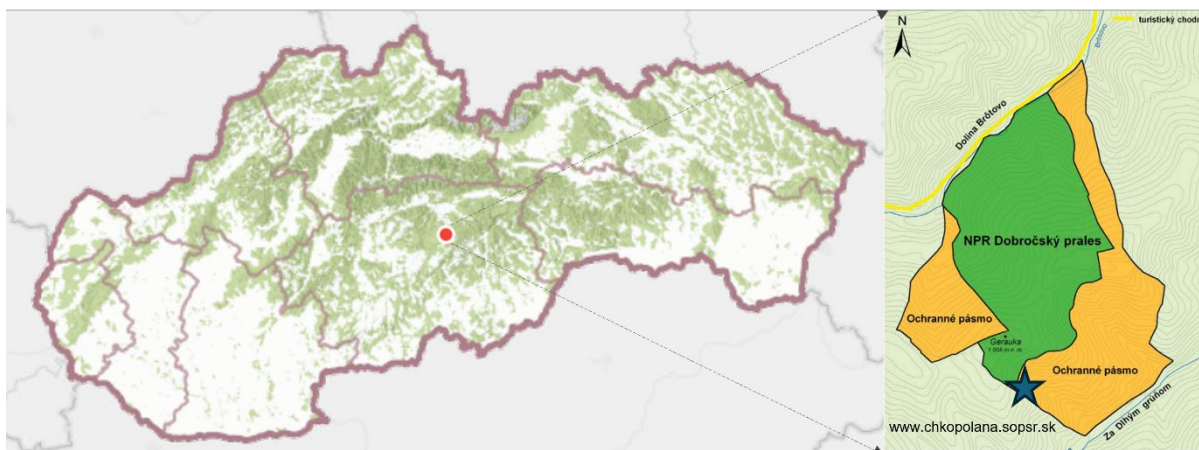
2. Metodika

2.1 Charakteristika výskumnej plochy

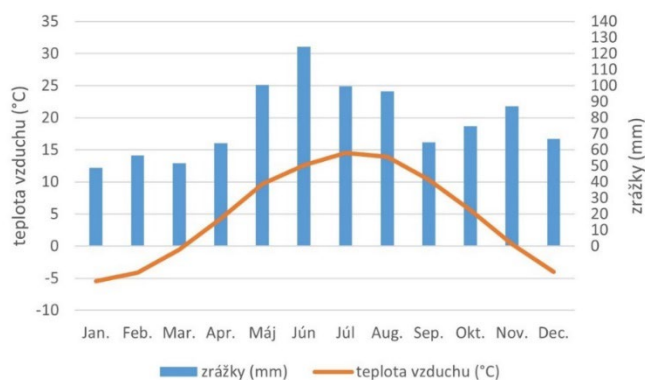
Na výskumnej lokalite v tesnej blízkosti Dobročského pralesa, situovanej v piatom jedľovo-bukovom lesnom vegetačnom stupni, sa prvé merania spustili v roku 2020. Lokalita sa nachádza sa v okrese Brezno nad obcou Sihla na strednom Slovensku, v strednej časti Veporských vrchov (Obr. 1).

Územie z geologického hľadiska patrí do kráľovohôrskej 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 pomeštné sa vyskytujúcej pseudoglebovej kambizeme s vysokým podielom skeletu (Molčanyi 2022).

Klimatické pomery danej oblasti charakterizuje klimadiagram na Obr. 2. Je zostrojený z 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. Na základe dlhodobých údajov bol 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.



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



Obr. 2 Klimadiagram výskumnej lokality.

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, merali 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 časti výsledky sú kvôli prehľadnosti namerané hodnoty (transpiračný prúd, zmeny obvodu kmeňa, ...) uvádzané ako priemer hodnôt smrekov a bukov.

2.2 Monitoring podmienok prostredia

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 odvodených veličín potenciálna evapotranspirácia (Penman 1948) a sýtosťný doplnok využitím nameraných meteorologických údajov sme využili softvér Mini32 od dodávateľa prístrojov EMS Brno.

Na výskumných plochách 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 (MPa). Senzory každej sondy (hĺbok 10, 25 a 50 cm) sú pripojené na vlastný dataloger Microlog SP3 (ESM Brno, Česká republika). Dané zariadenie dokáže zmerať vodný potenciál pôdy (SWP) 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.

2.3 Meranie na kmeňoch stromov

Na vybraných dospelých vzorníkoch buka a smreka sme za pomoci Sap flow metra SF 81 od českej firmy ESM Brno merali transpiračný prúd vybraných drevín. Snímač je určený na kontinuálne meranie toku xylému u stromov, ktoré majú priemer väčší ako 12 cm. Využíva metódu tepelnej bilancie „Tree trunk Heat Balance method“ (THB). Princíp spočíva v nainštalovaní troch nehrdzavejúcich elektród radiálne na os kmeňa, do ktorých prúdi striedavý elektrický prúd. Časť xylému medzi elektródami je týmto prúdom ohrievaná a v miestach, kde ihlice prechádzajú floém je izolácia kvôli zabráneniu prúdenia el. energie. Transpiračný prúd odvádza časť tepla xylému (medzi elektródami) preč a určuje sa z množstva tepla, ktoré je potrebné doplniť na udržanie stálej teploty. Riadiaca jednotka systému, po zadaní parametrov potrebných pre kalkuláciu (obvod kmeňa v mieste merania a hrúbka borky + floému) prostredníctvom softvéru Mini32, udáva výsledné hodnoty transpiračného toku vyjadrené v kilogramoch za hodinu na celý strom.

V dnešnej dobe je často používanou metódou na výskum vzťahu medzi klímou, rastom dreviny a jej vodnou bilanciou určovanie zmien obvodu kmeňa pomocou automatických dendrometrov. Túto metódu označujú Leštianska et.al (2023) ako nedeštruktívnu a kontinuálnu, poskytuje konkrétne hodnoty v konkrétnych časových intervaloch od hodinových, denných až po sezónne. Na meranie zmien obvodu kmeňov v čase 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, ktoré sa po jednoduchom napojení (USB/IRda adaptéra) prenesenú do prenosného počítača, v ktorom je nainštalovaný softvér Mini 32 bez potreby demontáže dendrometra. Dátová pamäť prístroja dokáže uložiť až 50 000 hodnôt po dobu troch rokov čo zabezpečuje lítiovo-iónová batéria. V prípade poškodenia batérie sú údaje uložené v pamäti prístroja. Prístroj dokáže detegovať zmeny už na úrovni 1 μ m a maximálny možný rozsah merania je 6,4 cm (EMS Brno 2018).

2.4 Spracovanie nameraných údajov

Sťahovanie nameraných údajov, ako aj ich kontrola a predbežné spracovanie boli vykonané prostredníctvom softvéru Mini32 v.10.2.17.0 dodávaného výrobcom meracích zariadení (EMS Brno, Česká republika). Vďaka tomuto softvéru je možné údaje skontrolovať priamo v teréne, dokonca aj graficky. Umožňuje tiež súbory prečistiť od chybných údajov (*Erase, Data editing*), vytvárať priemery, agregácie alebo vrátiť poslednú nameranú hodnotu v mnohých časových intervaloch (x-minútové, x-hodinové, denné, mesačné, ročné atď.; *Mean values*), ďalej kalkulovať základné štatistické charakteristiky alebo regresie, spájať alebo nadpájať súbory, export dát do textových či excelových formátov pre ďalšie spracovanie a podobne. Z nameraných údajov sa najprv v Mini32 vytvorili hodinové a denné priemery, resp. sumy spracovávaných parametrov. Rovnako sa daný softvér, presnejšie jeho mód *PrgmCalc*, využil na vypočítanie veličín potenciálna evapotranspirácia (Penman 1948) a sýtosťný doplnok pomocou nameraných meteorologických údajov. Pri transpiračnom toku bol na substrakciu nulovej hodnoty (na grafické odčítanie tepelných strát v sap flow premenných meraní THB metódou) využitý doplnok *Base line*. Všetky získané dáta boli exportované do MS Excel, v ktorom boli ďalej spracovávané a vytvárané grafické výstupy. 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).

3. 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

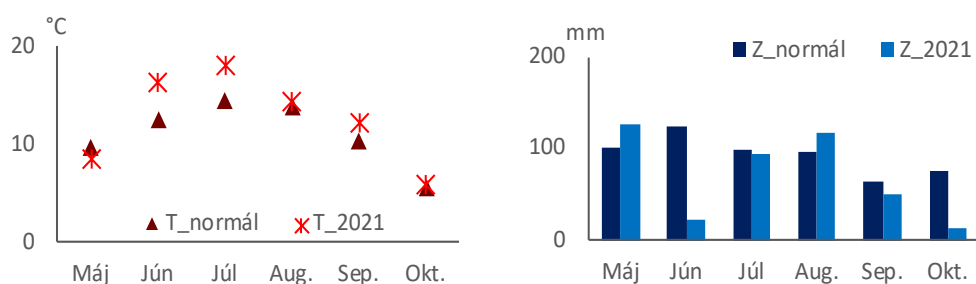
v rozličných lesných ekosystémoch. Z toho dôvodu bol vodný potenciál pôdy meraný pre každý z nich (zmiešaný les a smreková monokultúra) a vyhodnocovaný tiež osobitne. Záujmové sezóny rokov 2021 a 2022 sme z klimatologického hľadiska vyhodnotili na základe porovnania mesačných priemerov teplôt vzduchu, respektíve úhrnov zrážok s dlhodobými normálmi.

3.1 Zhodnotenie meteorologických charakteristík za vegetačnú sezónu 2021 a 2022 vo vzťahu k dlhodobým priemerom

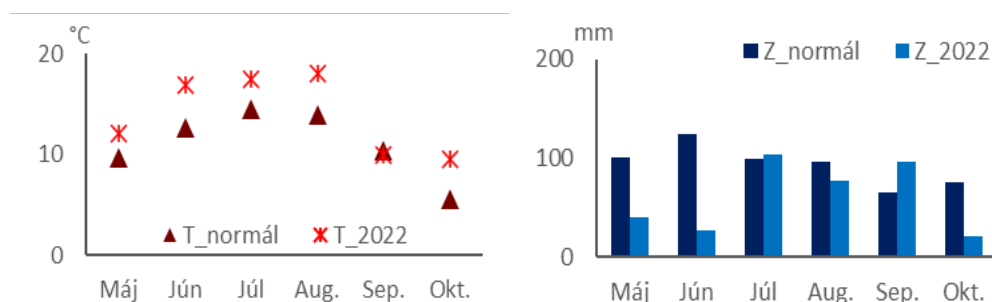
V blízkosti výskumnej plochy je umiestnená meteorologická stanica, na ktorej sa počas doby trvania výskumu merali meteorologické prvky. Tie predstavujú významný faktor, ktorý vo veľkej miere ovplyvňuje fyziologické procesy drevín. Namerané priemerné hodnoty pre teplotu vzduchu a úhrny zrážok pre roky 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 teploty dlhodobého priemeru ($T_{\text{normál}}$) 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. 4). 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. 4 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 Porovnanie priemernej mesačnej teploty vzduchu a priemerného úhrnu zrážok za rok 2021 s normálmi.

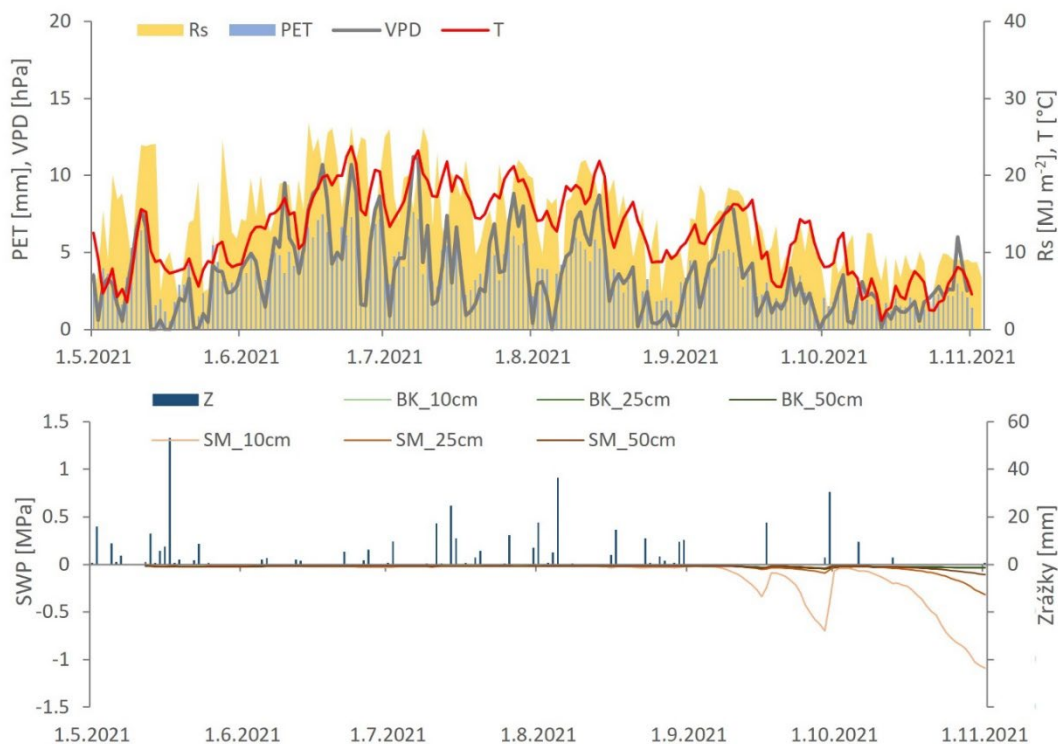


Obr. 4 Porovnanie priemernej mesačnej teploty vzduchu a priemerného úhrnu zrážok za rok 2022 s normálmi.

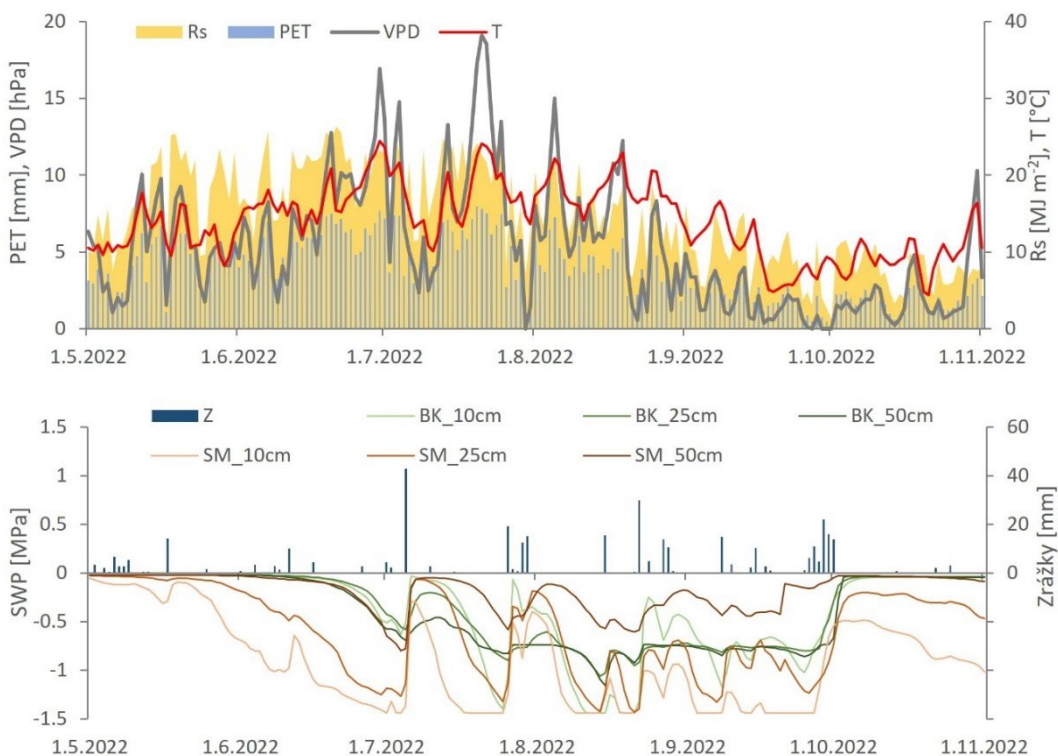
3.2 Priebeh meteorologických podmienok a vodného potenciálu pôdy vo vegetačnej sezóne 2021 a 2022

Vo vrchnej časti Obr. 5 je znázornený priebeh teploty vzduchu, globálnej radiácie (R_s), sýtosťného doplnku (VPD) potencionalnej evapotranspirácie (PET) na výskumnej ploche v blízkosti Dobročského pralesa. Pri pohľade na graf môžeme tvrdiť, 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. Potencionálna 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 sýtosťný doplnok (VPD), 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. 5 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.



Obr. 5 Sezónny priebeh priemerných denných teplôt vzduchu (T), globálnej radiácie (R_s), sýtosťného doplnku (VPD), potencionálnej evapotranspirácie (PET), vodného potenciálu pôdy (SWP) v hĺbkach 10, 25 a 50 cm a úhm zrážok (Z) za vegetačnú sezónu máj–október 2021.

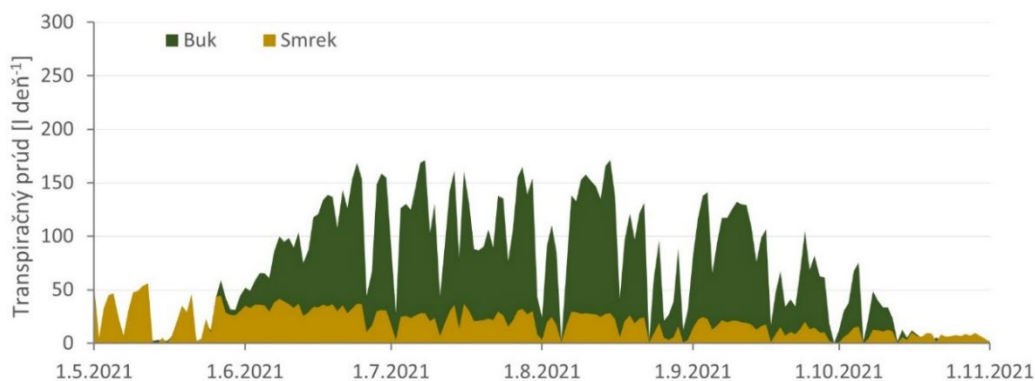


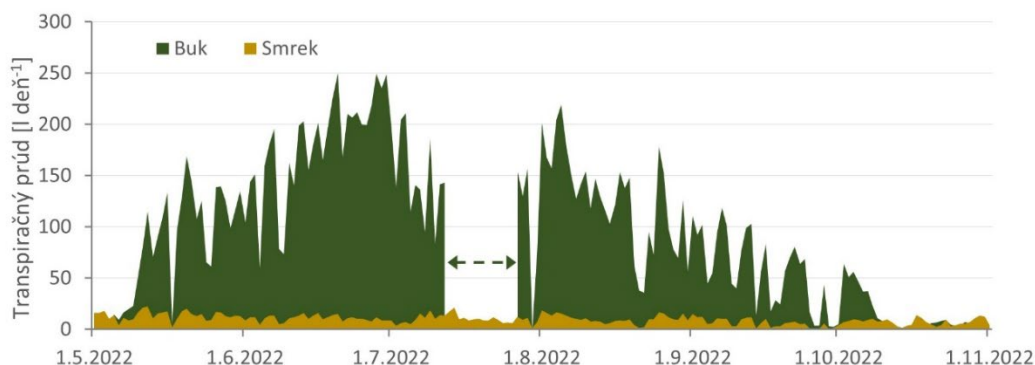
Obr. 6 Sezónny priebeh priemerných denných teplôt vzduchu (T), globálnej radiácie (R_s), sýtosťného doplnku (VPD), potencionálnej evapotranspirácie (PET), vodného potenciálu pôdy (SWP) v hĺbkach 10, 25 a 50 cm a úhm zrážok (Z) za vegetačnú sezónu máj–október 2022.

Vegetačná sezóna v roku 2022 bola sa vyznačovala situáciami so zníženou dostupnosťou pôdnej vody (Obr. 6). 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 aj maximálna možná merateľná hodnota vodného potenciálu pôdy 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 minimálnemu sýtoštnému 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, naopak, boli zaznamenané práve v smrekovom poraste.

3.3 Transpiračný prúd, dynamika zmien obvodu kmeňov a vodný status smreka a buka v priebehu sledovaných sezón 2021 a 2022

Na Obr. 7 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. 7 Sezónny priebeh transpirácie drevín buk a smrek za sledované obdobie 2021 a 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 straší 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 medziročnej 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 SPW (Obr. 6) kolísala počas celej sezóny a dosahovala vysoké 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 predošlom roku, hlavne asi vďaka 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.

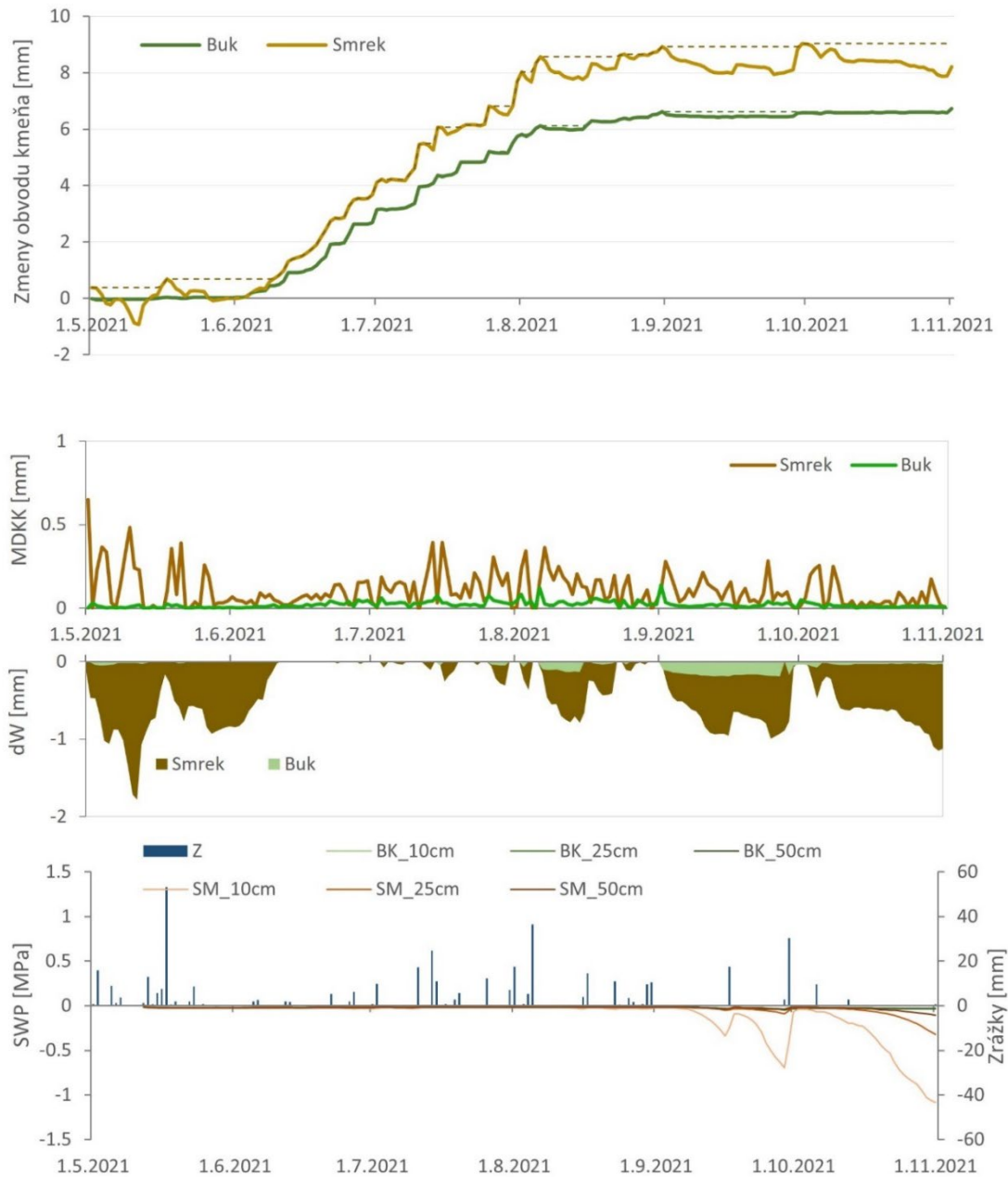
Na obr. 8 je znázornená sezónna dynamika zmien obvodu priemerného kmeňa (ZOK) smreka a buka v roku 2021. Počiatkové výraznejšie kolísanie obvodu v sezóne u dreviny smrek je spôsobené doplňovaním vody zo zimného obdobia a výskytom výdatných májových zrážok. Nárast obvodu kmeňa zaznamenávame až začiatkom 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. 9). 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 dreviny smrek sa bolo ukončené dňa 05. 07. 2022, kedy napršalo 43 mm zrážok, následkom čoho drevina 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 nastalo ďalšie zo série markantných zmršťovaní – obvody kmeňov sa zmenšovali, kumuloval sa účinok deficitu zrážok. U buka v porovnaní so

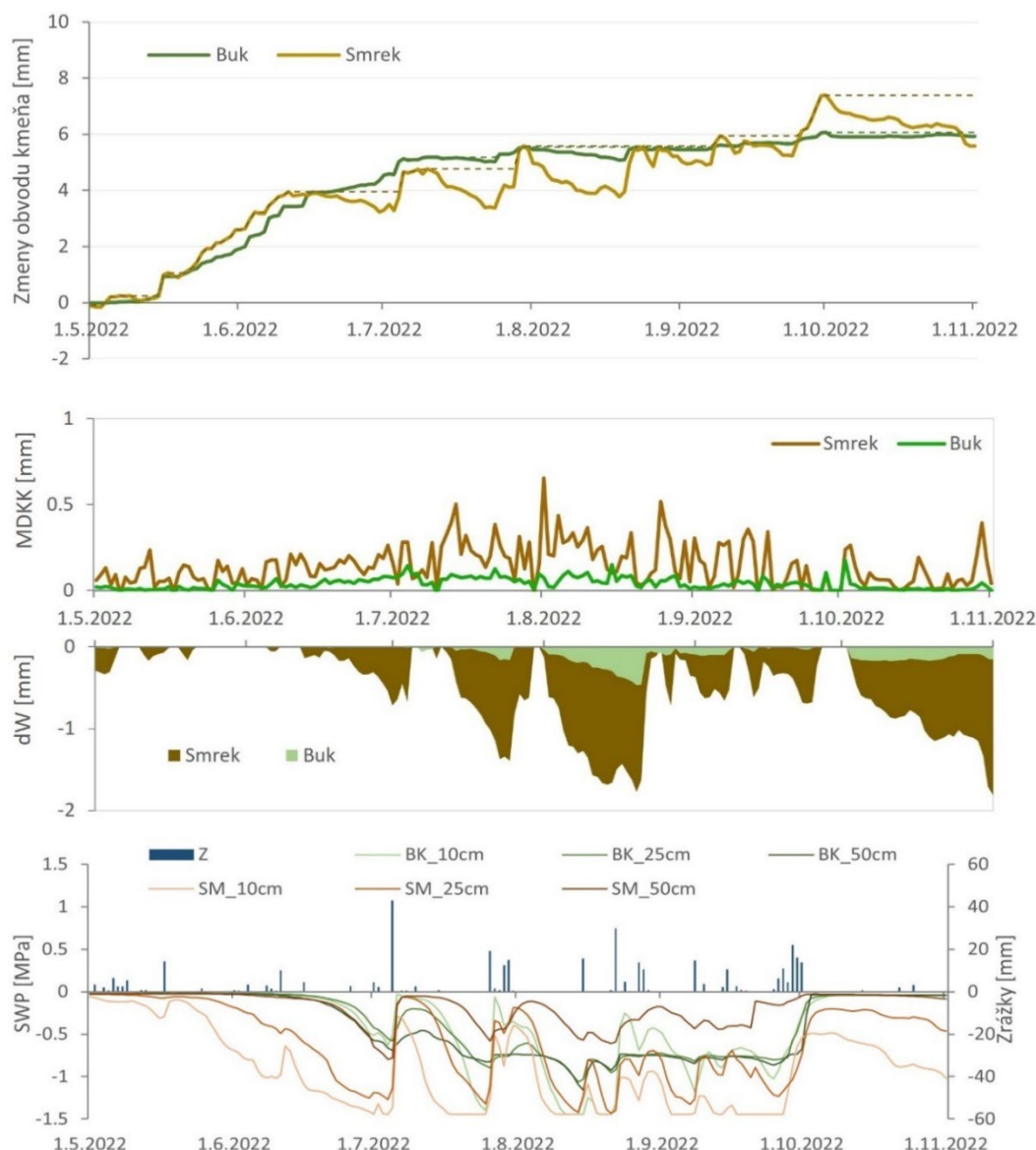
smrekom celkovo dochádzalo k menšiemu zmršťovaniu kmeňa, do júna skôr len k stagnácii nárastu. Ako bolo spomenuté, hodnoty SWP dosahovali počas danej vegetačnej sezóny minimálne merané hodnoty nielen v hĺbke 10 cm, ale aj v 25 cm. Takýto priebeh je charakteristický pre celé vegetačné obdobie 2022, ako pre stanovište dreviny smrek, tak aj pre buk a evidujeme 4 dlhodobejšie 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.

V stredných častiach na Obr. 8 a 9 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 doobedným 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 ΔW . Čím viac sú hodnoty ΔW 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.

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. 9, kde vegetačná sezóna 2022 bola zrážkovo hlboko podpriemerná, čo ovplyvnilo aj mieru zmršťovania kmeňa. Pri zníženej dostupnosti vody, nočná expanzia (napučevanie) 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) predstavuje rozdiel medzi predchádzajúcim maximom obvodu a maximom 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 kumulatívne 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 faktoru. Výhodou je to, že sú odvodené z údajov z citlivých dendrometrov, ktoré predstavujú technicky nenáročnú, nedeštruktúrnú a pomerne dostupnú metódu meraní.



Obr. 8 Sezónna dynamika zmien obvodu kmeňa drevín buk a smrek (vrchná časť obrázka) v roku 2021 a maximálne denné kontrakcie kmeňa (MDKK) a vodný deficit kmeňa (ΔW) (v strede), doplnené o vodný potenciál pôdy SWP v hĺbkach 10, 25 a 50 cm pre obe dreviny (spodná časť)



Obr. 9 Sezónna dynamika zmien obvodu kmeňa drevín buk a smrek (vrchná časť obrázka) v roku 2022 a maximálne denné kontrakcie kmeňa (MDKK) a vodný deficit kmeňa (ΔW) (v strede), doplnené o vodný potenciál pôdy SWP v hĺbkach 10, 25 a 50 cm pre obe dreviny (spodná časť).

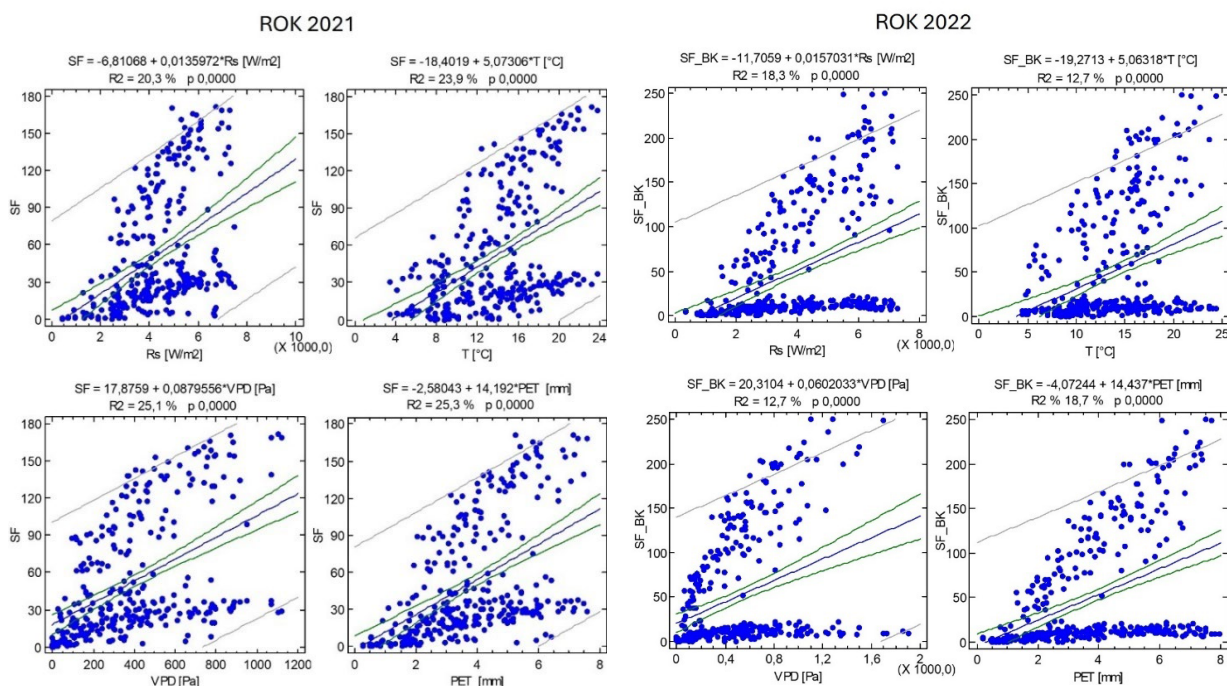
3.4 Štatistické zhodnotenie vzťahu transpiračného prúdu a faktorov prostredia

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. 10).

Analýza potvrdila štatisticky signifikantný vplyv viacerých prvkov na transpiračný prúd na hladine významnosti $\alpha = 0,05$, a to žiarenia, teploty vzduchu, sýstostného doplnku a potenciálnej evapotranspirácie (R^2 v intervale 20,3 – 25,3). Najtesnejší vzťah sa aj 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 ($R^2 = 18,7$, $R = 0,43$) – relatívne slabý vzťah.

Podobne sme pokles zaznamenali aj pri ostatných premenných, teda 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 určená 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. 10 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) ($\alpha = 0,05$).

4. 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. Odzrkadľilo 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 predpokladáme, že 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 júly 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.

PodĎakovanie

Táto práca vznikla s finančnou podporou projektov APVV-21-0224, APVV-19-0183 a projektov VEGA číslo 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_pd_p.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, E., 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), 156.

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: Technická univerzita 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 E uropean 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

Srážkové poměry oblasti Malé Hané a jejich vliv na pěstování silážní kukuřice

Precipitation conditions in the Malá Haná region and their influence on the cultivation of maize for silage

Pavel Nerušil¹, Jaroslav Rožnovský^{1,2}, Miroslav Jurka³, Ladislav Menšík st.⁴, Ladislav Menšík ml.¹

¹ Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Dmlovská 507/73, 161 06 Praha 6 – Ruzyně, nerusil@vurv.cz, ladislav.mensik@vurv.cz

² Mendelova univerzita v Brně, Zahradnická fakulta, Valtická 43, Lednice 616 00, jaroslav.roznovsky@mendelu.cz

³ Hanácká zemědělská společnost Jevíčko, a.s., Třebovská 713, 569 43 Jevíčko, m.jurka@seznam.cz

⁴ AGROSPOL a.d., Knínice 338, 679 34 Knínice, agrosopolkninice@email.cz

Abstrakt

V posledních dvou desetiletích se v celé ČR včetně regionu Malá Haná (Boskovická Brázda) zvyšuje četnost projevů sucha, které jsou vyvolány nízkými úhrny srážek ve vegetačním období s trváním od pár týdnů až po několik měsíců, a které mají významný vliv na pěstování kukuřice seté. Cílem studie bylo vyhodnotit srážkové poměry období 2001–2020 oblasti Malé Hané a jejich vliv na výnosy silážní kukuřice v období 2016–2023. Srážkové poměry v období 2001–2020 byly zpracovány na základě údajů z klimatologické stanice Jevíčko (ČHMÚ, pobočka Ostrava). Výnosy kukuřice seté určené k výrobě siláže byly zjišťovány v období 2015–2023 v zemědělských podnicích tohoto regionu (Hanácká zemědělská společnost Jevíčko, a.s., resp. AGROSPOL, agrární družstvo Knínice) v poloprovozních pokusech. Analýza srážkových úhrnů i počet dnů s jejich výskytem prokázala vysokou proměnlivost srážek. Počet dnů se srážkami představuje 120 až mírně přes 200 dnů v roce. Denní úhrny 10 mm a více až na výjimky představují méně než polovinu ročního srážkového úhrnu. Analýza produkce silážní kukuřice v dané oblasti za období 2016–2023 prokazuje vysokou proměnlivost výnosů (14,67 až 20,52 t.ha⁻¹). Nízké výnosy silážní kukuřice byly zaznamenány v mimořádně suchém roce 2018 a dále i v roce 2017. Vyšší produkci silážní kukuřice (stabilnější výnosy) i v suchých obdobích (častější výskyt vláhového deficitu) lze dosáhnout při pěstování kukuřice v systému úzkých řádků (0,375 m). S ohledem na rychle se měnící podmínky prostředí, je nadále potřebné získávat informace o růstu kukuřice ve vztahu k počasí /srážky, vlhkost půdy apod./, hustotě porostů i organizaci setí za účelem udržení současných výnosů a kvality píce.

Klíčová slova: silážní kukuřice, úzkořádková technologie, výnos, úhrn srážek, Boskovická brázda

Abstract

Over the past two decades, the frequency of drought events caused by low rainfall during the growing season, lasting from a few weeks to several months, has increased throughout the Czech Republic. This trend is particularly evident in the Malá Haná region (Boskovice Furrow), where drought has significantly impacted maize cultivation. The objective of this study was to evaluate the precipitation conditions in the Malá Haná region from 2001 to 2020 and their effects on silage maize yields between 2016 and 2023. Precipitation data for the 2001–2020 period were obtained from the climatological station at Jevíčko (CHMI). The yields of maize sown for silage production were assessed from 2015 to 2023 on two farms in the region through semi-operational experiments. An analysis of total rainfall and the number of days with precipitation revealed a high degree of variability in rainfall patterns. The number of days with precipitation ranges from 120 to slightly over 200 days per year. Daily rainfall totals of 10 mm or more, with a few exceptions, account for less than half of the annual rainfall. The analysis of silage maize production in the area from 2016 to 2023 shows considerable variability in yields, with figures ranging from 14.67 to 20.52 t ha⁻¹. The growing seasons of 2017 and 2018 were characterized by exceptionally low silage maize yields. Cultivating maize in narrow rows (0.375 m) has been shown to enhance silage maize production, even under arid conditions. In light of the rapid environmental changes, it is crucial

to collect data on maize growth in relation to weather, rainfall, soil moisture, etc., stand density, and sowing organization. This will help maintain current yields and forage quality.

Keywords: corn silage, narrow-row technology, yield, total precipitation, Boskovice Furrow area

1. Úvod

Světové zemědělství, respektive zemědělská produkce, která je určena k výživě lidí nebo ke krmení hospodářských zvířat, je výrazně ovlivněna variabilitou a změnou klimatu (Parry *et al.*, 2004; Lal, 2004; Olesen *et al.*, 2011; Steenwerth *et al.*, 2014; Hasegawa *et al.*, 2018; Wiebe *et al.*, 2019). Celosvětová zemědělská produkce se za posledních 50 let významně zvýšila, ale budoucí poptávka po obilovinách, krmivech a obnovitelných zdrojích energie se v důsledku rostoucí populace výrazně zvýší (Tilman *et al.*, 2002; Godfray *et al.*, 2010; Urruty *et al.*, 2016). Vyšší objem rostlinné produkce je možné v současné době zajistit jen díky intenzivnímu obhospodařování půdy (Oldfield *et al.*, 2019) pomocí postupů, jako jsou např. závlahy, hnojení, ale i hustota porostů (Li *et al.*, 2022) či rozmístění rostlin v prostoru (Mackey *et al.* 2016; Lindsey *et al.* 2019).

Kukuřice je jednou z celosvětově nejproduktivnějších plodin. Udržitelná intenzifikace zemědělské výroby má zásadní význam pro zvýšení globální poptávky po produkci potravin i objemných krmiv včetně kukuřice apod. s minimálním dopadem na životní prostředí (Ball *et al.* 2005; Garnett *et al.* 2013; Rockström *et al.* 2017; Struik and Kuiper 2017; Xie *et al.* 2019; Joseph *et al.* 2023; Staniszewski *et al.* 2023). Rozlohou pěstitelské plochy patří kukuřici třetí místo na světě po pšenici a rýži, přičemž v produkci zrna zaujímá dokonce první místo. Celková světová výměra silážní kukuřice v roce 2020 dosahovala 201,98 mil. ha a průměrný výnos činil 57,55 t.ha⁻¹ (FAO, 2022).

Celková výměra osevních ploch silážní kukuřice v ČR kukuřice v roce 2023 podle údajů ČSÚ činila více než 213 tis. ha, přičemž v posledním období je patrný spíše pokles osevních ploch a celkové produkce (viz. tab. 1). Průměrný výnos silážní hmoty se v posledních letech zpravidla pohyboval na úrovni 35–37 t.ha⁻¹, avšak v roce 2023 došlo vlivem nepříznivého počasí (výskyt period sucha ve vegetačním období) k propadu průměrného výnosu na 30,56 t.ha⁻¹ (ČSÚ, 2024). K obdobným propadům výnosů dochází obvykle v těch ročnících, kdy v důsledku dlouhodobého nedostatku srážek v kombinaci vysokými teplotami vzduchu a intenzivním výparem z půdy rostliny trpí výrazným stresem ze sucha a předčasně zasychají, než fyziologicky dozrávají při nižší kvalitě vyprodukované píce (viz. např. sklizňové roky 2015 a 2018).

Tab. 1 Osevní plochy, produkce a průměrný výnos kukuřice na siláž v ČR (2019–2023).

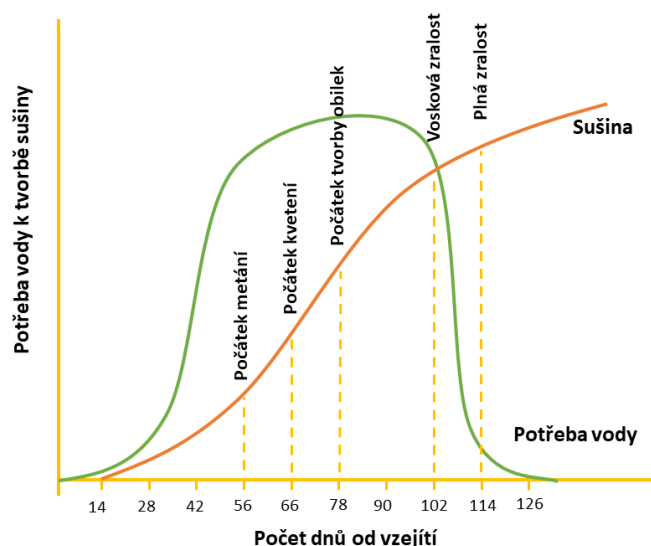
Rok	Výměra kukuřice (ha)	Produkce kukuřice (t)	Průměrný výnos (t.ha ⁻¹)
2019	231 367	8 243 654	35,63
2020	234 742	8 832 117	37,62
2021	228 486	8 431 655	36,90
2022	212 067	7 615 122	35,91
2023	213 596	6 526 873	30,56

Pozn.: průměrný výnos v zelené hmotě (sušina 35 %)

Zdroj: ČSÚ 2024

Kukuřice (*Zea mays* L.) je C4 plodina (podle způsobu fixace CO₂ při fotosyntéze), která dobře využívá sluneční energii a produkuje velké množství biomasy (Gaevaya *et al.*, 2023). Pro tento typ rostlin je charakteristická vyšší rychlost fotosyntézy (přibližně 60 mg CO₂ na 0,01 m² asimilačního povrchu za 1 hodinu) a tím také vysoká účinnost fotosyntézy (Liu *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2024). Kukuřice patří mezi teplomilné plodiny s vysokým nárokem na půdní podmínky a dostatek vláhy i živin. Za nejvhodnější oblasti pro její pěstování lze označit lokality s průměrnou roční teplotou 9–10 °C a 16,5–17 °C za vegetační období duben–září (Kim *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2014). Přitom je nezbytné, aby v takto teplotně příznivých oblastech roční úhrn srážek přesahoval hranici 500 mm, z toho alespoň 300 mm v průběhu vegetace (Nagy and Huzsvai, 1996; Xu *et al.*, 2022). Díky specifické stavbě listů dosahuje (na rozdíl od C3 rostlin, např. trávy) 2–3x efektivnějšího využívání vody a živin při tvorbě výnosu (produkce sušiny). Spotřeba vody na 1 kg sušiny (tj. transpirační koeficient) představuje 349 l, což je podstatně méně než např. u ječmene (527 l), cukrovky (443 l) nebo píce nářsky nejvýznamnějších leguminóz /jetel 698 l, resp. vojtěška až 800 l/ (Larcher, 1988; Zimolka, 2008; KWS OSIVA, 2012). V době prodlužovacího růstu stébla potřebuje kukuřice přijímat nejen velké množství živin, ale i vody (polovina června až srpen). Rostliny mají nejvyšší nároky na vodu v období mezi metáním a mléčnou zralostí (obr. 1),

kdy vyžaduje 80–120 mm srážek za měsíc. Nejvíce citlivá na sucho je kukuřice v době květu blizen, kdy může docházet k jejich zasychání a tím i ke snížení výnosu zrna. Vlivem stresu z nedostatku vody během kvetení a opylování může dojít ke snížení výnosu až o 6–8 % (Pazdera et al. 2024). Zimolka (2008) uvádí, že dešťové srážky v období ca před 15 lety dostačovaly v našich klimatických podmínkách zajistit vláhovou potřebu přibližně ze 70 % a zbytek by měla uhradit doplňková závlaha. Ta je však i při současném technickém stavu závlahových systémů a ekonomických možnostech většiny zemědělských podniků v ČR spíše výjimkou (Sviták et al., 2022).



Obr. 1 Požadavky kukuřice na vodu vzhledem k nárůstu sušiny (Colless et al., 1992).

Vlivem GZK se významně zvyšuje pravděpodobnost výskytu extrémních povětrnostních podmínek (Beillouin et al., 2020; Cogato et al., 2019; Lesk et al., 2016). Vysoké teploty a nerovnoměrně rozložené srážky již v současné době významně ovlivňují růst a vývoj kukuřice a vedou ke snížení výnosů ve světovém měřítku (Mangani et al., 2019; van der Velde et al., 2012), ale i v ČR (Hlavinka et al., 2009; Maitah et al., 2021). Současná zvyšující se dynamika podnebí na území České republiky dokládá jeho typickou proměnlivost. Roste počet extrémních projevů počasí, statisticky prokazatelně se zvyšují teploty vzduchu, ale srážky ne. Projevem změn jsou také výskyty častějších povodní i sucha, které se na našem území projevují nepravidelně. Změnám klimatu je přičítáno, že se vyskytují mimořádně vysoké úhrny srážek, které vyvolávají plošné povodně, jak tomu bylo v letech 1997, 2002 a díky rychlému tání vysoké sněhové pokrývky i v roce 2006. V roce 2010 byly zaznamenány vysoké srážkové úhrny a výskyt mnoha lokálních povodní z přivalových dešťů. Ovšem v posledních dvou desetiletích roste četnost stavů sucha, které jsou vyvolány nízkými úhrny srážek hlavně během teplého půlroku (duben až září) s trváním od několika týdnů až po několik měsíců. Výskyty mimořádného sucha takřka na celém území ČR jsme zaznamenali v letech 2000, 2003, 2012, 2015 a 2017. Na jižní Moravě také v roce 2007. Je nutné připomenout, že výskyty sucha jsou u nás nahodilé, a proto je velmi obtížné jejich četnost předpovídat. Tímto se stávají o to škodlivější, protože přicházejí neočekávaně v různých ročních obdobích.

Údaje o srážkách jsou zaznamenávány na srážkoměrných stanicích Českého hydrometeorologického ústavu (dále jen ČHMÚ), v posledních letech převážně na automatických stanicích. Průměrné úhrny srážek se z části liší podle období zpracování. V Atlasu podnebí Československa (1958) a Podnebí ČSSR – Tabulky (1960) jsou uvedeny výstupy zpracování za období 1901 až 1950. Mapy klimatických prvků za období 1961 až 2000 uvádí Atlas podnebí Česka (Tolasz et al., 2007). Z analýzy sezónních a ročních úhrnů srážek na území ČR za období 1961 až 2010 (Střešík et al., 2014) vyplývá, že v dlouhodobém pohledu se průměrné roční úhrny srážek statisticky prokazatelně nemění, ale roste proměnlivost jejich úhrnů v jednotlivých letech a ročních obdobích. K hodnocení srážek za různá období, zvláště za roky s výskyty povodní či sucha, najdeme vysoký počet publikací. Srážkový deficit ve vegetačním období bývá velmi často doprovázen vysokými teplotami, včetně výskytu tropických dnů (maximální denní teplota vzduchu dosáhne či překročí 30 °C), nižší relativní vlhkostí vzduchu, zmenšenou oblačností a vyšším počtem hodin slunečního svitu. Je známo, že úhrny srážek jsou jediným zdrojem vody pro naši krajinu. Ovšem přesto, že se používá k vyjádření sucha pouze úhrn srážek, není to zcela vhodná charakteristika.

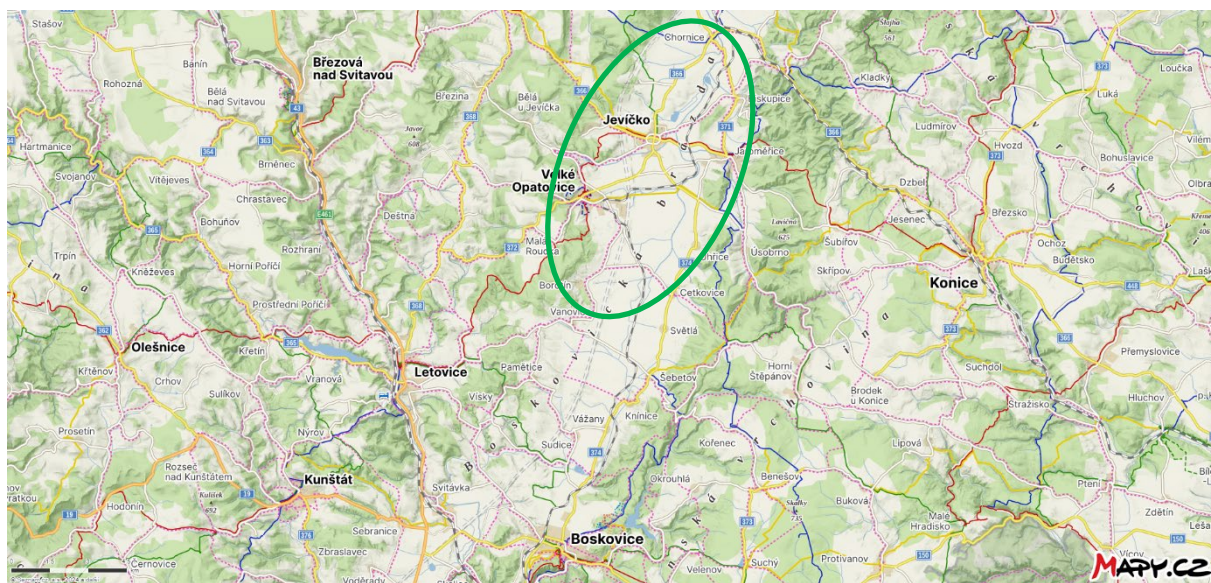
S ohledem na rychle se měnící podmínky prostředí (GZK) viz text výše, je potřebné nadále získávat informace o růstu kukuřice ve vztahu k počasí /srážky, vlhkost a teplota půdy apod./ (Huang et al., 2015; Quan et al., 2024), dále i ve vztahu k hustotě porostů (Li et al., 2022) a organizaci setí (Mackey et al. 2016; Lindsey et al. 2019; Liang et al. 2020; Liang et al. 2021), výnosům a kvalitě píce apod.

Cílem příspěvku bylo vyhodnotit srážkové poměry období 2001–2020 oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) a jejich vliv na pěstování (výnosy) silážní kukuřice v období 2016–2023.

2. Materiál a metody

Zájmové území Boskovické brázdy (*Malé Hané*) se nachází v Jihomoravském a Pardubickém kraji, v okrese Blansko a Svitavy. Leží cca 60 km severně od Brna v nadmořské výšce od 340 do 550 m. Oblast spadá do Brněnského bioregionu 1.24, který má protáhlý tvar od jihu k severu a plochu 807 km² (viz obr. 2). V regionálním členění georeliéfu České republiky patří do provincie Česká vysočina, subprovincie Česko-moravská, oblasti Brněnské vrchoviny, celku Boskovické brázdy, podcelku Malá Haná, okrsku Jevíčská sníženina (Bína and Demek, 2012). Okrsek Malá Haná zahrnuje Chrudichromský hřbet a tvoří úzký pruh vyššího terénu mezi Jevíčskou sníženinou a Lysickou sníženinou má plochu 8,98 km². Je tvořený permo-karbonskými usazeninami Boskovické brázdy a nejvyšší bod se nazývá Habří 451,2 m (Demek and Mackovčín, 2006).

Geologickým podložím zájmového území jsou kvarterní hlíny, spraše, písky a štěrky. Další část je tvořena permokarbonskými horninami jako jsou pískovce, slepence a jílovce a okrajová nejmenší část je zastoupena tercierními písky a jíly (www.geoportal.gov.cz). Zájmové území leží v geografickém útvaru Boskovické brázdy, která patří do pánví permokarbonských. Pánve vznikaly v důsledku hercynského vrásnění jako příkopová propadlina v moldanubickém krystaliniku. Výběžek Boskovické brázdy tvoří červené pískovce a jílovce (lupky), lokálně i vápnité slepence permu (Culek, 1995). Pánev je mělká na severu s permskými pískovci a břidlicí s složkou třetihorních lupků a vápenců. Nejvyšší karbon v permském podloží se vyskytuje pouze v jižní části. Zachované sedimenty jsou větší mocnosti.



Pozn.: zájmové území vyznačeno zeleně

Obr. 2 Mapa zájmového území (upraveno podle <https://mapy.cz/>).

Dle morfologicko-geografické diferenciacie zájmové území spadá do sníženin s normálně dlouhým, mírným a mírně suchým létem s černozeměmi, hnědozeměmi a eutrofními hnědými půdami (kambizeměmi) ve 3–4. vegetačním stupni s velmi nízkou lesnatostí.

Zájmové území leží v rozlehlých sníženinách s plochým dnem a souvislými sprašovými pokryvy na jílovitých sedimentech, kde vznikly půdní druhy hlinité až jílovitohlinité. V zájmové oblasti proto rozeznáváme několik půdních typů: černozem luvická, černice glejová, hnědozem modální, luvizem glejová, šedozem modální, fluvizem glejová, kambizem modální, kambizem luvická, pararendzina kambická, pelozem karbonátová, glej modální, pseudoglej modální aj. (Němeček et al., 2011).

Klimatický region dle Culka (1995) je mírně teplý, vlhký, nížinný. Podnebí v zájmové oblasti Malé Hané dle klasifikace Quitta (1971) můžeme v období 1961–2000 zařadit do kategorie mírně teplá /MT8–9/ (Štěpánová, 2010). Dlouhodobé průměrné roční teploty vzduchu a roční srážky za období 1991–2020 uvádí *tab. 2*.

Tab. 2 Dlouhodobé průměrné měsíční a roční teploty (°C) a srážky (mm) ze stanice Jevíčko (1991–2020) dle ČHMÚ Ostrava–Poruba.

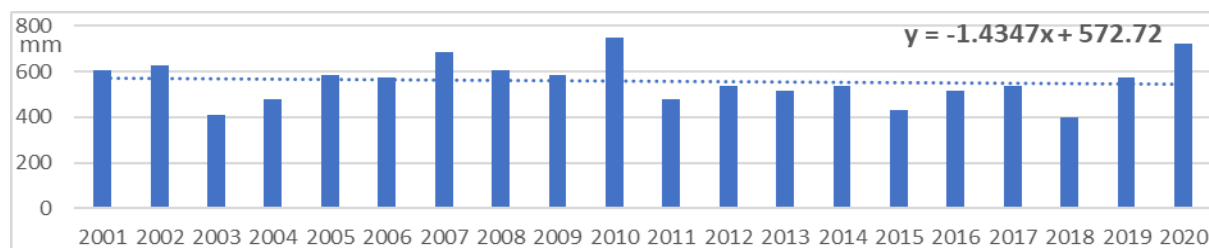
Období 1991–2020	Měsíc													Veget. období
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Rok	
Srážky (mm)	28,7	23,3	35,5	33,8	62,6	68,7	83,3	66,0	54,9	38,9	32,5	30,5	558,5	369,2
Teplota (°C)	-1,9	-0,5	3,1	8,6	13,3	16,8	18,4	17,9	13,1	8,3	3,9	-0,6	8,4	14,7

Pozn.: Vegetační období 1.4.–30.9; normál (1991–2020). Zdroj: ČHMÚ Ostrava.

Srážkové poměry (denní srážky) v období 2001–2024 byly hodnoceny na základě naměřených údajů z klimatologické stanice Jevíčko (*správce je pobočka Českého hydrometeorologického ústavu /ČHMÚ/ v Ostravě*). Meteorologická stanice je určena pro získávání klimatologických dat na základě měření a sledování meteorologických prvků a jevů, za účelem zajištění porovnatelnosti získávaných klimatologických dat v rámci celé České republiky. Výnosy kukuřice seté určené k výrobě siláže byly měřeny v období 2015–2023 v zemědělských podnicích (*Hanácká zemědělská společnost Jevíčko, a.s., resp. AGROSPOL, agrární družstvo Knínice*) v poloprovozních pokusech (Menšík et al., 2018; Nerušil et al., 2023).

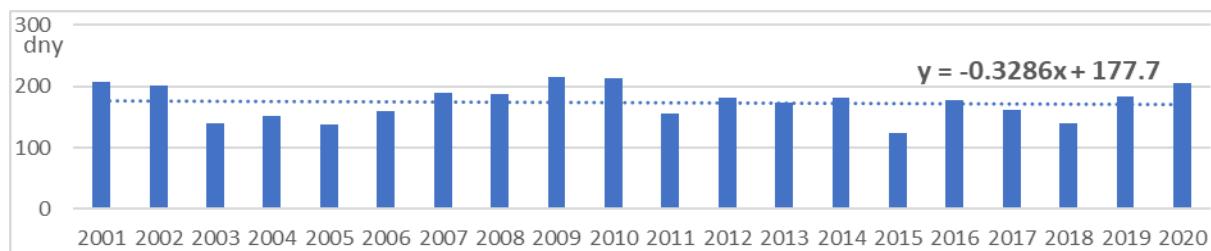
3. Výsledky

Jak je patrné z *obr. 3*, kde jsou v sloupcovém grafu zobrazeny sumy srážek dosažené v jednotlivých letech za období 2001 až 2020 na stanici Jevíčko, výskyt srážek je typický svou proměnlivostí. Nejnižší hodnotu má roční suma v roce 2018, a to 400,9 mm, následuje rok 2003 s úhrnem 409,6 mm a rok 2015 s úhrnem 432,5 mm. Uváděné roky jsou známy výskytem mimořádného sucha. Nejvyšší roční úhrn byl v roce 2010 o hodnotě 747,4 mm, dále rok 2000 s úhrnem 723,5 mm a rok 2007 se 686,2 mm. Obecně tedy můžeme uvést, že se roční úhrny v hodnoceném období pohybují v rozpětí 400 až 750 mm. I když roční úhrn přes 700 mm je výjimečný. Důležité je též poznání, že dlouhodobý trend ročních srážkových úhrnů za roky 2001 až 2020 nemá statisticky význam. Tato skutečnost ovšem znamená, že při prokazatelném zvyšování teploty vzduchu, tedy i potenciální evapotranspirace, je vysoce pravděpodobný častější výskyt deficitní vláhové bilance, tedy sucha.



Obr. 3 Úhrny srážek v jednotlivých letech za období 2001 až 2020, stanice Jevíčko.

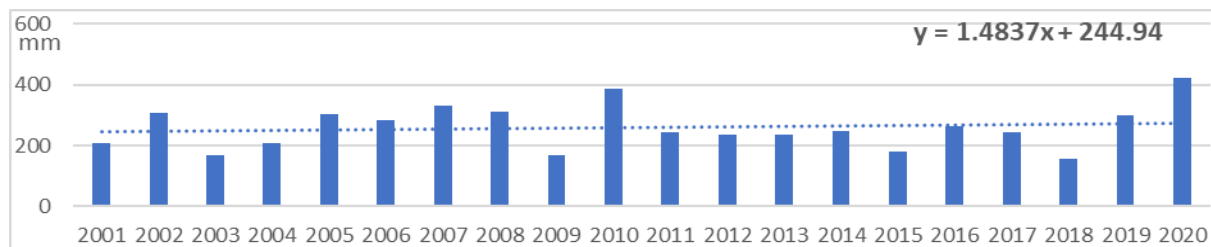
Z hlediska dostupné vody pro zemědělské plodiny obecně je důležitý nejen úhrn srážek, ale také počet dnů se srážkami a výše denních úhrnů. Na *obr. 4* je znázorněn počet dnů se srážkami v jednotlivých letech za období 2001 až 2020. Když srovnáme extrémní hodnoty ročních úhrnů srážek a počet dnů v jednotlivých letech, vidíme, že se zcela neshodují. Nejméně dnů se srážkami bylo v roce 2015, a to 213, v roce 2005 137, v roce 2003 a v roce 2018 shodně 139. Též nejvyšší počet dnů se srážkami není zcela s maximálními úhrny shodný, kdy nejvíce srážkových dnů bylo v roce 2009, a to 216, v roce 2010 nejbohatším na srážky 213, 208 dnů v roce 2001 a 205 v roce 2020.



Obr. 4 Počet dnů se srážkami v jednotlivých rocích za období 2001 až 2020, stanice Jevíčko.

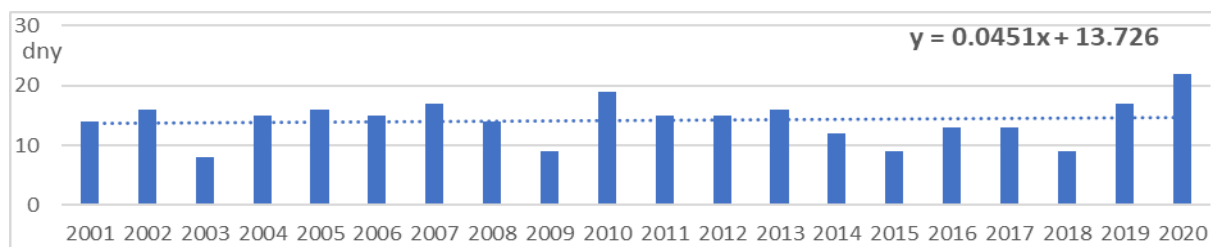
Přes 200 dnů se vyskytlo ještě v roce 2002. Obecně lze uvést, že počet dnů se srážkami v období 2001 až 2020 se pohyboval mezi více jak 120 až slabě přes 200. Amplituda počtu výskytu srážkových dnů je 103 dny, tedy vysoká. Shodný se srážkovými úhrny je dlouhodobý trend počtu srážkových úhrnů, které též nemají statisticky význam.

Jistě, že pro vlhkost půdy, tedy prostředí, z kterého kukuřice čerpá vodu, je příznivější větší počet srážkových dnů o nižším úhrnu. Tím je dáno vyšší vsakování vody do půdy. Naopak vyšší denní úhrny mohou odtékat povrchovým odtokem a na oběhu vody pro rostlinu se tak nepodílejí. Na obr. 5 vidíme roční úhrny srážek, kterých denní úhrn byl 10 mm a více. I zde vidíme, že jejich nejnížší hodnoty jsou v mimořádně suchých rocích, tedy v letech 2018 s úhrnem 157,1 mm a 2003, kdy byl úhrn 169,1 mm. Dále je to v roce 2009 s úhrnem 169,5. Mimořádně suchý rok 2015 měl tento úhrn 180,3 mm. Nejvyšší úhrny v tomto hodnocení má rok 2020, a to 423,8. Rok 2010 s celkovými nevyššími srážkami má tento úhrn 388,1 mm. V tomto pohledu je třetí nejvyšší úhrn v roce 2007 s hodnotou 331,7 mm.



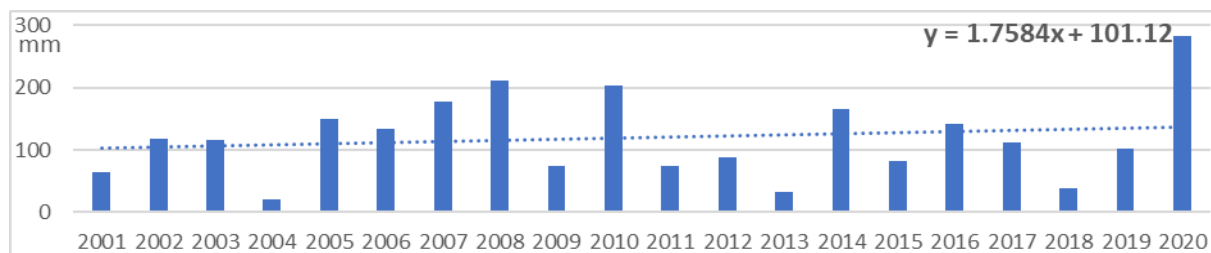
Obr. 5 Roční úhrny srážek s denní sumou 10 mm a více v jednotlivých letech za období 2001 až 2020, stanice Jevíčko.

V kolika dnech se srážkami se úhrny 10 mm a více vyskytly, vidíme na obr. 6. Nejnížší počet, tedy 8 dnů bylo v roce 2003. V letech 2009, 2015 a 2018 to bylo shodně 9 dnů. Nejvyšší počet, a to 22 dnů se vyskytlo v roce 2020, následně v roce 2010 to bylo 19 dnů a 17 v roce 2019.



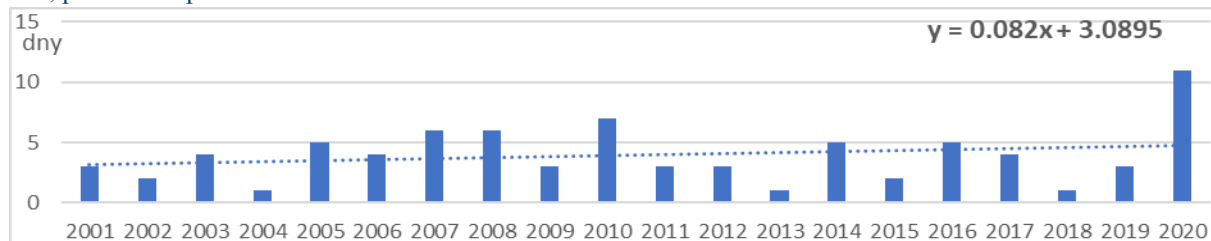
Obr. 6 Počet dnů se srážkami s denní sumou 10 mm a více v jednotlivých letech za období 2001 až 2020, stanice Jevíčko.

Dále jsme hodnotili denní úhrny 20 mm a více. Jejich roční úhrny vidíme na obr. 7. Jejich výskyt se ještě více liší od celkových srážkových úhrnů a jejich rozložení za období 2001 až 2020. Nejnížší úhrn nacházíme v roce 2004 s hodnotou 21,2 mm, tedy to byl pouze jeden den v roce. Obdobně je na tom rok 2013 s úhrnem 31,9 mm. V mimořádně suchém roce 2018 je tento úhrn jen o málo vyšší, a to 38,7 mm. Naopak u nejvyšších úhrnů je opět nejvyšší hodnota úhrnu 283,9 mm. Přes 200 mm, tedy přesně 211,9 mm bylo v roce 2008 a 203,6 mm v roce 2010.



Obr. 7 Roční úhrny srážek s denní sumou 20 mm a více v jednotlivých letech za období 2001 až 2020, stanice Jevíčko.

Počty dnů s denním úhrnem 20 mm a více jsou logicky významně nižší, viz obr. 8. V rocích 2004, 2013 a 2018 to byl pouze jeden den. Naopak v roce 2020 to bylo nejvíce, a to 11 dnů. Výrazně nižší počet byl v roce 2010, kdy to bylo 7 dnů, po 6 dnech potom v rocích 2007 a 2008.



Obr. 8 Počet dnů se srážkami s denní sumou 20 mm a více v jednotlivých letech za období 2001 až 2020, stanice Jevíčko.

U všech hodnocených úhrnů i počtu dnů s jejich výskytem se potvrdil stejně jako u celkových ročních úhrnů a počtu dnů statisticky nevýznamný trend. To je důležitý poznatek již z uvedeného vlivu vyšších teplot vzduchu a častějších výskytů sucha, ale současně lze uvést, že nedochází k významné změně výše hodnocených srážkových úhrnů a počtu dnů. Jejich posun k vyššímu zastoupení by znamenal delší bezesrážková období, a tím i možný častější výskyt vláhového deficitu.

Tab. 3 Vybrané údaje o sklizni silážní kukuřice v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) v období 2015–2023.

Podnik: Hanácká zemědělská společnost Jevíčko, a.s.

Rok	Termín setí	Termín sklizně	Široký řádek /ŠŘ/ (0,75 m)		Úzký řádek /ÚŘ/ (0,375 m)		Rozdíl: ÚŘ–ŠŘ (t/ha)	Rozdíl: ÚŘ–ŠŘ (relativně ‰)
			Výnos ZH (t/ha)	Výnos SH (t/ha)	Výnos ZH (t/ha)	Výnos SH (t/ha)		
2015	20.4.	17.9.	58,40	17,76	-	-	-	-
2016	21.4.	22.9.	59,10	18,14	60,96	19,69	1,55	108,5
2017	24.4.	15.9.	42,30	14,67	49,40	15,61	0,94	106,4
2018	20.4.	16.8.	41,95	14,76	46,53	15,07	0,31	102,1
2019	15.4.	19.9.	54,04	19,00	56,33	20,03	1,03	105,4
2020	14.4.	6.10.	61,71	19,83	71,28	23,27	3,44	117,3
2021	26.4.	4.10.	59,07	20,52	63,69	21,09	0,57	102,8
2022	22.4.	17.9.	57,96	17,40	60,48	18,91	1,51	108,7
2023	27.4.	21.9.	54,20	18,14	54,72	18,55	0,41	102,3
Průměr 2016–2023			53,79	17,81	57,92	19,03	1,22	106,9

Podnik: AGROSPOL, agrární družstvo Knínice

Rok	Termín setí	Termín sklizně	Široký řádek /ŠŘ/ (0,75 m)		Úzký řádek /ÚŘ/ (0,375 m)		Rozdíl: ÚŘ–ŠŘ (t/ha)	Rozdíl: ÚŘ–ŠŘ (relativně ‰)
			Výnos ZH (t/ha)	Výnos SH (t/ha)	Výnos ZH (t/ha)	Výnos SH (t/ha)		
2017	24.4.	15.9.	60,98	18,00	60,02	18,00	0,00	100,0
2021	26.4.	4.10.	55,80	18,21	60,02	19,81	1,60	108,8
2022	22.4.	17.9.	56,78	17,61	60,78	19,39	1,78	110,1
2023	27.4.	21.9.	50,67	16,14	54,76	17,72	1,58	109,8
Průměr 2017 a 2021–2023			56,06	17,49	58,90	18,73	1,24	107,1

Pozn.: výsevek 85 tis. zrn/ha, sečí stroj Kinze 3500; ZH - zelená hmota, SH - suchá hmota (sušina 100 %); ŠŘ - široký řádek, ÚŘ - úzký řádek

Zdroj: VÚRV, v.v.i., VS Jevíčko (poloprovozní pokusy na zem. podnicích v oblasti Malé Hané v letech 2015–2023)

Vybrané charakteristiky pěstování kukuřice seté v oblasti Boskovické brázdy (Malé Hané) uvádí tab. 3 (data z provozních pokusů). Průměrné výnosy silážní kukuřice v suché hmotě ve standardní technologii pěstování s roztečí řádků 0,75 m, byly za období 2016–2023 stanoveny ve výši 17,81 t.ha⁻¹ (podnik Hanácká zemědělská společnost Jevíčko, a.s.), resp.

17,49 t.ha⁻¹ (AGROSPOL, agrární družstvo Knínice; období 2017 a 2021–2023). V roce 2017 a mimořádně suchém roce 2018 byly zaznamenány nejnižší výnosy a to 14,67, resp. 14,76 t.ha⁻¹, naopak v roce 2020 byl stanoven druhý nejvyšší výnos 19,83 t.ha⁻¹ (rok 2021: 20,52 t.ha⁻¹). Od roku 2016 se v oblasti Malé Hané testuje technologie pěstování kukuřice seté v úzkých řádcích (0,375 m). Z předběžných výsledků dosažených v období 2016–2023 je patrné, že porosty u technologie úzkého řádku s rovnoměrným prostorovým uspořádáním rostlin, lépe využívající světelné podmínky a vláhu, zvyšují výnos silážní kukuřice v průměru o 7 % oproti standardní širokořádkové technologii viz *tab. 3* (oba zemědělské podniky).

4. Závěr

Analýza srážkových úhrnů i počet dnů s jejich výskytem provedená v oblasti Jevíčka v letech 2001 až 2020 dokládá, že se potvrzuje vysoká proměnlivost srážek. Mezi hodnocenými charakteristikami srážek není jednoznačná závislost, tedy roky s nejvyššími úhrny nemusí mít nejvíce srážkových dnů apod. Rozpětí mezi nejvyšším a nejnižším ročním úhrnem je takřka 340 mm. Počet dnů se srážkami představuje 120 až mírně přes 200 dnů v roce. S ohledem na proces vsakování je důležitým poznatkem, že denní úhrny 10 mm a více až na výjimky představuje méně než polovinu ročního srážkového úhrnu. Vysoce důležitá

skutečnost je, že trend srážek není statisticky významný. Takže v rámci uvedeného rozpětí nedochází v dlouhodobém pohledu ke zvyšování, ale ani ke snižování úhrnů a počtu srážkových dnů. Jak již bylo uvedeno, zvýšená potenciální evapotranspirace díky růstu teploty vzduchu není a nebude kompenzována zvýšenými úhrny, tedy pravděpodobně bude častější výskyt vláhového deficitu až k projevům sucha.

Analýza produkce silážní kukuřice v dané oblasti za období 2016–2023 ukazuje vysokou proměnlivost výnosů (14,67 až 20,52 t.ha⁻¹). Nízké výnosy silážní kukuřice byly zaznamenány v mimořádně suchém roce 2018 a dále i v roce 2017. Vyšší produkci silážní kukuřice (stabilnější výnosy) i v suchých obdobích (častější výskyt vláhového deficitu) lze dosáhnout při pěstování kukuřice v systému úzkých řádků (0,375 m).

Poděkování

Príspevek byl zpracován s podporou projektů: MZe ČR „DKRVO“ – RO0423 – VZ04: Pícninářství a využití biomasy a bioodpadů pro energetické a průmyslové účely v podmínkách klimatické změny; MZe NAZV QL24010237: Pěstování kukuřice seté technologií úzkého řádku v systému precizního zemědělství (Zemědělství 4.0) v podmínkách klimatické změny (GZK) – stabilizace produkce objemných krmiv a udržitelná intenzifikace zemědělské výroby v ČR.

Literatura

- BALL, B.C., BINGHAM, I., REES, R.M., WATSON, C.A., LITTERICK, A., 2005. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. *Can. J. Soil Sci.* **85**, 557–577. <https://doi.org/10.4141/S04-078>.
- BEILLOUIN, D., SCHAUBERGER, B., BASTOS, A., CIAIS, P., MAKOWSKI, D., 2020. Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **375**, 20190510. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>.
- BÍNA, J., DEMEK, J., 2012. Z nížin do hor: geomorfologické jednotky České republiky. Academia, Praha.
- COGATO, A., MEGGIO, F., DE ANTONI MIGLIORATI, M., MARINELLO, F., 2019. Extreme Weather Events in Agriculture: A Systematic Review. *Sustainability* **11**, 2547. <https://doi.org/10.3390/su11092547>.
- COLLESS, J.M., AGRICULTURE, N.S.W., RESEARCH, A., Advisory Station, G., 1992. Maize growing: J.M. Colless (Agricultural Research and Advisory Station, Grafton). NSW Agriculture.
- CULEK, M., 1995. Biogeografické členění České republiky. Enigma, Praha.
- CZSO, 2024. Vývoj ploch, hektarových výnosů a sklizní zemědělských plodin [WWW Document]. URL https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jspx?_af=VYSTUP-objekt&pvo=ZEM02G&z=T&f=TABULKA&skupId=386&katalog=30840&pvo=ZEM02G&evo=v1442_!_ZEM02G-celek_1#w=.
- ČHMÚ, 2024. Denní data dle zákona 123/1998 Sb. <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z-123-1998-Sb>.

- DEMEK, J., MACKOVČIN, P. (Eds.), 2006. Hory a nížiny: Zeměpisný lexikon ČR. MŽP ČR - AOPK ČR, Brno.
- FAO, 2022. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- GAEVAYA, E., ILYINSKAYA, I., BEZUGLOVA, O., KLIMENKO, A., TARADIN, S., NEZHINSKAYA, E., MISHCHENKO, A., GOROVTSOV, A., 2023. Influence of Heat Stress and Water Availability on Productivity of Silage Maize (*Zea mays* L.) under Different Tillage and Fertilizer Management Practices in Rostov Region of Russia. *Agronomy* 13. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020320>.
- GARNETT, TARA, BURLINGAME, B., VERMEULEN, S.J., BATEMAN, I.J., FRASER, D., DAWKINS, M., SMITH, P., GARNETT, T., GODFRAY, H.C.J.J., TOULMIN, C., BLOOMER, P., HOFFMANN, I., APPLEBY, M.C., HERRERO, M., THORNTON, P.K., BALMFORD, A., BENTON, T.G., DOLAN, L., BATEMAN, I.J., BENTON, T.G., BLOOMER, P., BURLINGAME, B., DAWKINS, M., DOLAN, L., FRASER, D., HERRERO, M., HOFFMANN, I., SMITH, P., THORNTON, P.K., TOULMIN, C., VERMEULEN, S.J., GODFRAY, H.C.J.J., 2013. Sustainable Intensification in Agriculture: *Premises and Policies*. *Science* (80-.). **341**, 33–34. <https://doi.org/10.1126/science.1234485>.
- GODFRAY, H.C.J., BEDDINGTON, J.R., CRUTE, I.R., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J.F., PRETTY, J., ROBINSON, S., THOMAS, S.M., TOULMIN, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* (80-.). **327**, 812–818.
- HASEGAWA, T., FUJIMORI, S., HAVLÍK, P., VALIN, H., BODIRSKY, B.L., DOELMAN, J.C., FELLMANN, T., KYLE, P., KOOPMAN, J.F.L., LOTZE-CAMPEN, H., MASON-D'CROZ, D., OCHI, Y., PÉREZ DOMÍNGUEZ, I., STEHFEST, E., SULSER, T.B., TABEAU, A., TAKAHASHI, K., TAKAKURA, J., VAN MEIJL, H., VAN ZEIST, W.J., WIEBE, K., WITZKE, P., 2018. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nat. Clim. Chang.* **8**, 699–703. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>.
- HLAVINKA, P., TRNKA, M., SEMERÁDOVÁ, D., DUBROVSKÝ, M., ŽALUD, Z., MOŽNÝ, M., 2009. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. *Agric. For. Meteorol.* **149**, 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.004>.
- HUANG, C., DUIKER, S.W., DENG, L., FANG, C., ZENG, W., 2015. Influence of precipitation on maize yield in the eastern United States. *Sustain.* **7**, 5996–6010. <https://doi.org/10.3390/su7055996>.
- JOSEPH, J., TRAMBEREND, S., GONZALEZ, D.L., FISCHER, G., KAHIL, T., 2023. Modeling Sustainable Intensification of Agriculture under Resource Constraints, in: EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023., pp. EGU23-6817. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-6817>.
- KIM, S.H., GITZ, D.C., SICHER, R.C., BAKER, J.T., TIMLIN, D.J., REDDY, V.R., 2007. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂. *Environ. Exp. Bot.* **61**, 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.06.005>.
- Kolektiv Autorů, 1958. Atlas podnebí Československé republiky. Ústřední správa geodézie a kartografie, Praha.
- Kolektiv Autorů, 1961. Podnebí Československé socialistické republiky. Tabulky. Hydrometeorologický ústav, Praha, 379 s.
- KWS OSIVA, 2012. Kukuřice do kapsy. KWS OSIVA s.r.o., Velké Meziříčí.
- LAL, R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* (80-.). **304**, 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- LARCHER, W., 1988. Fyziologická ekologie rostlin. Academia, Praha.
- LESK, C., ROWHANI, P., RAMANKUTTY, N., 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* **529**, 84–87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>.
- LI, Y.C., DAI, H.Y., CHEN, H., 2022. Effects of plant density on the aboveground dry matter and radiation-use efficiency of field corn. *PLoS One* **17**, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277547>.
- LIANG, S., YOSHIHIRA, T., SATO, C., 2020. Grain yield responses to planting density in twin and narrow row cultivation of early cultivars in maize. *Grassl. Sci.* **66**, 183–193. <https://doi.org/10.1111/grs.12264>.
- LIANG, S., YOSHIHIRA, T., SATO, C., 2021. Differences in grain yield responses to planting density in twin and narrow row cultivation between early and late maize cultivars. *Grassl. Sci.* **67**, 185–197. <https://doi.org/10.1111/grs.12303>.

- LINDSEY, A.J., THOMISON, P.R., REESE, K., GEYER, A.B., RITCHIE, A., BANKS, S., OGANDO DO GRANJA, M., 2019. Does Narrow-Row Corn Production Influence Plants' Response to Foliar Inputs? *Crop. Forage Turfgrass Manag.* **5**, 190039. <https://doi.org/10.2134/cftm2019.05.0039>.
- LIU, J., GUO, Y.Y., BAI, Y.W., CAMBERATO, J.J., XUE, J.Q., ZHANG, R.H., 2018. Effects of Drought Stress on the Photosynthesis in Maize. *Russ. J. Plant Physiol.* **65**, 849–856. <https://doi.org/10.1134/S1021443718060092>.
- MACKEY, G.L., ORLOWSKI, J.M., BANISZEWSKI, J., LEE, C.D., 2016. Corn Response to Row Spacing and Seeding Rate Varies by Hybrid and Environment in Kentucky. *Crop. Forage Turfgrass Manag.* **2**, 1–8. <https://doi.org/10.2134/cftm2016.0002>.
- MAITAH, M., MALEC, K., MAITAH, K., 2021. Influence of precipitation and temperature on maize production in the Czech Republic from 2002 to 2019. *Sci. Rep.* **11**, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89962-2>.
- MANGANI, R., TESFAMARIAM, E.H., ENGELBRECHT, C.J., BELLOCCHI, G., HASSEN, A., MANGANI, T., 2019. Correction to: Potential impacts of extreme weather events in main maize (*Zea mays* L.) producing areas of South Africa under rainfed conditions. *Reg. Environ. Chang.* **19**, 1453–1454. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01500-z>.
- MENŠÍK, L., KINCL, D., NERUŠIL, P., SRBEK, J., KABELKA, D., HEROUT, M., JURKA, M., ŠEDEK, A., HORKÝ, T., VACH, M., 2018. Pěstování kukuřice seté půdoochrannými technologiemi. Příkladová studie Boskovická Brázda a Středočeská Pahorkatina. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha 6 - Ruzyně, Praha.
- MŽP, 1993. Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Academia, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha 1993, 594 s.
- NAGY, T., HUZSVAL, L., 1996. The effect of precipitation on the yield of maize (*Zea mays* L.). *Cereal Res. Commun.* **24**, 93–100.
- NĚMEČEK, J., MÜHLHANSELOVÁ, M., MACKŮ, J., VAVŘÍČEK, D., NOVÁK, P., 2011. Taxonomický klasifikační systém půd, 2. upraven. ed, Taxonomický Klasifikační Systém Půd České Republiky. ČZU v Praze, Praha.
- NERUŠIL, P., KINCL, D., PLISKOVÁ, J., SRBEK, J., SMUTNÝ, V., ŠEDEK, A., MENŠÍK, L., 2023. Pěstování silážní kukuřice s podsevoými plodinami - výsledky pokusů z oblasti Boskovické brázdy. *Úroda* **71**, 291–298.
- OLDFIELD, E.E., BRADFORD, M.A., WOOD, S.A., 2019. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil* **5**, 15–32. <https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>.
- OLESEN, J.E., TRNKA, M., KERSEBAUM, K.C., SKJELVÅG, A.O., SEGUIN, B., PELTONEN-SAINIO, P., ROSSI, F., KOZYRA, J., MICALE, F., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *Eur. J. Agron.* **34**, 96–112. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.003>.
- PAL, ARYA, S. 2001. Introduction to Micrometeorology. Academic Press, 2nd Edition, London 2001, 421 p.
- PARRY, M.L., ROSENZWEIG, C., IGLESIAS, A., LIVERMORE, M., FISCHER, G., 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Glob. Environ. Chang.* **14**, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008>.
- PAZDERA, J. et al., 2024. Kukuřice, Mendelova univerzita v Brně, 1. vydání (v tisku).
- QUAN, H., FENG, H., ZHANG, T., WU, L., DONG, Q., SIDDIQUE, K.H.M., 2024. Response of soil water, temperature, and maize productivity to different irrigation practices in an arid region. *Soil Tillage Res.* **237**, 105962. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105962>.
- QUITT, E., 1971. Klimatické oblasti Československa, Studia Geographica. GgÚ ČSAV, Brno.
- ROCKSTRÖM, J., WILLIAMS, J., DAILY, G., NOBLE, A., MATTHEWS, N., GORDON, L., WETTERSTRAND, H., DECLERCK, F., SHAH, M., STEDUTO, P., DE FRAITURE, C., HATIBU, N., UNVER, O., BIRD, J., SIBANDA, L., SMITH, J., 2017. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* **46**, 4–17. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>.
- ROŽNOVSKÝ, J., STŘEŠTÍK, J., ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P. 2020. The dynamics of annual and seasonal precipitation totals in the Czech Republic during 1961–2019. *Acta Hydrologica Slovaca*, **21**(2), 197–204. 2644–4690. DOI: <https://doi.org/10.31577/ahs-2020-0021.02.0024>.
- SÁNCHEZ, B., RASMUSSEN, A., PORTER, J.R., 2014. Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Glob. Chang. Biol.* **20**, 408–417. <https://doi.org/10.1111/gcb.12389>.

- STANISZEWSKI, J., GUTH, M., SMĘDZIK-AMBROŻY, K., 2023. Structural conditions of the sustainable intensification of agriculture in the regions of the European Union. *J. Clean. Prod.* 389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136109>.
- STEENWERTH, K.L., REYNOLDS, M.P., SANDOVAL SOLIS, S., SISCHO, W.M., LUBELL, M.N., MSANGI, S., PRABHU, R., SPRINGBORN, M., WOLLENBERG, E.K., JARVIS, L.S., JACKSON, L.E., TITTONELL, P., WHEELER, S.M., VERMEULEN, S.J., CATTANEO, A., CHARTRES, C.J., HATFIELD, J.L., HODSON, A.K., BLOOM, A.J., CARTER, M.R., HENRY, K., KEBREAB, E., LEEMANS, R., LIPPER, L., HOPMANS, J.W., HORWATH, W.R., JENKINS, B.M., 2014. Climate-smart agriculture global research agenda: scientific basis for action [electronic resource]. *Agric. food Secur.* 3, 56.
- STRIJK, P.C., KUYPER, T.W., 2017. Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-7>.
- STŘEŠTÍK, J., ROŽNOVSKÝ J., ŠTĚPÁNEK P., ZAHRADNÍČEK P., 2014. Increase of annual and seasonal air temperatures in the Czech Republic during 1961–2010. In: Rožnovský, J., H. Středová, T. Středa. Průběh počasí roku 2018 z pohledu environmentální bezpečnosti. In: Šenovský, M. (ed.) OCHRANA OBYVATELSTVA - NEBEZPEČNÉ LÁTKY 2019: Recenzovaný Sborník abstraktů XVIII. ročníku mezinárodní konference. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2019. ISBN 978-80-7385-209-2.
- SVITÁK, Z., VYSKOČIL, A., ROZKOŠNÝ, M., 2022. Závlahy – znovuobjevované dědictví: kritický katalog výstavy, 1. vydání. ed. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha.
- ŠTĚPÁNOVÁ, M., 2010. Mapy podnebí Česka v prostředí Google maps. Univerzita Palackého v Olomouci.
- TILMAN, D., CASSMAN, K.G., MATSON, P.A., NAYLOR, R., POLASKY, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677.
- TOLASZ, R., et al. 2007. Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1 (CHMI), 978-80-244-1626-7 (UP).
- URRUTY, N., TAILLIEZ-LEFEBVRE, D., HUYGHE, C., TAILLIEZ-LEFEBVRE, D., 2016. Stability , robustness , vulnerability and resilience of agricultural systems . A review. *Agron. Sustain. Dev.* <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0347-5>.
- van der VELDE, M., TUBIELLO, F.N., VRIELING, A., BOURAOUI, F., 2012. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. *Clim. Change* 113, 751–765. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0368-2>.
- WIEBE, K., ROBINSON, S., CATTANEO, A., 2019. Climate Change, Agriculture and Food Security, in: Campanhola, C., Pande, S. (Eds.), *Sustainable Food and Agriculture*. Elsevier, pp. 55–74. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812134-4.00004-2>.
- XIE, H., HUANG, Y., CHEN, Q., ZHANG, Y., WU, Q., 2019. Prospects for agricultural sustainable intensification: A review of research. *Land* 8, 1–27. <https://doi.org/10.3390/land8110157>.
- XU, R., LI, Y., GUAN, K., ZHAO, L., PENG, B., MIAO, C., FU, B., 2022. Divergent responses of maize yield to precipitation in the United States. *Environ. Res. Lett.* 17. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3cee>.
- YAN, Y., DUAN, F., LI, X., ZHAO, R., HOU, P., ZHAO, M., LI, S., WANG, Y., DAI, T., ZHOU, W., 2024. Photosynthetic capacity and assimilate transport of the lower canopy influence maize yield under high planting density. *Plant Physiol.* 195, 2652–2667. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae204>.
- ZIMOLKA, J., 2008. Kukuřice – hlavní a alternativní užitkové směry, 1. vyd. ed, hlavní a alternativní užitkové směry. Profi Press, Praha.

Změny v rozdělení srážek na území Česka a Šumavy

Changes in the distribution of precipitation in Czechia and Šumava Mts.

Jan Procházka ¹, Veronika Šustková ², Pavel Lipina ², Miroslav Tesař ³

¹ Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta zemědělská a technologická, Studentská 1668, 370 05 České Budějovice, prochazkaj@fzt.jcu.cz

² Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava, K Myslivně 3/2182, 708 00, Ostrava-Poruba, veronika.sustkova@chmi.cz, pavel.lipina@chmi.cz

³ Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6, miroslav.tesar@iol.cz

Abstrakt

Probíhající klimatická změna se projevuje velmi zřetelně nejen nárůstem průměrné teploty vzduchu, ale také změnou v množství a rozložení srážek v různých obdobích. Příspěvek hodnotí rozdíly v průměrném ročním a měsíčním úhrnu srážek na území Česka a Šumavy za posledních 10 let (2014–2023) v porovnání s normálovým obdobím 1981–2010. Pro hodnocení byla použita veřejně dostupná územní data srážek ČHMÚ, pro oblast Šumavy a okolí data z meteorologických stanic Česka, Německa a Rakouska. Na území Česka byl zaznamenán pokles ročního úhrnu srážek o více než 5 %, v některých krajích ale o více než 10 %. Nejvíce klesly srážky v březnu a červenci, naopak v říjnu došlo k nárůstu měsíčních srážkových úhrnů. Na Šumavě byl největší pokles srážek v oblastech s nejvyššími úhrny, o 10 a více %. Největší pokles srážek byl zaznamenán na jaře, nejslabší v zimě. Při porovnání srážek za posledních 10 let oproti normálu 1981–2010 lze konstatovat, že na většině hodnoceného území chyběl v letech 2014–2023 v průměru každý rok jeden měsíční úhrn srážek. Rozdíl v nárůstu teploty vzduchu je přitom všude na území Česka okolo 1,2 °C, což ještě více prohlubuje uvedený srážkový deficit. Ovšem proměnlivost srážek je poměrně vysoká, pro hodnocení srážkových poměrů a jejich změn je proto důležitá dostupnost dostatečného množství dat a znalost místních podmínek, ale i metod měření a zpracování.

Klíčová slova: územní srážky, klimatologický normál, klimatická změna, Šumava, srážkový deficit

Abstract

The ongoing climate change is manifested very clearly not only by an increase in the average air temperature, but also by a change in the amount and distribution of precipitation in different seasons. The contribution evaluates the differences in the average annual and monthly rainfall in the territory of Czechia and Šumava Mountains for the last 10 years (2014–2023) compared to the normal period 1981–2010. For the assessment, publicly available regional precipitation data from the Czech Hydrometeorological Institute was used, and for the Šumava Mts. region and the surrounding area, data from meteorological stations in Czechia, Germany and Austria. In the territory of Czechia, a decrease in the annual total of precipitation by more than 5 % was recorded, but in some regions by more than 10 %. Precipitation decreased the most in March and July, on the contrary, there was an increase in monthly precipitation totals in October. In Šumava Mts., the largest decrease in precipitation was in the areas with the highest totals, by 10 % or more. The greatest decrease in precipitation was recorded in spring, the weakest in winter. When comparing precipitation over the last 10 years compared to the 1981–2010 normal, it can be stated that in most of the evaluated territory, in the years 2014–2023, on average, one monthly total of precipitation was missing each year. At the same time, the difference in the increase in air temperature is around 1.2 °C everywhere in Czechia, which depends the mentioned precipitation deficit even more. However, the variability of precipitation is quite high. The availability of a sufficient amount of data and knowledge of local conditions as well as measurement and processing methods are therefore important for the assessment of precipitation ratios and their changes.

Keywords: territorial precipitation, climatological normal, climate change, Šumava Mountains, precipitation deficit

1. Úvod

Počasí se na území České republiky vyznačuje vysokou proměnlivostí během roku a v posledním období se výrazněji mění i celkové klimatické podmínky, tedy podnebí. Podnebí je nejdynamičtější složkou přírodního prostředí a obvykle je primárně charakterizováno klimatickými prvky jako průměrná teplota vzduchu a úhrn srážek, které mají na našem území poměrně velký rozsah, amplitudu a dynamiku (Rožnovský 2014). Zatímco v případě průměrné teploty vzduchu je prokazatelný trend postupného růstu průměrných ročních hodnot, dlouhodobý roční úhrn srážek je pro období s dostupnými daty od roku 1961 prezentován bez prokazatelného trendu (Tolasz a kol. 2024, Matějka 2021). Růst teploty vzduchu je celosvětově dáván zpravidla do souvislosti s rostoucími koncentracemi skleníkových plynů (WMO 2024), ale někteří autoři poukazují v našich středoevropských podmínkách na možný nezanedbatelný vliv nárůstu doby trvání slunečního svitu a globálního slunečního záření (Pokorný a kol. 2023). Na rozdělení srážek na našem území má pak kromě nadmořské výšky, orografie vliv také četnost výskytu různých typů cirkulace (Brázdil a kol. 2022, Řehoř a kol. 2022). Změny v rozdělení srážek a hydrologické bilance krajiny vlivem klimatické změny mají za následek nárůst počtu a doby trvání suchých období (Jaagus a kol. 2022, Rožnovský 2014), změny v charakteristice odtoku (Kašpárek a Kožín 2022), počátku a délce trvání vegetačního období (Fiala a Kozová 2019), nebo na pěstování zemědělských plodin (např. Možný a kol. 2011, Žalud a kol. 2020).

Atmosférické srážky jsou na území Česka prakticky jediným zdrojem vody do hydrologického cyklu a změna v jejich množství a rozdělení ovlivňuje život a široké spektrum činností člověka i okolní krajinu. V posledních letech pocítujeme příslušné změny o něco intenzivněji než dříve. Cílem předloženého příspěvku není posuzovat možné příčiny a důsledky klimatické změny, ale porovnat územní úhrny srážek v Česku, v rámci jednotlivých krajů a zvláště v oblasti Šumavy, co by významné pramenné oblasti Vltavy, a to za poslední desetiletí 2014–2023 v porovnání s předchozím normálovým obdobím 1981–2010. Metody a zpracování dat

1.1 Období pro hodnocení

V tomto příspěvku se jednalo o co nejaktuálnější zohlednění současného stavu a zároveň respektování minimální řady dat pro reprezentativnost hodnocení. Byla proto vybrána řada dat za posledních 10 let, tedy období let 2014 až 2023. Oproti třicetiletému normálu mají tato kratší období u některých prvků výhodu v možnosti podrobnějšího vyhodnocení aktuálního stavu klimatu (např. díky většímu počtu stanic, srovnatelné kvalitě měření, metod zpracování), aniž by ztrácelo přiměřenou vypovídací hodnotu (WMO 2018).

Pro hodnocení klimatických prvků se od roku 2022 standardně používá srovnání s aktuálním třicetiletým klimatickým normálem 1991–2020. Nicméně aby nebyla mezi sebou porovnávána data z těch samých let, které by se v hodnocených obdobích posledních 10 let a aktuálního normálu překrývaly (roky 2014 až 2020), bylo zvoleno jako referenční období třicetiletí předchozího používaného klimatického normálu 1981–2010. Ten byl vzhledem ke zrychlující se klimatické změně ustanoven na základě požadavku Světové meteorologické organizace od roku 2015 na místo stabilního referenčního normálu 1961–1990, který již v našem století například vzhledem ke konzistentnímu růstu teploty vzduchu postupně pozbýval na aktuálnosti (WMO 2018). Porovnání se zde tedy týká průměrných hodnot z období 2014–2023 vzhledem k referenčnímu období 1981–2010.

1.2 Zpracování dat

Příspěvek se sice zabývá především úhrnem srážek, nicméně pro dokumentaci rozdílů dvou uvedených období byly nejprve vyhodnoceny územní teploty vzduchu pro území Česka a jednotlivých krajů, potažmo vybraných stanic z oblasti Šumavy. Zpracování se týkalo jak ročních, tak sezonních a měsíčních dat. Podobně v případě úhrnu srážek byla použita a porovnána veřejně dostupná územní data (ČHMÚ 2024). Pro oblast Šumavy byla zvláště vyhodnocena data úhrnu srážek z příslušných stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ 2024), data z vybraných stanic meteorologických služeb Německa a Rakouska (DWD 2024, Geosphere 2024) a z hraniční bavorské části centrální Šumavy i měsíční data z totalizátorů umístěných podél státní hranice poskytnutá Správou Národního parku Bavorský les (NPV-BW a LWF 2024).

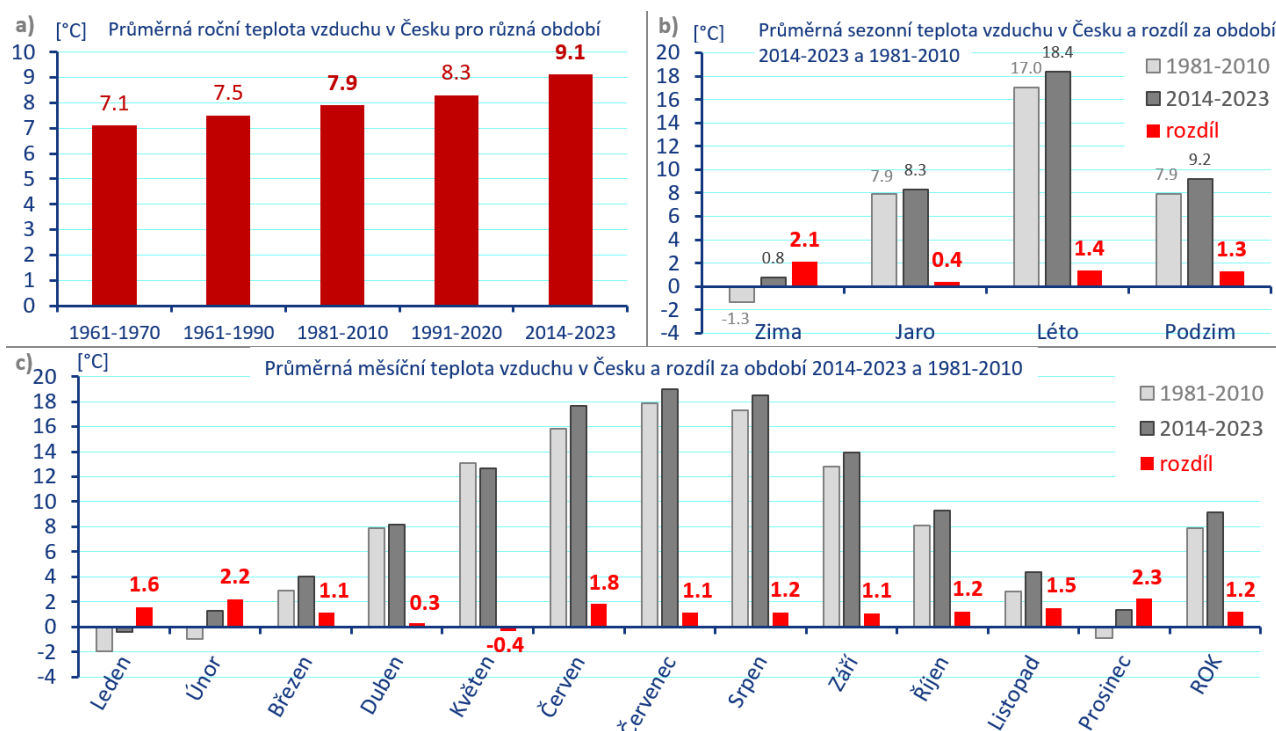
Mapová zobrazení procentuálních rozdílů úhrnu srážek v jednotlivých krajích Česka za období 2014–2023 oproti normálu 1981–2010 (Obr. 4) jsou výsledkem zobrazení příslušných hodnot v polygonech odpovídajících krajů v prostředí geografického informačního systému (GIS). Barevná legenda byla zvolena pro jednotlivé měsíce i roční rozdíl stejná. Mapová projekce dat průměrného ročního úhrnu srážek pro oblast Šumavy pro období 1981–2010 a 2014–2023 je

výsledkem prostorové analýzy naměřených dat, která mají charakter bodových měření. Pro prostorovou analýzu bodových dat byla využita interpolační metoda, vyvinutá na ČHMÚ. Jde o metodu Orografická interpolace (Šercl 2008a,b), která vychází z lokální lineární regrese a zohledňuje vliv nadmořské výšky (případně jiných faktorů jako jsou orientace a sklonitosti svahů, krajinný pokryv) na interpolovanou veličinu a zachovávající původní naměřenou hodnotu ve známém bodě. Pro hodnocenou širší oblast Šumavy a okolí byla využita srážková data až ze 183 příslušných meteorologických stanic.

2. Výsledky

2.1 Nárůst průměrné teploty vzduchu

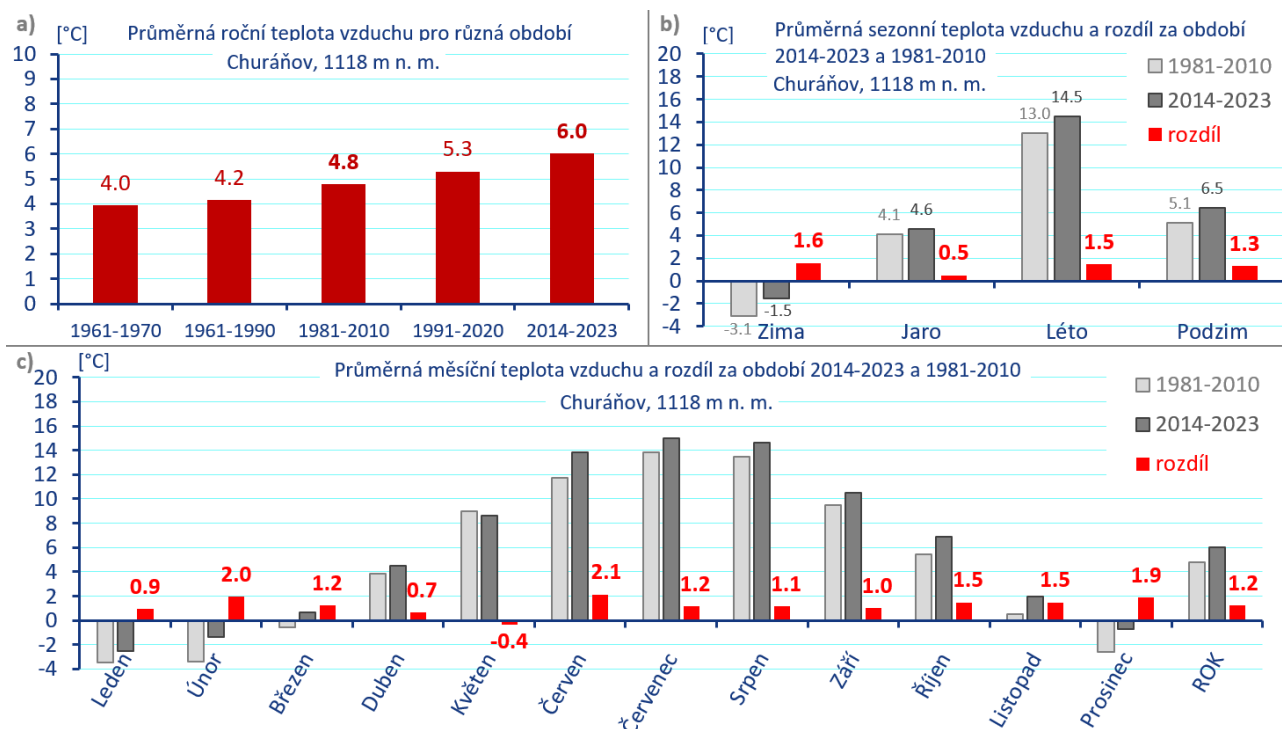
Z hodnocení územní teploty pro Česko vyplývá, že průměrná roční teplota vzduchu v období posledních 10 let mezi roky 2014–2023 dosahuje hodnoty 9,1 °C. To je o 1,2 °C více, než je průměr v referenčním normálovém období 1981–2010. Za stabilní normálová období 1961–1990 a 1991–2020 to bylo 7,1 °C, resp. 8,3 °C, a v prvním desetiletí po roce 1961 činil průměr 7,1 °C, což je rozdíl celých 2 °C oproti poslednímu hodnocenému desetiletí (Obr. 1a). Pokud jde o sezónní hodnocení jednotlivých ročních období, došlo v posledních 10 letech v porovnání s referenčním obdobím 1981–2010 k největšímu oteplení v zimě (o 2,1 °C), zatímco na jaře to bylo jen o 0,4 °C (Obr. 1b). V jednotlivých měsících roku se v průměru největší oteplení na území Česka projevilo v prosinci a únoru (+2,3 °C, resp. +2,2 °C), dále pak v měsících červen (+1,8 °C), leden (+1,6 °C) a listopad (+1,5 °C). Naopak nejméně o +0,4 °C se oteplilo v dubnu, a v měsíci květnu došlo dokonce k ochlazení, a to o –0,4 °C (Obr. 1c).



Obr. 1 Průměrné roční (a), sezonní (b) a měsíční (c) teploty vzduchu v Česku a rozdíly za období 2014–2023 oproti normálu 1981–2010 (zdroj dat: ČHMÚ 2024).

V oblasti Šumavy je nej kvalitnější komplexní dlouhodobá řada měření a pozorování na profesionální meteorologické stanici Churáňov (1118 m n. m.). Zde jsou dokumentovány velmi podobné změny teploty vzduchu jako pro území Česka. Jedná se o oteplení o 1,2 °C mezi obdobími 1981–2010 a 2014–2023 nebo rozdíl na průměru o +2 °C v posledním desetiletí od let 1961–1970 (Obr. 2a). Nejvíce o +1,6 °C se na Churáňově oteplilo také v zimě, podobně ale i v létě (+1,5 °C), nejnižší rozdíl +0,5 °C zde byl podobně jako republikově zaznamenán na jaře (Obr. 2b). Nejvyšší kladnou odchylku od

referenčního období měly za posledních 10 let na Churáňově měsíce červen, únor a prosinec (+1,9 až +2,1 °C), naopak stejně jako územně v Česku se zde o –0,4 °C ochladil květen (Obr. 2c). Z obdobného hodnocení dlouhodobé řady dat stanice Husinec (483 m n. m.), reprezentující podhůří Šumavy, vyplývají velmi podobné hodnoty, tedy roční vzestup teploty vzduchu mezi obdobími 1981–2010 a 2014–2023 o 1,2 °C, nejvyšší oteplení v zimě (+2,1 °C), z měsíců pak v prosinci (+2,3 °C) a únoru (+2,2 °C), a nejnižší oteplení na jaře (+0,4 °C) s tím, že měsíc květen se v porovnání ochladil o –0,2 °C (ČHMÚ 2024).



Obr. 2 Průměrné roční (a), sezonní (b) a měsíční (c) teploty vzduchu na šumavském Churáňově a rozdíly za období 2014–2023 oproti normálu 1981–2010 (zdroj dat: ČHMÚ 2024).

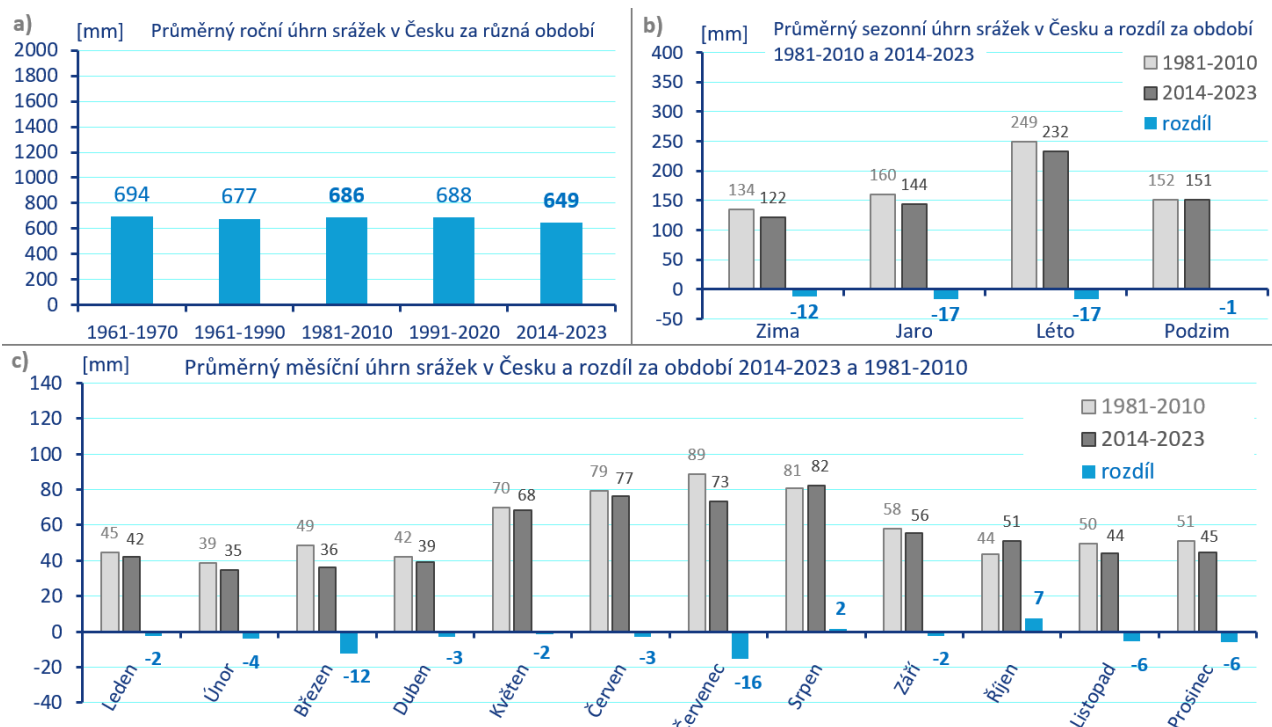
Z hodnocení změn klimatu prostřednictvím průměrné teploty vzduchu je zřejmé, že roční, sezonní i měsíční rozdíly jsou mezi obdobími 1981–2010 a 2014–2023 velmi podobné jak územně v Česku, tak na Šumavě i jejím podhůří. Průměrná roční teplota vzduchu se tedy všude zvýšila zpravidla o +1,2 °C.

2.2 Změny v množství a rozložení srážek v Česku

Průměrný roční úhrn srážek na území Česka za referenční období 1981–2010 dosahoval 686 mm, zatímco v posledních deseti letech tomu bylo 649 mm, tedy v průměru o 37 mm méně. Normálová období 1961–1990 a 1991–2020 disponovala průměrným ročním úhrnem srážek 677 a 688 mm, desetiletí 1961–1970 pak úhrnem 694 mm (Obr. 3a). Při sezonním porovnání územních srážek v Česku nebyla zaznamenána prakticky žádná změna úhrnu na podzim (–1 mm), kdežto na jaře i v létě došlo k průměrnému poklesu o 17 mm (Obr. 3b). Při poměrně vysoké měsíční variabilitě srážek došlo v období 2014–2023 v průměru k největšímu poklesu územních hodnot ročního úhrnu oproti referenčnímu období 1981–2010 v červenci (–16 mm) a březnu (–12 mm), naopak nárůst +2 mm zaznamenal měsíc srpen a +7 mm říjen (Obr. 3c).

Vzhledem k nerovnoměrnosti měsíčního úhrnu srážek během roku jsou výstižnější vyjádření rozdílů prostřednictvím podílu v % k referenčnímu období. Podíl srážek za období 2014–2023 vůči období 1981–2010 takto činí pro Česko v ročním průměru 94 %, kdy nejvýraznější pokles byl zaznamenán v měsíci březnu (pouze 75 % měsíčního úhrnu vůči referenčnímu období) a červenci (83 %), naopak v říjnu došlo v posledních letech k největšímu nárůstu o 19 %. Zřejmě jsou však poměrně velké rozdíly v rámci jednotlivých krajů, kdy se nejvýraznějším ročním poklesem srážek vyznačovaly kraje Liberecký a Královéhradecký (87, resp. 88 % ročního úhrnu vůči referenčnímu období) a nejmenším poklesem kraje

Jihočeský a Moravskoslezský (98 %). Číselné vyjádření rozdílu srážek v % za poslední desetiletí 2014–2023 oproti referenčnímu období 1981–2010 poskytují údaje v tabulce (Tab. 1), pro prostorové vyjádření rozdílu v jednotlivých krajích prostřednictvím barevné škály s příslušnými podíly v % byly vytvořeny klimatologické mapy (Obr. 4).

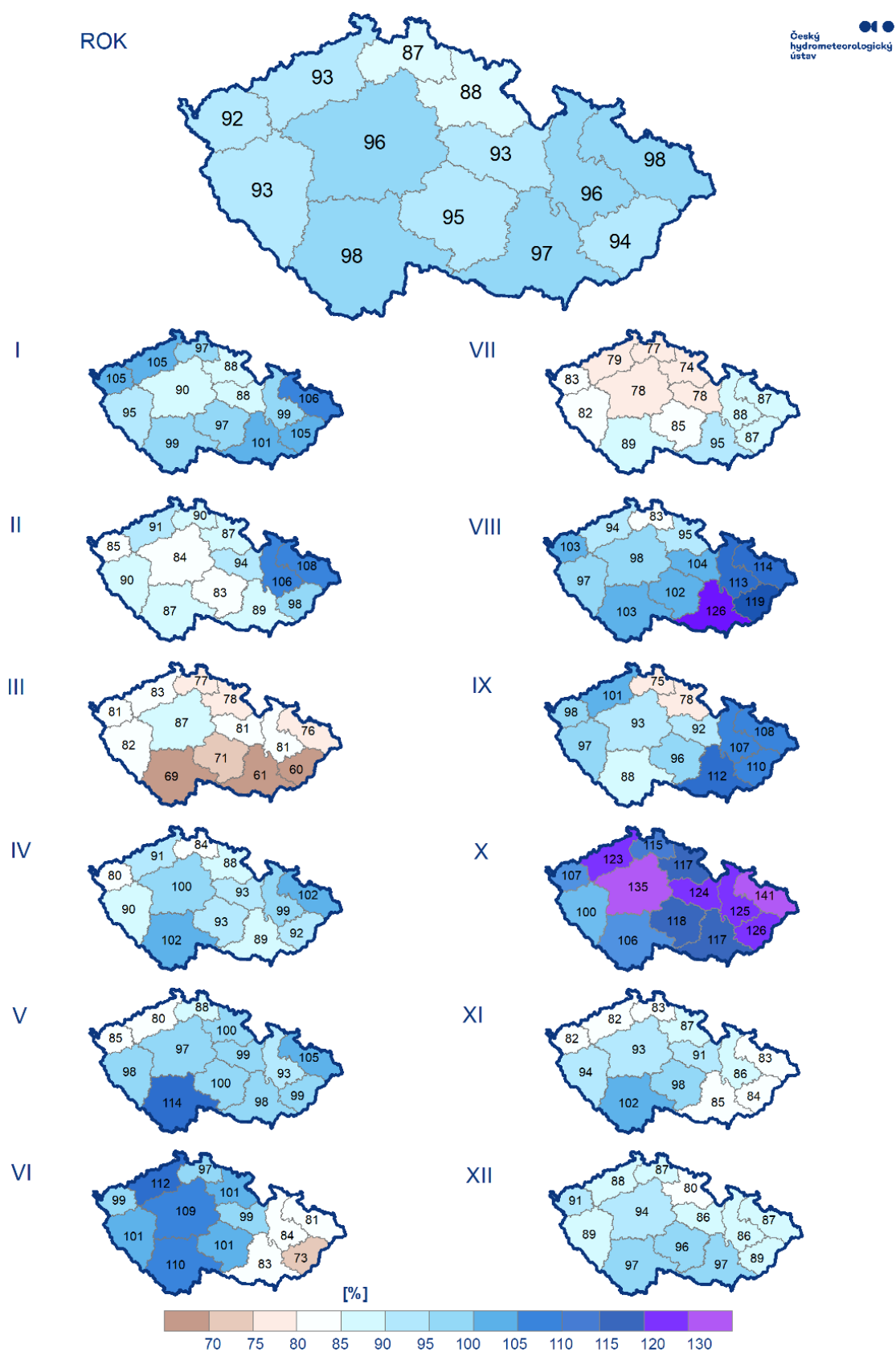


Obr. 3 Průměrné roční (a), sezonní (b) a měsíční (c) úhrny srážek v Česku a rozdíly za období 2014–2023 oproti normálu 1981–2010 (zdroj dat: ČHMÚ 2024).

Tab. 1 Procentní rozdíl průměrného ročního úhrnu územních srážek za období 2014–2023 v procentech normálu 1981–2010 (zdroj dat: ČHMÚ 2024).

Území / Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Rok
Česká republika	96	91	75	93	99	97	83	103	96	119	90	90	94
Praha a Středočeský	90	84	87	100	97	109	78	98	93	135	93	94	96
Jihočeský	99	87	69	102	114	110	89	103	88	106	102	97	98
Plzeňský	95	90	82	90	98	101	82	97	97	100	94	89	93
Karlovarský	105	85	81	80	85	99	83	103	98	107	82	91	92
Ústecký	105	91	83	91	80	112	79	94	101	123	82	88	93
Liberecký	97	90	77	84	88	97	77	83	75	115	83	87	87
Královéhradecký	88	87	78	88	100	101	74	95	78	117	87	80	88
Pardubický	88	94	81	93	99	99	78	104	92	124	91	86	93
Vysočina	97	83	71	93	100	101	85	102	96	118	98	96	95
Jihomoravský	101	89	61	89	98	83	95	126	112	117	85	97	97
Olomoucký	99	106	81	99	93	84	88	113	107	125	86	86	96
Zlínský	105	98	60	92	99	73	87	119	110	126	84	89	94
Moravskoslezský	106	108	76	102	105	81	87	114	108	141	83	87	98

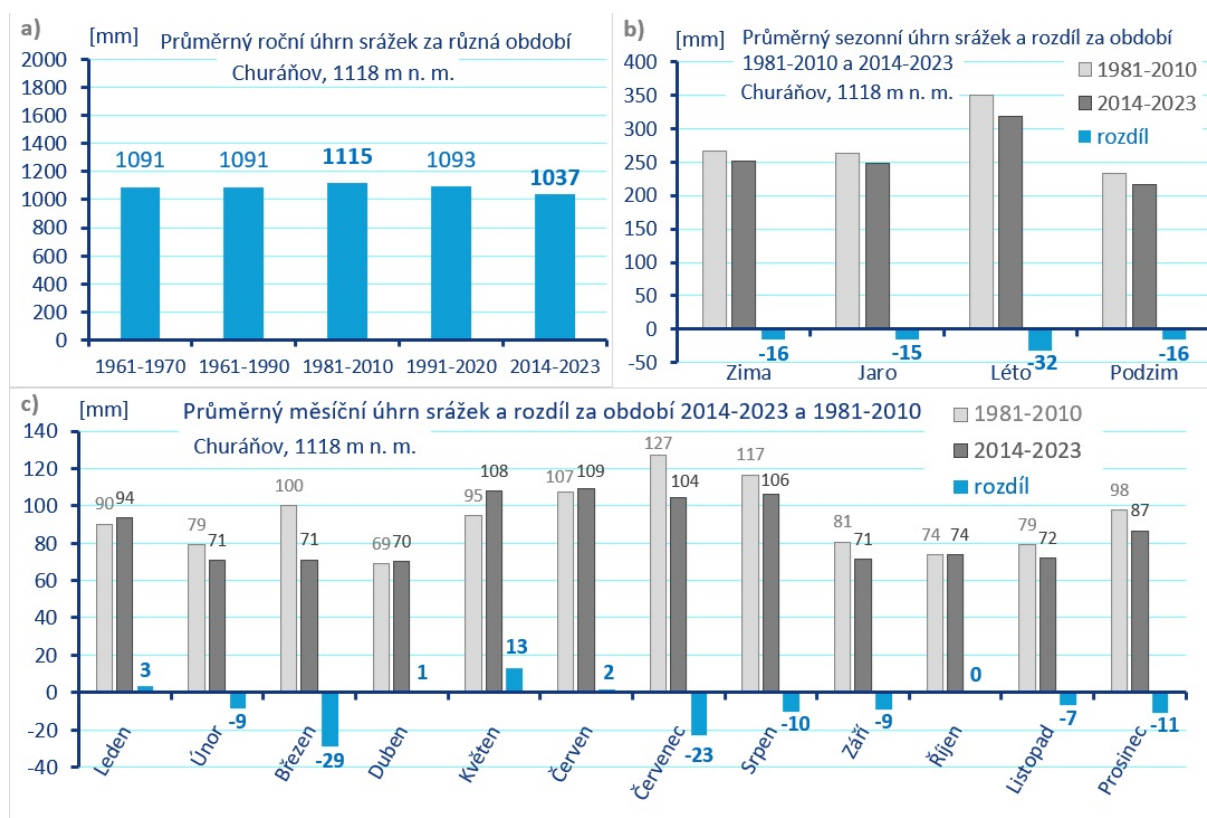
Roční a měsíční úhrny srážek za období 2014–2023 v procentech normálu 1981–2010



Obr. 4 Územní rozdíly srážek za období 2014–2023 v procentech normálu 1981–2010 pro jednotlivé kraje v ročním a měsíčních úhrnech (zdroj dat: ČHMÚ 2024).

2.3 Změny úhrnu srážek na Šumavě

Z hodnocení změn v úhrnu srážek širší oblasti Šumavy a jejího podhůří včetně německé a rakouské části vyplývají poměrně významné rozdíly. Pokud jde o data z profesionální meteorologické stanice Churáňov (ČHMÚ), byl zde v případě průměrného ročního úhrnu srážek podobný pokles jako v případě hodnocení územního úhrnu pro celé území Česka (94 % normálu 1981–2010). Zatímco v případě Česka se jedná v absolutním vyjádření o rozdíl 37 mm, na Churáňově klesl roční úhrn srážek o 79 mm. Z pohledu sezon ubylo srážek na Churáňově nejvíce o 32 mm v létě, v měsíčním porovnání pak v březnu (29 mm) a červenci (23 mm), kdežto v květnu zde srážek přibýlo v průměru o 13 mm (Obr. 5).



Obr. 5 Průměrné roční (a), sezonní (b) a měsíční (c) úhrny srážek na meteorologické stanici Churáňov a rozdíly za období 2014–2023 oproti normálu 1981–2010 (zdroj dat: ČHMÚ 2024).

Významnější deficit srážek v posledních letech ovšem zaznamenaly srážkové bohaté lokality na návětrné straně Šumavy. Ze srážkoměrných stanic ČHMÚ se jedná například o stanici Špičák s poklesem průměrného ročního úhrnu srážek o 140 mm (o 10 % oproti normálu 1981–2010). Ze stanic Německé meteorologické služby (DWD) patří mezi lokality s vysokými úhrny srážek a zároveň odpovídající řadou pozorování stanice Brennes (1050 m n. m.), kde došlo v posledních 10 letech k poklesu v ročním průměru také o 10 %, což je v absolutním množství 165 mm. Při porovnání průměrného ročního úhrnu srážek měřeného totalizátory ve srážkově bohaté příhraniční oblasti: Plechý, Březník, Hraniční slat' a Poledník (ČHMÚ), byl zaznamenán v období 2014–2023 průměrný roční pokles srážek o 161 mm v porovnání s úhrny srážek do roku 2010 (pozn. příhraniční totalizátory ČHMÚ nemají kompletní řadu dat pro normál 1981–2010). Značný pokles ročního úhrnu srážek na Šumavě byl zaznamenán měřením totalizátory na německé straně státní hranice v oblasti centrální části Šumavy, v tzv. Podroklání, která je mj. i pramennou oblastí přítoků řeky Otavy. Pravidelnými měsíčními záznamy úhrnu srážek od roku 1978 (NPV-BW a LWF 2024) je zde prostřednictvím průměrného úhrnu ze 4 příslušných lokalit v nadmořské výšce 1150 až 1350 m dokumentován roční pokles srážek o 224 mm (88 % normálu 1981–2010), přičemž nejvyšší na jaře (82 % normálu) a nejnižší v zimě (93 % normálu). Porovnání úhrnu srážek z výše uvedených lokalit a za obě hodnocená období poskytují data v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2 Průměrné sezonní a roční úhrny srážek, absolutní (v mm) a relativní (v %) rozdíl v posledním desetiletí 2014–2023 oproti referenčnímu normálovému období 1981–2010 pro území Česka a vybrané stanice Šumavy.

Česko (ČHMÚ)	1981–2010	2014–2023	rozdíl (mm)	rozdíl (%)	Brennes (DWD)	1981–2010	2014–2023	rozdíl (mm)	rozdíl (%)
Zima	134	122	–12	91	Zima	447	423	–23	95
Jaro	160	144	–17	90	Jaro	367	305	–63	83
Léto	249	232	–17	93	Léto	405	372	–33	92
Podzim	152	151	–1	100	Podzim	375	328	–47	88
ROK	696	649	–47	93	ROK	1594	1429	–165	90
Churáňov (ČHMÚ)					Totalizátory (ČHMÚ)*				
Zima	267	251	–16	94	Zima	493	469	–25	95
Jaro	264	249	–15	94	Jaro	426	364	–62	85
Léto	351	319	–32	91	Léto	447	410	–38	92
Podzim	233	217	–16	93	Podzim	363	326	–37	90
ROK	1115	1037	–79	93	ROK	1729	1568	–161	91
Špičák (ČHMÚ)					Podroklaný (NPV-BW a LWF)**				
Zima	389	365	–24	94	Zima	621	577	–44	93
Jaro	325	285	–39	88	Jaro	409	334	–75	82
Léto	406	356	–50	88	Léto	432	379	–54	88
Podzim	318	291	–27	91	Podzim	399	348	–51	87
ROK	1438	1298	–140	90	ROK	1862	1638	–224	88

* průměrné hodnoty ze tří totalizátorů příhraniční oblasti Plechý, Březník (Hraniční slat) a Poledník. Pro referenční období 1981–2010 neobsahuje tento soubor dat kompletní časovou řadu (zdroj dat: ČHMÚ)

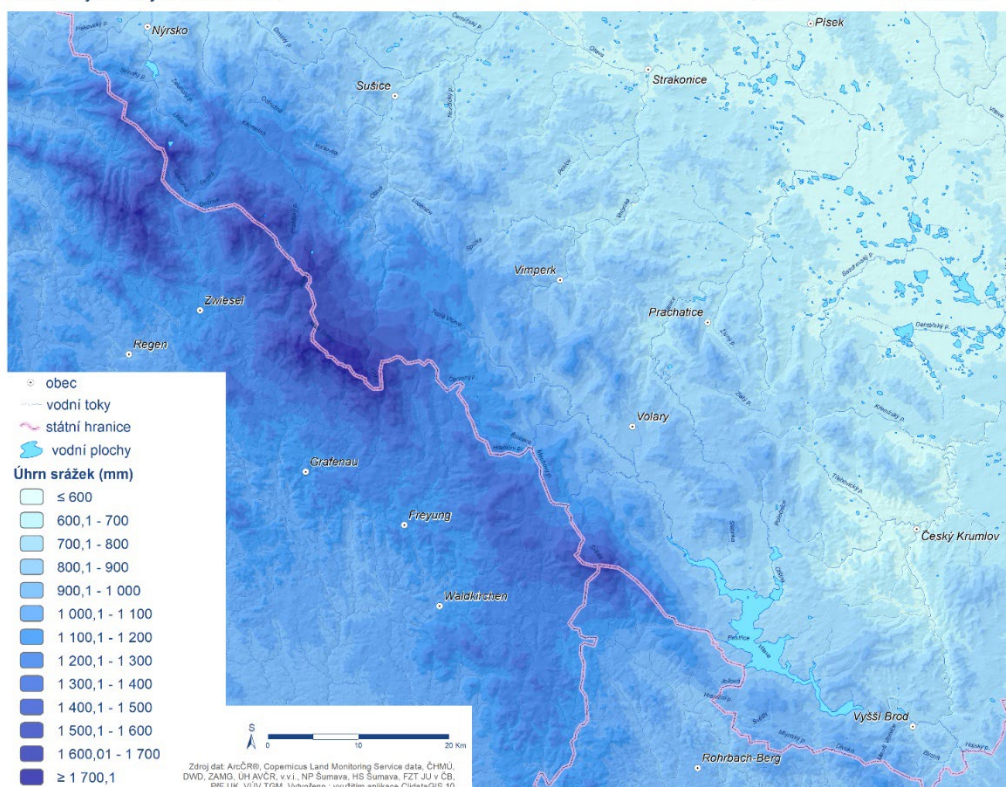
** průměrné hodnoty z měsíčních dat 4 totalizátorů při státní hranici centrální Šumavy mezi Blatným vrchem a Velkým Roklanem (Grosser Rachel) (zdroj dat: NPV-BW a LWF 2024)

Naproti tomu některé meteorologické a srážkoměrné stanice v podhůří a širším okolí Šumavy zaznamenaly v hodnocených obdobích mírnější pokles nebo srovnatelný úhrn srážek. Naopak určitý nárůst oproti normálu registrují některé stanice spíše jen výjimečně, například srážkoměrná stanice Frantoly prezentuje průměrný roční nárůst srážek mezi obdobími +31 mm, Němčice +24 mm, Netřebice +40 mm, Lipno +18 mm, Brloh +21 mm, Paseky +28 mm (ČHMÚ 2024), z německých stanic Büchlberg-Tannöd +36 mm (DWD 2024).

Rozložení srážek v oblasti Šumavy a širšího okolí v referenčním normálovém období 1981–2010 a v posledním desetiletí 2014–2023 prezentují klimatologické mapy průměrného ročního úhrnu (Obr. 6 a 7). Z prostorového vyjádření úhrnů prostřednictvím barevné interpolace dat vyplývají výrazné rozdíly mezi návětrnou příhraniční oblastí Šumavy a podhůřím s širším okolím, jak v celkových úhrnech tak pokud jde o změny mezi obdobími. Srážkově nejbohatší oblast Šumavy se vyznačuje v období 2014–2023 oproti normálu 1981–2010 výrazným poklesem srážek, zatímco na závětrné Šumavě a vzdálenějším podhůří jsou změny relativně menší.

ŠUMAVA

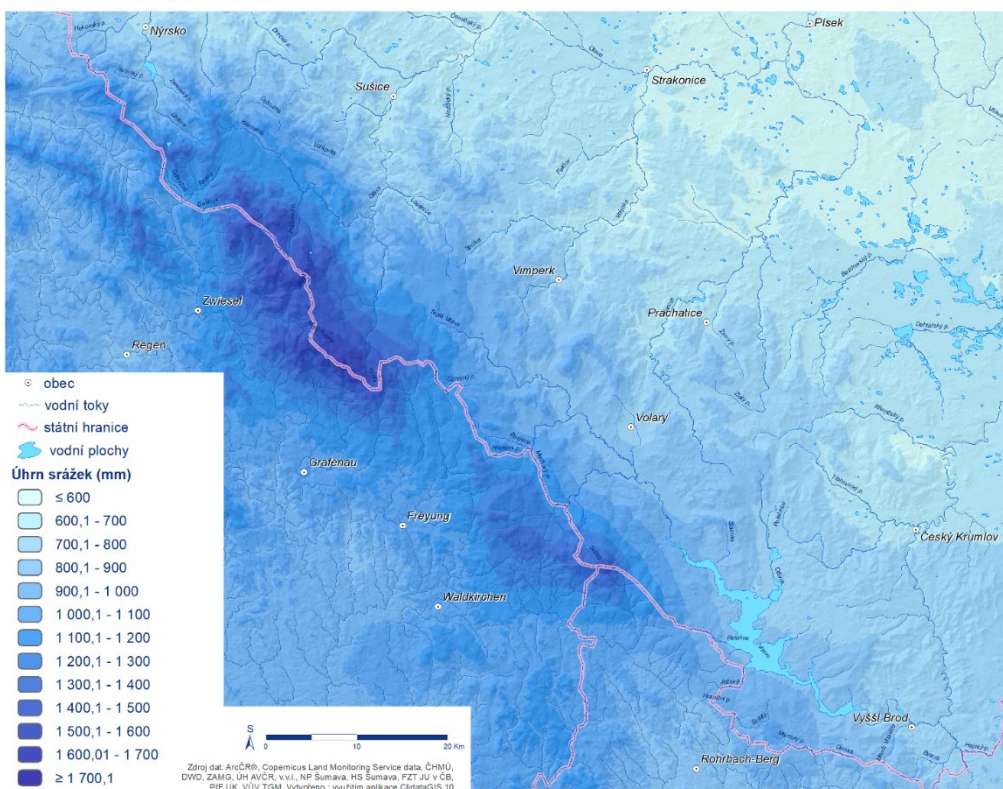
Dlouhodobý srážkový normál 1981–2010

Český
hydrometeorologický
ústavJihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
Fakulta zemědělská
a technologická

Obr. 6 Průměrný roční úhrn srážek v oblasti Šumavy za normálové období 1981–2010.

ŠUMAVA

Roční úhrn srážek za období 2014–2023

Český
hydrometeorologický
ústavJihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
Fakulta zemědělská
a technologická

Obr. 7 Průměrný roční úhrn srážek v oblasti Šumavy za období 2014–2023.

3. Diskuse

Pokud bychom se v oblasti Šumavy zaměřili pouze na území Národního parku Šumava s rozlohou přes 680 km² s průměrnou nadmořskou výškou cca 980 m, tak dle použité interpolace dat (Šercl 2008a,b) vypočtený normál ročního úhrnu srážek za období 1981–2010 činí 1220 mm, kdežto v období 2014–2023 jsou průměrné roční srážky 1110 mm. Pro území okolní CHKO Šumava s plochou 996 km² a průměrnou nadmořskou výškou cca 850 m jsou v obdobném porovnání průměrné roční hodnoty úhrnu srážek 1020 mm a 940 mm. Z uvedeného lze konstatovat, že v posledním desetiletí na Šumavě chybí každý rok v průměru jeden měsíční úhrn srážek. Pokud bychom vypočítali územní srážkové úhrny pro celý mapový výřez Šumavy a okolí (Obr. 5), budou roční úhrny srážek a rozdíl mezi obdobími ještě o něco nižší, a to 933 mm a 881 mm. Každopádně ve všech výše uvedených případech se v hodnocené oblasti za příslušné období 2014–2023 jedná v součtu o nezanedbatelný územní pokles srážek.

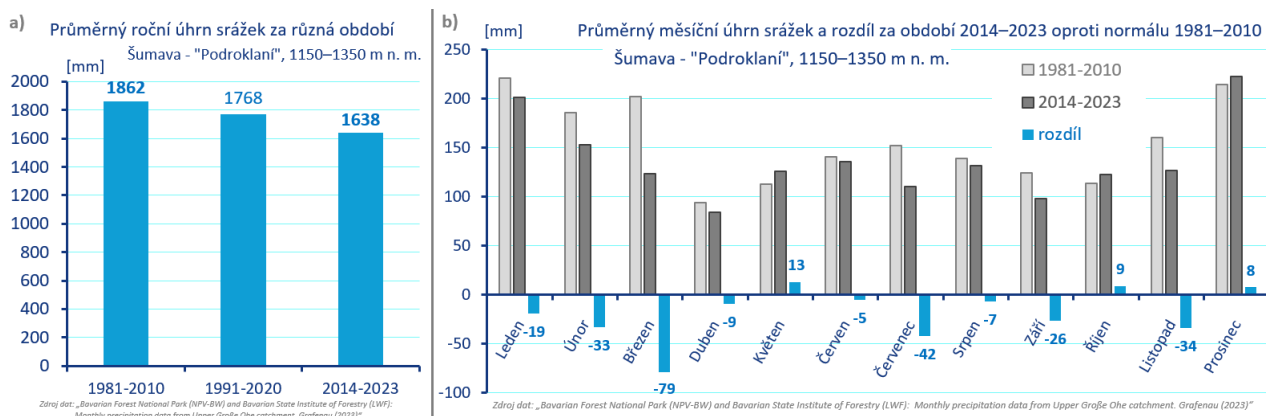
Dotčené období bylo na celém našem území charakteristické poměrně dlouhou epizodou sucha mezi roky 2014 a 2019. Epizoda byla hodnocena jako období s prohlubujícím se deficitem srážek, kde na základě průměrných měsíčních úhrnů srážek v Česku byl za období leden 2014–duben 2020 spočten územní srážkový deficit téměř 500 mm (ČHMÚ 2020). K prohlubování dopadu deficitu srážek v tomto období navíc přispěly nadprůměrné teploty, které napomáhaly vyššímu výparu, a nepříznivý průběh zim, kdy se vyjma horských oblastí nevytvořily významnější zásoby sněhu. Částečné zlepšení nastalo, resp. situace se dále nezhoršovala v dalších letech, kdy rok 2020 byl na území Česka hodnocen jako srážkově nadnormální, roky 2021–2023 srážkově normální (ČHMÚ 2024).

V rámci Česka byly v některých případech vyhodnoceny poměrně výrazné územní rozdíly, pokud jde o trend ročního úhrnu srážek mezi normálem 1981–2010 a období 2014–2023, kdy v Libereckém a Královéhradeckém kraji došlo k poklesu srážek o 12–13 %, zatímco v Jihočeském, Moravskoslezském a Jihomoravském kraji v průměru jen o 2–3 %. V měsíčním porovnání byly zaznamenány největší poklesy srážek v březnu v jižní polovině Čech a Moravy (o 30 – 40 % měsíčního úhrnu), v červnu a srpnu byl pozorován významný rozdíl ve vývoji měsíčních srážek mezi Moravou a Čechami, v červenci a září nejvíce srážek ubylo na SV Čech, v květnu pro změnu na SZ Čech. Kromě Plzeňského kraje došlo v měsíci říjnu ve všech krajích k nárůstu srážek, v srpnu si srážkově nejvíce polepšila jižní Morava (Tab. 1, Obr. 4.).

Pro hodnocení průměrného úhrnu srážek nemusí být desetileté období při vysoké proměnlivosti srážek zcela vypovídající, na druhou stranu vzdálenější roky dlouhodobějších časových řad nemusí již odpovídat realitě aktuálního stavu měnicího se a více rozkolísaného klimatu. V hodnoceném desetiletí, v letech 2014 až 2023, byly na našem území zaznamenány na jedné straně absolutně nízké roční úhrny, např. v roce 2018 na stanici Ústí nad Labem, Vaňov 289 mm, zatímco na některých lokalitách v roce 2023 byly naměřeny úhrny absolutně vysoké, např. v roce 2023 na stanici Labská bouda 2295 mm, rozdíl tedy v rámci Česka byl v posledních letech více než 2 tis. mm (ČHMÚ 2024). V oblasti Šumavy byl za celý rok 2015 naměřen velmi nízký úhrn srážek na stanici v Husinci, pouze 436 mm srážek, zatímco na Blatném vrchu u hranic s Německem ve stejném roce 1388 mm. V roce 2023 na Blatném vrchu spadlo 2176 mm srážek, desetiletý (2014–2023) průměr zde dosahuje 1677 mm. Srážkový normál 1981–2010 pro tuto centrální příhraniční oblast Šumavy (užívaný název Podroklán) podle měření měsíčních úhrnů pomocí totalizátorů na německé straně státní hranice (NPV-BW a LWF 2024) činí 1862 mm, podle stejného měření je zde v posledních 10 letech průměrný roční úhrn srážek už jen 1638 mm, což je 88 % zmíněného normálu (Obr. 8). Nutno podotknout, že dotčená oblast prošla v minulých desetiletích poměrně rozsáhlou kůrovcovou kalamitou spojenou s rozpadem vzrostlého porostu horských smrčín a změnou místních podmínek. Srovnatelný pokles srážek kolem 10 % potvrzují v podobných podmínkách šumavského příhraničí měření totalizátory ČHMÚ, nebo některé srážkoměrné stanice ČHMÚ a DWD na návětrné straně Šumavy (Tab. 2). Poměrně zajímavá může být skutečnost, že v této oblasti došlo na jaře v období 2014–2023 k nejvýraznějšímu poklesu srážek, ale zároveň nejnižšímu vzestupu teploty vzduchu, naproti tomu v zimě se zde v těchto letech nejvíce oteplilo, ale zimních srážek ubylo ze všech ročních období nejméně.

I přes významný pokles srážek v posledním desetiletí patří stále pramenná oblast Otavy v Podrokláně i s Blatným vrchem mezi srážkově vůbec nejbohatší lokality v Česku. Z dalších srážkově nejbohatších horských oblastí Česka, krkonošská stanice Labská bouda registruje v období 2014–2023 průměrný roční úhrn srážek 1614 mm (nesouvislá řada dat z období 1981–2010 zde poskytuje průměrný roční úhrn srážek 1430 mm), jizerskohorské stanice Bílý potok, Smědava za stejné období posledních 10 let 1447 mm a Desná Souš 1176 mm v porovnání s normálem 1365 mm, beskydská stanice Lysá hora 1413 mm, kde je ovšem naměřen srovnatelný úhrn 1412 mm i pro normálové období 1981–2010. Na druhou stranu nejsušší oblasti Česka, v závětrí Krušných hor stanice Tušimice za posledních 10 let nárůst ročního průměru na 464 mm

oproti 431 mm za normálové období 1981-2010, naopak Žatec pokles na 453 mm oproti normálu 473 mm, na jižní Moravě Brod nad Dyjí 482 mm oproti normálu 497 mm nebo Božice 474 mm oproti normálu 514 mm (ČHMÚ 2024).



Obr. 8 Průměrný roční úhrn srážek na německo-českém pomezí centrální Šumavy – Podroklaní v jednotlivých obdobích (a) a měsíční úhrny a rozdíl (c) za období 2014–2023 oproti normálu 1981–2010 (zdroj dat: NPV-BW a LWF 2024).

Pokles srážek na Šumavě v posledních 10 letech oproti předchozímu normálu je v návětrné části velmi zřetelný, více než 200 mm v ročním průměru, a to i přes zde srážkově bohatý rok 2023. Několik málo lokalit Šumavy a širšího podhůří, které zaznamenaly v hodnocených obdobích srovnatelný úhrn srážek nebo i nárůst za období 2014–2023, se nacházejí zpravidla ve východní, srážkově chudší polovině hodnocené oblasti. Proměnlivost srážek v Česku i na Šumavě je poměrně vysoká, s většími rozdíly i na relativně malém území, navíc hodnoty úhrnu srážek mohou být ve výsledku ovlivněny i dalšími vlivy v místě měření. Hodnocení prostorového rozdělení a dlouhodobých trendů srážek může být i proto velmi problematické a někdy i nejednoznačné.

4. Závěr

Příspěvek hodnotí rozdíly v průměrném ročním a měsíčním úhrnu srážek na území Česka a Šumavy za posledních 10 let (2014–2023) v porovnání s normálovým obdobím 1981–2010. Změna klimatu v jednotlivých obdobích je nejprve dokumentována rozdílem hodnot průměrné teploty vzduchu, nárůstem na ročním průměru o 1,2 °C jak v Česku, tak na šumavském Churáňově. Nejvíce se zpravidla oteplilo v zimě a nejméně na jaře, z jednotlivých měsíců vzrostla nejvíce teplota v únoru a prosinci (okolo 2 °C), naopak pokles byl zaznamenán pouze v květnu (–0,4 °C).

V průměrném ročním úhrnu došlo v posledním desetiletí k územnímu poklesu srážek v různé míře jak na našem území, tak i na Šumavě. Zatímco průměrný roční územní úhrn srážek v Česku za období 1981–2010 činil 686 mm, v letech 2014–2023 to bylo 649 mm. Nejvíce územní roční srážky klesly na SV Čech, a to o 12–13 %. Z hodnocení měsíčních úhrnů srážek vyplynul nejvyšší pokles v březnu a červenci, naopak nárůst v říjnu. V červnu byl nejvyšší rozdíl mezi východem a západem Česka, kdy na rozdíl od Čech na Moravě došlo k výraznému poklesu měsíčních srážek. V oblasti Šumavy byl v období 2014–2023 zaznamenán nejvýraznější pokles srážek v návětrných polohách centrální části pohoří, kdy v Podroklaní (pramenná oblast přítoků Otavy) srážky dosahovaly pouze 88 %, srážkoměrné stanice Brennes (DWD) a Špičák 90 % a vybrané totalizátory ČHMÚ průměrně 91 % z normálu 1981–2010. Na jaře zde byl zpravidla pokles srážek nejvýraznější, naopak v zimě nejslabší. Na závětrné straně Šumavy a v podhůří byl pokles srážek méně výrazný, několik málo stanic východní části hodnocené oblasti dokonce oproti normálu zaznamenalo nárůst ročních úhrnů.

Problematika hodnocení územních úhrnů srážek a jejich změn není jednoduchá, pro správnou interpretaci vyžaduje kromě husté sítě měřících bodů i konzistentní časové řady dat, znalost historie a instrumentace měření i specifika územních (místních) podmínek.

Poděkování

Studie vznikla za podpory a v rámci činnosti FZT JU (RVO 60076658), ÚH AVČR, v.v.i. (RVO 67985874 a program Strategie AV21 – Voda pro život) a ČHMÚ v souvislosti s řešením projektu TAČR SS02030040 - PERUN (Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku). Poděkování patří také pracovníkům Správy NP Bavorský les za poskytnutí měsíčních srážkových úhrnů, nicméně největší dík patří zejména všem pozorovatelům a provozovatelům meteorologických stanic, bez jejichž dlouhodobé a obětavé práce by nebylo možno obdobná data archivovat a hodnotit.

Literatura

- 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**: 137. <https://doi.org/10.3390/atmos13010137>.
- ČHMÚ, 2020. Stav a vývoj sucha v Česku. [online]. [cit. 1. 8. 2024]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2020/Stav_a_vyvoj_sucha-kveten_2020.pdf.
- ČHMÚ, 2024. Historická data - meteorologie a klimatologie. Český hydrometeorologický ústav. [online]. [cit. 1. 8. 2024]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zakladni-informace>.
- DWD, 2024. Climate Data Center. Deutscher Wetterdienst. [online]. [cit. 1. 8. 2024]. Dostupné z: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html.
- FIALA, R., KNOZOVÁ, G., 2019. Charakteristika vegetačního období na jižní Moravě a její dlouhodobé změny (1961–2018). In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): Fenologie, její význam a užití. Modrá 11. – 12. 4. 2019, VÚMOP v.v.i. Praha, 12 s. ISBN 978-80-87361-98-6.
- GEOSPHERE, 2024. Stationsdaten. GeoSphere Austria. [online]. [cit. 1. 8. 2024]. Dostupné z: <https://data.hub.geosphere.at/>.
- JAAGUS, J., AASA, A., ANISKEVICH, S., BOINCEAN, B., BOJARIU, R., BRIEDE, A., DANILOVICH, I., CASTRO, F. D., DUMITRESCU, A., LABUDA, M., LABUDOVÁ, L., LÖHMUS, K., MELNIK, V., MÖISJA, K., PONGRACZ, R., POTOPOVÁ, V., ŘEZNÍČKOVÁ, L., RIMKUS, E., SEMENOVA, I., STONEVIČIUS, E., ŠTĚPÁNEK, P., TRNKA, M., VICENTE-SERRANO, S. M., WIBIG, J., ZAHRADNÍČEK, P., 2022. Long-term changes in drought indices in eastern and central Europe. *International Journal of Climatology*, **42**(1), 225–249. <https://doi.org/10.1002/joc.7241>.
- KAŠPÁREK, L., KOŽÍN, R., 2022. Změny srážek a odtoků na povodích v ČR v období intenzivního oteplování. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2022, roč. **64**, č. 2, str. 17–27. ISSN 0322-8916.
- KRŠKA, K., ŠAMAJ, F., 2001. Dějiny meteorologie v českých zemích a na Slovensku. Praha: Nakladatelství Karolinum. ISBN 80-7184-951-0.
- MATĚJKA, K. 2021. Vývoj teplot a srážek v ČR od roku 1961. [online]. [cit. 1. 8. 2024]. Dostupné z: https://www.infodatasys.cz/climate/KlimaCR1961_2020.htm.
- MOŽNÝ, M., TRNKA, M., ŽALUD, Z., BARTOŠOVÁ, L., 2011. Dopady změn klimatu na pěstování Žateckého chmele v České republice. *Úroda*, vědecká příloha, 2011, s. 382–387.
- NPV-BW a LWF, 2024. Monthly precipitation and snow data from Upper Große Ohe catchment. Grafenau (2024). Bavarian Forest National Park and Bavarian State Institute of Forestry.
- POKORNÝ, J., PROCHÁZKA, J., JIRKA, V., HURYNA, A., HESSLEROVÁ, P., 2023. Lze nárůst příkonu sluneční energie a teplot vysvětlit jinak než úbytkem oblačnosti a vody v ovzduší? *Vodní hospodářství*, **73**(12), s. 2–8. ISSN 1211-0760.
- ROŽNOVSKÝ, J., 2014. Sucho na území České republiky. *ŽIVA*. Nakladatelství Academia, SSČ AV ČR, v. v. i., 2014(1). ISSN 0044-4812.
- ŘEHOŘ, J.; BRÁZDIL, R.; LHOTKA, O.; TRNKA, M.; BALEK, J.; ŠTĚPÁNEK, P.; ZAHRADNÍČEK, P., 2021. Precipitation in the Czech Republic in Light of Subjective and Objective Classifications of Circulation Types. *Atmosphere* 2021, **12**, 1536. <https://doi.org/10.3390/atmos12111536>.

- ŠERCL, P., 2008a: Hodnocení metod odhadu plošných srážek. *Meteorologické zprávy*, **61**, č. 2, s. 33–43.
- ŠERCL, P., 2008b. AGHydroInterpolace (Interpolační procedury pro ArcGIS). Uživatelská příručka. Praha: Český hydrometeorologický ústav.
- TOLASZ, R. 2013. Změny ročního chodu srážek v České republice od roku 1961. *Meteorologické zprávy*, **66**, 4, s. 104–109, ISSN 0026-1173.
- TOLASZ, R., ČEKAL, R., LAMAČOVÁ, A., ŠKÁCHOVÁ, H., 2024. Rok 2023 v Česku. *Meteorologické zprávy*, **77**, 1, s. 2-16, ISSN 0026-1173.
- WMO, 2018. Guide to Climatological Practices. [online], [cit. 2024-08-01]. Dostupné z: https://biotech.law.lsu.edu/blog/100-2018_en.pdf.
- WMO, 2024. Climate change indicators reached record levels in 2023: WMO. [online]. [cit. 1. 8. 2024]. Dostupné z: <https://wmo.int/news/media-centre/climate-change-indicators-reached-record-levels-2023-wmo>.
- ŽALUD, Z., HLAVINKA, P., RŮŽEK, P., KLEM, K., ZAHRADNÍČEK, P., ŠTĚPÁNEK, P., MOŽNÝ, M., TRNKA, M. 2020. Změna klimatu a její dopady pro polní produkci se zaměřením na cukrovou řepu v České republice. *Listy cukrovarnické a řepařské*. Roč. **136**, č. 7-8 (2020), s. 248-255. ISSN 1210-3306.

Srážkové poměry Klementina

Precipitation ratios of Klementinum

Jaroslav Rožnovský^{1,2}, Milan Palát³

¹ Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 43, 616 67, Brno, jaroslav.roznovsky@chmi.cz

² Mendelova univerzita v Brně, Zahradnická fakulta, Valtická 337, 691 44 Lednice

³ Univerzita obrany, Kounicova 65, 662 10 Brno

Abstrakt

Součástí studia klimatických změn je i městské prostředí, ve kterém hrají významnou roli srážky, které mají specifické účinky. Cílem naší práce bylo analyzovat úhrny srážek v nejdelší sérii měření srážek v ČR. Hodnoceno bylo období 1811 až 2020 na stanici Praha - Klementinum v rámci projektu studia městského klimatu. Pro statistickou analýzu byla použita data z databáze Českého hydrometeorologického ústavu. Analýza dat byla provedena za celé období a za jednotlivá třicetiletá období tak, aby navazovala na normální období od roku 1901. Na jedné straně naše výsledky ukazují, že z dlouhodobého hlediska roční úhrny srážek se statisticky významně nemění. Mezi jednotlivými třiceti lety jsou však rozdíly. Nejvyšší roční průměrné srážky byly v letech 1811 až 1830, a to 494,1 mm. Naopak nejnižší v období 1841 až 1870, a to 435,3 mm. Následuje poslední normálové období 1991 až 2020 s úhrnem 453,9 mm. Nejvyšší roční úhrn byl v roce 1939 s hodnotou 746,8 mm a nejnižší v roce 1842 s hodnotou 255,3 mm.

Klíčová slova: městské klima, kolísání úhrnů srážek,

Abstract

Part of the study of climate change is also the urban environment, in which precipitation plays a significant role, which have specific effects. The goal of our work was to determine the dynamics of raindrops in the longest series of precipitation measurements in the Czech Republic for the period 1811 to 2020 at the station Prague - Klementinum, as part of the urban climate project. Data from the database of the Czech Hydrometeorological Institute were used for the statistical analysis. The data analysis was carried out for the entire period and for individual thirty-year periods in such a way as to follow the normal periods from 1901. On the one hand, our results demonstrate that, in the long-term perspective, annual precipitation totals do not change statistically significantly. However, there are differences between individual thirty years. The highest annual average rainfall was between 1811 and 1830, namely 494.1 mm. Conversely, the lowest in the period 1841 to 1870, namely 435.3 mm. The last normal follows, the period 1991 to 2020 with a total of 453.9 mm. The highest annual total was in 1939 with a total of 746.8 mm and the lowest in 1842 with a total 255.3 mm.

Keywords: urban climate, precipitation dynamics, trends

1. Úvod

Součástí studií v rámci hodnocení změny klimatu jsou jednoznačně srážky. Před časem Kozuchowski a Marciniak (1990) předložili studii, podle níž v západní a severní Evropě srážky v poslední době rostou a porostou i nadále, v jižní a východní Evropě naopak klesají a klesat budou dále. Naše území leží v oblasti očekávaného poklesu (Räisänen et al., 2004, Střeščík, 2013). Vývoji srážek na našem území je věnována stálá pozornost (Rožnovský, 2019). V jednotlivých letech dosahuje ovšem hodnot často velmi odlišných: v nejsušším roce 2003 pouhých 513 mm, v r. 1983 to bylo 551 mm, v nejdeštivějším roce 1966 plných 860 mm, v r. 2002 856 mm a v r. 1981 852 mm. V průběhu let 1961–2010 srážkové úhrny slabě rostou (Střeščík, Rožnovský 2020), ale tento růst je nepatrný vzhledem k silnému kolísání z roku na rok.

V dynamice našeho podnebí sehrávají hlavní roli vlivy cirkulační a geografický. Po převážnou část roku u nás převládá vzduch mírného pásma, v krátkých obdobích se projevuje vzduch tropický, ale také vzduch arktický. Atlantický oceán způsobuje, že oceanita našeho podnebí je vyšší v Čechách, kde jsou častěji mírnější zimy a chladnější léta, srážky jsou

rozděleny rovnoměrněji. Naopak kontinentalita je oproti Čechám vyšší na Moravě a ve Slezsku, kde jsou také větší teplotní amplitudy. Charakteristiky našeho podnebí jsou zpracovány v několika atlasech. Klimatologickou analýzu období 1901 až 1950 obsahuje Atlas podnebí Československa (1958) a Podnebí ČSSR - Tabulky (1960). Mapy rozložení klimatických prvků v Atlasu podnebí Česka (Tolasz et al., 2007) byly vypracovány z meteorologických údajů za období 1961 až 2000. Z literárních podkladů pro hodnocení území je zřejmé, že bude docházet k aridizaci našeho území. Z hlediska odvodu vody měst je nutné s touto predikcí počítat. Možná změna klimatu ještě zvýší dynamiku proměnlivosti našeho podnebí včetně úhrnů srážek. Z hodnocení výskytu bezesrážkových období (Fukalová et al., 2009) vychází, že průměrný počet dnů tohoto období se mění v závislosti na nadmořské výšce od asi 90 pro nejnižší část Moravy po 50 na Vysočině, s maximy v nejsušších oblastech přes 100 dnů v roce, např. Kuchařovice 108 dnů.

Je celosvětovým trendem, že roste počet obyvatel měst. Ovšem městské prostředí se liší od přírodní krajiny zvláště svým povrchem, kdy místo zeleně jde převážně o umělé povrchy, zvláště beton a asfalt, které mají odlišnou radiální a následně energetickou bilanci než povrch tvořený zelení. Ovšem měli bychom si s ohledem na lidské zdraví uvědomovat, že městské prostředí má svou specifickou formu mezoklimatu až mikroklimatu. V odborné literatuře označujeme tepelné změny jako „tepelný ostrov měst“, kdy přes den jsou teploty vzduchu vyšší než v okolí města, ale i v noci se město ochlazuje pomaleji než přírodní okolí (Rožnovský et al.). Ve studii o klimatu města Brna (Litschmann, Rožnovský, 2012) je uvedeno, že z porovnání teplotních poměrů „městské“ stanice na Mendlově náměstí a stanice Brno – Tuřany vychází u maximálních denních teplot rozdílů přesahujících 4 °C. Klima města bylo podrobně studováno pro Brno (Dobrovolný et al., 2012) a pro Prahu (Žák, 2012). V podstatě metody měření na klimatologických stanicích nedovolují měření ve městech, proto jsou nutná specifická meteorologická měření. Pro městská měření uvádí doporučení pro budování sítí měřicích bodů Rožnovský et al., 2011.

Vzhledem k trendu zvyšování počtu obyvatel ve městech je nutné studovat podmínky městského klimatu. Proto jsme se zaměřili na hodnocení srážek ve městech. Pro vyjádření dynamiky srážek jsme se zaměřili na jednu z nejdelších řad měření, a to na data ze stanice Praha-Klementinum. Jak uvádí Kyselý, J. (2009), jsou data ze stanice Praha-Klementinum nejčastěji analyzované dlouhodobé řady v České republice. Pohybem srážkových událostí v oblasti Prahy, převážně konvektivními srážkovými událostmi se zabýval Máca, P. (2003). Uvádí průměrné parametry pro celou oblast a dílčí hodnoty pohybu srážek pro devět podoblastí, na které byla oblast Prahy rozdělena.

2. Materiál a metody

Meteorologická stanice v Praze-Klementinu se nachází v centru města a je umístěna na střeše Klementina, ve kterém sídlí Národní knihovna ČR. Mapuje klima centra města Prahy, které je značně odlišné od klimatu ostatních částí a značně odlišné od okrajových částí Prahy na tzv. pražských vrcholech. Měření srážek a slunečního svitu jsou prováděna na střešní plošině na východním křídle budovy technické knihovny (https://www.in-pocasi.cz/archiv/praha_klementinum). Provozovatelem meteorologické stanice (Praha, 191 m n. m.) je Český hydrometeorologický ústav, stanice je zařazena do ústavní sítě klimatologických stanic (<https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-a-zajimavosti/mereni-z-klementina>).

Ke zpracování byly použity denní srážkové úhrny od roku 1811, které jsou uvedené na webové stránce Českého hydrometeorologického ústavu (<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/praha-klementinum>). Tato data byla statisticky zpracována v intervalech jednotlivých měsíců, ročních období, roků, desetiletí a třicetiletí – normálových období a za dobu měření od roku 1981 až 2020.

3. Výsledky

Přehled statistických charakteristik denních srážkových úhrnů za jednotlivá třicetiletá období, které budeme dále nazývat normály, uvádí Table 1. Pokud jde o roční průměry, můžeme uvést, že jsou v podstatě vyrovnané, když nejnížší hodnotou 435,3 mm je za období 1841–1870 a nejvyšší 494,1 mm v prvním hodnoceném období 1811–1840. Větší rozdíly nacházíme u extrémních hodnot v hodnoceném období. Minimální roční úhrn byl 255,3 mm v roce 1842, kterému je blízký další v pořadí úhrn 267,1 mm v roce 2003. Maximum má hodnotu 746,8 mm v roce 1939. Standard deviation má nejvyšší hodnotu 112,5 v období 1931 až 1960, kdy byl i rok s nejvyšším úhrnem. Obdobný průběh srážek v jednotlivých třicetiletích dokládá pro všechny stejná hodnota coefficient of variation, a to 0,2.

Tab 1 Statistické charakteristiky srážek (mm) za období 1811 až 2020, Praha Klementinum.

Precipitation	1811 - 1840	1841 - 1870	1871 - 1900	1901 - 1930	1931 - 1960	1961 - 1990	1991 - 2020
sum	494.1	435.3	474.1	481.2	492.2	470.6	453.9
minimum	310.0	255.3	348.0	326.0	268.7	332.2	267.1
minimum (year)	1826	1842	1874	1911	1943	1976	2003
maximum	665.4	600.8	637.3	633.8	746.8	624.1	661.5
maximum (year)	1828	1844	1890	1926	1939	1966	2002
standard deviation	100.8	78.0	78.4	85.0	112.5	86.2	82.2
coefficient of variation	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Z hodnocení jednotlivých měsíců vyplývají následující poznatky. U měsíce ledna nacházíme velmi vyrovnané měsíční úhrny, které jsou v rozpětí minima 18,1 mm v posledním třicetiletí (1991–2020) a maxima 26,1 mm v období 1811–1840. Jak vidíme, v lednu jsou u všech období minima v jednotkách mm, v období 1871–1900 potom jen 0,7 mm. Ovšem maxima mají hodnoty úhrnů v letních měsících, když nejvyšší úhrn za leden byl 75,9 mm v roce 1920. Standard deviation svým způsobem sice nevyrovnaně ale postupně klesá. Coefficient of variation je v rozmezí od 0,4 do 0,7. Měsíc únor vykazuje nejnižší měsíční úhrny ze všech měsíců roku s průměry za třicetiletí v rozpětí 15,8 mm (1811–1840) až 21,9 mm v letech 1841–1870 a velmi blízké je období 1931–1960 s úhrnem 21,6 mm. Minima jsou podobně jako u ledna v jednotkách mm, ale maxima mají nižší hodnoty než u ledna, a v rozpětí 6 mm, když maximum v roce 1828 činilo 48,5 mm a minimum 42,5 mm v roce 1948. Oproti lednu je standard deviation mezi obdobími kolísající, když nejnižší je v období 1961–1990 a nejvyšší 14,4 v období 1871–1900. Rozpětí coefficient of variation je oproti lednu vyrovnanější s převažující hodnotou 0,6.

Jarní období začíná březnem, který má měsíční průměry vyšší, než byly v lednu a únoru. Nejvyšší průměr byl v období 1811 až 1840, a to 30,2 mm, nejnižší 22,3 mm, v letech 1931–1960. Minima mimo roku 1977 s úhrnem 11,7 mm jsou v jednotkách mm, nejnižší hodnotu 2,6 mm vidíme v posledním období, rok 2003, kterému se blíží 2,9 mm rok 1899. Nejvyšší úhrny jsou v posledním období s hodnotou 81,4 v roce 2000 a nejnižší maximum 48 mm měl rok 1952 a v letech 1890 a 1941 překonávají 100 mm. Hodnota standard deviation je vyšší než v lednu a únoru, 17,8 byla v období 1811–1840 a nejnižší 10,2 v období 1961–1990. Coefficient of variation má ve třech obdobích hodnotu 0,6, ve dvou 0,5 a nejnižší 0,4 v letech 1961–1990. Měsíční úhrny v dubnu dokládají rostoucí úhrny srážek v jarních měsících oproti zimním. V období 1901–1930 je nejvyšší úhrn, a to 41,8 mm, nejnižší 24,7 mm byl v období 1991–2020 s úhrnem 21,6 mm. Minima se pohybují od 0,2 mm v roce 1893 do maxima 12,3 mm v roce 1916. Nejvyšší úhrny mají rozpětí mezi 103,9 mm v roce 1941 po 62,5 v roce 2001. Standard deviation má vyšší hodnoty než v březnu, a to mezi nejvyšší hodnotou 23,2 v prvním období (1811–1840) a nejnižší v posledním období, tedy 1991–2020. Rozpětí coefficient of variation je mezi 0,6 a 0,5. Podobně jako v hodnocení dubna, jsou průměrné úhrny srážek za měsíc květen vyšší než v měsíci dubnu, a to ve všech obdobích. Nejvyšší měsíční úhrn 62,6 mm nacházíme v období 1961–1990, když průměr 62,5 mm byl v období 1871–1900. Nejnižší průměr 50,1 mm byl v období 1841–1870. I v měsíci květnu jsou ve třech obdobích minima v jednotkách mm. Nejnižší byl úhrn 2,7 mm v roce 1922 a nejvyšší 153,7 mm v roce 1996, když ve všech obdobích byla maxima úhrnů přes 100 mm. Uvedené extrémní hodnoty jsou příčinou rostoucí hodnoty standard deviation, a to v rozmezí 27,9 (1931–1960) po 36,8 (1871–1900). Hodnoty coefficient of variation jsou sice rozdílné, ale jako v měsíci dubnu mezi 0,6 a 0,5.

V červnu a až na období 1901–1930 a 1931–1960 jde o měsíc s nejvyššími průměry srážek. Navíc jsou červnové průměry srážek vyrovnané, když nejvyšší měsíční úhrn činí 74 mm v letech 1811–1840 a nejnižší 64,3 nacházíme v období 1941–1870, ale průměr je velmi podobný, lišící se jen desetinami v dalších třech obdobích. Pouze v roce 2014 je minimální měsíční úhrn pod 10 mm, a to 9,9 mm. Ostatní jsou vyšší, až do 18,8 mm v roce 1950. Nejvyšší úhrny v červnu se pohybují mezi 176,7 mm v roce 1926 a 132,4 mm v roce 1979. 0 mm. Vyšší oproti květnu jsou hodnoty standard deviation mimo období 1991–2020 s hodnotou 26,0, u ostatních období s hodnotou přes 30, nejvyšší je 39,3 v období 1901–1930. Rozdíl oproti květnu je u coefficient of variation, když hodnotu 0,6 má jen období 1901–1930, ostatní 0,5, mimo poslední s hodnotou 0,4. Červencové průměry ve většině třicetiletí vykazují postupný pokles úhrnů srážek v ročním chodu, ale v období 1901–1930 a 1931–1960 mají nejvyšší měsíční úhrny srážek v roce. Úhrn 77,2 mm v období 1931–1960 je ze všech období nejvyšší, naopak nejnižší, 55,0 mm byl v letech 1841–1870. Minimální úhrny vykazují velké rozdíly, v roce 1990 je to jen 5 mm, naopak nejvyšší minimum 20 mm bylo v roce 1898. Nejvyšší úhrny přesahují 100 mm ve všech obdobích, i když v roce 1895 to bylo jen 102,1 mm, naopak 214,3 bylo naměřeno v roce 1981. Standard deviation přesáhla hodnotu 40 v obdobích 1931–1960 (46,1) a 1961–1990 (45,3), naopak v letech 1841–1870 je 25,3. Coefficient of

variation má oproti červnu větší rozdíly. Nejvyšší je v období 1961–1990, a to 0,8, naopak v obdobích 1871–1900 a 1901–1930 jen 0,4. Poslední letní měsíc srpen, potvrzuje sice nepravidelně, ale pokračující pokles úhrnů srážek. Období se v podstatě dělí na dvě skupiny, a to s úhrnem přes 60 mm, kdy nejvyšší 67,5 je v období 1931–1960 a v následujícím 1961–1990 je to 67,1. Druhá skupina s nižšími úhrny má nejnižší 51,8 mm v období 1871–1900. Minimální úhrny za období jsou též klesající, v roce 1904 je nejnižší, 2,5 mm, nevyšší je v roce 1976 s 21,7 mm. Podobně jako u července jsou nejvyšší úhrny v obdobích přes 100 mm, když nejnižší 103,2 mm byl v roce 1870 a nejvyšší 191,6 mm v roce 1938. Oproti červenci je standard deviation vyrovnanější. Hodnotu nejvyšší 39,3 má v letech 1931–1960 a nejnižší v letech 1841–1870, tj. 25,3. Coefficient of variation má převážně hodnotu 0,5. Vyšší je v obdobích 1901–1930 a 1931–1960 s hodnotou 0,6, v letech 1991–2020 je 0,4.

První podzimní měsíc má ve většině období oproti létu úhrny až o dvě či tři desítky nižší, ale vyrovnanější v rozmezí od nejvyššího úhrnu 42,5 mm 1901–1930 a po 33,7 mm v letech 1841–1870 a 33,9 v posledním období. Minimální úhrny v jednotlivých obdobích jsou jen v jednotkách s minimem 2 mm v roce 1959 a nejvyšší hodnotou 8,3 mm v roce 1834. Nejvyšší úhrny za období přesahují 100 mm, když v roce 1906 to bylo 123,5 mm. Nejnižší hodnota maxima je 73,1 v 2014. Hodnota standard deviation je velmi vyrovnaná, mimo hodnotu 19,6 za roky 1991–2020 se pohybuje v rozmezí 22,5 (1871–1900) až 25,6 v letech 1901–1930. Mimo období 1841–1870 s hodnotou 0,7 a let 1871–1900, kdy je coefficient of variation 0,5, mají ostatní období shodně 0,6. V říjnu jsou průměrné úhrny vzhledem k září nižší. 39 mm činí nejvyšší průměr v letech 1931–1960, nejnižší s hodnotou 23,8 je za období 1811–1840. A poprvé je měsíc, kdy nebyly měřitelné srážky, když v roce 1908 byl úhrn 0,0 mm. Velmi nízký je potom rok 1866 s úhrnem 0,1 mm. Nejvyšší hodnotu minima máme v roce 1995, a to 5,4 mm. Nejvyšší úhrn přes 100 mm je jen jednou, a to 108,8 mm v roce 1960. Nejnižší maximum za období nacházíme v roce 1813 s úhrnem 53,5 mm. Na nižší úhrny reaguje svými hodnotami standard deviation s nejnižší hodnotou 13,8 v období 1811–1840 a nejvyšší za období 131–1960 s hodnotou 29,6. Coefficient of variation kolísá mezi hodnotou 0,8 ve třech obdobích a hodnotou 0,5 v posledním období, tedy 1991–2020. V několika obdobích má listopad podobné úhrny, jako byly v říjnu. Nejvyšší průměr 31,8 mm má období 1811–1840, nejnižší 24,6 mm potom roky 1931–1960. Vysoká podobnost průměrných úhrnů dokládá i jejich amplituda, která je 7,2 mm. Můžeme uvést, že listopadové úhrny jsou za celé období 1811 až 2020 velmi stabilní. Jen v roce 1966 přesáhl minimální úhrn za období 10 mm, a to bylo 11,7 mm. Naopak ve třech obdobích jsou minimální hodnoty pod 2 mm, a to 1,1 mm v roce 2011, 1,6 mm v roce 1920 a 1,9 v roce 1953. Nejvyšší listopadové úhrny nedosahují 100 mm, když nejbliž to bylo v roce 1919 s úhrnem 96,9, nejmenší má hodnotu 51,3 mm v roce 1938. Standard deviation se pohybuje v rozpětí 21,3 v letech 1871–1900 a 13,4 v období 1961–1990. Podobně jako v říjnu coefficient of variation kolísá mezi hodnotou 0,8, a to v období 1871–1900 a hodnotou 0,5 v obdobích 1811–1840 a 1961–1990.

Poslední měsíc roku a první zimní, prosinec, vykazuje podobnost s listopadem. Nejvyšší průměr má shodně v období 1811–1840 i s velmi podobnou hodnotou, 31,1 mm. Nejnižší průměr je 20,8 mm v rocích 1841–1870. Proto i amplituda posledních tří měsíců roku je podobná, pro prosinec činí 10,3 mm. Také je možné konstatovat, že prosincové úhrny jsou dosti stabilní. Minimální úhrny se pohybují od 8 mm v roce 1908 po 0,5 mm v roce 1865. Podobnost října až prosince je také v možném výskytu velmi nízkých až nulových úhrnů. Ve výskytu nejvyšších se zcela vymyká rok 1839 s úhrnem 146,6 mm. V ostatních obdobích jsou nejvyšší úhrny svým způsobem vyrovnané, když nejvyšší hodnota 78,2 mm je v roce 1939 a nejnižší 44,3 mm v roce 1974. Uvedeným hodnotám odpovídá standard deviation, když nejvyšší hodnotu 28,7 má první období a nejnižší hodnoty potom v období 1961–1990, a to 12,1 a 12,6 v období posledním. Odchylující se maximum v prvním období zvýšilo i hodnotu coefficient of variation na nejvyšší, a to 0,9, když nejnižší 0,5 je v letech 1901–1930.

4. Závěr

Z vyhodnocení vyplývá, že roční průměry třicetiletých období jsou v podstatě vyrovnané, když nejnižší hodnotou 435,3 mm je za období 1841–1870 a nejvyšší 494,1 mm v prvním hodnoceném období 1811–1840. Jistě, že rozdíly nacházíme u extrémních hodnot, takže nejnižší roční úhrn byl 255,3 mm v roce 1842, kterému je blízký další v pořadí úhrn 267,1 mm v roce 2003. Nejvyšší roční úhrn o hodnotě 746,8 mm přísluší roku 1939. Standard deviation má nejvyšší hodnotu 112,5 v období 1931 až 1960, kdy byl i rok s nejvyšším úhrnem. Obdobný průběh srážek v jednotlivých třicetiletích dokládá pro všechny stejná hodnota coefficient of variation, a to 0,2. Z analýzy jednotlivých měsíců vyplynulo, že v měsíci lednu jsou možné výskyty srážek blízké nule, ale také v mnoha desítkách mm, jak dokládá úhrn 75,9 mm v roce 1920. Nejnižší měsíční úhrny ze všech měsíců roku vykazuje únor, s průměry za třicetiletí v rozpětí

15,8 mm (1811–1840) až 21,9 mm v letech 1841–1870 a velmi blízké je období 1931–1960 s úhrnem 21,6 mm. Minima jsou podobně jako u ledna v jednotkách mm, ale maxima mají nižší hodnoty než u ledna.

Úhrny v březnu dokládají postupný nárůst srážek, ale přesto jsou jeho minima až na jednu výjimku stále v jednotkách mm, kdy nejnižší hodnotu 2,6 mm vidíme v roce 2003, kterému se blíží 2,9 mm rok 1899. Hodnoty nejvyšších úhrnů rostou, když v letech 1890 a 1941 překonávají 100 mm. Hodnota standard deviation je vyšší než v lednu a únoru. Postupný nárůst úhrnů pozorujeme i v dubnu. Ovšem nejnižší úhrny, jako 0,2 mm v roce 1893, dokládají výskyty sucha i uprostřed jara. Naopak nejvyšší úhrny mají rozpětí mezi 103,9 mm v roce 1941 po 62,5 v roce 2001. Standard deviation má vyšší hodnoty než v březnu. Poslední jarní měsíc květen má rostoucí průměrné úhrny, ale přesto byl měsíční úhrn 2,7 mm v roce 1922. Maxima jsou však již přes 100 mm, nejvyšší 153,7 mm bylo v roce 1996. Narůstá také hodnota standard deviation, a to v rozmezí 27,9 (1931–1960) po 36,8 (1871–1900).

Vrchol měsíčních úhrnů představují srážky v červnu, přitom jsou průměry v podstatě vyrovnané, když nejvyšší měsíční úhrn činí 74 mm v letech 1811–1840, a nejnižší 64,3 nacházíme v období 1841–1870, Minimální měsíční úhrny takřka neklesají pod 10 mm. Nejvyšší úhrn 176,7 mm byl v roce 1926 a 132,4 mm v roce 1979. Rostou hodnoty standard deviation až na 39,3 v období 1901–1930. Od července pozorujeme postupný pokles úhrnů srážek v ročním chodu, ale i když ještě v období 1901–1930 a 1931–1960 mají nejvyšší měsíční úhrny srážek v roce. Minimální úhrny však vykazují velké rozdíly, a to v roce 1990 jen 5 mm, naopak nejvyšší úhrny přesahují 100 mm ve všech obdobích, když v roce 1981 bylo naměřeno 214,3 mm. Vysoká je hodnota standard deviation, která v obdobích 1931–1960 dosáhla hodnoty 46,1. Také srpen vykazuje pokles úhrnů srážek. Minimální úhrny v roce 1904 byly jen 2,5 mm, nejvyšší 191,6 mm v roce 1938. Oproti červenci je standard deviation vyrovnanější, mezi hodnotami 39,3 až 25,3.

Měsíce podzimu dokládají postupné vyrovnávání klesajících úhrnů srážek. V září minimální úhrny jsou v jednotkách mm. Ale nejvyšší úhrn v roce 1906 byl 123,5 mm. Hodnota standard deviation je velmi vyrovnaná, v podstatě v rozmezí 22,5 (1871–1900) až 25,6 v letech 1901–1930. V říjnu jsou průměrné úhrny vzhledem k září nižší. Ale v roce 1908 byl úhrn 0,0 mm. Velmi blízký je potom rok 1866 s úhrnem 0,1 mm. Nejvyšší úhrn 108,8 mm byl v roce 1960. Na nižší úhrny reaguje svými hodnotami standard deviation s nejnižší hodnotou 13,8 až 29,6. V několika obdobích má listopad podobné úhrny, jako byly v říjnu. Vysokou podobnost průměrných úhrnů dokládá i jejich amplituda, která je 7,2 mm. Můžeme uvést, že listopadové úhrny jsou za celé období 1811 až 2020 velmi stabilní. Standard deviation se pohybuje v rozpětí 21,3 v letech 1871–1900 a 13,4 v období 1961–1990.

Prosinec vykazuje podobnost s listopadem. Nejvyšší průměr má shodně v období 1811–1840 i velmi podobnou hodnotou, 31,1 mm. Amplituda posledních tří měsíců roku je podobná, pro prosinec činí 10,3 mm, která je 7,2 mm. Podobnost října až prosince je také v možném výskytu velmi nízkých až nulových úhrnů. Ve výskytu nejvyšších se zcela vymyká rok 1839 s úhrnem 146,6 mm. Standard deviation prosince je v rozpětí 28,7 v první období, a nejnižší hodnoty potom v období 1961–1990, a to 12,1 a 12,6 v období posledním. Coefficient of variation je v průběhu roku až na výjimky v rozmezí od 0,4 do 0,7, převážně o hodnotách 0 nebo 0,6.

Z analýzy srážkových úhrnů na stanici Praha-Klementinum můžeme vyvodit závěr, že minimálně centrální část městského hlediska klimatologického představuje oblast s nižšími úhrny srážek, s vyšší pravděpodobností výskytů sucha jak v jarním, tak podzimním období. Z tohoto důvodu je nutné zajisti pro doporučovanou zeleň pravidelnou kontrolu půdní vlhkosti a stabilní závlahu. Současně lze konstatovat, že výskyty extrémů srážek mají nízkou pravděpodobnost.

Literatura

BHATIA, N., SINGH, V.P. A LEE, K. (2019): Variability of extreme precipitation over Texas and its relation with climatic cycles. *Theor Appl Climatol* **138**, 449–467. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02840-w>

FUKALOVÁ, P., ROŽNOVSKÝ, J., CHUCHMA, F. 2009: Analýza bezesrážkových období v podmínkách současného i budoucího klimatu v oblasti jižní Moravy. In 17. Posterový den s mezinárodní účastí a Deň otvorených dverí na ÚH SAV "Transport vody, chemikálií a energie v systéme pôda-rastlina-atmosféra". Bratislava: Ústav hydrológie SAV, Bratislava, s. 118-128, CD ROM. ISBN 978-80-89139-19-4.

HLADNÝ J. et al., 1997. Vyhodnocení povodňové situace v červenci 1997 (Souhrnná zpráva projektu). Český hydrometeorologický ústav, 163 s., Praha 1998.

- KOHUT, M., ROŽNOVSKÝ, J., CHUCHMA, F. 2009: The long-term soil moisture reserve variability in the Czech Republic based on the AVISO model. In Sustainable development and bioclimate: Reviewed Conference Proceedings, Stará Lesná 5th to 8th October 2009. Eds. Pribullová and Bičarová. Stará Lesná: Geophysical Institute of the Slovak Academy of Science and Slovak Bioclimatological Society of the Slovak Academy of Science, pp. 162-163. ISBN 978-80900450-1-9.
- Kolektiv, 1997: Stoleté výročí extrémních srážek. Praha, Český hydrometeorologický ústav, 321 pp.
- KOŽUCHOWSKI, K., MARCINIAK, K. (1990): Tendencje zmian temperatury i opadów w Europie środkowej w stuleciu 1881–1980. Acta universitatis Nicolai Copernici, Geografia, XXII, zesz. 73, 22–43.
- KURPELOVÁ, M., COUFAL, L., ČULÍK, J., 1975. Agroklimatické podmienky ČSSR. Bratislava: Hydrometeorologický ústav, 270 s.
- KVĚTOŇ, V. et al. 1997: Rozložení srážek při povodních v červenci 1997. Met. Zpr. 50 (6): 171–177.
- LABUDOVÁ, L., P. ŠTASTNÝ A M. TRIZNA (2013): The North Atlantic Oscillation and winter precipitation totals in Slovakia. Moravian Geographical Reports, Vol. 21, No. 4, p. 38–49, DOI: 10.2478/mgr-2013-0019.
- NETOPIIL, R. et al. (1984): Fyzická geografie 1. Praha, Státní pedagogické nakladatelství, 273 s.
- PAVLÍK, J., SANDEV, M. 1997: Synoptické hodnocení povětrnostních situací v průběhu povodně v červenci 1997. Met. Zpr. 50 (6): 164-171.
- Podnebí ČSSR – Souborná studie (1969): Praha, Hydrometeorologický ústav, 357s.
- Podnebí ČSSR – Tabulky, 1960: Praha, Hydrometeorologický ústav, 379 pp.
- Portal ČHMÚ <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zakladni-informace>
- RÄISÄNEN, J., HANSSON, U., ULLERSTIG, A., DÖSCHER, R., GRAHAM, L.P., JONES, C., MEIER, H.E.M., SAMUELSSON, P., WILLÉN, U. (2004): European climate in late twenty first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. Climate dynamics 27, 13–31.
- ROŽNOVSKÝ, J. et al, 2021 Hodnocení městského klimatu, zvláště tepelného ostrova, postupy a opatření pro omezení negativních dopadů meteorologických extrémů na obyvatele a životní prostředí. Metodika. Český hydrometeorologický ústav. 37 s.
- ROŽNOVSKÝ, J. Water Balance and Phase of Hydrocycle Dynamics. In: ZELENÁKOVÁ, Martina, Jitka FIALOVÁ a Abdelazim M. NEGM, ed. *Assessment and Protection of Water Resources in the Czech Republic*. Springer Water, 2019, s. 403-414. ISBN 978-3-030-18362-2.
- STŘEŠTÍK J., ROŽNOVSKÝ J., ŠTĚPÁNEK P., ZAHRADNÍČEK P. Změna ročních a sezonních srážkových úhrnů v České republice v letech 1961-2012 . In: Extrémy oběhu vody v krajině, Mikulov, 2014. (CD-ROM).
- STŘEŠTÍK, J. (2013): The change of precipitation totals in different European localities during 1900-2000. Proceedings of the international conference “Environmental changes and adaptation strategies“, Eds. Šiška, Nejedlík, Hájková and Kožnarová, Skalica.
- STŘEŠTÍK, J., J. ROŽNOVSKÝ, P. ŠTĚPÁNEK A P. ZAHRADNÍČEK (2014a): Increase of annual and seasonal air temperatures in the Czech Republic during 1961-2010. In: ROŽNOVSKÝ, J. a T. LITSCHMANN eds. Mendel and Bioclimatology. Conference proceedings, Brno, [CD-ROM]. Brno: 2014. ISBN 978-80-210-6983-1.
- ŠTĚPÁNEK P, ZAHRADNÍČEK P, FARDA A. (2013): Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961–2010. *Időjárás* 117: 123–141,
- TOLASZ, R., et al. Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, 255 s. 2007. ISBN 978-80-86690-26-1 (CHMI), 978-80-244-1626-7 (UP).
- ZAHRADNÍČEK P., BRÁZDIL R, ŠTĚPÁNEK P., TRNKA M. (2020): Reflections of global warming in trends of temperature characteristics in the Czech Republic, 1961–2019. *Int J Climatol.*;1–19. <https://doi.org/10.1002/joc.6791>

Přehled finančních možností v oblasti vědy aneb využijte grantové možnosti naplno

Overview of financial opportunities in science or how to fully utilize grant options

Eva Stehnová

Český hydrometeorologický ústav, Projektové oddělení, Kroftova 2578/43, 616 00, Brno, eva.stehnova@chmi.cz

Abstrakt

K oblasti vědy, výzkumu a inovací neodmyslitelně patří i problematika výzkumných grantových možností. Bez těchto finančních prostředků vědecké týmy jen těžko mohou existovat a fungovat. Výzkum je klíčovým motorem pokroku a inovací pro celou společnost. Článek poskytuje přehled nejčastějších výzev, se kterými se žadatelé o granty setkávají, a zdůrazňuje strategický význam těchto financí pro rozvoj inovací a vědy v České republice. Příspěvek se zaměřuje na konkrétní poskytovatele v rámci českého grantového prostředí, a to konkrétně na Technologickou agenturu České republiky, Národní agenturu pro zemědělský výzkum, Grantovou agenturu České republiky. V textu níže jsou detailněji rozebrány programy zaměřené na oblast životního prostředí a přírodní vědy (Programy: Prostředí pro život 2, Země II, a Standardní projekty Grantové agentury).

Klíčová slova: grantové možnosti, Technologická agentura České republiky, Národní agentura pro zemědělský výzkum, Grantová agentura České republiky

Abstract

The field of science, research, and innovation is inherently linked to the issue of research grant opportunities. Without these financial resources, scientific teams can hardly exist and operate. Research is a key driver of progress and innovation for society as a whole. This article provides an overview of the most common challenges faced by grant applicants and highlights the strategic importance of this funding for the development of innovation and science in the Czech Republic. The paper focuses on specific grant providers within the Czech funding landscape, namely the Technology Agency of the Czech Republic, the National Agency for Agricultural Research, and the Czech Science Foundation. The text below further details programs focused on the environment and natural sciences (Programs: Environment for Life 2, Earth II, and Standard Projects of the Czech Science Foundation).

Keywords: grant opportunities, Technology Agency of the Czech Republic, National Agency for Agricultural Research, Czech Science Foundation

1. Úvod

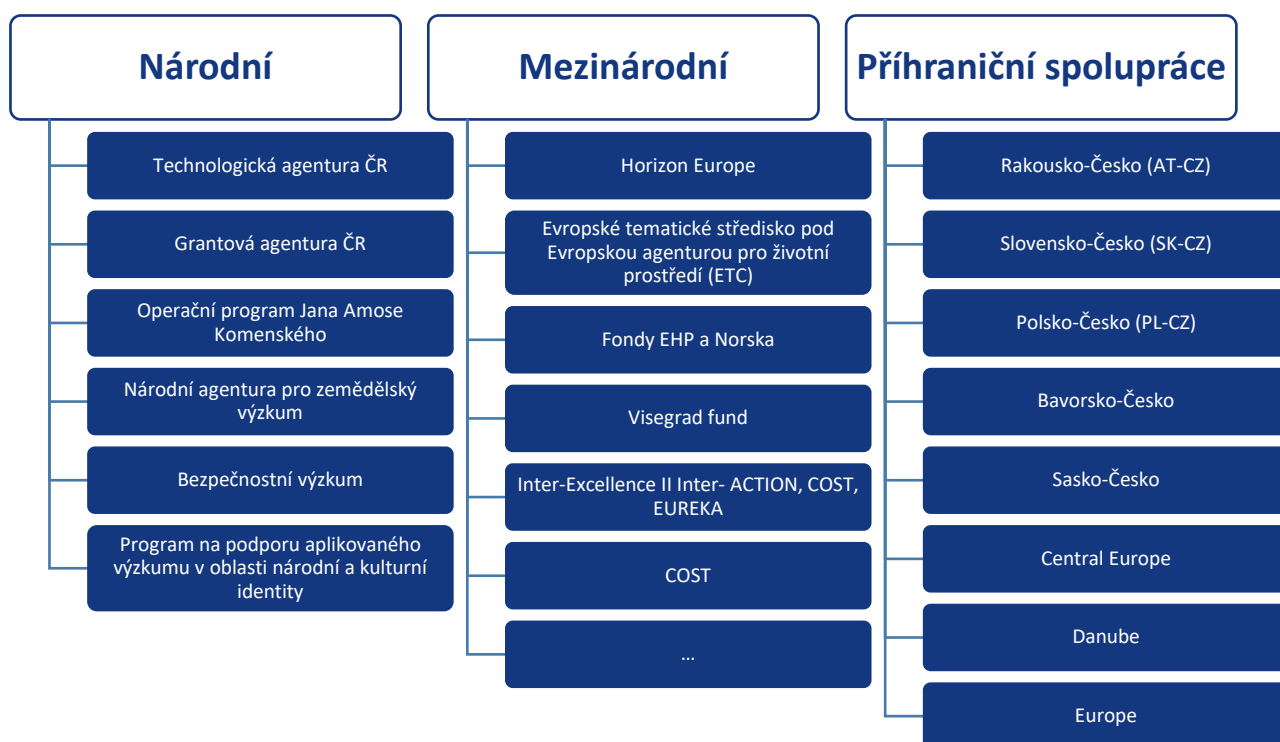
Neoddělitelnou a neopomenutelnou součástí vědeckého výzkumného prostředí jsou grantové možnosti. Pro mnoho vědců a výzkumných institucí jsou granty klíčovým zdrojem prostředků, které umožňují realizaci vědeckých projektů. Výzkum je klíčovým motorem pokroku a inovací celé společnosti. Jedním z důležitých faktorů kromě projektového nápadu je i dostupnost finančních zdrojů alokovaných na výzkum. Grantové příležitosti představují zásadní nástroj pro financování vědy, který umožňuje výzkumníkům realizovat své nápady a přispívat k rozvoji daného oboru. Finanční prostředky jsou v posledních letech v českém výzkumném prostředí poměrně limitovány. V nedávné historii byly i roky, kdy kvůli nedostatku finančních prostředků nedošlo k vypsání některých grantových výzev. Jednalo se například o Program na podporu aplikovaného výzkumu v oblasti národní a kulturní identity Ministerstva kultury.

Zapojení výzkumníků do vědeckých projektů nemá pouze finanční dopad pro daný vědecký tým a výzkumnou organizaci, ale zahrnuje i další důležité body navázané na vědecké prostředí, například získání dalších dovedností a zkušeností v oblasti vědy a výzkumu; osobní rozvoj zapojených osob; zapojení se do teamové práce nad vybraným tématem s různými výzkumnými organizacemi; získání nových kontaktů (networking); sledování nejaktuálnějších trendů v oblasti národních a evropských politik; nutná publikační činnost a mnoho dalších souvisejících činností.

Tento příspěvek obsahuje výčet možných grantových příležitostí v rámci přírodních vědních oblastí s akcentem na oblast životního prostředí.

2. Přehled grantových možností

Grantové výzvy pro podávání vědeckých projektů je možné pro přehlednost rozdělit do tří úrovní: **národní, mezinárodní a příhraniční spolupráce**. Některé programy mohou být kombinací několika těchto úrovní, jelikož jsou spolufinancovány například i z Evropské unie. Jedná se například o Operační program Jana Amose Komenského. Přehled grantových možností a jednotlivých poskytovatelů je k dispozici na Obr. 1.



Obr. 1. Přehled poskytovatelů výzkumných grantových možností.

3. Bližší specifikace jednotlivých grantových poskytovatelů a možností

V následující kapitole jsou uvedeny bližší informace o jednotlivých poskytovatelích včetně jejich nejdůležitějších grantových výzev v oblasti životního prostředí.

V rámci národní úrovně je uveden popis grantových možností u Grantové agentury České republiky (GA ČR), Technologické agentury České republiky (TA ČR) a Národní agentury pro zemědělský výzkum (NAZV) s akcentem na oblast životního prostředí. Bližší popis programů je uveden pro Prostředí pro život 2, Water4All, Partnerství pro biodiverzitu a ZEMĚ II.

3.1 Grantová agentura České republiky (GA ČR)

Agentura je organizační složkou státu a jako jediná u nás se orientuje na základní výzkum. V rámci realizovaných projektů agentura podporuje jak erudované vědce a týmy, tak i mladé začínající vědce. Cílem grantové agentury je financování vědeckých projektů základního výzkumu, vytváření vhodných a atraktivních podmínek pro vědce a podpora mezinárodní vědecké spolupráce (Grantová agentura, 2022).

Podávání projektů je obvykle realizováno v prvním čtvrtletí daného roku (obvykle únor a březen daného roku). Výjimku tvoří mezinárodní projekty, které bývají vyhlašovány i v jiných měsících dle podmínek zahraničních agentur. Projekty grantové agentury patří mezi jedny z nejprestižnějších záležitostí. Jedním z důležitých ukazatelů u klíčových osob je H - index. Podávání návrhů výzkumných projektů probíhá přes systém [GRIS](#).

V posledních letech bývají vyhlašovány tyto výzvy:

- **Standardní projekty**
Tyto projekty jsou podporovány od samého vzniku agentury tj. od roku 1993. Projekt může být realizován v horizontu 2 až 3 let. Návrhy projektů mohou být podávány ze všech oblastí základního výzkumu. Tato kategorie projektů je bez věkového omezení a témata projektu volí navrhovatel. Hodnocení podaných projektů probíhá prostřednictvím tzv. peer review (zahraniční oponenti a panelový systém agentury). Bližší specifikace je uvedena v [zadávací dokumentaci](#) k jednotlivým výzvám (Grantová agentura, 2024a).
- **Expro**
Tento program byl zahájen v roce 2019. Cílem projektů EXPRO je vytvoření podmínek pro rozvoj excelentního výzkumu a nastavení standardů excelentní vědy. Tento program má nápomoci překonat bariéry v rámci návrhů projektů ERC (granty Evropské výzkumné rady). Cílem této projektové výzvy je nabýt nutné znalosti a zkušenosti, které jsou potřebné při podávání vysoce prestižních evropských grantů. Délka řešení projektů v rámci tohoto programu je 5 let. Navrhovatel volí téma projektu a projekty je možné podávat ve všech oblastech základního výzkumu. Jednou ze stěžejních podmínek tohoto programu je po ukončení řešení projektu podání návrhu projektu do jedné z hlavních ERC výzev s hostitelskou organizací v ČR. Bližší specifikace programu je uvedena v [zadávací dokumentaci](#). (Grantová agentura, 2024a)
- **Junior star**
Cílem programu Junior star je dopomoci začínajícím vědeckým pracovníkům k samostatnosti včetně vybudování vlastní vědecké skupiny s několika spolupracovníky, potřebným vybavením a nezávislým programem. Tato grantová výzva byla poprvé vyhlášena v roce 2020 a umožňuje vědeckým osobnostem s originálním myšlením realizovat vlastní vědecké cíle v raných stádiích vědecké kariéry. Výzkumný projekt je možné řešit po maximální délku 5 let. V návrhu projektu může být uveden pouze jeden uchazeč. Navrhovatelem projektu (vedoucí řešitelského týmu) musí splňovat podmínku, že k 30. září roku vyhlášení soutěže uplynulo maximálně 8 let od udělení akademického titulu Ph.D. nebo jeho ekvivalentu. Navrhovatelem projektu může být pouze osoba působící v oblasti základního výzkumu. Další podmínkou programu je, že navrhovatel musí mít významnou mezinárodní vědeckou zkušenost. Bližší specifikace programu je uvedena v [zadávací dokumentaci](#). (Grantová agentura, 2024a)
- **PostDoc Individual Fellowship (incoming, outgoing)**
Tento program se orientuje na motivaci vynikajících vědců k příjezdu do České republiky nebo k absolvování stáže v zahraničí. Délka řešení projektu v rámci programu je 3 roky. Téma projektu si volí navrhovatel, který musí mít udělen akademický titul Ph.D. nejdéle před 4 roky (nezapočítává se rodičovská dovolená). Bližší specifikace programu je uvedena v [zadávací dokumentaci](#). (Grantová agentura, 2024a)
- **Mezinárodní a Lead Agency projekty**
Program se zaměřuje na podporu mezinárodní spolupráce v oblasti základního výzkumu. Grantová agentura spolupracuje s National Research Foundation of Korea (NRF) - Korea; NSTC (National Science and Technology Council) - Tchaj-wan (dříve MOST); São Paulo Research Foundation (FAPESP). GA ČR dále v rámci projektů Lead Agency spolupracuje s americkou agenturou National Science Foundation (NSF) a dále v rámci rozsáhlé evropské iniciativy Weave. Témata projektů jsou volena českým navrhovatelem ve spolupráci se zahraničním navrhovatelem. Délka trvání projektu v rámci programu je možná 2 až 3 roky. Bližší specifikace programu je uvedena v [zadávací dokumentaci](#). (Grantová agentura, 2024a)

3.2 Technologická agentura České republiky (TA ČR)

Jedná se o organizační složku státu, která byla zřízena na základě zákona č. 130/2002 Sb. o podpoře výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v roce 2002. Úkolem TA ČR je centralizace státní podpory v rámci aplikovaného výzkumu. Agentura se zaměřuje na podporu aplikovaného výzkumu prostřednictvím veřejných financí (Technologická agentura, 2022). Dle zákona TA ČR zabezpečuje: přípravu a realizaci programů aplikovaného výzkumu včetně programů pro potřeby státní správy a zadávání veřejných zakázek; hodnocení navrhovaných projektů; poskytnutí účelové podpory,

kontrolu plnění smluv; poradenskou činnost, spolupráci se zahraničními grantovými agenturami a mnoho dalších činností (Technologická agentura, 2024a). V brožuře (2022) je uvedeno, že TA ČR poskytuje účelovou podporu stovkám výzkumných projektů v celkové výši přesahující 5 miliard korun. Agentura se podílí na národních programech, programech mezinárodní spolupráce, resortních programech (např. Ministerstva životního prostředí, Ministerstva dopravy), ERA-NET Cofundy a Partnerství. Podávání projektů probíhá prostřednictvím systému [SISTA](#) (dříve ISTA). Na obr. 2 je přehled všech aktuálně podporovaných grantových programů TA ČR. Dále níže v textu jsou uvedeny bližší specifikace pro vybrané programy zaměřené na oblast životního prostředí.

Programy TA ČR

Národní

- Sigma DC 1 - Podpora komercializace VaVaI
- Sigma DC 2 - Začínající výzkumníci/výzkumnice
- Sigma DC 3 - Podpora inovačního potenciálu společenských věd, humanitních věd a umění (SHUV)
- Sigma DC 4 - Bilaterální spolupráce
- Sigma DC 5 - Dlouhodobé záměry s prvky SHUV
- Théta 2
- Doprava 2030
- Prostředí pro život 2
- Trend
- Prodef

• Mezinárodní

- CHist-ERA IV
- M-ERA-NET 3
- DUT partnerství
- Partnerství pro biodiverzitu
- Water4All
- CET partnerství
- Prodef

Obr. 2 Aktuální grantové programy v rámci TA ČR (Technologická agentura, 2024b).

Bližší informace k jednotlivým programům jsou na [webových stránkách poskytovatele](#).

Prostředí pro život 2 (PPŽ2)

Program podporuje aplikovaný výzkum v oblasti životního prostředí, ochrany klimatu a udržitelného rozvoje. Doba trvání programu je po dobu 10 let od 1.1.2024 do 31.12.2033. Program je připraven na základě **Aktualizované koncepce výzkumu, vývoje a inovací Ministerstva životního prostředí na léta 2016 až 2035 s výhledem do roku 2050** zpracované s ohledem na evropský kontext, stěžejní dokumenty podpory VaVaI v České republice a základní strategické dokumenty týkající se oblasti životního prostředí a udržitelného rozvoje. V oblasti účelové podpory je Program hlavním

nástrojem naplnění této koncepce. Tento program je členěn na tři podprogramy: **1. Inovace a operativní výzkum ve veřejném zájmu**, **2. Nová řešení pro ekonomiku, životní prostředí a společnost** a **3. Environmentální a klimatické výzvy v dlouhodobé perspektivě**. Podat projekt mohou tito uchazeči: podniky, organizace pro výzkum a šíření znalostí, organizační složky státu, územně samosprávné celky, další fyzické a právnické osoby. (Program Prostředí pro život 2, 2024)

Aktuálně předpokládáme, že PPŽ2 bude v roce 2025 vyhlášen v prvním čtvrtletí roku v měsících leden až březen (Technologická agentura, 2024b)

Podprogram 1: Inovace a operativní výzkum ve veřejném zájmu (PP1)

Cílem podprogramu je zjednodušit, zkvalitnit a zefektivnit veřejnou správu v oblasti životního prostředí a ochrany klimatu, vytvářet prostředí pro prosazování principů oběhového hospodářství a udržitelného rozvoje ve veřejném sektoru. Tematické okruhy pro danou výzvu budou specifikovány dle naléhavosti řešení dané problematiky. Veřejné soutěže v **PP1** budou **vyhlašovány každý rok v letech 2024-2031**. (Program Prostředí pro život 2, 2024)

Podprogram 2: Nová řešení pro ekonomiku, životní prostředí a společnost (PP2)

Zaměřuje se na nové postupy, technologie, služby a obecně nová řešení s vysokým potenciálem pro rychlé uplatnění ve společenské, ekonomické a environmentální praxi, včetně ochrany klimatu. Především v PP2 bude státní podpora provázána s dalšími podporami v rámci jiných programů a případně fondů EU k naplnění RIS3. Bude brán velký ohled na účast mladých výzkumníků v projektech, jejich potenciál k navazování mezinárodní spolupráce a dosahování excelentních aplikovaných výsledků. Soutěže v rámci **PP2** budou vyhlašovány v letech **2024, 2026, 2028 a 2030**. (Program Prostředí pro život 2, 2024)

Podprogram 3: Environmentální a klimatické výzvy v dlouhodobé perspektivě (PP3)

Orientace PP3 je na **podporu časově a znalostně náročnějších řešení** založených na dlouhodobějším sledování společenských, klimatických, environmentálních, přírodních a dalších změn a trendů. Předpokládaná délka řešení projektu je 7 let. Veřejná soutěž bude **vyhlášena v roce 2025 a 2026**. Plánovaná témata výzkumu, v němž je zásadní holistický přístup k řešené problematice, jsou následující: environmentálně a ekonomicky udržitelný rozvoj společnosti, kvalitní životní prostředí a resilience; ochrana klimatu a adaptace na jeho změny; ovzduší, voda, půda, nerostné suroviny, horninové prostředí a geologická rizika; biodiverzita a ekologická obnova, ochrana krajiny a její šetrné využívání; toky energie a hmoty, přechod na oběhové hospodářství. (Program Prostředí pro život 2, 2024)

Bližší informace k aktuálně vyhlášené výzvě jsou k dispozici na [webových stránkách poskytovatele](#).

Partnerství pro biodiverzitu (PPB)

Program je zaměřen na výzkum v oblasti Transformative Change. Jedná se o mezinárodní výzvu Evropského Partnerství pro biodiverzitu. Výzva je určena mezinárodním výzkumným konsorciím, která se řídí mezinárodními pravidly společnými pro uchazeče ze všech zapojených zemí. Výzva cílí na multidisciplinární výzkumné projekty, které budou identifikovat a analyzovat transformační procesy a pomohou tak k zastavení či zvrácení úbytku biodiverzity. Projekty budou muset mít vedle akademické kvality dopad i na společnost a policy - sféru, aby došlo právě k propojení vědy, společnosti a oblasti politiky. Výzva se zaměřuje na výzkum Transformative Change ve všech prostředích: suchozemská a mořská prostředí i sladkovodní systémy. Zaměření výzvy se liší rok od roku dle mezinárodních požadavků. V letošním roce se výzva věnuje: The worldwide crises of biodiversity loss, climate change, and pollution are highly interlinked, with an urgent need to understand trade-offs and cross-linkages both in terms of drivers and effects. In this context, BiodivTransform will aim for interdisciplinary, transdisciplinary, and/or cross-sectoral research and innovation projects to identify, analyse, and comprehend transformation processes that may halt and reverse biodiversity decline. It should generate knowledge to safeguard biodiversity and ecosystems, as well as the benefits these may provide to people, through transformative change to mitigate and reverse biodiversity threats. Projekty budou moci předkládat mezinárodní konsorcia složená minimálně ze tří způsobilých partnerů z nejméně tří zapojených zemí (z toho alespoň dvě členské nebo [přidružené země EU](#)). O projekt mohou žádat výzkumné organizace, podniky a organizační složky státu. Maximální intenzita podpory na projekt je 80 %. (Technologická agentura ČR, 2024d)

Bližší informace jsou dostupné na [webových stránkách poskytovatele](#).

Water4All

Zaměřením výzvy je **udržitelné hospodaření s vodními zdroji**. Cílem programu je zlepšení bezpečnosti vodních zdrojů v dlouhodobém horizontu. V rámci každého roku jsou upřesňována témata výzvy, která mají být v rámci podávaných projektů řešena. V roce 2024 jsou to následující: **Enhancement of water circularity in industries; Urban water circularity; Resource recovery and valorization a Economic, environmental and social implications of water reuse and recovered products**. V rámci programu Water4All jsou podporovány čtyři základní prioritní oblasti: **1. přírodní zdroje, 2. globální změny, 3. environmentální technologie a ekoinovace a 4. environmentálně příznivá společnost**. Hlavním uchazečem musí být podnik a dalším účastníkem projektu výzkumná organizace. Maximální intenzita podpory projektu pro českou stranu je 80 % z celkových způsobilých nákladů projektu.

Projekt předkládá projektové konsorcium tvořené alespoň třemi způsobilými nezávislými partnery, kteří žádají o financování alespoň ze tří zemí EU zapojených do výzvy nebo následujících asociovaných zemí [Horizon Europe associated countries](#). (Technologická agentura, 2024c)

Bližší informace k aktuální výzvě jsou k dispozici na [webových stránkách poskytovatele](#).

3.3 Národní agentura pro zemědělský výzkum (NAZV)

Agentura zajišťuje od roku 1994 národní dotace v rámci projektů výzkumu a vývoje prostřednictvím **úcelových prostředků Ministerstva zemědělství**. Hlavní činností organizace je zajišťování kompletní přípravy a vyhlášení resortních programů výzkumu Ministerstva zemědělství, vyhlášení a průběh veřejných soutěží. Navazující činností agentury je následná administrace financovaných projektů. U projektů v realizaci NAZV dále zajišťuje hodnocení periodických a závěrečných zpráv. Programy v rámci NAZV se **zaměřují na oblast zemědělství, potravinářství, lesnictví a vodohospodářství**. Aktuálně jsou v rámci agentury podporovány projekty v rámci **Programu Země** (Program aplikovaného výzkumu ministerstva zemědělství na období **2017 – 2025 Země** a Program na podporu aplikovaného výzkumu ministerstva zemědělství na období **2024 – 2032, ZEMĚ II**). (Ministerstvo zemědělství, 2024)

V rámci programu se počítá s celkem šesti veřejnými soutěžemi. Předpokládané roky vyhlášení programu ZEMĚ II jsou: **2024, 2025, 2027, 2028 a 2029**. Aktuálně není k dispozici předpokládaný termín vyhlášení soutěže v roce 2025. Maximální délka řešení projektů v tomto programu je 6 roků, ale může se lišit dle jednotlivých podprogramů. (Národní agentura pro zemědělský výzkum, 2024)

Program ZEMĚ II má vymezeny tři klíčové oblasti: **Bioekonomika, Smart zemědělství, Globální změny v biosféře**. Příjemce podpory v rámci programu může být výzkumná organizace, podnik a organizační složka státu. Program ZEMĚ II je rozdělen do dvou podprogramů: **1. Podpora inovativního zemědělství a lesnictví prostřednictvím pokročilých postupů a technologií a 2. Podpora státní politiky v agrárním sektoru**. (Národní agentura pro zemědělský výzkum, 2024)

Podprogram 1: Podpora inovativního zemědělství a lesnictví prostřednictvím pokročilých postupů a technologií

Zaměření tohoto podprogramu je na výzkumné potřeby uživatelů v oblasti podnikání a služeb v agrárním sektoru. Přednostně budou vybrány návrhy projektů, u kterých budou plánované výsledky dávat předpoklad k naplnění požadavků na kvalitu dle kritérií hodnocení v oblasti společenské relevance a v oblasti přínosu poznání dle Metodiky hodnocení výzkumných organizací z roku 2017. Výsledky řešených projektů budou hodnoceny podle přínosů pro uživatele a využitelnosti v praxi.

V rámci podprogramu budou realizovány **dva typy projektů**:

- i) **Projekty zaměřené na řešení komplexních a víceoborových témat spadajících do alespoň jedné ze tří klíčových** (bioekonomika, smart zemědělství, globální změny v biosféře) **oblastí dle Koncepce VaVaI MZe 2023+.**
- ii) **Strategické projekty interdisciplinární povahy zaměřené na klíčové oblasti** – rok vyhlášení 2025, veřejná soutěž bude vyhlášena na předem definovaná témata pro projekty interdisciplinární povahy.

(Národní agentura pro zemědělský výzkum, 2024)

Podprogram 2: Podpora státní politiky v agrárním sektoru

Druhý podprogram je zaměřen na výzkumné potřeby veřejného sektoru. Prioritně budou vybírány projekty, jejichž výsledky budou sloužit k výzkumné podpoře veřejného sektoru v oblasti zemědělství, potravinářství, lesního a vodního

hospodářství a ochrany zemědělského půdního fondu. Ihned po ukončení projektu je žádoucí výsledky aplikovat do praxe s okamžitým efektem zlepšení problematické situace, proto je délka řešení těchto projektů výrazně kratší (maximálně 4 roky). V rámci tohoto podprogramu bude příjemce podpory výzkumná organizace a dalším účastníkem může být jiná výzkumná organizace nebo i podnik. (Národní agentura pro zemědělský výzkum, 2024)

Bližší informace k jednotlivým výzvám jsou dispozici na [webových stránkách poskytovatele](#).

4. Závěr

Na závěr lze konstatovat, že grantové možnosti jak v národním, tak i v mezinárodním měřítku hrají zásadní roli v podpoře výzkumu a inovací napříč různými vědeckými oblastmi. Díky řadě poskytovatelů mají vědci a jejich výzkumné týmy možnost realizovat své projekty a přispívat svými poznatky k řešení globálních výzev. Úspěšnost při získávání projektů závisí nejen na originalitě projektu, ale také na pečlivosti připravené žádosti a dostatečnému porozumění podmínkám jednotlivých programů. Rozmanitost grantových programů nabízí široké spektrum možností, které mají potenciál přinést významné výsledky k novému poznání. Proces získávání grantů může být náročný a konkurenční, efektivní využití dostupných příležitostí může výrazně přispět k rozvoji české vědy a její pozici na globální scéně. Grantové výzvy nejsou jen o financování, ale také o vytváření nových příležitostí pro růst vědeckých komunit, šíření znalostí a rozvoj technologií k lepší budoucnosti.

V rámci vyhlašovaných grantových výzev se vědecké organizace setkávají s řadou omezení a limitů např. prioritní výzkumné cíle, omezené lidské zdroje v organizaci a s tím související motivace nových výzkumníků, přísnější a striktnější parametry uznatelnosti nákladů, změny podmínek v průběhu řešení projektů (např. změna výše režii).

I přes tato úskalí jsou výzkumné granty klíčovou příležitostí a možností k získání zajímavých finančních prostředků, nových kontaktů, osobního rozvoje vědců, zkušenosti práce v týmu a dalších důležitých aspektů.

Literatura

GRANTOVÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY, 2022. Pod Lupou [online]. Praha: Grantová agentura ČR [cit. 6. 9. 2024]. Dostupné z WWW: <https://gacr.cz/publikace/>.

GRANTOVÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY, 2024a. Skupiny grantových projektů [online]. Grantová agentura ČR [cit. 6.9.2024]. Dostupné z WWW: <https://gacr.cz/zakladni-informace/>.

TECHNOLOGICKÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY, 2022. Brožura TA ČR 2022 CZ [online]. Technologická agentura ČR [cit. 8. 9. 2024]. Dostupné z WWW: https://www.tacr.cz/wp-content/uploads/documents/2022/10/26/1666782551_220921_Brozura_2022.pdf.

TECHNOLOGICKÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY, 2024a. O nás [online]. Technologická agentura ČR [cit. 8.9.2024]. Dostupné z WWW: <https://www.tacr.cz/o-nas/>.

TECHNOLOGICKÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY, 2024b. Předběžný harmonogram [online]. Technologická agentura ČR [cit. 14. 9. 2024]. Dostupné z WWW: https://www.tacr.cz/wp-content/uploads/documents/2024/04/29/1714392433_harmonogram%20vs.pdf.

Prostředí pro život 2 [online]. Technologická agentura ČR [cit. 14.9.2024]. Dostupné z WWW: https://www.tacr.cz/wp-content/uploads/documents/2023/12/15/1702645067_Program%20Prost%C5%99ed%C3%AD%20pro%20%C5%BEiv%20.pdf.

TECHNOLOGICKÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY, 2024c. Základní parametry výzvy – Partnerství Water4All Call 2024 [online]. Technologická agentura ČR [cit. 14.9.2024]. Dostupné z WWW: https://www.tacr.cz/wp-content/uploads/documents/2024/09/12/1726148988_Z%C3%A1kladn%C3%AD%20parametry%20v%C3%BDzvy%20Partnerstv%C3%AD%20Water4All%20Call%202024%20_v1.pdf.

TECHNOLOGICKÁ AGENTURA ČESKÉ REPUBLIKY, 2024d. Podmínky zapojení českého uchazeče do výzvy Partnerství pro biodiverzitu Call 2024 [online]. Technologická agentura ČR [cit. 14. 9. 2024]. Dostupné z WWW: https://www.tacr.cz/wp-content/uploads/documents/2024/09/10/1725975016_Partnerstv%C3%AD%20pro%20biodiverzitu%20Call%202024_P

[odm%C3%ADnky%20zapojen%C3%AD%20%C4%8Desk%C3%A9ho%20uchaze%C4%8De%20do%20v%C3%BDzvy.pdf](#)

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2024. Národní agentura pro zemědělský výzkum (NAZV) [online]. Ministerstvo zemědělství [cit. 14.9.2024]. Dostupné z WWW: <https://mze.gov.cz/public/portal/mze/poradenstvi-a-vyzkum/vyzkum-a-vyvoj/narodni-agentura-pro-zemedelsky-vyzkum>

NÁRODNÍ AGENTURA PRO ZEMĚDĚLSKÝ VÝZKUM, 2024. Program na podporu aplikovaného výzkumu Ministerstva zemědělství na období 2024 – 2032 [online]. Ministerstvo zemědělství [cit. 14.9.2024]. Dostupné z WWW: https://mze.gov.cz/public/portal/-q331435---8M55WW0h/program-na-podporu-aplikovaneho-vyzkumu?_linka=a260159

Nebadané dôsledky: vplyv hlbínnej ťažby hnedého uhlia na dynamiku pôdneho vodného potenciálu v oblasti bane Cígeľ (okres Prievidza)

Unseen consequences: Influence of brown coal mining on soil water potential in the area of the Cígeľ mine (Prievidza county – Slovakia)

Jaroslav Vido, Paulína Nalevanková

Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001, Zvolen, vido@tuzvo.sk

Abstrakt

Za posledné desaťročia bola na Slovensku významne zdokumentovaná antropogénna narušenosť geologických štruktúr, spôsobená dobývaním nerastných surovín pre národné hospodárstvo. Medzi tieto suroviny patrí aj hnedé uhlie, ktoré sa prevažne ťaží v Hornonitrianskej uhoľnej panve v okrese Prievidza (Slovensko), a má významnú úlohu. Ťažobné aktivity v okolí mesta Handlová a obcí Koš, Cígeľ a Sebedražie, konkrétne v bani Cígeľ, vyvolali niekoľko geologických defektov. Tieto defekty, charakterizované veľkými prasklinami a miestnymi zosuvmi pôdy, narušajú hydrogeologické podmienky a výrazne ovplyvňujú stabilitu vodného režimu pôdy v lesných ekosystémoch v poškodených oblastiach. Táto štúdia skúma variabilitu a dynamiku vodného potenciálu pôdy v lokalite ovplyvnenej ťažbou (Račkov laz) v porovnaní s nepoškodenou referenčnou oblasťou (Čertove chodníky) v období rokov 2020 až 2022. Naše zistenia naznačujú, že ťažobné aktivity môžu mať výrazné dôsledky na vodný režim pôdy a následne na ekologickú stabilitu lesných ekosystémov.

Kľúčová slova: vodný potenciál pôdy, banská činnosť, antropogénne narušenie, sucho

Abstract

Over the past decades, anthropogenic disturbance of geological structures has been significantly documented in Slovakia, mainly driven by the national economy's demand for mining resources. Among these resources, brown coal, primarily mined in the Upper Nitra coal basin in the Prievidza district (Slovakia), has been essential. Mining activities around town of Handlová, and villages of Koš, Cígeľ and Sebedražie, particularly at the Cígeľ coal mine, have induced several geological defects. These defects, characterised by large cracks and local landslides, disrupt the hydrogeological conditions, significantly impacting the soil water regime stability of the forest ecosystems in these damaged areas. This study investigates the variability and dynamics of the soil water potential in a mining-affected site (Račkov laz) compared to an intact reference area (Čertove chodníky) between 2020 and 2022. Our findings suggest that mining activities could have substantial implications for the soil water regime and, consequently, the ecological stability of forest ecosystems..

Keywords: soil water potential, mining activities, anthropogenic disturbance, drought

1. Úvod

Antropogénne narušenie geologických štruktúr zaznamenávalo v minulých desaťročiach na Slovensku značný rozsah (Halmo et al. 2010). Dôvodom bola logická potreba dobývania a získavania nerastných surovín pre národné hospodárstvo. Jedným z najdôležitejších nerastných surovín bolo aj hnedé uhlie, ktoré sa v najväčšej miere dobývalo hlbinným, ale aj povrchovým spôsobom v oblasti Hornonitrianskej uhoľnej panvy v okrese Prievidza. Hlbinným spôsobom sa dobývalo hnedé uhlie najmä v okolí mesta Handlová, obce Koš, a obce Cígeľ a Sebedražie. Práve v bezprostrednej blízkosti poslednej spomenutej obce sa nachádza baňa Cígeľ, ktorej činnosť spôsobila množstvo geologických porúch, ktoré majú

charakter rozsiahlych trhlín, miestnych zosuvov a prepádov, ktoré narušujú geologické kontinuum, poškadzujú hydrogeologické pomery územia (Kučera et Novotná 2015), čo môže mať za následok zásadné dopady na vodný režim pôdy a tým aj ekologickú stabilitu lesných ekosystémov rastúcich v takto poškodenom území v prípade výskytu epizód sucha (Vido et Nalevanková. 2021). Z dôvodu potreby zistenia možných dopadov vyššie uvedených antropogénnych deštruktívnych faktorov na edifikátor miestnych ekosystémov - bukové porasty, boli v dopredu vytypovanej lokalite poškodenej poddolovaním nainštalované senzory pôdneho vodného potenciálu s dataloggerom (EMS SP3 so senzorami GB1, EMS Brno, Czech republic). Na tejto lokalite vznikla následkom ťažby v sedemdesiatych rokoch terénna depresia, priehľbeň s viacerými trhlinami v bezprostrednom okolí. Táto lokalita s miestnym názvom Račkov laz sa nachádza na území Horského komposesorátu Prievidza, pozemkového spoločenstva. Lokalizovaná je severovýchodne od obce Cígeľ. Z dôvodu potreby porovnania vodného režimu resp. režimu pôdneho vodného potenciálu na banskou činnosťou nepoškodenej lokalite, bola ako referenčná plocha vybraná lokalita s miestnym názvom Čertove chodníky, nachádzajúca sa juhovýchodne od obce Kamenec pod Vtáčnikom. Cieľom uvedeného príspevku je poukázať na variabilitu a dynamiku pôdneho vodného potenciálu na banskou činnosťou poškodenej lokalite (Račkov laz) a intaktnej referenčnej ploche (Čertove chodníky) na výsledkoch meraní v období rokov 2020, 2021 a 2022. A tým poukázať na banskú činnosť ako antropogénny disturbačný faktor potenciálne znižujúci ekologickú stabilitu lesných ekosystémov prostredníctvom zvýšenia stresového faktora sucha.

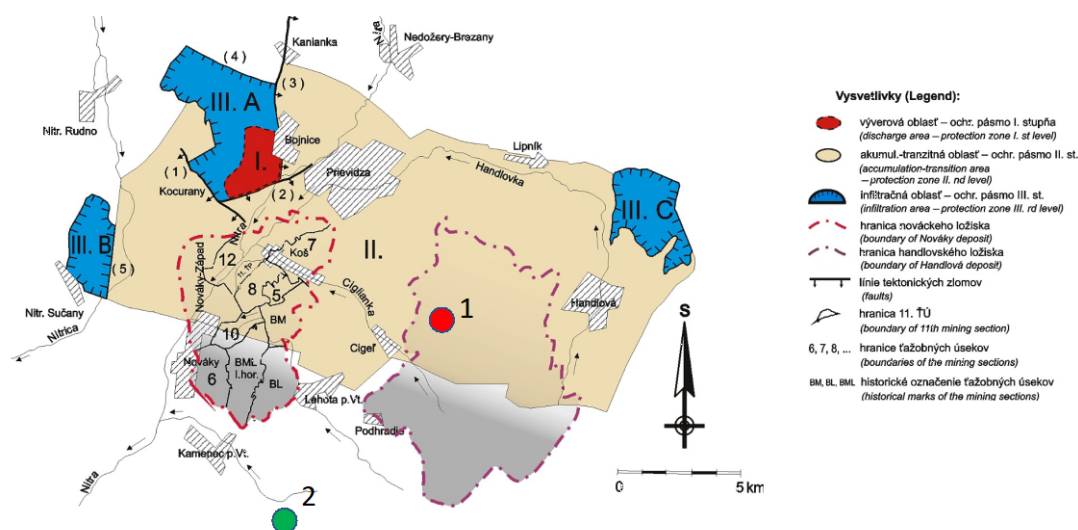
2. Metodika

Založený experiment pozostáva z kontinuálneho sledovania a zaznamenávania pôdneho vodného potenciálu v hĺbke 30 cm. V tejto hĺbke sa podľa predbežného pôdneho prieskumu identifikovala nástup hlavnej zóny prekorenenia. Za týmto účelom boli aplikované senzory pôdneho vodného potenciálu od výrobcu Delmhorst (U.S.A) s typovým označením GB 1, merajúcim potenciál do maximálneho tlaku -15 barov. Tieto boli pripojené k dataloggerom SP3 výrobcu Environmental Measuring Systems s.r.o. (Brno, Czech republic), ktorý je vybavený taktiež integrovaným senzorom pre meranie teploty prostredia. Z uvedeného dôvodu bol datalogger osadený do pôdy do hĺbky 5 cm a zabezpečoval okrem kontinuálneho záznamu hodnôt vodného potenciálu aj meranie teploty pôdneho prostredia. Zariadenie je zhotovené z odolných nekorozívnych materiálov so celkovým stupňom krytia IP 68, čo zabezpečuje jeho spoľahlivú prevádzku aj v podmienkach úplného zakopania do pôdneho prostredia. Každý datalogger je vybavený tromi senzormi GB 1, takže je zabezpečené opakovanie meraní v troch meracích bodoch. Hodnoty pôdneho potenciálu boli vyhodnotené ako priemerná hodnota údajov nameraných jednotlivými senzormi pripojenými k dataloggeru.

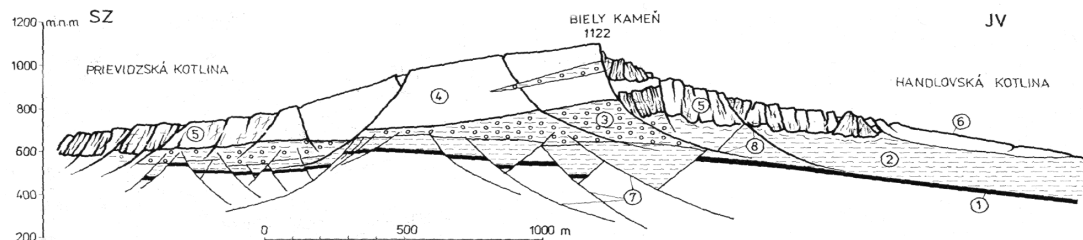
Atmosférické zrážky boli merané na voľnej ploche v lokalite rekreačného strediska Púšť - Prievidza, rovnako ako teplota vzduchu. Tieto merania boli realizované prostredníctvom automatickej meteorologickej stanice s kontinuálnym prenosom údajov prostredníctvom siete IoT (RainSet 02, Environmental Measuring Systems s.r.o., Brno, Czech republic). Všetky merané údaje o poveternostných podmienkach ako aj hodnoty pôdneho vodného potenciálu boli spracované a použité ako denné priemery s výnimkou atmosférických zrážok, ktoré boli vyhodnotené ako denné úhrny.

2.1 Charakteristika územia

Študijné plochy sú situované v severozápadnej časti orografického celku Vtáčnik v okrese Prievidza. Banskou činnosťou poškodená lokalita Račkov laz (619 m n.m.) je lokalizovaná v oblasti banských aktivít dnes už uzavretej bane Cígeľ v ťažobnej oblasti handlovského uhoľného ložiska (Obr. 1). Príčiny a dôvody hydrogeologických poškodení v tejto lokalite, možno definovať nasledovne. Geologická stavba územia (Obr. 2) znázorňuje, že na mechanicky mäkkých a plastických ílovcoch, prachovcoch a zlepencoch ležia polohy rigidných andezitov a tufov, v dôsledku čoho došlo k rozlámaniu celého pohoria Vtáčnik na systém blokových polí, ktorých pohyb bol následne akcelerovaný aj procesmi podpovrchovej ťažby Bane Cígeľ handlovského uhoľného ložiska (Halmo et al. 2010). Záujmové územie v oblasti lokality Račkov laz je tak porušené viacerými tektonickými poruchami poklesového charakteru so zložitým systémom priekopových prepádlin a hrastí.



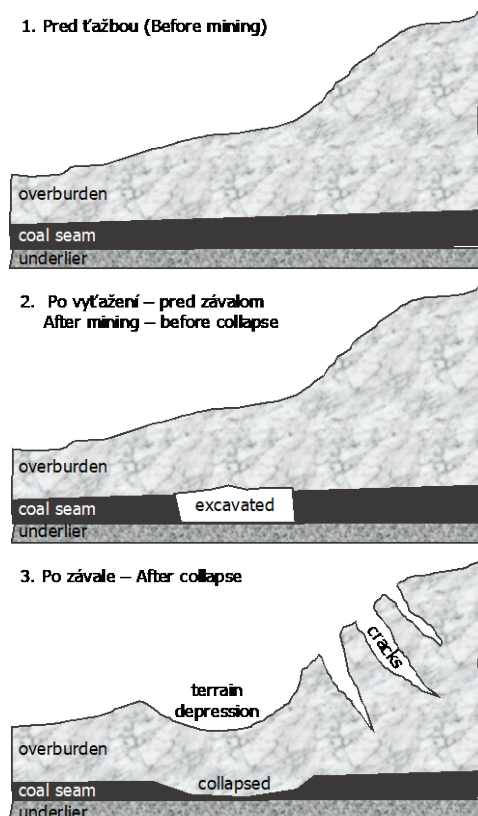
Obr. 1 Situačná mapa oblasti Nováckej a Handlovskej uhoľnej panvy (Zdroj: Halmo et al. 2010). Červeným terčíkom s číslom 1 označená lokalizácia poddolovanej výskumnej lokality Račkov laz a zeleným terčíkom s číslom 2 označená lokalizácia referenčnej výskumnej lokality Čertove chodníky.



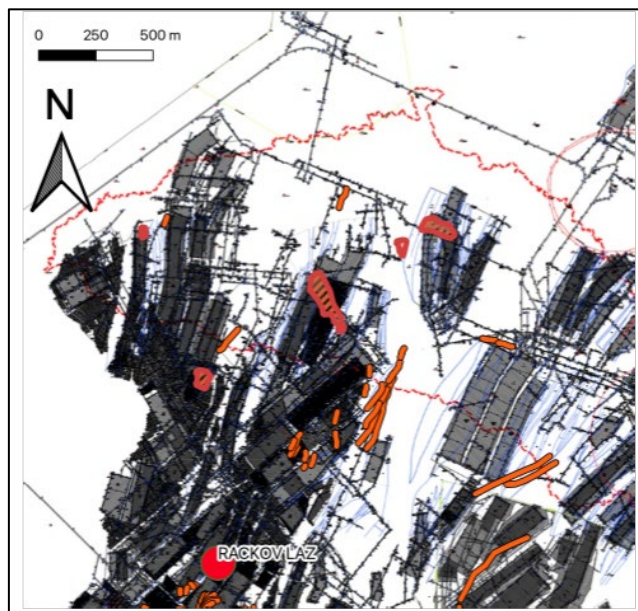
Obr. 2 Geologický rez pohorím Vtáčnik (Zdroj: Halmo et al. 2010). Vysvetlivky: (1) uhoľné sloje, (2) ilovce a prachovce Bádenského veku, (3) štrky (Sarmatského veku), (4) andezity, aglomerátové tufy (Sarmatského veku), (5) blokové rifty, blokové polia, (6) zosuvy

Antropogénne narušenie geoeosystému (krajiny) prebiehalo v oblasti lokality Račkov laz v istej postupnosti a nadväznosti. Najskôr dochádzalo k odťaženiu časti geologického podložia (odťaženie uhoľného sloja). Následne sa po zavalení zosunulo nadložie do prázdneho vytáženého priestoru a dochádzalo k posúvaniu jeho jednotlivých vrstiev, zmene jeho hustoty a narušeniu kontinuity. Vo svahu boli dôsledky ťažby podstatne výraznejšie ako na rovine (Obr. 3). Nasledovali zmeny hydrického režimu na povrchu (zmeny odtokových pomerov, riečnych sietí) a zmeny hydrického prostredia pod zemským povrchom. Územie musí byť pri ťažbe kompletne odvodnené a procesy, ktorými sa odvodnenie dosiahne, môžu byť dočasné, ale aj trvalé, a môžu tak mať širšie dôsledky na okolité ekosystémy. So zmenami a narušením geologického prostredia nadložia totiž súvisia aj možné a pravdepodobné zmeny a narušenie vodných kolektorov podzemnej vody, ktoré môžu mať dôsledky na širšom území (Kučera et Novotná. 2015).

Ukážka plošného priemetu banskej hlbínnej ťažby hnedého uhlia v okolí lokality Račkov laz do mapy zobrazujúcej zmapované rozsiahle trhliny a zosuvy na povrchu terénu je znázornené v obrázku č. 4. Tmavé polia v obrázku zobrazujú vytážené hnedouhoľné polia. Oranžové línie zobrazujú rozsiahle trhliny na povrchu terénu, plošné šrafované plochy reprezentujú zosuvy a červený terčík zobrazuje lokalizáciu výskumnej plochy Račkov laz v rámci banskou činnosťou postihnutej oblasti.



Obr. 3 Schematický rez terénom v prípade hlbínnej ťažby závalom vo svažitom teréne (ilustrácia: Vido J.).



Obr. 4 Povrchový priemet vyťažených hnedouhoľných ložísk Bane Cígeľ so zobrazením lokalizácie výskumnej plochy Račkov laz. Oranžové línie zobrazujú rozsiahle povrchové trhliny, šrafované plochy reprezentujú v zosuvy pôdy aktivované banskou činnosťou. Červený terčík je lokalita s inštalovanými meračmi pôdneho potenciálu SP3. Údaje o plošnom priemete boli získané od HBP Prievidza a.s., ostatné podkladové zdrojové údaje boli získané z ÚGKK SR a spracované prostredníctvom systému QGIS.

Na základe uvedených skutočností bola ako referenčná, banskou činnosťou nepoškodená lokalita vybratá oblasť východne od obce Kamenec pod Vtáčnikom s miestnym názvom Čertove chodníky (590 m n.m.). Táto leží vo vzdialenosti 15 km od banskou činnosťou postihnutej oblasti. Obe lokality sú z hľadiska geologického podložia resp. pôdneho prostredia identické (kambizeme na pyroxenických a amfibolicko-pyroxenických andezitoch) s rovnakou južnou resp. juho-západnou expozíciou. Obe patria do bukového lesného vegetačného stupňa a do klimatického okrsku M6 (mierne teplý, vlhký, vrchovinový) podľa Bochníček et al. (2015).

Detailný popis zistených prírodných podmienok na skúmaných lokalitách je zobrazené v tabuľke 1 a 2.

	Lokalita	Koordináty a nadmorská výška	Expozícia a sklon	Group of forest types and altitudinal stage
Poddolované územie	Račkov laz	λ – 48.723 N φ – 18.664 E 619 m n. m.	N, 12%	Fagetum typicum, 4. lesný vegetačný stupeň
Referenčná plocha	Čertove chodníky	λ – 48.664 N φ – 18.587 E 590 m n. m.	N, 15%	Fagetum pauper, 4. lesný vegetačný stupeň

Tab. 1 Prírodné podmienky na skúmaných lokalitách.

Tab. 2 Zistené pôdne podmienky na výskumných lokalitách.

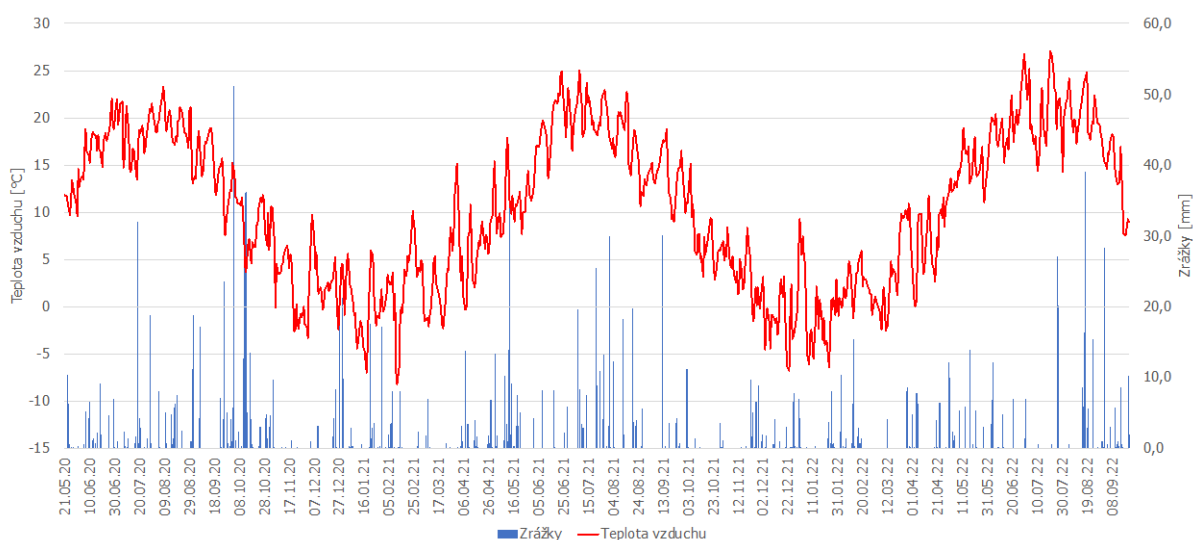
	Pôdne horizonty	Hustota prekorenenia	Pôdny skelet (>2mm)	Stanovená textúrna klasifikácia (in situ)	Textúrne triedy (%)		
					piesok	prach	íl
Račkov laz	A (0-7 cm)	high	5%	piesočnato hlinitá	23	49	28
	A/B (7.1-15 cm)	high	15%	piesočnato ílovito hlinitá	26	52	22
	B(15.1-37 cm)	absent roots	50%	piesočnato ílovito hlinitá	25	54	21
	B/C (>37.1 cm)		80%	hlinitá	-	-	-
Čertove chodníky	A (0-5 cm)	high	2%	ílovito hlinitá	13	66	21
	A/B (5.1-11cm)	high	10%	piesočnato hlinitá	11	66	23
	B1 (11.1-27cm)	sharp decrease	25%	ílovito hlinitá	13	80	7

	B2 (27.1-38 cm)	absent roots	50%	hlinitá	12	70	18
	B/C (>38.1cm)		75%	hlinitá	-	-	-

3. Výsledky a diskusia

3.1 Poveternostné podmienky v skúmanom období

Poveternostné podmienky prostredia sme sledovali kontinuálne v celom sledovanom období od 21. 5. 2020 do 22. 9. 2022. V uvedenom období bola najvyššia priemerná teplota vzduchu nameraná dňa 20.7.2022, naopak najnižšia priemerná denná teplota vzduchu bola nameraná dňa 12. 2. 2021. Priebeh poveternostných podmienok podľa meraní meteorologickej stanice RS Púšť-Prievidza (350 m n.m.) uvádzame na obrázku č. 5.



Obr. 5 Zobrazenie dynamiky priemernej dennej teploty vzduchu a denného úhrnu zrážok na stanici v lokalite RS-Púšť Prievidza v období od 21. 5. 2020 do 22. 9. 2022.

V roku 2020 boli najvyššie denné zrážkové namerané dňa 4. 10. 2020 (51,2 mm). Druhý najvyšší denný úhrn bol zaznamenaný 14. 10. 2020 (36,2 mm) a tretí najvyšší 13. 10. 2020 (36 mm). Možno konštatovať, že zrážkovo najvýdatnejšie obdobie bolo zaznamenané v roku 2020 od 10. 10. do 19. 10. s úhrnom 135,2 mm, zatiaľ čo za takmer celé vegetačné obdobie od 1. 6. do 30. 9. bol celkový úhrn 269,4 mm. Najdlhším súvislým bezzrážkovým bolo obdobie od 8. 9.–23. 9. 2020 (15 dní). Avšak veľmi suchým obdobím bolo aj obdobie od 12. 11. 2020 do 21. 12. 2020 kedy bolo toto štyridsať dňové obdobie prerušené iba tromi dňami so zrážkami od 1 do 3,2 mm. Z pohľadu teplotného bolo vegetačné obdobie roku 2020 zo všetkých sledovaných priemerne najchladnejšie. Treba poznamenať, že najchladnejšie mesiace (január a február) neboli odsledované, nakoľko došlo k inštalácii meracích zariadení až 21. 5. 2020. Priemerná denná teplota v období od 1. 6. do 30. 9. 2020 bola 17,9 °C, absolútne maximum bolo zaznamenané 7. 8. 2020 (28,7°C), absolútne minimum pripadalo na 27. 12. 2020 (–7,8°C).

Rok 2021 je charakteristický dvoma výraznými obdobiami zrážok v jarnom období (8. 5.–21. 5.) s úhrnom 96,8 mm a letnom období (21. 7.–5. 8.) s úhrnom 109,4 mm a dvoma suchými epizódami. Prvé v predjarnom období od 16. 2. do 30. 4. (79 dní s úhrnom 52,6 mm) a jesenná epizóda sucha v trvaní 70 dní (od 15. 9. do 20. 11.) s celkovým úhrnom 31,8 mm. Zrážkovo bolo obdobie od 1. 6. 2021 do 30. 9. 2021 lepšie zásobené (280,8 mm) v porovnaní s rovnakým obdobím v roku 2020 (269,4 mm), avšak je potrebné zvýrazniť horšiu časovú distribúciu v súvislosti s vyššie uvedeným jarným resp. jesenným suchým obdobím.

Z teplotného hľadiska bol rok 2021 oproti predchádzajúcemu roku teplejší, pričom priemerná denná teplota vzduchu v období od 1. 6. do 30. 9. bola 18,2 °C (+0,4° oproti roku 2020). Prejavilo sa to aj na výrazne vyššej nameranej absolútnej teplote vzduchu (35°C – 24. 6. 2021). Absolútne minimum bolo zaznamenané dňa 23. 12. 2021 (–9,6°C).

Rok 2022 bol zrážkovo v období od 1. 6. do 30. 9. najlepšie zásobený spomedzi hodnotených rokov (295,5 mm). Avšak je potrebné v tejto súvislosti poznamenať viacero skutočností. V prvom rade to bol výskyt veľmi dlhá letná epizóda sucha (55 dní) v období od 1. 6. do 25. 7. s veľmi nízkym úhrnom zrážok (44,2 mm). V druhom rade je potrebné zvýrazniť, že tento veľmi nízky úhrn zrážok sa vyskytol v období s najvyššími teplotami vzduchu (dve vlny horúčav vrcholiace priemernou dennou teplotou 26,7°C – 30. 6. a 26,8°C – 22. 7. a absolútne najvyššou nameranou teplotou na úrovni 36,5°C dňa 21.7. Evaporačné požiadavky atmosféry tak nedokázali byť saturované vyššie popísaným minimálnym úhrnom zrážok počas prakticky polovice letného obdobia. K výraznejšiemu uvoľneniu sucha došlo až od 16.8, kedy nastúpilo obdobie zrážok (trvajúce až do konca hodnoteného obdobia (30. 9.)), ktoré doplnili meteorologický deficit a posunuli hodnotenie roka 2022 z pohľadu zrážkového paradoxne na najlepšiu úroveň spomedzi hodnotených rokov. Môžeme však konštatovať, že pri komplexnom pohľade bol rok 2022 práve naopak najsuchším, ak hodnotíme kumulatívny efekt teploty vzduchu a zrážok. To sa prejavilo aj na priebehu a dynamike pôdneho vodného potenciálu čo uvedieme v ďalšej kapitole. V tabuľke 3 uvádzame sumárne hodnotenie dynamiky poveternosti v sledovaných rokoch.

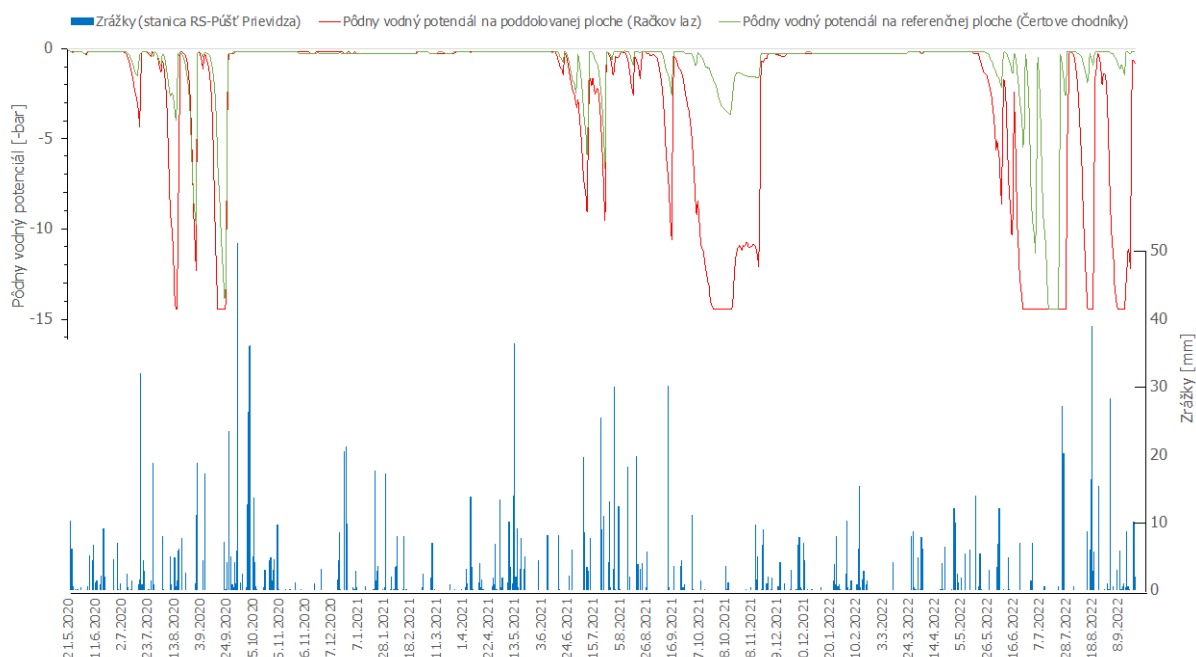
Tab. 3 Vybrané ukazovatele meteorologických podmienok v sledovaných rokoch 2020 až 2022 na základe meraní meteorologickej stanice na lokalite RS-Púšť Prievdza.

2020						
	Zrážky	dátum	[mm]	Teplota vzduchu	dátum	[°C]
úhrn		1.6-30.9.2020	269,4	absolútne min. *	27.12.2020	-7,8
max		4.10.2020	51,2	absolútne max.	7.8.2020	28,7
najdlhšie bezzrážkové obdobie		8.9.-22.9.2020	15 dni	priemerná teplota	1.6.-30.9.2020	17,9
2021						
	Zrážky	dátum	[mm]	Teplota vzduchu	dátum	[°C]
úhrn		1.6-30.9.2021	280,8	absolútne min.	23.12.2021	-9,6
max		13.5.2021	36,4	absolútne max.	24.6.2021	35
najdlhšie bezzrážkové obdobie		13.10.-28.10.2021	16 dni	priemerná teplota	1.6.-30.9.2021	18,2
2022						
	Zrážky	dátum	[mm]	Teplota vzduchu	dátum	[°C]
úhrn		1.6-30.9.2022	295,5	absolútne min.	24.1.2022	-11,7
max		18.8.2022	39	absolútne max.	21.7.2022	36,5
najdlhšie bezzrážkové obdobie		20.2.-11.3.2022	20 dni	priemerná teplota	1.6.-30.9.2021	18,4

* rok 2020 meranie až od 21.5.2020

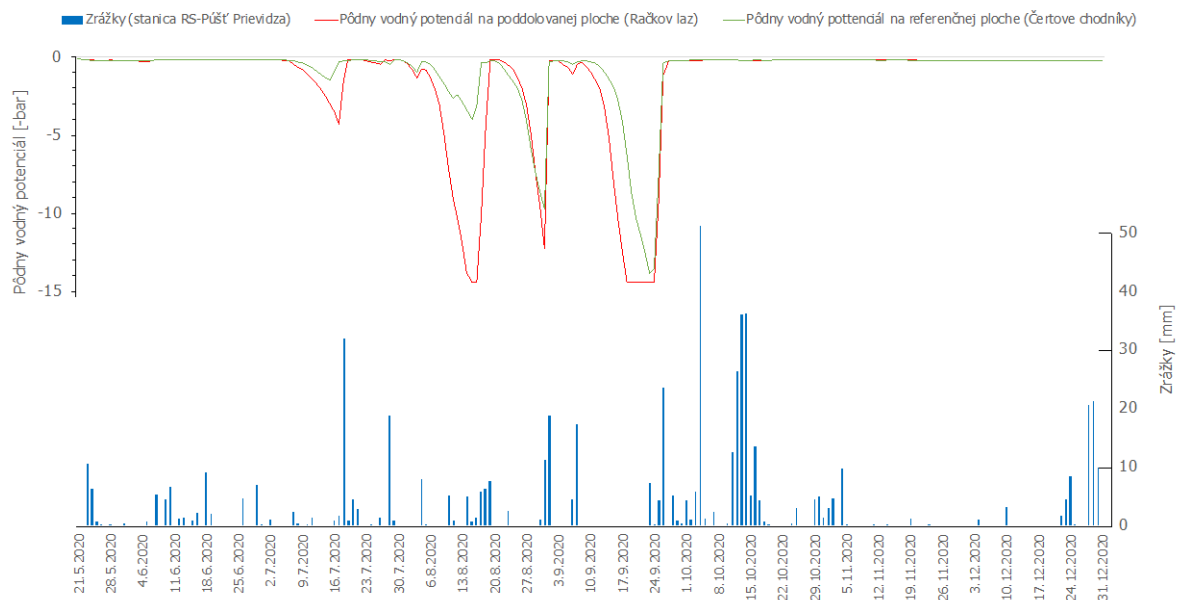
3.2 Dynamika pôdneho vodného potenciálu

Priebeh a charakter poveternostných podmienok sa v sledovaných rokoch prejavoval zásadne odlišne na lokalite poškodenej banskou činnosťou a na referenčnej lokalite. Pri celkovom pohľade na priebeh pôdneho vodného potenciálu v priebehu všetkých troch sledovaných rokov, je zrejma skutočnosť, že existujú veľmi výrazné rozdiely medzi priebehom a dynamikou vodného potenciálu medzi poškodenou (poddolovanou) a referenčnou plochou. Názorný pohľad na variabilitu priebehu vodného potenciálu poskytujú obrázok č. 6.



Obr. 6 Rozdielna dynamika pôdneho vodného potenciálu v priebehu sledovaných rokov (2020 až 2022) na poškodenej (Račkov laz) a referenčnej ploche (Čertove chodníky).

V roku 2020 bola dynamika pôdneho vodného potenciálu ovplyvnená najmä výskytom krátkodobých bezzrážkových epizód. Priebeh dynamiky vodného potenciálu v roku 2020 je detailne zobrazený na obrázku 7.

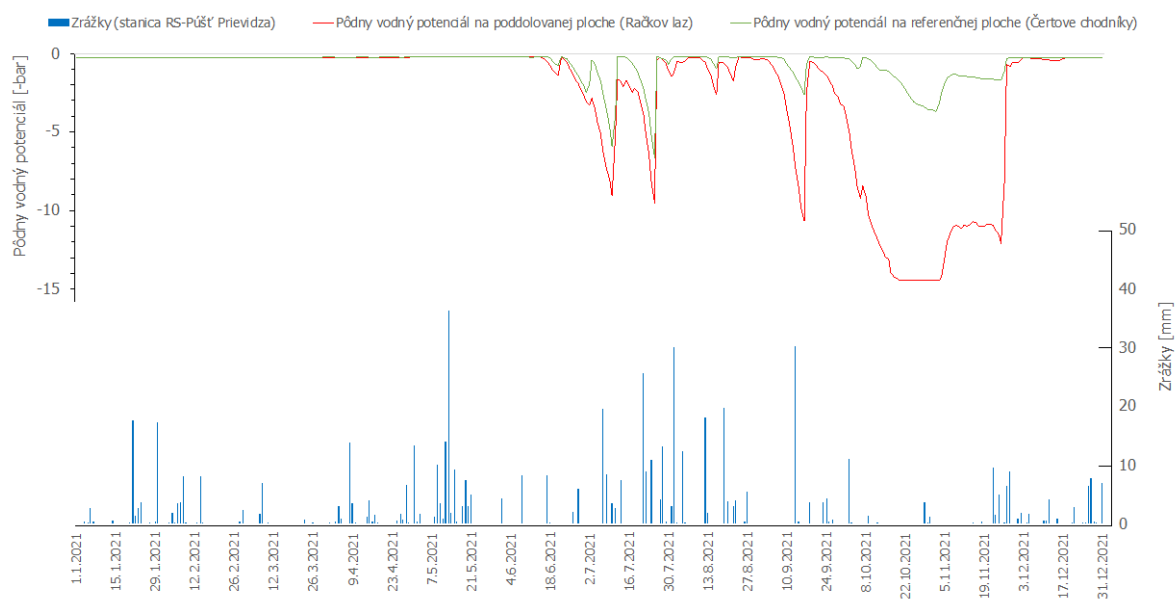


Obr. 7 Pôdny vodný potenciál v roku 2020. Z dôvodu neskoršej inštalácie začína hodnotenie roka 2020 až 21.5.

Detailnejší pohľad na obrázku 7 dokumentuje výrazne rozdielny chod vodného potenciálu na banskou činnosťou poškodenej ploche a na referenčnej ploche. Pri krátkodobých epizódach sucha ako napríklad v prvej a druhej dekáde júla 2020, došlo iba k miernemu poklesu vodného potenciálu na hodnoty -1,4 bar na referenčnej ploche (15. 7.) a -4,4 bar na poškodenej lokalite (17. 7.). Vyššia zásoba pôdnej vody resp. vyššia retenčná kapacita je dokumentovateľná aj

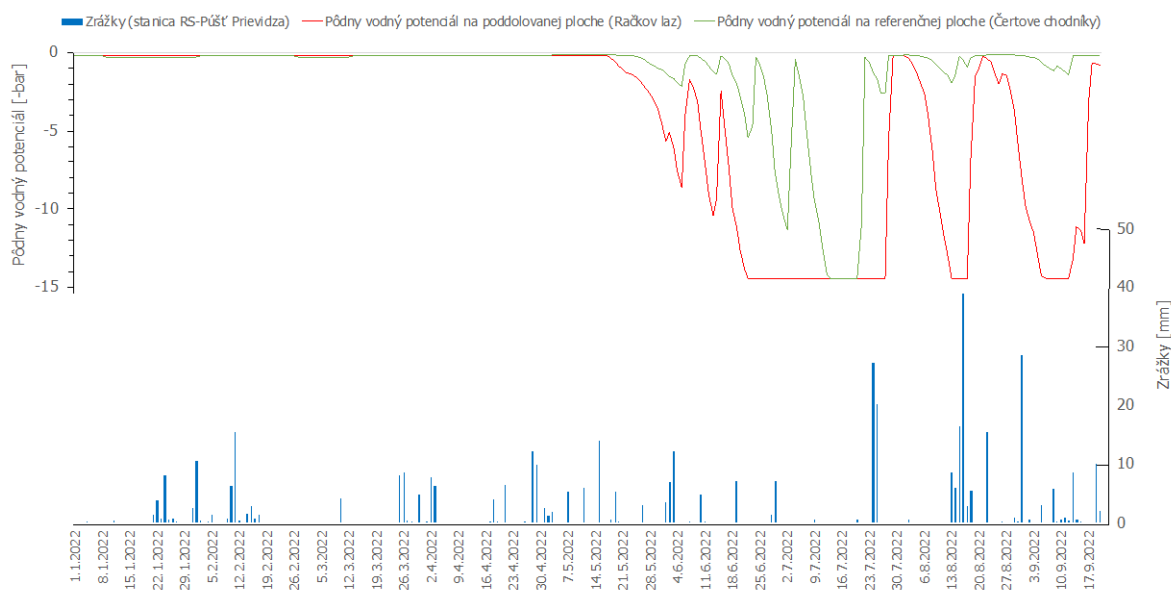
skutočnosťou, že na referenčnej ploche sa už po veľmi miernych zrážkach dňa 16. 7. (0,8 mm) a dňa 17. 7. (1,6 mm) zvýšila hodnota pôdneho potenciálu na hodnotu $-0,3$ bar, zatiaľ čo v tej dobe bola na poškodenej lokalite zaznamenaná hodnota $-4,4$ bar. Táto sa na poddolovanej lokalite dostala na hodnoty $-0,25$ bar až 20.7. po tom čo sa 18.7. vyskytli úhrny zrážok 32 mm nasledované 4,4 mm úhrnom dňa 20.7.2020. Neskôr v prvej dekáde až polovici mesiaca august sa vyskytlo niekoľkodňové obdobie bez zrážok, na ktoré reagovala referenčná plocha iba nevýrazným poklesom potenciálu na hodnoty $-3,9$ bar, zatiaľ čo v rovnakom období sa tento prepadol na poddolanom území až na minimálne merateľné hodnoty -15 bar (16. 8.). Po zrážkach, ktoré sa vyskytli od 16.8 sa začal potenciál zdvíhať na oboch plochách, no s evidentným časovým odstupom v prípade poškodenej plochy. Výrazný rozdiel nastáva od 8. 9. do 22. 9., kedy sa vyskytuje už v meteorologickom rozbere spomenutá nadlhšia epizóda sucha v tomto roku. Táto výraznejšia epizóda sucha sa prejavila rýchlym a náhlým poklesom vodného potenciálu na poškodenej ploche v priebehu 10 dní (9. 9.–19. 9.) z hodnoty $-0,25$ bar na -15 bar, zatiaľ čo referenčná plocha zaznamenala svoje najnižšie hodnoty až 23.9 na úrovni $-13,9$ bar. Pokles potenciálu tiež datujeme do 9. 9., tento však na svoje minimum klesal 14 dní (o štyri dni dlhšie oproti poškodenej ploche). Návrat do hodnôt blízko nuly nastal krátko po výdatných zrážkach od 23. 9. V tomto prípade nastal návrat do normálu v rovnakých dátumoch, nakoľko zrážkové obdobie ktoré začalo 23. 9. bolo výdatné a plne saturovalo vodný deficit, čo sa ukázalo spoločným prudkým stúpaním potenciálu na oboch plochách.

Rok 2021 bol charakteristický relatívne chladnou a zrážkovo dobre zásobenou jarou. To sa prejavilo aj na priebehu vodného potenciálu, ktorý sa držal veľmi dlho na vysokých hodnotách až do 16.6.2021. Dobré zavlaženie pôdy z prvej a druhej dekády mája v súbehu s len veľmi pozvoľna nastupujúcou jarnou fenológiou spôsobilo, že vodný potenciál začal klesať iba k hodnotám -9 bar (Račkov laz) resp. $-5,8$ bar (referenčná plocha Čertove chodníky) dňa 10. 7. resp. neskôr 25. 7. s identickými hodnotami (obr. 8). Dokazuje to skutočnosť, že pokiaľ je zrážkové zabezpečenie vyvážené z časového a kvantitatívneho hľadiska, rozdiel medzi poškodenou plochou a referenčnou je relatívne zanedbateľný. Ak však nastane dlhotrvajúci nedostatok atmosférických zrážok (od 7. 9. do 22. 11.) s relatívne slabými a občasnými zrážkovými situáciami, retenčná kapacita resp. poškodenie územia sa prejaví veľmi výrazne. A to aj s ohľadom na končiacu vegetačnú sezónu a nižšiu potrebu vody na transpiračné zabezpečenie lesných porastov. Počas vyššie spomenutého obdobia jesenného meteorologického sucha bol pokles pôdneho potenciálu na referenčnej lokalite zaznamenaný na minimálnu úroveň $-3,6$ bar dňa 2. 11. zatiaľ čo na poškodenej lokalite pôdny potenciál dosahoval takmer minimálnych hodnôt $-14,4$ bar od 21. 10. až -12 bar dňa 25. 11. 2021. Z uvedeného vyplýva, že dynamiku pôdneho vodného potenciálu na poškodenej ploche najväčšmi ovplyvňuje predchádzajúce zrážkové zabezpečenie, priebeh potenciálnej evapotranspirácie (teploty vzduchu) a distribúcia zrážok z časového hľadiska. Ak sú splnené tieto podmienky, tak sú rozdiely medzi referenčnou plochou a poškodenou takmer zanedbateľné.



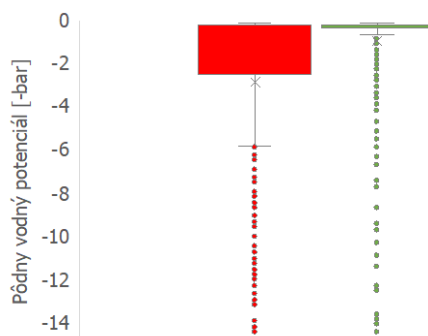
Obr. 8 Dynamika a priebeh pôdneho vodného potenciálu v roku 2021.

Dynamika vodného potenciálu v roku 2022 bola ovplyvnená najmä zrážkovo veľmi málo zásobenými mesiacmi február až júl (obrázok č. 9). V tejto časti roka spadlo dovedna počas 156 dní iba 157 mm zrážok (od 20. 2. do 25. 7.). Očakávateľný prepád vodného potenciálu pri takto nízkom úhrne zrážok však nastúpil pomerne neskoro (19. 5. – poškodená plocha, 26. 5. – referenčná plocha). Dôvodom pre tento zvláštne oneskorený nástup reakcie pôdneho potenciálu na nedostatok atmosférických zrážok je relatívne chladný priebeh mesiacov marec (priemerná teplota 3,78 °C), apríl (priemerná teplota 7°C) a máj (14,53°C). Tieto pri porovnaní s hodnotami dlhodobého normálu (1981–2010) pre meteorologickú stanicu SHMÚ v Prievidzi nižšie o 0,42°C v marci, –2,9°C v apríli a 0,47°C v mesiaci máj. Toto relatívne chladnejšie obdobie malo za následok aj neskorší nábeh plného olistenia a spomalila sa aj transpiračná potreba lesného porastu. Deficit zrážok však viedol k tomu, že pokles vodného potenciálu bol razantný a na ploche postihnutej banskou činnosťou sa až na niekoľko dní trvajúce výnimky po výskyte veľmi občasných výdatnejších zrážok na konci júla (23–24. 7., a 15. 8.) držal prakticky na minimálnych hodnotách –15 bar. Úplne najdlhším obdobím, kedy sa pôdny potenciál držal na úrovni –15 bar bola epizóda sucha od 23. 6. do 27. 7. Zaujímavou skutočnosťou je, že tento kritický priebeh pôdneho potenciálu je charakteristický iba pre banskou činnosťou poškodenú lokalitu Račkov laz. Aj na referenčnej ploche bol priebeh potenciálu dynamický a došlo aj k poklesu na minimálnu úroveň –15 bar, no toto obdobie trvalo iba od 14. 7. do 20. 7. Je teda evidentné a potvrdzuje sa tvrdenie, že pokiaľ je zrážkové zabezpečenie nepriaznivé čo do časovej distribúcie a množstva, väčšmi sa prejavuje sucho resp. nízke hodnoty vodného potenciálu na poškodenej lokalite ako na referenčnej. Všeobecné zlepšenie stavu vodného potenciálu nastalo iba ku konci sledovaného obdobia (september 2022) výhradne na referenčnej lokalite, zatiaľ čo na ploche poškodenej banskou činnosťou sa situácia nezlepšila ani v súvislosti s výdatnými zrážkami z konca augusta a začiatku septembra.



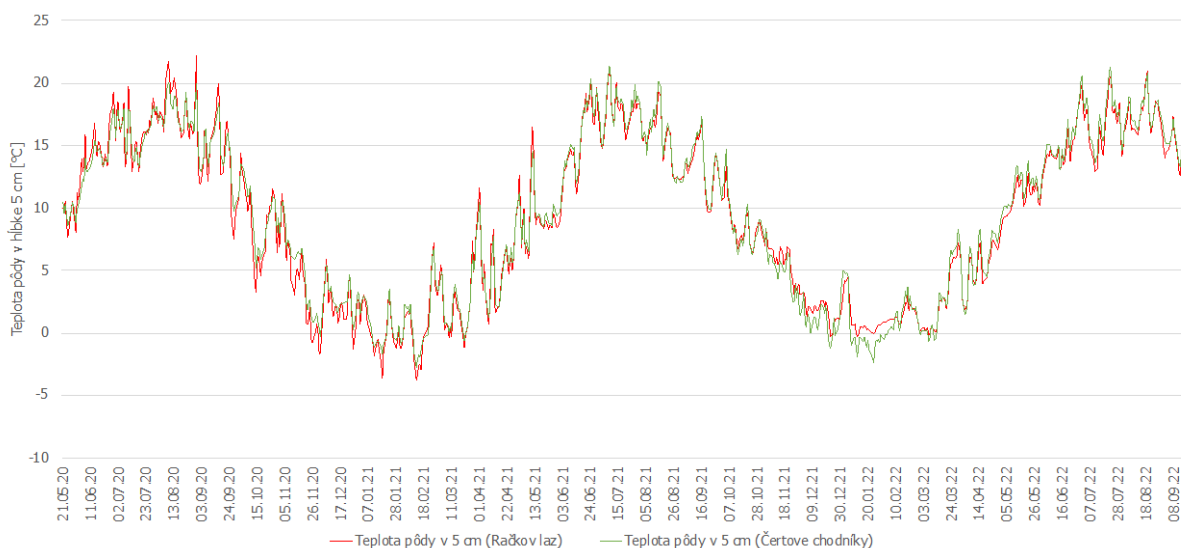
Obr. 9 Dynamika a priebeh pôdneho vodného potenciálu v roku 2022.

Charakter dynamiky pôdneho vodného potenciálu na referenčnej (Čertove chodníky) a poškodenej ploche (Račkov laz) môžeme sledovať taktiež na výrazne odlišnej variabilite (obr. 10.).

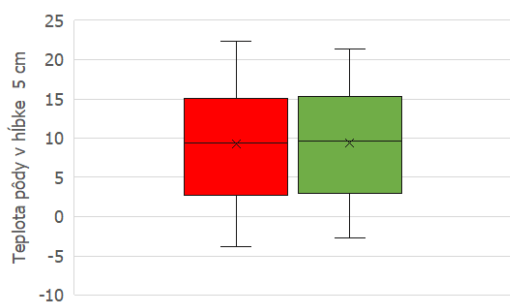


Obr. 10 Variabilita hodnôt pôdneho vodného potenciálu na poškodenej lokalite Račkov laz (červená farba) a intaktnej referenčnej ploche Čertove chodníky (zelená farba).

Z obrázku je evidentné, že dynamika vodného potenciálu na poškodenej lokalite je zreteľne vyššia, čím môžeme konštatovať, že poškodenie geologického podložia a tým aj pôdneho vodného režimu spôsobuje zosilňovanie dôsledkov sucha a vystavuje lesné ekosystémy zvýšenému stresu zo sucha. Z dôvodu potreby poukázania na rovnaký tepelný režim na oboch lokalitách si dovoľujeme na záver uviesť graf priebehu teploty pôdy v hĺbke 5 cm v období od 21. 5. 2020 do 22. 9. 2022 (Obr. 11). Z grafu je evidentné, že tepelný režim v povrchovej vrstve pôdy, ktorá je kontaktnou zónou transformácie krátkovlnného žiarenia na infračervené je na oboch lokalitách relatívne zhodná čo vylučuje zásadný vplyv rozdielnej energetickej bilancie na vodný režim v pôde. Potvrdzuje to aj obrázok 12, na ktorom nie je evidentná odlišná variabilita hodnôt teploty pôdy na oboch lokalitách, čo podporuje naše závery.



Obr. 11 Dynamika teploty pôdy v hĺbke 5 cm na lokalitách Račkov laz a Čertove chodníky v období od 21. 5. 2020 do 22. 9. 2022.



Obr. 12 Variabilita hodnôt teploty pôdy v hĺbke 5 cm na lokalitách Račkov laz (červená farba) a Čertove chodníky (zelená farba).

4. Záver

V príspevku sme potvrdili rozdielny režim pôdneho vodného potenciálu na banskou činnosťou poškodennej lokalite Račkov laz v porovnaní s intaktnou referenčnou plochou na lokalite Čertove chodníky. Z výsledkov je evidentné, že na poškodenej lokalite sa dosahujú nižšie hodnoty pôdneho vodného potenciálu, pokles má razantnejší priebeh a vodný potenciál dlhšie zotrúva na minimálnych hodnotách v prípade bezzrážkových situácií resp. v obdobiach s vyššími evaporačnými požiadavkami atmosféry. Taktiež možno konštatovať, že odolnostný potenciál ekosystémov na sledovaných lokalitách, vyjadrený v zmysle charakteristík pôdneho vodného potenciálu je slabší na poddolovanej lokalite Račkov laz ako na referenčnej lokalite Čertove chodníky. Teda aj pri relatívne menej priaznivom chode poveternosti, kedy sa kombinuje nedostatok zrážok s vysokými evaporačnými požiadavkami atmosféry, dokáže nepoškodená plocha čiastočne tlmieť s tým spojené dopady v pôdno-hydrologickom komplexe. Opak platí pri poddolovanej lokalite. Aj napriek tomu, že výsledky vychádzajú zatiaľ z troch rokov, rozdielnosť dynamiky vodného potenciálu pôdy nás vedie k záverom, že banskú činnosť na uvedenom území môžeme hodnotiť ako antropogénny disturbačný faktor znižujúci odolnosť lesných ekosystémov voči suchu. Je však potrebné vykonať ešte rozsiahlejší zber údajov o vodnom potenciáli ale aj objemovej vlhkosti pôdy, fyziologické a dendrometrické kontinuálne merania ktoré by umožnili nahliadnuť do retenčných vlastností pôd a fyziologickej manifestácie drevín na uvedených lokalitách.

PodĎakovanie

Táto práca vznikla s finančnou podporou projektov: APVV-21-0224 a projektu VEGA 1/0392/22.

Literatúra

BOCHNÍČEK, O., BORSÁNYI, P., ČEPCEKOVÁ, E., FAŠKO, P., CHMELÍK, M., JANCOVICOVÁ, L. et al., 2015. Climate atlas of Slovakia [Klimatický atlas Slovenska]. Bratislava: SHMU. 132p.

HALMO, J., ŠARKAN, J., GURSKÝ, S., TOMA, S., LALÚCH, I., BOGDAN, P., 2010. 11. ťažobný úsek Bane Nováky, nová ťažobná kapacita na Hornej Nitre. *Mineralia Slovaca*, roč. 42, č. 4, s. 133–140. ISSN 0369-2086.

KUČERA, K., NOVOTNÁ, Ž., 2015. Metodika hodnocení krajiny narušené těžbou surovin. Výstup projektu Programu aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity (NAKI) financovaného MK ČR. Identifikační kód DF11P01OVV019 „Metody a nástroje krajinářské architektury pro rozvoj území“ (2011-2015).

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*, roč. 23, s. 1696–1718.

VIDO, J., NALEVANKOVÁ, P., 2021. Impact of natural hazards on forest ecosystems and their surrounding landscape under climate change.

Hospodaření s vodou v krajině 2024

Sborník příspěvků z mezinárodní konference.

Příspěvky prošly recenzním řízením.

Recenzenti sborníku:

Prof. Ing. Ilja Vyskot, CSc.

Ing. Libor Rak, MSc.

Vydalo nakladatelství Českého hydrometeorologického ústavu, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4-Komořany
Praha 2024, 1. vydání

Publikace neprošla jazykovou úpravou, za obsah příspěvků odpovídají autoři.

ISBN 978-80-7653-075-1 (pdf)