

Hospodaření s vodou v krajině 2022

Sborník příspěvků z mezinárodní konference


Sborník příspěvků

HOSPODAŘENÍ S VODOU V KRAJINĚ

mezinárodní konference

13.–14. 9. 2022 Třeboň

Brno 2022

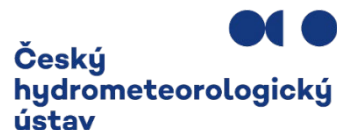

Český
hydrometeorologický
ústav

Pořádající organizace

Česká bioklimatologická společnost, z. s.



Český hydrometeorologický ústav



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



ENKI, o.p.s.



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



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

Slovenská bioklimatologická společnost



slovenská bioklimatologická spoločnosť
slovak bioclimatological society

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



Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.



Výskumný ústav rastlinnej výroby



Ústav hydrológie SAV, v. v. i.



CREA Hydro&Energy, z. s.



OBSAH

Úvodní slovo	4
Hodnocení vodního květu v nádržích pomocí dálkového průzkumu Země	5
Jakub Brom, Václav Nedbal, Petr Císař, Blanka Tesařová, Jan Kuntzman	
Srovnání modelovaných a měřených vláhových poměrů v ovocných sadech	11
Rostislav Fiala, Petr Hora, Martin Mészáros	
Analýza evapotranspirácie získanej výpočtom a bilanciou pomocou lyzimetra.....	18
Branislav Kandra, Andrej Tall, Dana Pavelková, Milan Gomboš	
Dlouhodobý pohled na vývoj teplot a srážek na Jižní Moravě	26
Jaroslav Lang, Tomáš Vymyslický	
Optimalizace množství dodané vody při kapkové závlaze jabloní s využitím snímačů půdní vlhkosti.....	30
Tomáš Litschmann	
Vliv výparu z vodní hladiny na výsledky hodnocení vodohospodářské bilance v povodí Nežárky v období sucha 2015–2019.....	48
Magdalena Nesládková, Ivo Brejcha, Petr Vyskoč, Adam Beran	
Retenční prvky a jejich vztah k prostorové distribuci zamokřených ploch v krajině	55
Patrik Netopil, Renata Pavelková, Bořivoj Šarapatka, Marek Bednář	
Změny poměru nového sněhu a sezónních srážek v horských a podhorských oblastech Česka.....	61
Jan Procházka, Pavel Lipina, Veronika Šustková, Miroslav Tesař	
Hospodaření s vodou v závlahách	75
Pavla Schwarzová, Jan Šálek, Tomáš Dostál, Martin Dočkal	
Porovnania metód merania zrážok: preklápací zrážkomer vs. lyzimeter.....	83
Andrej Tall, Branislav Kandra, Dana Pavelková, Milan Gomboš, Helena Hlavatá	
Retencia vody organickým horizontom lesnej pôdy	92
Anton Zvala, Viliam Nagy, Peter Šurda, Justína Vitková	

Úvodní slovo

Vážené dámy a vážení pánové,

jsem rád, že držíte v rukou tento sborník, který obsahuje články z již páté konference „Hospodaření s vodou v krajině“. Otázka vody se nejen pro naši republiku stává stále závaznějším problémem, protože vývoj podnebí její dostupnost stále více snižuje. Toto prosté konstatování však představuje celý soubor procesů, kde se prolínají podmínky přírodní a způsoby našeho hospodaření jako celku. Stále musíme mít na paměti, že pro území naší republiky jsou jediným zdrojem vody srážky, tedy jak dešťové, tak sněhové. Jak prokázaly mnohé analýzy, roční úhrny srážek na našem území za období 1961 až 2020 nevykazují statisticky prokazatelný trend, tedy v tomto pohledu srážky neklesají, ani nerostou, ale mají vysokou dynamiku. Toto je svým způsobem pozitivní poznání, ale v rámci oběhu vody musíme věnovat pozornost také výparu, a ten díky prokazatelně rostoucí teplotě vzduchu, ale i povrchů, roste. Tímto je dáno, že vláhová bilance naší krajiny je častěji záporná a stále častější dochází k výskytům sucha, bez ohledu o který typ jde. Tato skutečnost vede ke snaze, co nejvíce vody v naší krajině zadržet. Ovšem často jsou to návrhy, které řeší jednotlivosti bez ohledu na dostupnost vod, tedy na zákonitosti oběhu vody v krajině.

Pro udržení úrody zemědělských plodin je jistě voda nezbytná, ale musíme si uvědomit, že sucho nedokážeme potlačit. Naopak musíme jeho výskyt respektovat, podrobně studovat a hledat možnosti omezení jeho negativních dopadů. Zde je nutné věnovat pozornost závlahám. Je nutné hledat možnosti pro co nejrozsáhlejší zavlažované plochy, ale z vody, kterou pro závlahy v krajině zadržíme. Proto jsou potřebné podrobné studie odvodňování a zavlažování. Zvláště u drenážních systémů je nutné hledat cesty pro jejich další využití nebo naopak zrušení. Mimo odbornou stránku se zde významně projevují finance.

Často dochází k nerespektování zákonitostí oběhu vody v naší krajině. Musíme zohlednit potřebu vody pro celý přírodní komplex a pro udržení životní úrovně naší společnosti. Proto nelze čerpat z povrchových toků více vody než je udržení minimálního průtoku. Musíme udržet hladinu podzemní vody na úrovni, aby nebylo ohroženo zásobování obyvatel pitnou vodou. Potřebujeme budovat vodní nádrže, ale současně respektovat přírodní podmínky i zájmy občanů. Jak vidíme, hospodaření s vodou v krajině představuje složitý proces.

Věřím, že na dílčí části složitého procesu hospodaření s vodou v naší krajině najdete odpověď v tomto sborníku, v odborných pojednáních účastníků naší konference. Děkuji všem účastníkům konference za jejich přínos k poznání a zlepšení našeho hospodaření s vodou.

V Brně

Jaroslav Rožnovský jménem organizátorů

Hodnocení vodního květu v nádržích pomocí dálkového průzkumu Země

Jakub Brom¹, Václav Nedbal¹, Petr Císař², Blanka Tesařová¹, Jan Kuntzman¹

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

² Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybnářství a ochrany vod, Zátíší 728/II, 389 25, Vodňany, cisar@frov.jcu.cz

Abstrakt

Znečištění vodních nádrží fytoplanktonem v důsledku eutrofizace představuje značný problém v mnoha oblastech. Znečištění má vliv na biodiverzitu, snižuje technologickou jakost vody a zhoršuje možnosti rekreačního využití vodních nádrží. Negativní vliv zde mají především sinice, jejichž toxiny představují významné zdravotní riziko. Monitoring kvality vody v nádržích je zásadním nástrojem pro hodnocení dynamiky vývoje vodního květu v nádržích, ale představuje též zásadní nástroj pro možná opatření. Tradičně používanou metodou hodnocení stavu nádrží je odběr vzorků a následný laboratorní rozbor vody. Alternativní možností je využití dat dálkového průzkumu Země (DPZ), který umožňuje hodnotit některé ukazatele výskytu vodního květu a znečištění povrchových vod, např. koncentraci chlorofylu, fykocyaninu, nerozpuštěných látek apod. Možnosti DPZ pak rozšiřují moderní metody zpracování dat, jako např. metody umělé inteligence. Výhodou tohoto přístupu je možnost hodnocení velkého počtu nádrží v jeden okamžik, heterogenity sledovaných ukazatelů v rámci nádrže a možnost retrospektivního hodnocení s relativně vysokou přesností. Cílem příspěvku je ve stručnosti představit využití dálkového průzkumu Země pro hodnocení kvality vody ve vodních nádržích, jeho možnosti, výhody a omezení.

1. Úvod

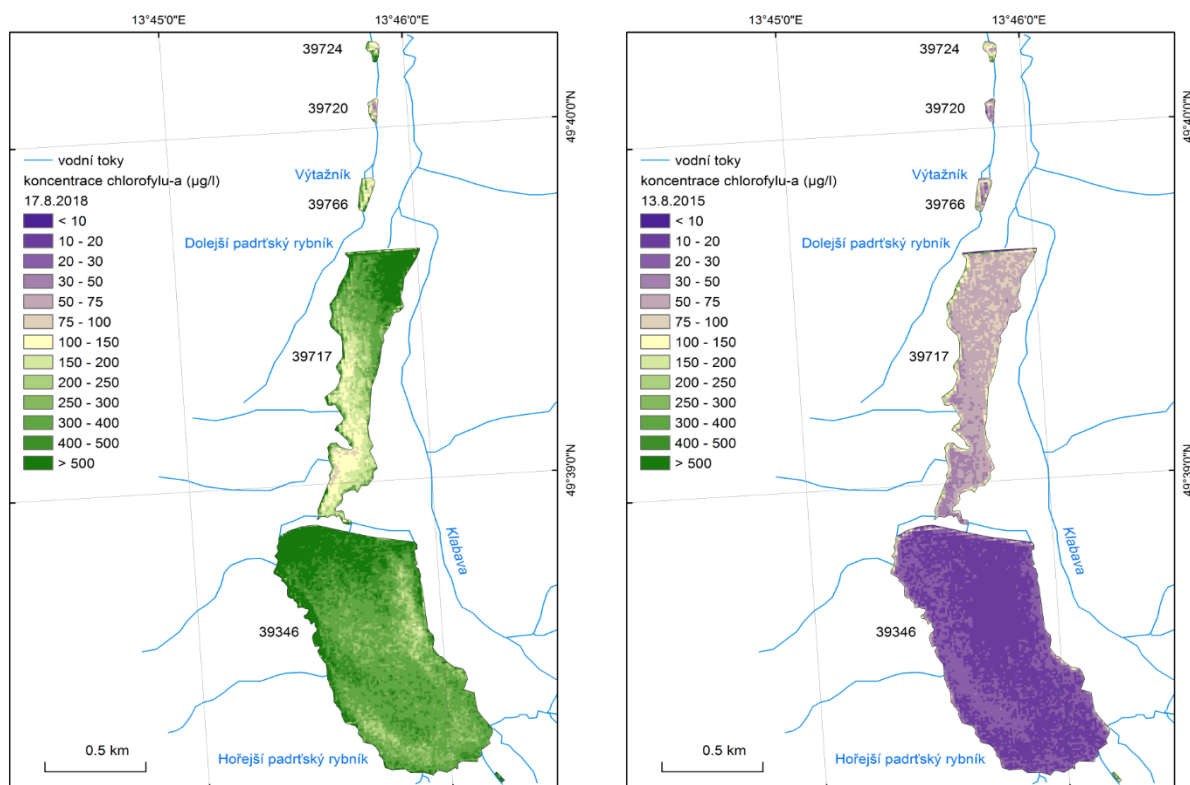
Vnitrozemské vodní nádrže, ať už se jedná o rybníky, přehradní nádrže nebo další vodní plochy trpí až na výjimky sníženou kvalitou vody, která se projevuje výskytem vodního květu. Důvodem je proces eutrofizace, který je výsledkem nadměrného zatížení vodních nádrží živinami. Eutrofizace s sebou přináší řadu, především negativních důsledků. Jmenovat můžeme hospodářské dopady s přímým ekonomickým efektem, jako je zhoršení technologických vlastností pro úpravu surové vody na pitnou nebo zhoršení hygienických vlastností vody, zejména pak při masivním výskytu toxických sinic. Neméně důležité jsou též dopady eutrofizace s nepřímým ekonomickým efektem, jako je vliv na biodiverzitu, např. v důsledku snížení průhlednosti vody (Amorim et Moura 2021), vnímání estetiky vodních ploch (Fish 1972, Bhagowati et al. 2020) apod.

Abychom pochopili dynamiku jednotlivých nádrží a jejich soustav v rámci povodí, je nutné provádět monitoring kvality vody. Tradičně je monitoring prováděn odběrem vzorků vody z nádrží s následnou standardizovanou laboratorní analýzou. Tento přístup má řadu výhod, ale též některé nevýhody. Výhodou je samozřejmě přesnost stanovení sledovaných vlastností vody a značná flexibilita možnosti odběru vzorků, na druhou stranu bodový odběr vzorku nereflktuje plošnou distribuci vlastností vody v nádrži, vždy budeme znát pouze vlastnosti vody v daném místě odběru. Navíc je limitované množství vzorků, které lze v daném čase v laboratoři zpracovat, a významnou roli hraje též finanční hledisko. Dálkový průzkum Země (DPZ) do určité míry eliminuje tento nedostatek díky své "prostorovosti". Družicový snímek zachycuje obraz zájmového území, který poskytuje informaci o jeho spektrálním projevu. Spektrální projev můžeme chápat jako "barevnost" povrchu i v těch částech elektromagnetického spektra, která jsou pro lidské oko neviditelná. Zpracováním obrazových spektrálních dat můžeme získat velmi cenné informace o površích, které snímek zachycuje, včetně vodních ploch. V případě vody lze stanovit ukazatele, které se projevují "barevně", tedy změnou vlastností elektromagnetického záření, které se od vody v nádrži odráží. Jedná se typicky o obsah fotosyntetických pigmentů (chlorofyl, fykobiliny, karotenoidy), obsah nerozpuštěných látek, případně průhlednost vody, teplotu vody a další ukazatele. Pomocí DPZ je též možné hodnotit např. plochu a stav litorálních porostů nebo výskyt makrofytní

vegetace. Nepochybně významným kladem dat DPZ je možnost jejich hodnocení zpětně, díky archivaci dat. Můžeme tak hodnotit změny téměř jakékoli dostatečně velké vodní nádrže kdekoli na Zemi až několik desítek let zpět. Dálkový průzkum Země nabízí možnosti hodnocení vodních nádrží a kvality vody, které využijí např. vodohospodáři, správci vodních nádrží, chovatelé ryb a dalších vodních organismů, orgány ochrany přírody, odborné organizace ochrany přírody, posuzovatelé a zpracovatelé odborných posudků, orgány ochrany veřejného zdraví, vědecko-výzkumná sféra, ale i pracovníci v oblasti vzdělávání.

2. Vhodné systémy pro sledování vodních nádrží

V současné době existuje celá řada satelitních systémů, které umožňují systematicky sledovat rozsáhlá území a ukazatele kvality vody. Jmenovat lze multispektrální systémy, tedy systémy s několika spektrálními pásy, jako je např. MODIS, MERIS, Landsat, Sentinel, WorldView a další. Například satelitní systémy MODIS, MERIS a Sentinel 3 jsou využívány pro sledování velkých vodních nádrží a mořských oblastí, kde umožňují hodnotit obsah chlorofylu-a (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/) a fykocyaninu (viz např. <https://www.epa.gov/water-research/cyanobacteria-assessment-network-cyan>, <https://cyanoalert.com> apod.). Jejich použití je nicméně pro území České republiky nevhodné z důvodu příliš malého prostorového rozlišení (stovky m). Vhodnějšími systémy jsou družice Sentinel 2 a družice systému Landsat. Data družic Sentinel 2 s rozlišením 10 x 10 m ve viditelné části spektra, respektive 20 x 20 m v infračervené části spektra, jsou k dispozici od roku 2014, data z družic Landsat dokonce od roku 1982 (Landsat 4 TM). Ta mají prostorové rozlišení 30 x 30 m. V případě družice Landsat je snímkaný pás široký přibližně 180 km, v případě družice Sentinel 2 dokonce 290 km. Data z družic Sentinel 2 a Landsat umožňují sledování např. obsahu chlorofylu-a, obsahu nerozpuštěných látek apod. Zásadní výhodou těchto systémů je systematické snímkování zemského povrchu. Data jsou k dispozici zpětně od doby zprovoznění daného systému a v případě jmenovaných systémů jsou k dispozici bezplatně. Ukázka prostorové distribuce odhadu koncentrace chlorofylu-a ze snímků družice Sentinel 2 je uvedena na obrázku 1.



Obr. 1. Ukázka prostorové distribuce odhadnuté koncentrace chlorofylu-a na příkladu Padrtských rybníků ve dvou různých termínech (13. 8. 2015 vlevo a 17. 8. 2018 vpravo). Snímky ukazují rozdíl nejenom mezi jednotlivými termíny, ale je zde též patrná prostorová distribuce chlorofylu-a v prostoru jednotlivých nádrží.

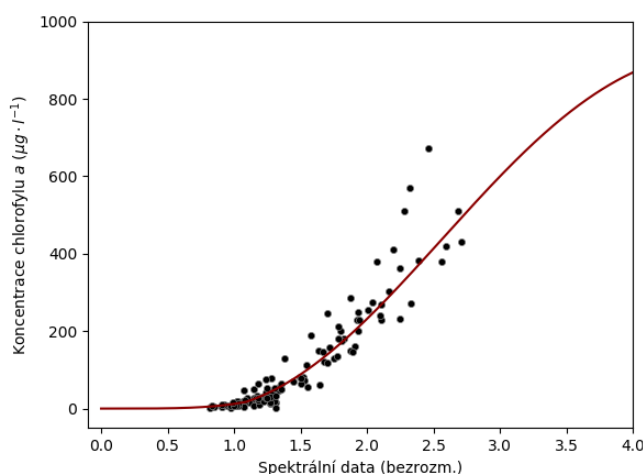
Vedle multispektrálních satelitních systémů lze pro hodnocení stavu vodních nádrží a kvality jejich vod použít též tzv. hyperspektrální systémy, které mají velmi podrobné spektrální rozlišení, tzn., že snímky obsahují velké množství spektrálních pásem. Takovým systémem může být např. satelit PRISMA (<https://www.asi.it/en/earth-science/prisma/>) nebo EnMAP (<https://www.enmap.org/>), často jsou používány též letecké hyperspektrální senzory. Hyperspektrální systémy umožňují na jednu stranu mnohem detailnější analýzu dat, na druhou stranu je zpracování dat, vzhledem k jejich objemu komplikovanější. Navíc jsou tato data poskytována pouze na objednávku a často za úplatu. Význam hyperspektrálních systémů je tedy stále spíše otázkou výzkumných aktivit a specializovaných sledování.

Zajímavou možností prostorového sledování vodních nádrží a jejich vlastností je využití leteckého snímkování a bezpilotní techniky (UAV). Výhodou těchto přístupů je relativně velká flexibilita použití a velmi vysoké prostorové rozlišení. Letecké i bezpilotní snímkování nachází uplatnění především ve specifických úlohách, jako je velmi podrobné mapování a nebo opakované snímkování v krátkých časových intervalech.

3. Příprava a zpracování prostorových dat

Použití dat DPZ pro sledování vodních nádrží má svá specifika, která vycházejí z vlastností vody a její schopnosti absorbovat elektromagnetické záření. Obecně má voda značnou schopnost absorpce záření a v oblasti infračerveného záření dokonce pohlcuje téměř všechnu energii. Chová se tedy téměř jako absolutně černé těleso. Větší schopnost odrazu elektromagnetického záření je v modré oblasti spektra, nicméně za většinu odrazu záření od vodní plochy jsou zodpovědné nerozpuštěné a barevně aktivní látky, které jsou ve vodě rozpuštěné. Aby bylo možné data DPZ použít pro odhad vlastností vody, je potřeba odstranit prostorové nepřesnosti, šумы a chyby, které ovlivňují kvalitu radiometrické informace uložené ve snímku. Korekci geometrických nepřesností provádí zpravidla poskytovatel dat, radiometrické korekce jsou následně řešeny pomocí specializovaných algoritmů. Pro družice Sentinel 2 a Landsat lze použít např. algoritmus ACOLITE (Vanhellemont et Ruddick 2018) pro vnitrozemské vody a pro mořské oblasti algoritmus C2RCC (Schiller et Doerffer 1999, Brockmann et al. 2016, Soriano-González et al. 2022).

V případě systémů MODIS a MERIS jsou např. vrstvy obsahu chlorofylu-*a* nebo fykocyaninu poskytovány už vypočtené přímo poskytovatelem dat, v případě odhadu chlorofylu-*a* ze snímků Sentinel 2 lze pro území ČR použít náš systém RemoteGuard (www.remotewaterquality.com) vyvíjený na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích, který dále zlepšujeme a rozšiřujeme.



Obr. 2. Ukázka vztahu mezi měřenými hodnotami chlorofylu-*a* a spektrální informací získanou z družice Sentinel 2. V grafu je vyznačen nelineární vztah modelovaný pomocí metody strojového učení Support Vector Regression (SVR).

V rámci přípravy dat je potřeba ještě zmínit problematiku vlivu oblačnosti, která způsobuje řadu problémů. Vliv oblačnosti lze řešit v podstatě pouze odstraněním části snímku, na kterém se oblačnost, případně stíny oblačnosti, vyskytuje. Výsledkem je ztráta dat (viz dále).

Odhad vlastností vody v nádržích pomocí dat DPZ má, vedle výběru vhodného systému a kvalitního předzpracování dat, ještě podmínku použití vhodného modelu pro odhad daného parametru a jeho kvalitní natrénování. Přístup k výpočtu sledovaných ukazatelů kvality vody může být založen na různých postupech. Tradiční přístupy vycházejí z poznání spektrometrických vlastností jednotlivých sledovaných látek a využívají pro výpočet relativně jednoduché přístupy, jako je lineární regresní analýza apod. Např. obsah chlorofylu-*a* velmi úzce koreluje s poměrem spektrální odrazivosti o vlnových délkách 709 a 665 nm. Vztah mezi koncentrací chlorofylu-*a* a spektrálním poměrem lze jednoduše popsat mocninovou transformací (Nedbal et Brom 2019). V současné době se stále více uplatňují moderní přístupy založené na metodách umělé inteligence, respektive strojového učení (např. Support Vector Machine, Random Forest, Celulární automaty, Neurální sítě apod.) nebo tzv. hlubokého učení (Deep Learning). Výhodou těchto přístupů je bezpochyby jejich nelinearita, a tedy mnohdy lepší schopnost postihnout variabilitu v datech oproti parametrickým metodám. Ukázka vztahu mezi měřeními hodnotami chlorofylu-*a* a spektrálními daty modelovaného pomocí metody strojového učení Support Vector Regression (SVR) je uvedena na obrázku 2.

Metody strojového učení do určité míry umožňují eliminovat potřebu biologických a fyzikálních znalostí daného systému. Modely hledají nejlepší shodu v použitých datech vůči tzv. trénovacím datům, aniž by zpracovatel dat znal podrobnosti o jednotlivých vztazích v datech. Použitý model tak může fungovat jako černá skříňka. Nevýhodou takového přístupu je někdy tendence zpracovatele k použití velkého množství vstupních parametrů a následně neúměrného zvýšení míry volnosti modelu. Takový model vyžaduje značné množství trénovacích dat a snadno může dojít k jeho přetrénování, což znamená, že model velmi silně koresponduje s trénovacími daty, ale lze jej velmi obtížně zobecnit na jiné situace.

Otázka trénovacích dat je pro použití odhadních modelů naprosto zásadní. Jedná se o data získaná přímou cestou, tedy například stanovením v laboratoři. Data jsou v odhadním modelu použita jako nezávislá proměnná a model, založený na použití spektrálních dat DPZ, hledá nejlepší vztah k datům. Pomocí přímo měřených dat je následně provedena validace modelu. V reálných podmínkách je získání vhodného trénovacího a validačního datasetu poměrně obtížné, protože je potřeba zároveň provádět měření spektrální odrazivosti vody, které je, vedle potřeby přístrojového vybavení, limitováno též počasím. Obecně platí, že čím komplikovanější model použijeme, tím větší množství dat pro natrénování a validaci modelu potřebujeme.

4. Omezení použití DPZ pro hodnocení povrchových vod

Použití dat dálkového průzkumu Země pro účely hodnocení kvality povrchových vod má, vedle řady výhod uvedených výše, i některé nevýhody, které komplikují a omezují jejich využití.

Jedním ze zásadních nedostatků využití metod DPZ je možnost zjišťování pouze omezeného počtu vlastností povrchových vod. DPZ umožňuje hodnotit pouze ukazatele, které mají optickou odezvu, tedy dokáží měnit vlastnosti odraženého elektromagnetického záření, zjednodušeně řečeno “barevnost”. DPZ lze tedy použít pouze pro některé aplikace, případně je potřeba další parametry změřit *in situ* nebo v laboratoři. Schopnost hodnotit některé vlastnosti povrchových vod je limitována radiometrickým rozlišením použitých přístrojů. Např. družicové systémy Sentinel 2 a Landsat nedisponují spektrálními pásy potřebnými pro stanovení obsahu sinicových pigmentů (zejm. fykocyaninu). Určitým řešením se zde jeví výpočet tzv. virtuálního pásma v oranžové části spektra (Kumar et al. 2019), nicméně tento přístup není ideální. Možnosti použití družicových systémů s potřebným spektrálním rozlišením je zde potom limitované buď omezenou dostupností dat (v případě hyperspektrálních systémů) nebo prostorovým rozlišením dat (MERIS, MODIS).

Významným omezením využití DPZ je závislost získávání dat (snímkování) na počasí. Data používaná pro hodnocení povrchových vod jsou velmi citlivá na atmosférické podmínky a zásadně limitovaná oblačností. Důvodem je neprostupnost oblačnosti pro záření odražené od povrchu, tedy neprůhlednost oblačnosti. Problém vlivu oblačnosti je významný především v humidních oblastech a může mít sezónní charakter. Např. na území České republiky je problematický výskyt oblačnosti ve vegetačním období zpravidla v období od května do konce července. Přestože je naše území systémem Sentinel 2 snímkováno zhruba dvakrát až třikrát týdně a systémem Landsat jednou týdně (v současné době jednou za osm dnů), může být pro sledované sezónní období k dispozici pouze několik málo použitelných snímků. V oblasti rovníkové Afriky je pak velmi obtížné získat použitelné snímky po většinu roku. V případě družicových systémů nebo leteckého snímkování, kde je potřeba objednávat snímkování v určitém období dopředu se omezení vlivem oblačnosti ještě umocňuje. Jedná se především o hyperspektrální družicové systémy, např. PRISMA nebo nově EnMAP. Omezení dostupnosti dat mají zásadní vliv na flexibilitu použití DPZ.

Omezením DPZ pro kvantitativní odhady kvality vody je použití výpočetních algoritmů a modelů pro předzpracování dat a pro výpočet vlastních ukazatelů. Problémem předzpracování dat je zejména odstranění vlivu atmosféry z dat. Atmosféra sama o sobě je komplexní prostředí s velkou prostorovou variabilitou, kterou musí použité modely reflektovat. V případě povrchových vod je tento požadavek ještě významnější, s ohledem na malou odrazivost vodních ploch. V současnosti používané algoritmy pro atmosférické korekce do výpočtu zahrnují celou řadu proměnných, které mohou být obtížně získatelné a znesnadňují tak přípravu dat.

Výpočet sledovaných veličin na základě spektrálních dat DPZ, a kvalitu výstupu ovlivňuje řada faktorů. Vedle spektrálního rozlišení použitého systému je významná otázka použitého odhadního modelu. V současné době existuje celá řada různých pokročilých parametrických a nelineárních metod, které umožňují využívat komplexní data, nicméně každá metoda má své limity. Zásadním limitem pro všechny metody je nicméně příprava kvalitních trénovacích dat. Bez nadsázky lze říct, že se jedná o nejnáročnější a nejnákladnější část systému odhadu vlastností povrchových vod pomocí DPZ.

Dalším okruhem otázek je komplexita systému vodní nádrže z pohledu radiometrických vlastností. Jedná se např. o projev určité sledované veličiny, který může být maskován jinou vlastností vody nebo je vlastní spektrální projev příliš komplexní, např. obsah nerozpuštěných látek, tvorba povlaků sraženin, rozpad buněk sinic a řas apod. Významnou roli mohou hrát nestandardní environmentální podmínky a další vlivy, jako je výskyt vln, odlesků, případně se do snímků promítá vliv dna nádrže v důsledku velké průhlednosti vodního sloupce.

Významnou otázkou zůstává též problematika průniku elektromagnetického záření sloupcem vody, a tedy otázka jakou část nádrže měříme a jak reprezentativní jsou data pro sledovanou nádrž. V podstatě lze předpokládat, že spektrální informace vzniká odrazem záření v eufotické vrstvě vodní nádrže a objem informace klesá s hloubkou. Z praktického hlediska můžeme hovořit o svrchní nebo hladinové vrstvě. Vlastní zobecnění získané informace na celý vertikální profil nádrže bude záviset na promíchání vody v nádrži. Lze předpokládat, že jednodušší situace bude u mělkých rybníků, komplikovanější u přehradních nádrží. Výstupy získané z dat DPZ je tudíž potřeba vždy hodnotit v kontextu vlastností dané vodní nádrže. Problematika radiometrických vlastností vody v nádržích v závislosti na environmentálních podmínkách, jejich komplexitě a dynamice je nedostatečně prozkoumaná a do budoucna bude vyžadovat další pozornost.

Poslední problém použití dat DPZ pro hodnocení kvality vody v povrchových vodách, který zmíníme, je nedůvěra uživatelů. Využití dat DPZ pro hodnocení kvality vody ve vodních nádržích je relativně nové a pro mnoho potenciálních uživatelů obtížně uchopitelné. Na jednu stranu může panovat obava z přesnosti (někdy oprávněně, viz výše), na stranu druhou pak může hrát roli malá zkušenost s hodnocením prostorových dat a použití GIS. Významná může být též malá ochota přijímat nové alternativní technologie apod.

5. Závěr

Dálkový průzkum Země představuje cenný zdroj dat, který může být do určité míry alternativou tradičních metod, ale zejména je zdrojem informací, které mohou vhodně doplnit tradičně získaná data. Zásadními výhodami DPZ je schopnost zachycení prostoru vodní nádrže, možnost hodnotit značné množství vodních nádrží v jednom čase a možnost retrospektivního hodnocení vodních nádrží. S rozvojem techniky, výpočetních metod, zejména metod umělé inteligence a automatizace, a se zlepšující se možností rychlého přístupu k datům tak DPZ nabývá na stále větším významu. Důležitou roli zde hraje též zlepšující se povědomí odborné veřejnosti o možnostech využití dat DPZ v oblasti hodnocení kvality povrchových vod, ale i v dalších oblastech praxe.

Využití dat dálkového průzkumu Země má před sebou nepochybně řadu dalších výzev, ať už je to pochopení a lepší uchopení informací o vertikální distribuci vlastností vody v nádržích, tak i vlastní technická stránka zpracování a analýzy dat. Neustále dochází ke zlepšování stávajících a vývoji nových technologií a technik výpočtu. Kombinace DPZ a metod umělé inteligence se jeví jako velmi efektivní spojení, které může přinést řadu nových informací o (nejenom) vodních nádržích. Do budoucna bude důležitá též otázka co nejrychlejší dostupnosti dat a vytvoření předpovědních modelů, které dokáží odhadnout stav vodních nádrží v řádu dnů. “Real-time” data a krátkodobé předpovědi si jistě najdou své uživatele.

Poděkování

Práce byla finančně podpořena z prostředků Technologické Agentury České Republiky projektem TA ČR Prostředí pro život SS03010277 Systém pro monitoring sinic ve vodních nádržích s využitím metod dálkového průzkumu Země a umělé inteligence.

Literatura:

- AMORIM, Cihelio Alves a Ariadne do Nascimento MOURA, 2021. Ecological impacts of freshwater algal blooms on water quality, plankton biodiversity, structure, and ecosystem functioning. *Science of The Total Environment* [online]. **758**, 143605. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:[10.1016/j.scitotenv.2020.143605](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143605)
- BHAGOWATI, Biswajit, Bishal TALUKDAR a Kamal Uddin AHAMAD, 2020. Lake Eutrophication: Causes, Concerns and Remedial Measures. In: Manish KUMAR, Daniel D. SNOW a Ryo HONDA, ed. *Emerging Issues in the Water Environment during Anthropocene* [online]. Singapore: Springer Singapore, s. 211–222 [vid. 2022-08-02]. ISBN 978-981-329-770-8. Dostupné z: doi:[10.1007/978-981-32-9771-5_12](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9771-5_12)
- BROCKMANN, Carsten, Roland DOERFFER, Marco PETERS, Kerstin STELZER, Sabine EMBACHER a Ana RUESCAS, 2016. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. In: L. OUWEHAND, ed. *Living Planet Symposium: Living Planet Symposium*. s. 54. ISBN 978-92-9221-305-3.
- FISH, GR, 1972. Aesthetics of pollution: eutrophication. *Man and his Environment; the Effects Of Pollution On Man*. 166–172.
- KUMAR, Abhishek, Deepak R. MISHRA a Nirav ILANGO, 2020. Landsat 8 Virtual Orange Band for Mapping Cyanobacterial Blooms. *Remote Sensing* [online]. **12**(5), 868. Dostupné z: doi:[10.3390/rs12050868](https://doi.org/10.3390/rs12050868)
- NEDBAL, Václav a Jakub BROM, 2019. Hodnocení znečištění povrchových vod pomocí satelitních snímků. *Vodní hospodářství*. **2019**(5), 6–8.
- SCHILLER, Helmut a Roland DOERFFER, 1999. Neural network for emulation of an inverse model operational derivation of Case II water properties from MERIS data. *International Journal of Remote Sensing* [online]. **20**(9), 1735–1746. ISSN 0143-1161, 1366-5901. Dostupné z: doi:[10.1080/014311699212443](https://doi.org/10.1080/014311699212443)
- SORIANO-GONZÁLEZ, Jesús, Esther Patricia URREGO, Xavier SÒRIA-PERPINYÀ, Eduard ANGELATS, Carles ALCARAZ, Jesús DELEGIDO, Antonio RUÍZ-VERDÚ, Carolina TENJO, Eduardo VICENTE a José MORENO, 2022. Towards the Combination of C2RCC Processors for Improving Water Quality Retrieval in Inland and Coastal Areas. *Remote Sensing* [online]. **14**(5), 1124. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:[10.3390/rs14051124](https://doi.org/10.3390/rs14051124)
- VANHELLEMONT, Quinten a Kevin RUDDICK, 2018. Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote Sensing of Environment* [online]. **216**, 586–597. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:[10.1016/j.rse.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015)

Klíčová slova: kvalita vody, dálkový průzkum Země, umělá inteligence, vodní nádrže

Srovnání modelovaných a měřených vláhových poměrů v ovocných sadech

Rostislav Fiala¹, Petr Hora¹, Martin Mészáros²

¹ Český hydrometeorologický ústav Brno, Oddělení meteorologie a klimatologie, Kroftova 43, 616 67 Brno, rostislav.fiala@chmi.cz

² Výzkumný a šlechtitelský ústav ovocnářský Holovousy s.r.o., Holovousy 129, 508 01, martin.meszaros@vsuo.cz

Abstrakt

Cílem bylo porovnání vlhkostních charakteristik modelovaných pomocí agrometeorologického modelu AVISO a měření půdní vlhkosti v ovocných sadech. Změnou v nastavení parametrů modelového porostu a půdy byl model AVISO upraven pro modelování zásoby vody v ovocných sadech. Měření v sadech je prováděno pomocí čidel VIRRIB ve třech hloubkách (10, 30 a 60 cm) přičemž pro potřeby srovnání s modelem jsou hodnoty přepočteny na průměrnou vlhkost pro profil 80 cm, což je zóna aktivního kořenění ve studovaných lokalitách. Do srovnání vstoupily hodnoty z dvou let měření (2020 a 2021) za období duben až září. Pro porovnání byl použit korelační koeficient, průměrné absolutní odchylky (MAE) a průměrné systematické odchylky bias. Data byla zobrazena pomocí liniových grafů srovnávaných veličin se srážkami a závlahou. Obecně nejvyšší korelace modelu a měření (nad 0,8) byly potvrzeny v sadech bez závlah. V datech je místy patrná rozdílná reakce čidel vlhkosti na závlahové dávky a srážky. To může být způsobeno preferenčními cestami v půdním profilu, umístěním čidel vlhkosti půdy, polohou zavlažovacího zařízení a korunami stromů. Oproti měření model reaguje na dodanou vodu vždy, což vychází z principu matematické bilance používané v modelech. Srovnávaná data mohou být zkreslena subjektivně stanovenými koeficienty pro přepočet měřené půdní vlhkosti na průměrnou zásobu vody v půdě v rozsahu využitelné vodní kapacity. Laděním modelových parametrů porostu se v určitých částech roku podařilo modelovat poklesové křivky zásoby vody v půdě odpovídající evapotranspiraci porostu.

Klíčová slova: AVISO, VIRRIB, ovocný sad, zásoba vody v půdě

1. Úvod

V současné době jsou projevy a dopady klimatických změn čím dál častěji zmiňovány a diskutovány v oblastech od vodního hospodářství, přes zemědělství a lesnictví, po dopravu a průmysl. Setkáváme se s náhlými projevy počasí i s dopady déletrvajících charakteru, mezi něž patří, zejména v posledních letech, sucho v různých podobách. S úbytkem vody v půdě a vodotečích jsme se potýkali v několika předchozích letech a v paměti tak máme například usychání vegetace i poklesy v rostlinné produkci. Určité hospodářské oblasti jsou plně či částečně závislé na závlaze, která má za cíl kontrolovaně udržovat optimální zásobu vody v půdě pro zajištění stabilních výnosů produkce. S rozvojem výpočetní techniky je žádoucí využití modelů, které jsou optimalizovány pro nasazení v rozhodovacích procesech v oblasti závlah. Zásadní otázkou není jen stanovení potřeby závlahy ze strany produkce, ale také plánování či přímo řízení odběru vody pro šetrné využívání vodních zdrojů. Pro vývoj počítačových modelů a jejich validaci je však zásadní dostupnost kvalitních dat z terénního měření.

2. Metodika

2.1 Zájmové území

Měření a modelování vláhových charakteristik probíhá ve třech porostech ovocných sadů, a to v porostu meruněk Bergarouge v obci Kobyly (okr. Břeclav), v porostu třešní Sweet Early v obci Ostroměř (okr. Jičín) a v porostu jabloní Gala Brookfield a Jonagold Red Jonaprince v obci Holovousy (okr. Jičín). V každém porostu je provozována kapková závlaha, základními režimy jsou plně zavlažovaná varianta „ETc100“ a varianta s polovinou závlahy „ETc50“. V porostech meruněk a třešní je dále běžný „provozní“ režim závlahy („P“) a v porostech jabloní kontrolní verze („K0“). Povození závlaha je provozována dle běžné ovocnářské praxe v daných provozech pěstitelů, v porostech jabloní je varianta

K0 bez závlah. V rámci výzkumného projektu je závlahových variant v porostech jabloní více, ale pro zpracování tohoto článku nejsou uvažovány.

Porosty jabloní provozuje Výzkumný a šlechtitelský ústav ovocnářský Holovousy s.r.o., sady třešní a meruněk jsou provozovány soukromými firmami.

2.2 Model AVISO

Pro výpočet vláhových charakteristik byl využit agrometeorologický model AVISO („Agrometeorologická výpočetní a informační soustava“), který je provozován na ČHMÚ Brno (Kohut, 2007). Model byl vyvinut dle anglického výpočetního modelu MORECS (Hough a Jones, 1997). Algoritmus modelu AVISO vychází z metodiky výpočtu evapotranspirace dle Penman-Monteith a prošel různými úpravami a modifikacemi pro podmínky ČR (např. Úlehla, 1982, Kohut a Vitoslavský, 1999). Standardně je model používán pro travní porost a vybrané polní kultury. Model byl v rámci projektu upraven pro využití v produkčních sadech:

- rozšíření parametrů modelu ze standardních povrchů na různé varianty ovocných sadů a závlahových režimů (parametry porostu – výška porostu, LAI, hloubka kořenové zóny),
- rozšíření o modul pro vstup závlah (načítání proměnné vstupující do modelu spolu se srážkami, avšak mimo intercepci na porostu), variantní řešení různých dávek závlah v rámci jednoho porostu,
- možnost nahrazení v čase lineárního algoritmu pro výpočet hloubky kořenů a plochy listoví přímým zadáním konstantní proměnné, případně nelineárně probíhající proměnné,
- úprava modulu výpočtu aktuálního deficitu vody v půdním profilu pro kalibraci pomocí měření vlhkosti půdy pro každou variantu porostu a zavlažovanou variantu (tzn. možnost kalibrace jednoho porostu při více variantách závlah).

Vstupními daty do modelu jsou průměrné hodnoty teploty a vlhkosti vzduchu a průměrná rychlost větru v denním kroku na účelových meteorologických stanicích v ovocných sadech. Data o srážkách a délce trvání slun. svitu jsou doplňována z nejbližších meteorologických stanic ČHMÚ v Kobyli a Holovousích. Data z účelových stanic jsou v případě poruchy stanice či chyby v měření nahrazena daty ze sítě ČHMÚ kompletně.

Pro všechny porosty je v modelu uvažována modelová hloubka půdního profilu 80 cm, pro tuto hloubku je vypočtena modelová zásoba vody v půdě „ZVVP“ v procentech využitelné vodní kapacity (0–100 %). Do zpracování tohoto článku vstupují denní hodnoty za období 1.1.2020–31.12.2021.

2.3 Měření vlhkosti půdy

Měření vlhkosti půdy je provozováno VŠUO Holovousy pomocí čidel VIRRIB na účelových stanicích firmy AMET, a to v každé variantě sadů v hloubce 10 a 30 cm a 60 cm. Průměrné denní hodnoty z jednotlivých čidel půdní vlhkosti jsou přepočteny na relativní nasycení profilu v rozsahu 0–100 % VVK a dále na průměrnou hodnotu pro profil o mocnosti 80 cm váženým průměrem. Takto jsou data z měření srovnatelná s výstupy modelu AVISO. Pro přepočet nebyly použity hydrolimity z fyzikálního rozboru vzorků půdy, ale subjektivně stanovené koeficienty pro každé čidlo zvlášť na základě zhodnocení průběhu vlhkosti z měření za období 08/2019–12/2021.

2.4 Srovnání dat

Do porovnání vstoupily denní data zásoby vody v půdě ZVVP v % VVK z modelu AVISO a přepočtená data půdní vlhkosti z čidel VIRRIB na stejnou veličinu. Výpočet korelace (cor.), průměrné absolutní chyby (MAE) a průměrné systematické chyby (bias) byly vypočteny na základě denních dat za celé období 1. 1. 2020–31. 12. 2021 a v měsíčním kroku a jednotlivé roky samostatně. Průměrné hodnoty byly uvažovány pouze z údajů za vegetačním období. Pro statistické zpracování byl použit program ProclimDB (Štěpánek, 2007).

3. Výsledky

Hodnoty vlhkosti půdy ovlivňoval průběh počasí a výskyt srážek, a to nejen z hlediska počátku aktivity vegetace a čerpání vody z půdy, ale také v potřebě nasazení závlahy, její četnosti a velikosti. Počátek vegetačního sezóny v roce 2020 byl sušší, vydatnější srážky se vyskytovaly až na přelomu dubna a května, přičemž v Kobyli až koncem května. Další období beze srážek bylo na Jičínsku koncem července a v září, v Kobyli v první polovině srpna a v polovině září. Rok 2021 byl na Jičínsku srážkově bohatší, na jižní Moravě se vyskytlo sušší období, přerušené občasnými srážkami nízkých úhrnů, prakticky od února do května a dále v červnu, počátkem září, a od října do listopadu. Závlahy probíhají v sadech třešní

a meruňk převážně v první polovině vegetační sezóny, s ohledem na časnou sklizeň ovoce, v sadech jabloní prakticky po celou vegetační sezónu do září. Z tohoto důvodu jsou data vlhkosti půdy v sadech jabloní v jednotlivých závlahových variantách více kontrastní nežli v případě třešní a meruňk.

V tabulce č. 1 jsou uvedeny výsledky statistického porovnání modelových a měřených dat. Statistické veličiny vypočtené pro jednotlivé měsíce a roky byly zprůměrovány pro vegetační období (duben–září) a to z důvodu přehlednosti. Vegetační období je vybráno z důvodu aktivity vegetace a provozu závlah.

Nejvyšší hodnoty korelačního koeficientu jsou u sadů bez závlahy (K0), případně s provozní (P) závlahou, přičemž u jabloní a třešní jsou korelace vyšší než u meruňk. Díky závlaze jsou data více rozkolísaná a model vs. měření může mít různorodý charakter, což korelaci obou sad v zavlažovaných variantách snižuje.

Naproti tomu u zavlažovaných variant jsou nižší hodnoty střední absolutní chyby MAE. Je to dáno zřejmě provozem závlah, které udržují hodnoty vlhkosti půdy na relativně stabilnější úrovni (nižšího rozsahu) proti nezavlažovaným variantám, byť jsou v denním kroku více rozkolísané. Hodnoty systematické chyby bias se převážně podobají MAE.

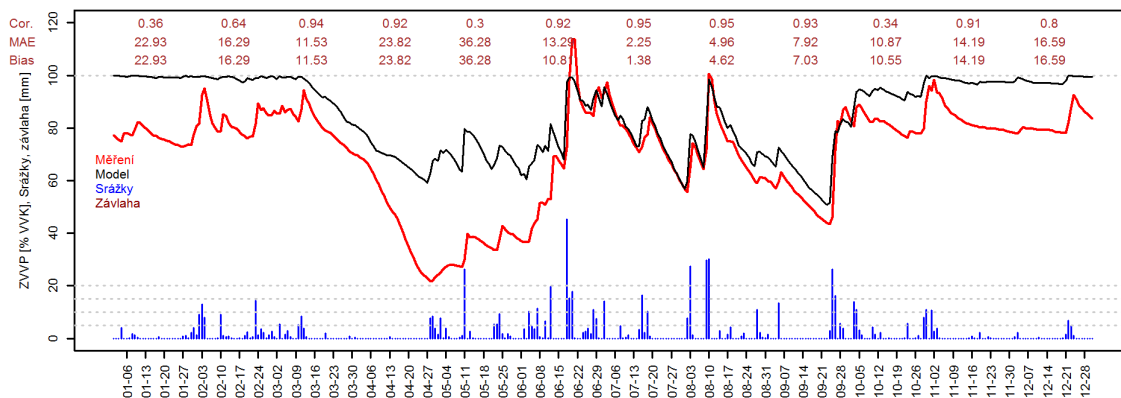
Tab. 1 Průměrné hodnoty korelace, střední absolutní a systematické chyby pro vegetační období 2020 a 2021

Sad	Závlaha	Korelace [-]	MAE [% VVK]	Bias [% VVK]
Jabloň Gala Brookfield	K0	0,80	8,83	6,62
Jabloň Gala Brookfield	ETc50	0,80	5,76	3,50
Jabloň Gala Brookfield	ETc100	0,65	7,00	2,14
Jabloň Red Jonaprince	K0	0,85	9,82	7,52
Jabloň Red Jonaprince	ETc50	0,78	8,79	5,59
Jabloň Red Jonaprince	ETc100	0,77	6,18	2,02
Meruňka	P	0,67	7,78	3,25
Meruňka	ETc50	0,66	8,71	6,17
Meruňka	ETc100	0,62	12,09	11,06
Třešeň	P	0,81	9,62	7,00
Třešeň	ETc50	0,75	6,41	3,15
Třešeň	ETc100	0,78	10,69	8,45

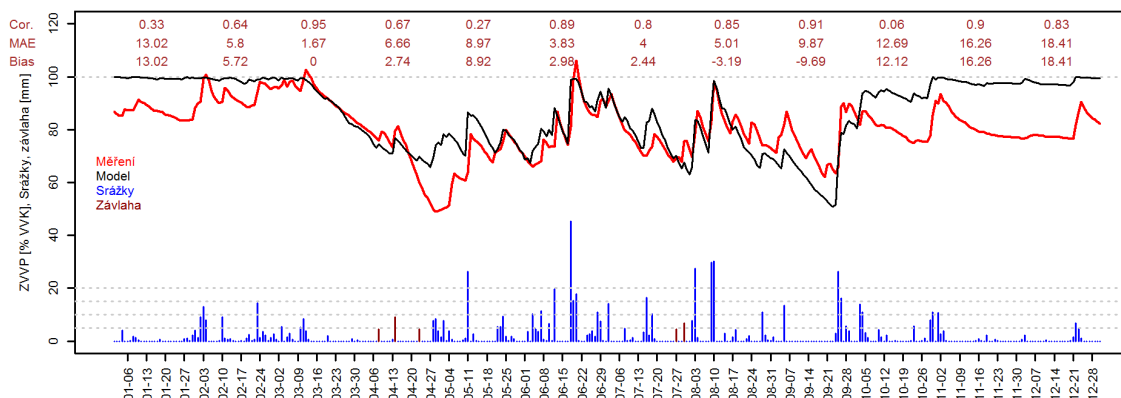
Pozn: tučně označeny tři výsledky s nejlepší shodou modelu a měření

Dále jsou uvedeny grafy průběhu porovnávaných veličin s výpisem výsledku statistik denních dat v měsíčním kroku v jednotlivých letech, vyobrazeny jsou též data o srážkách po opravě a závlaze. Grafy jsou uvedeny pro variantu K0 a P a kontrastní ETc100, řazeny po sadech, letech a variantách. Pro přehlednost jsou za jabloně vyobrazena pouze výsledky ze sadu Red Jonaprince, data i výsledky v sadu Gala Brookfield jsou obdobná.

Průběh přepočtené vlhkosti a modelových hodnot se v některých situacích dobře shodují, jindy naopak výrazně liší. Příkladem dobré shody jsou data ze sadu Red Jonaprince v kontrolní variantě K0 od poloviny června 2020, víceméně do konce září (obr. 1), přičemž korelace v červenci a srpnu dosahuje k hodnotám 0,95. Koncem tohoto období se sice model a měření více rozcházejí, nicméně trend si model drží. Nízké hodnoty vlhkosti půdy počátkem vegetačního období v roce 2020 jsou dány zejména deficitem srážek (od 15. 3. do 27. 4. spadlo 3,9 mm ve 4 dnech) a dále mohou být například zvýšenou aktivitu porostu v období s počátkem kolem 6. 4. 2020 – mezi fenofázemi BBCH 54 a 56, kdy dochází k přípravě porostu na kvetení. Plné kvetení BBCH 65 nastalo 23. 4. 2020 před příchodem vydatnějších srážek. Propad vlhkosti je patrný také na datech varianty ETc100 (obr. 2) ale díky jarní závlaze jsou hodnoty vlhkosti vyšší. Intenzita poklesu vlhkosti půdy je od května 2020 již v modelu i v měřených datech obdobná v obou variantách. V roce 2021 nastala BBCH 56 až 10. 5. a na sklonu křivky vlhkosti v květnu je vyšší intenzita čerpání vody proti měsíci dubnu také patrná, a to i přes vyšší srážkové úhrny.



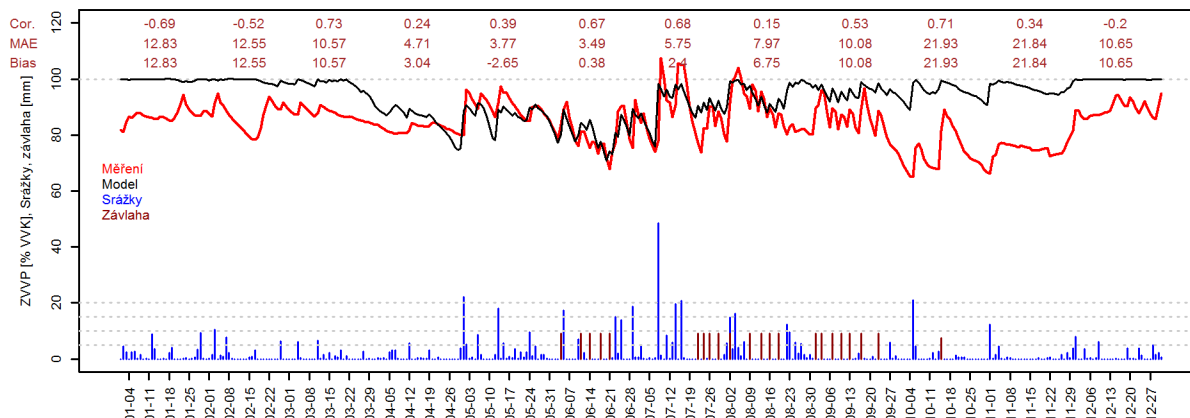
Obr. 1 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro Red Jonaprince var. K0 v roce 2020



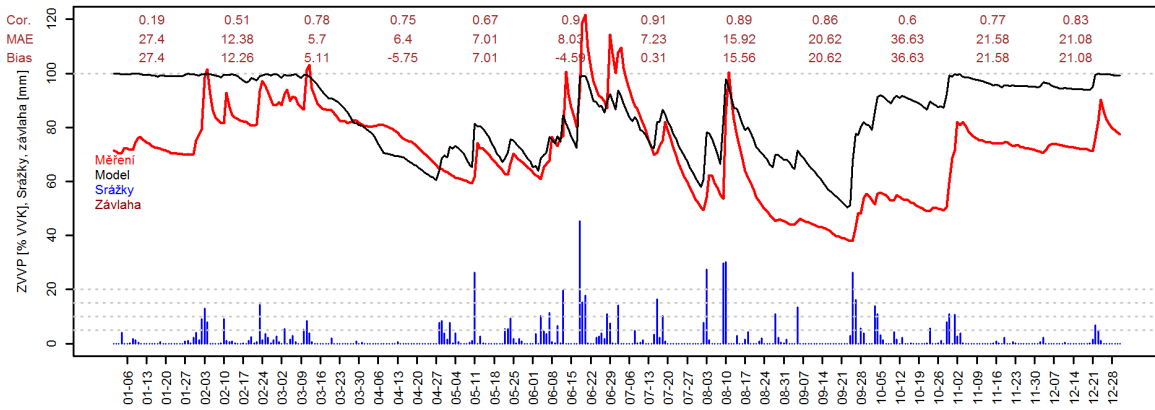
Obr. 2 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro Red Jonaprince var. ETc100 v roce 2020



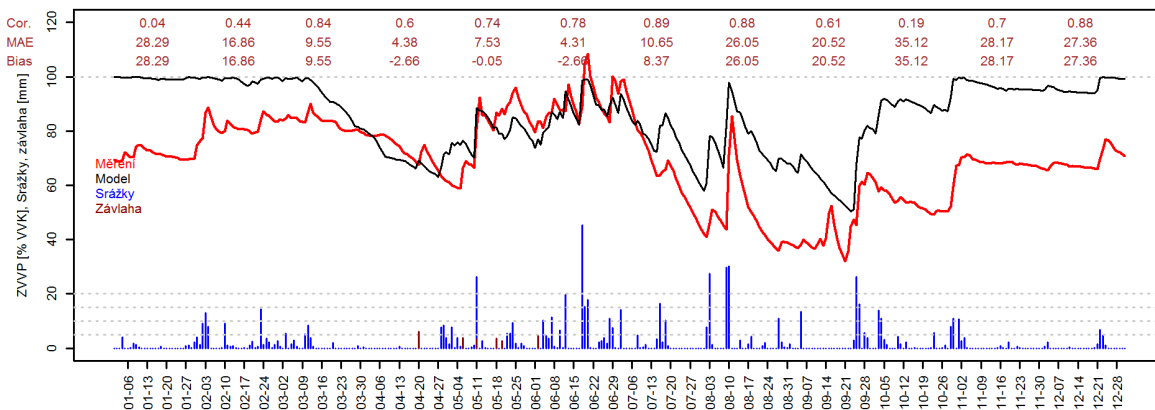
Obr. 3 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro Red Jonaprince var. K0 v roce 2021



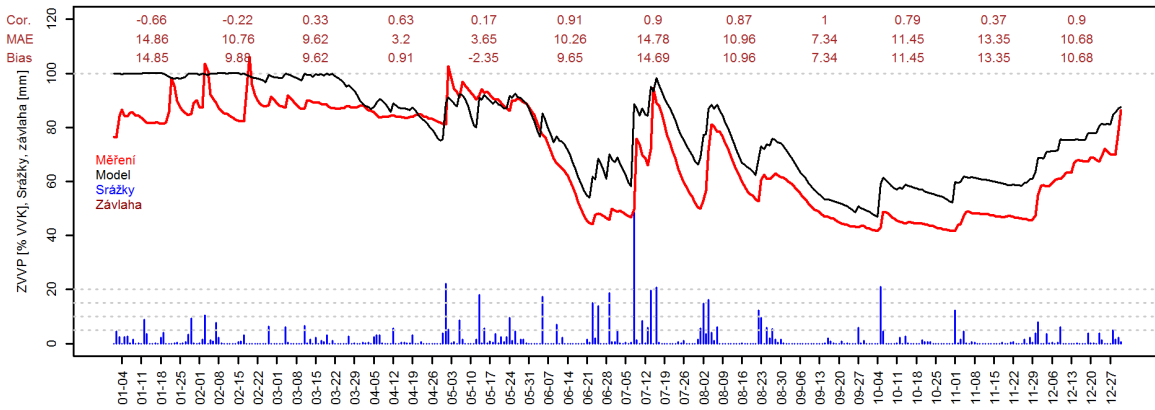
Obr. 4 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro Red Jonaprince var. ETc100 v roce 2021



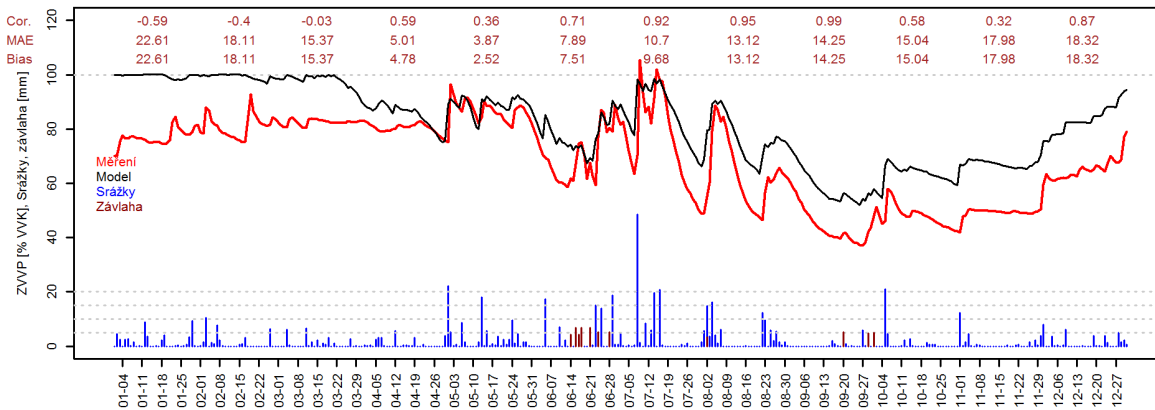
Obr. 5 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro třešeň var. P v roce 2020



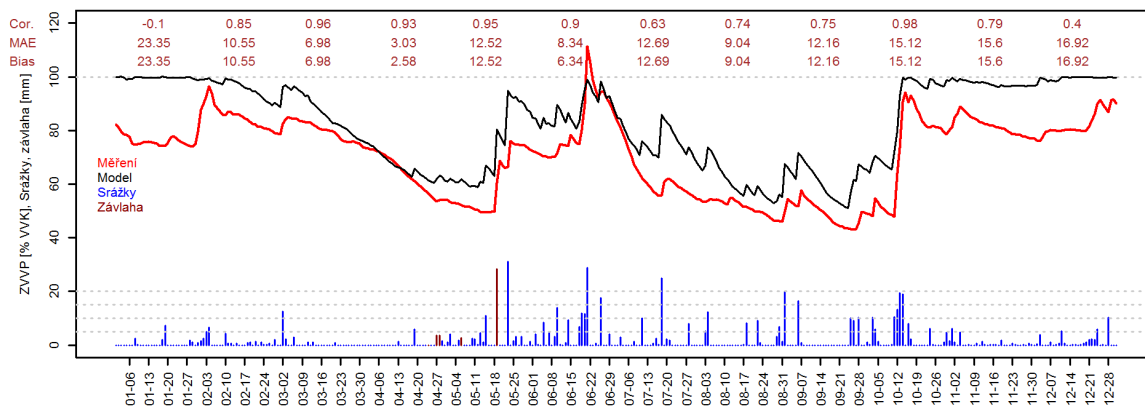
Obr. 6 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro třešeň var. ETc100 v roce 2020



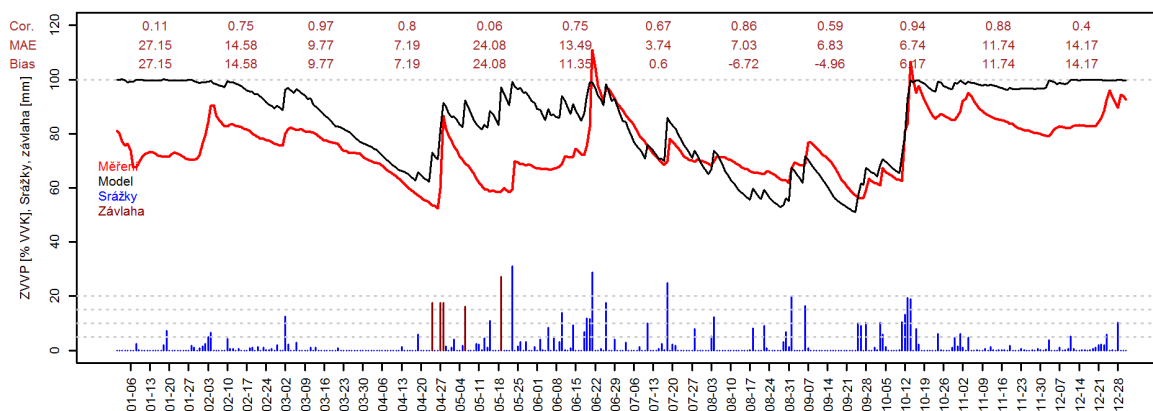
Obr. 7 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro třešeň var. P v roce 2021



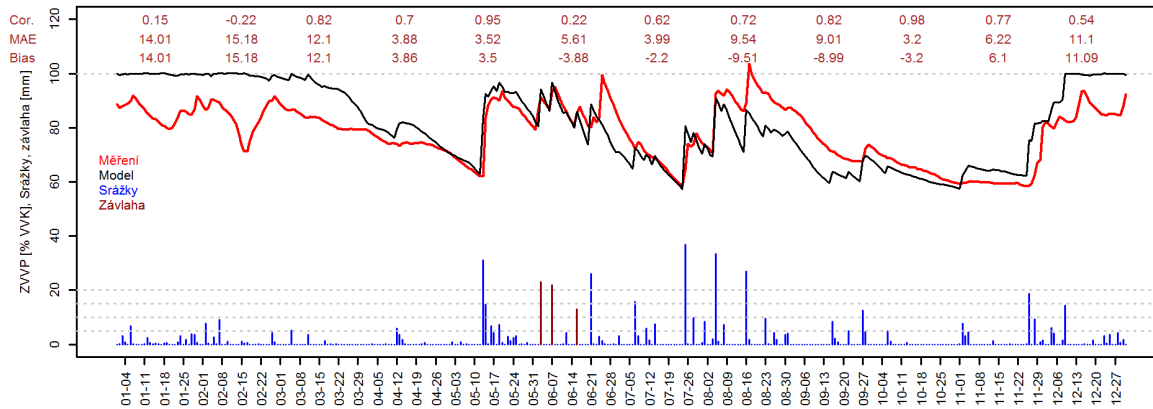
Obr. 8 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro třešeň var. ETc100 v roce 2021



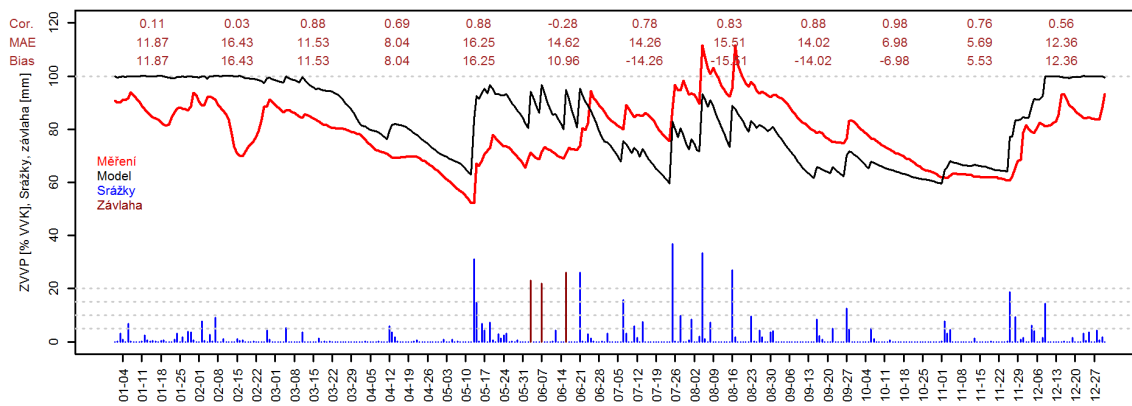
Obr. 9 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro meruňku var. P v roce 2020



Obr. 10 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro meruňku var. ETc100 v roce 2020



Obr. 11 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro meruňku var. P v roce 2021



Obr. 12 Srovnávané veličiny, srážky a závlahy pro meruňku var. ETc100 v roce 2021

Ostatní sady již takovou shodu jako v případě jabloní nemají, ale podobnost modelu s měřením je patrná v poklesových křivkách v třešních v červnu a červenci r. 2020 (obr. 5 a 6) a například v květnu, srpnu a září roku 2021 (obr. 7). V některých dnech panuje výrazný rozdíl v reakci měření na srážky. Je možné, že tento jev souvisí s umístěním čidel vlhkosti a také s hustotou porostu ovlivňující intercepci srážek nad přístroji.

V případě meruňek se model a měření v roce 2020 shodují spíše v trendech, v roce 2021 je shoda u průběhu křivek u provozní varianty (obr. 11) lepší, a to zejména v květnu, červenci a srpnu. Reakce křivky ZVVP na srážky je u měření v meruňkovém sadu nižší než v jiných porostech, reakce na srážky do 5 mm je v mnoha případech sporadická. Může to být způsobeno více faktory, například vlastnostmi půdy – zadržením srážek v horní vrstvě profilu či umístěním přístrojové techniky.

4. Závěr

Předložené výsledky srovnání průběhu modelované a měřené zásoby vody v půdě v experimentálních lokalitách dokazují, že se v rámci výzkumného projektu relativně podařilo vyladit parametry porostů ovocných sadů v modelu pro výpočet evapotranspirace, resp. čerpání vody z půdy ovocnými dřevinami. Výzvou do budoucna zůstává vyladění algoritmů pro stanovení čerpání vody v jarním období v návaznosti na fenologické fáze a fyziologii porostu. Ladění modelu probíhalo pomocí srovnání s měřenou vlhkostí. Nedostatkem je ale používání nekalibrovaných dat měření vlhkosti půdy a krátké datové řady. Zřejmě díky tomu se v datech vyskytuje nehomogenita způsobena například sedáním půdního profilu či preferenčními cestami a změnou v reakci křivek vlhkosti na srážky a závlahy. Samostatnou problematikou je přepočítání závlahových dávek z $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ na ekvivalent srážek v mm, se kterými pracuje model AVISO. I přes popsání slabá místa jsou výsledky modelu v některých porostech uspokojivé. Výhodou je možnost kalibrace modelu hodnotami z měření v průběhu sezony, což například v jedno či dvouměsíčním kroku využitelnost modelu zvyšuje.

Poděkování:

Tato práce byla podpořena Ministerstvem zemědělství – projektem QK1910165 Moderní postupy v závlahovém režimu ovocných dřevin v podmínkách vodního deficitu.

Literatura:

- HOUGH, M. N., JONES, R. J. A., 1997. The United Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS version 2.0 - an overview. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. European Geosciences Union, 1(2): 227–239. ISSN 1812-2116
- KOHUT, M., 2007. Vláhová bilance zemědělské krajiny. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Brno. 122 s.
- ŠTĚPÁNEK, P., 2007. ProClimDB – software for processing climatological datasets. CHMI, Regional office Brno [online]. Brno. Dostupné z: www.climahom.eu/ProcData.html
- KOHUT, M., VITOSLAVSKÝ, J., 1999. Agrometeorologická výpočetní a informační soustava - možnosti jejího využití. *Agrometeorologické prognózy a modely*. Velké Bílovice, 1999, 53–61 s.
- ÚLEHLA, J., 1982. Závlahové režimy a počasí. *Metodika ÚVTIZ, Hrušovany u Brna 1982*, 41 s.

Analýza evapotranspirácie získanej výpočtom a bilanciou pomocou lyzimetra.

Branislav Kandra, Andrej Tall, Dana Pavelková, Milan Gomboš

Ústav hydrologie Slovenskej akadémie vied, v.v.i, Oddelenie hydrologie podpovrchových vôd, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava, kandra@uh.savba.sk

Abstrakt

Hodnoty evapotranspirácie možno získať buď meraním alebo výpočtom. Výpočet aktuálnej evapotranspirácie môže byť uskutočnený cez numerické simulácie na matematických modeloch. Spoľahlivosť takýchto modelov musí byť verifikovaná pomocou meraných údajov. Za týmto účelom bola použitá lyzimetrická stanica v lokalite Petrovce nad Laborcom.

Príspevok je zameraný na analýzu evapotranspirácie v podmienkach Východoslovenskej nížiny. Pomocou lyzimetra boli merané úhrny aktuálnej evapotranspirácie pre obdobie 27. 5. 2017 až 21. 10. 2017.

V lyzimetri boli udržiavané optimálne vlhkosťné podmienky pre dosiahnutie maximálneho možného výparu. To umožnilo verifikovať a vzájomne porovnať dva modely referenčnej evapotranspirácie.

Lineárnou regresiou bola preukázaná vysoká zhoda medzi meranými a vypočítanými hodnotami evapotranspirácie ($R^2 = 0,93$; $SE = 0,05$). V prípade referenčnej evapotranspirácie sa ako vhodnejšia ukázala novšia metodika výpočtu vo vzťahu k meranej aktuálnej evapotranspirácii ($R^2 = 0,94$, $SE = 0,05$), kde bol sumárny rozdiel iba 9 mm (2%) oproti staršej metodike s rozdielom 42 mm (9%).

Výsledky verifikácie ukázali, že tak ako novšia aj staršia metodika výpočtu referenčnej evapotranspirácie v modeli HYDRUS-1D sú vhodné pre použitie v podmienkach simulujúcich existujúci pôdny profil v skúmanom lyzimetri.

1. Úvod

Pri bilancovaní vody v pôde je podstatnou zložkou na strane odtoku evapotranspirácia. Na evapotranspirácii sa podieľajú dva čiastkové procesy. Prvým z nich je transpirácia, ktorá sa uskutočňuje cez priechody rastlín a je dôležitým produkčným faktorom. Druhým je evaporácia, t.j. výpar z voľnej plochy. Veľkosť evapotranspirácie závisí predovšetkým od meteorologických podmienok a vlhkosti pôdy. Vlhkosť pôdy ovplyvňuje to, či je dostatok vody na výpar a či bude dosiahnutý jeho potenciál. Ak tomu tak nie je, vzniká evapotranspiračný deficit. Veľkosť evapotranspirácie možno získať buď priamo meraním alebo výpočtom.

Jedným zo spôsobov merania výparu je meranie pomocou vodnej bilancie na lyzimetri. Lyzimeter umožňuje kvantifikovať toky na hornom a dolnom okraji bilancovanej zóny pôdy. Spolu s meraním presnej hmotnosti pôdy je možné bilančne vyjadriť veľkosť evapotranspirácie. Lyzimetrický výskum sa v súčasnosti vo svete aj u nás opäť dostáva do pozornosti odbornej verejnosti (Matušek et al. 2017). V poslednom období bolo na Slovensku vybudovaných niekoľko moderných lyzimetrických staníc. Jednou z nich je aj stanica nachádzajúca sa v Petrovciach nad Laborcom, ktorá bola zdrojom údajov spracovaných v tomto príspevku.

Výpočtové metódy sú založené na numerickej simulácii vodného režimu pôd pomocou matematických modelov. Matematické modely umožňujú vypočítať jednotlivé zložky vodnej bilancie a teda aj veľkosť evapotranspirácie cez odber vody koreňmi rastlín a povrchový tok. V prípade, že je model verifikovaný korektnými meraniami predstavuje lacný a rýchly nástroj pre získanie potrebných údajov.

Predložený príspevok je zameraný na verifikáciu použitého modelu HYDRUS-1D pomocou lyzimetra. Analyzované boli hodinové úhrny aktuálnej evapotranspirácie vypočítané modelom s meranými hodnotami na lyzimetri za 148 dňové obdobie (27. 05. 2017 až 21. 10. 2017). Verifikácia modelu bola vykonaná metódami matematickej štatistiky. Vlhkosťné

podmienky v lyzimetri boli udržiavané tak aby bol dosiahnutý evapotranspiračný potenciál. To zároveň umožnilo overiť vhodnosť použitia dvoch metodík výpočtu referenčnej evapotranspirácie vo vzťahu k meranej a modelovanej aktuálnej evapotranspirácii..

2. Metodika

2.1 Charakteristika záujmovej lokality

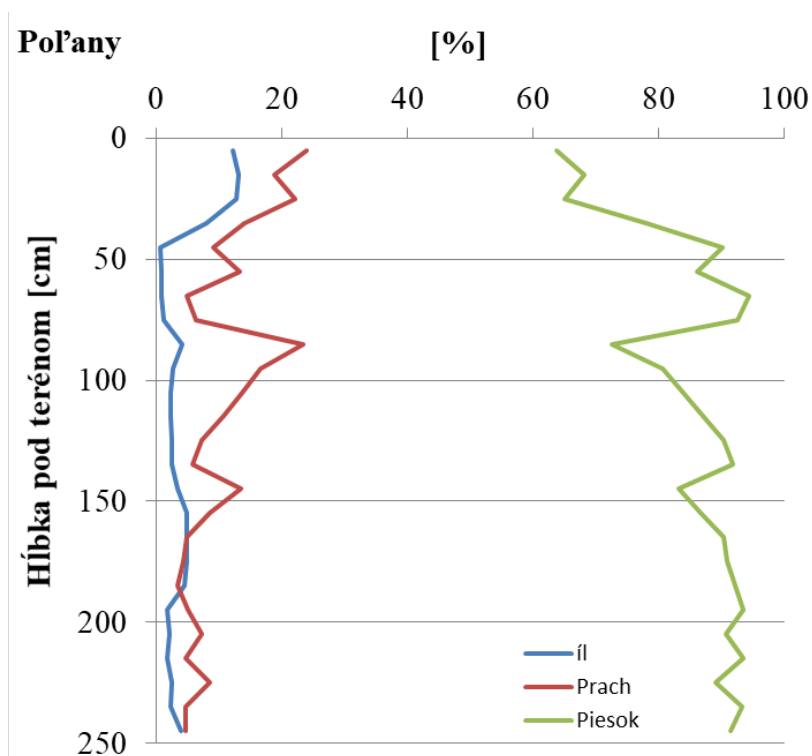
Skúmaná lokalita leží v katastri obce Petrovce nad Laborcom vzdialenej 5 km od mesta Michalovce (N 48° 47,540'; E 21° 53,175'; 117 m n. m.). V uzavretom areáli, ktorý je v súčasnosti v správe povodia Laborca začalo v marci 2014 budovanie lyzimetrickej stanice. Táto bola na jar 2015 plne uvedená do prevádzky (Obr. 1).



Obr. 1 Lyzimetrická stanica v Petrovciach nad Laborcom (Branislav Kandra, vlastný zdroj).

Stanica pozostáva z 5 lyzimetrov uložených v dvoch samostatných plastových kontajneroch. Každý lyzimeter je tvorený oceľovým valcom s plochou 1 m² a výškou 2,5 m. Vo valcoch sú pôdne monolity odobrané z rôznych lokalít Východoslovenskej nížiny (VSN) tak, aby čo najlepšie reprezentovali typické pôdne druhy na VSN. Každý lyzimeter je vybavený regulovateľným systémom hladiny podzemnej vody (HPV) napojeným na blízky vrt, ktorý slúži ako zdroj vody. Súčasťou lyzimetrickeho celku je aj meteorologická stanica poskytujúca údaje o meteorologických prvkoch. Všetky monolity sú postavené na váhach s presnosťou $\pm 0,01$ kg. Rastlinný kryt vo valcoch tvorí tráva zastrihávaná na výšku 12 cm.

Skúmaný monolit obsahuje pôdu odobranú z miesta pri obci Poľany na juhovýchode VSN. Pôdny profil je skôr ľahší hlinito-piesočnatý až piesočnatý prechádzajúci vo vrchnej časti do pieskovitej hlíny (Obr. 2).



Obr. 2 Zrnitostné zloženie pôdy z lokality Poľany (Branislav Kandra, vlastný zdroj).

2.2 Spracovanie lyzimetrických meraní

Lyzimeter je nástroj, ktorý umožňuje kvantifikovať jednotlivé zložky vodného režimu pôd prostredníctvom ich bilancie v systéme pôda – rastlina – atmosféra (Nolz 2016). Vo všeobecnosti môžeme takúto bilanciu vyjadriť jednoduchou bilančnou rovnicou:

$$\Delta W = P + I - ET_a - SW + CR \quad (1)$$

kde zmena vlhkosti (ΔW) v danom objeme pôdy v určitom čase závisí od prítoku resp. odtoku vody cez hornú a dolnú hranicu bilancovanej zóny pôdy. Horná hranica je oblasť, kde dochádza k interakcii bilancovanej zóny pôdy s rastlinným krytom a atmosférou. Tu sa infiltruje voda zo zrážok (P - precipitation) alebo závlahy (I - irrigation) a zároveň sa vyparuje do atmosféry prostredníctvom evapotranspirácie (ET_a). Dolná hranica je miestom interakcie bilancovanej zóny pôdy s podzemnou vodou. Tu sa prítok vody do bilancovanej zóny uskutočňuje kapilárnym vztlánaním (CR – capillary rise) z podzemnej vody a odtok z bilancovanej zóny zase gravitačným prúdením smerom do podzemnej vody (SW – seepage water).

V prípade, že poznáme hodnoty jednotlivých členov bilančnej rovnice je potom možné jednoducho vyjadriť aj hodnoty aktuálnej evapotranspirácie (ET_a). Najprv však bolo potrebné upraviť bilančnú rovnicu (1) do tvaru (2) (Tall et al. 2018):

$$\Delta W = P_{lys} - ET_a \pm BF \quad (2)$$

Samotné teleso lyzimetra s pôdou predstavuje bilancovanú zónu a preto dôležitým výstupom z lyzimetra je jeho hmotnosť. Každá zmena hmotnosti o 1 kg predstavuje zmenu vlhkosti pôdy ΔW o 1 mm, vzhľadom k ploche lyzimetra 1 m². Závlaha v tomto prípade nebola aplikovaná a hladina podzemnej vody bola počas celého obdobia nastavená na konštantnú úroveň 1 m pod terénom. V rovnici boli použité zrážky získané z lyzimetra (P_{lys}) z dôvodu eliminácie nepresnosti preklápacieho zrážkomera. Zrážkomer mal tendenciu podhodnocovať skutočne spadnuté zrážky, čo viedlo k nezmyselným hodnotám ET_a . Toky na dolnom okraji lyzimetra (BF – bottom fluxes) majú kladnú hodnotu v prípade, že voda prúdi do lyzimetra, čím sa kompenzujú kapilárne straty. Naopak záporné hodnoty BF reprezentujú výtok z lyzimetra t. j. gravitačný tok do HPV.

2.3 Popis použitého modelu

Matematický model HYDRUS-1D vo verzii 4 bol použitý pre výpočet analyzovaných členov bilančnej rovnice v hodnotenom časovom období. HYDRUS-1D je jednorozmerný model na simuláciu toku vody, prenosu tepla a pohybu rozpustných látok podieľajúcich sa v následných reakciách prvého rádu vo variabilne saturovaných pôdach (Šimůnek et al. 2008). Je založený na riešení Richardsovej rovnice pre variabilne nasýtené prúdenie a na advekčno-disperznom type rovníc pre prenos tepla a rozpustných látok. Rovnica prúdenia ráta s poklesom pre zohľadnenie príjmu vody koreňmi rastlín.

Nastavenie modelu pred a počas simulácie zodpovedalo reálnym podmienkam v lyzimetri. Simulovaný pôdny profil o mocnosti 2,5 m bol rozdelený na 20 materiálových vrstiev. Vybraný hydraulický model van Genuchten – Maulem (Van Genuchten 1980) bol jedno-pórovitý bez hysterézie a pre každú vrstvu boli zadané laboratorne zmerané hydrofyzikálne charakteristiky, t.j. van Genuchtenove parametre analytického vyjadrenia vlhkostných retenčných kriviek a hodnoty nasýtených hydraulických vodivostí. Ďalej bolo potrebné nastaviť počiatočné a okrajové podmienky. Počiatočná vlhkosť v jednotlivých materiálových vrstvách pôdy pred spustením simulácie zodpovedala skutočnej vlhkosti v lyzimetri. Časovo závislú hornú okrajovú podmienku tvorili denné hodnoty meteorologických prvkov z meteorologickej stanice a zrážkomera (atmosférické zrážky, solárna radiácia, maximálna a minimálna teplota vzduchu, vlhkosť vzduchu a rýchlosť vetra). Časovo závislú dolnú okrajovú podmienku definovala konštantná úroveň hladiny podzemnej vody 1 m pod terénom. Fenologické charakteristiky boli tiež nastavené konštantne na hodnoty: výška porastu – 12 cm, albedo – 0,23, LAI (index listovej pokryvnosti) – 2,88 a hĺbka koreňov 30 cm.

Úhrny modelovanej aktuálnej evapotranspirácie ET_a boli získané súčtom množstva vody odčerpanej z pôdy koreňmi rastlín (transpirácia) a vody z povrchového toku na rozhraní medzi povrchom pôdy, rastlinným krytom a atmosférou (evaporácia). Pre odber vody koreňmi rastlín bol zvolený Feddesov redukčný model (Feddes et al. 1978) s parametrami pre trávnatý porast.

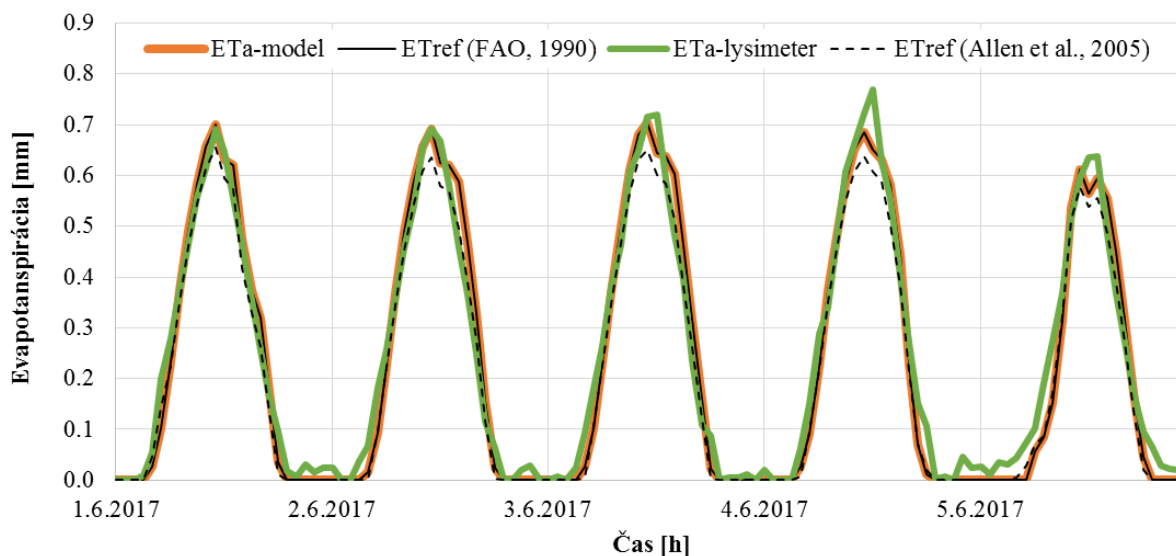
Výpočet referenčnej evapotranspirácie (ET_{ref}) v modeli HYDRUS-1D vychádzal z Penman-Monteithovej kombinačnej rovnice (3) odporúčanej FAO-om (FAO 1990):

$$ET_{ref} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T_{hr} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (3)$$

kde R_n je radiačná bilancia povrchu plodiny [$MJ m^{-2} h^{-1}$], G je tok tepla v pôde [$MJ m^{-2} h^{-1}$], T_{hr} je priemerná hodinová teplota vzduchu vo výške od 1,5 do 2,5 m [$^{\circ}C$], u_2 je priemerná hodinová rýchlosť vetra vo výške 2 m [$m s^{-1}$], e_s je tlak nasýtenej vodnej pary do 2,5 m [kPa], e_a je priemerný aktuálny tlak vodnej pary vo výške od 1,5 do 2,5 m [kPa], Δ je derivácia tlaku nasýtenej vodnej pary pri teplote vzduchu T_{hr} [$kPa ^{\circ}C^{-1}$], γ je psychrometrická konštanta [$kPa ^{\circ}C^{-1}$], C_n a C_d sú konštanty, ktoré sa menia podľa referenčného typu. V modeli sú hodnoty konštant $C_n = 900$ a $C_d = 0,34$. Pre porovnanie bol zvolený aj novší prístup výpočtu ET_{ref} podľa rovnice (3) s hodnotami konštant $C_n = 37$ a $C_d = 0,24$ (denné hodiny), 0,96 (nočné hodiny) (Allen et al. 2005).

3. Výsledky

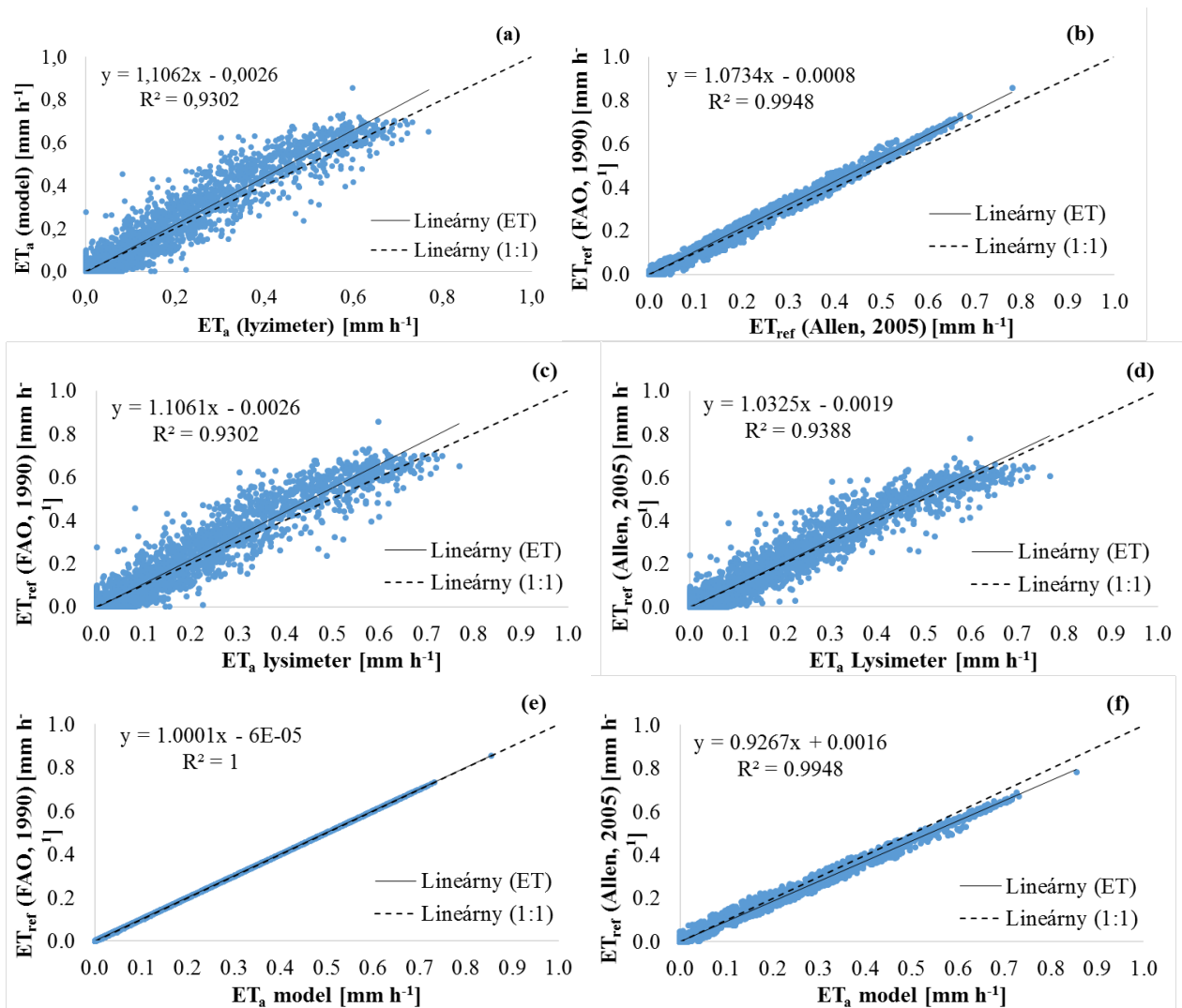
Na obrázku 3 sú spoločne znázornené hodinové priebehy ET_a vypočítanej modelom a bilančne pomocou lyzimetra s priebehmi ET_{ref} podľa rôznych metodík (FAO 1990; Allen et al. 2005). Pre lepší náhľad je na obrázku zobrazených prvých 5 júnových dní z celého analyzovaného obdobia (27. 05. 2017 až 21. 10. 2017). Tu je jasne viditeľná zhoda modelovaných a lyzimetrom zmeraných úhrnov ET_a . Vlhkostné podmienky v lyzimetri boli udržiavané tak, aby bol dosiahnutý maximálny možný výpar pomocou konštantnej hladiny podzemnej vody nastavenej na 1 m pod terénom. Vplyvom dolnej okrajovej podmienky na výpar a bilanciю vody v pôde sa zaoberal aj kolektív autorov (Meissner et al. 2016). Pre evapotranspiračný deficit ΔET daný rozdielom medzi ET_{ref} a ET_a teda platilo $\Delta ET \approx 0$. To zároveň umožnilo overiť presnosť rôznych metód výpočtu. Z obrázka je rovnako zrejmé aj vysoká miera zhody medzi ET_a a ET_{ref} .



Obr. 3 Porovnanie priebehov modelovanej a meranej ET_a s priebehmi vypočítanej ET_{ref} počas piatich dní zo začiatku júna 2017 (Branislav Kandra, vlastný zdroj).

Výsledky lineárnej regresie preukazujú vysokú mieru závislosti medzi meranými a vypočítanými hodnotami evapotranspirácie (Obr. 4). Hodinové úhrny ET_a vypočítané modelom veľmi dobre korelujú s meranými hodnotami na lyzimetri (Obr. 4a). Poukazuje na to vysoká hodnota koeficienta determinácie $R^2 = 0,93$. Odchýlky sa pohybujú v rozmedzí hodnôt $-0,37$ (MIN) až $0,25$ (MAX). Štandardná odchýlka je nízka ($SE = 0,05$), čo znamená, že hodnoty sa od seba odlišujú minimálne. Vzájomne sú korelované aj hodnoty ET_{ref} vypočítané dvoma rozdielnymi metodikami. Rozdiely v úhrnoch ET_{ref} vypočítaných podľa staršej metodiky (FAO 1990) a novej metodiky (Allen et al. 2005) sú veľmi malé (Obr. 4b).

Odchýlky spolu s hodnotou koeficienta determinácie sú uvedené v tabuľke 1. Výpočet ET_{ref} podľa rôznych metodík vo vzťahu k meranej ET_a vykazuje určité rozdiely (Obr. 4c a 4d). V prípade staršej metodiky výpočet viac nadhodnocuje meranie a hodnota koeficienta determinácie je o niečo nižšia $R^2 = 0,93$ v porovnaní s novšou metodikou, kde $R^2 = 0,94$. Tak ako koeficienty determinácie aj hodnoty odchýlok ukazujú v prospech novej metodiky pre výpočet ET_{ref} voči lyzimetricky meranej ET_a (Tab. 1). Ak porovnávame tieto dva prístupy výpočtu ET_{ref} s modelovanou ET_a , potom je situácia opačná. Úhrny modelovanej ET_a sú takmer totožné s ET_{ref} počítanou staršou metodikou (Obr. 4e). Je to ale skôr dôsledok toho, že v modeli je implementovaný tento starší výpočet ET_{ref} , ktorý je v simulácii zohľadnený. V tomto prípade s modelom veľmi dobre koreluje aj novší výpočet, čo potvrdzuje vysoká hodnota $R^2 = 0,99$ a veľmi malé odchýlky (Obr. 4f, tab. 1).



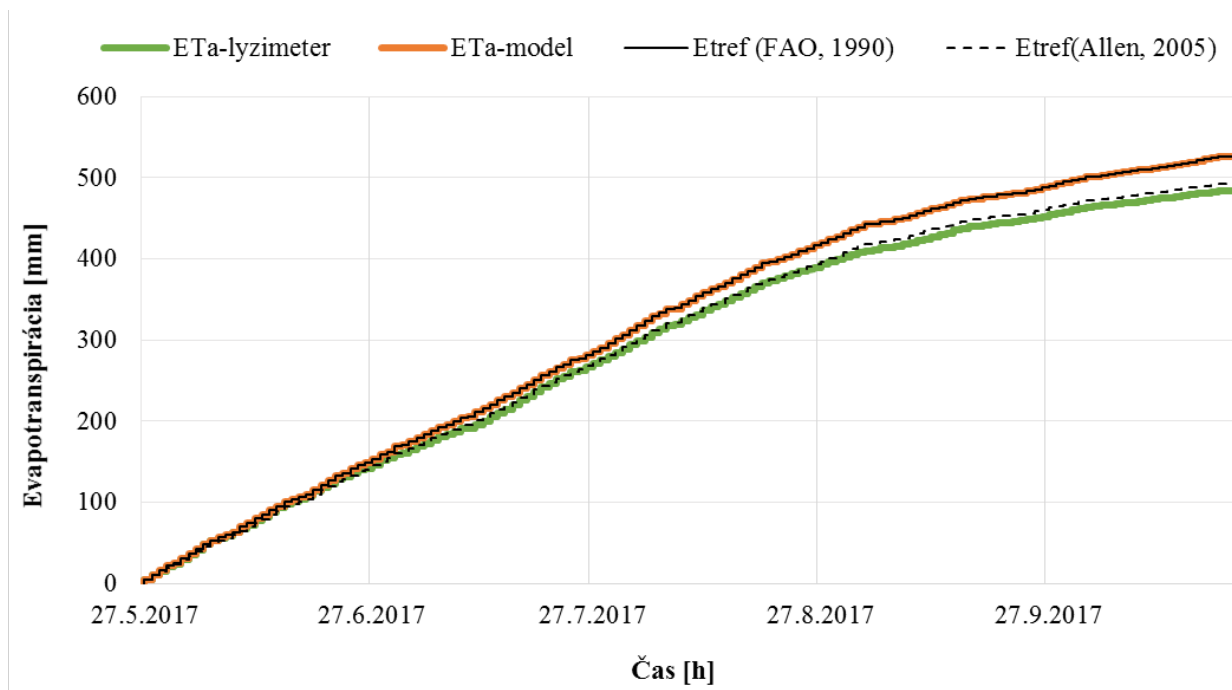
Obr. 4 Vyjadrenie lineárnych závislostí medzi meranými a vypočítanými hodnotami evapotranspirácie (Branislav Kandra, vlastný zdroj).

Tab. 1 Hodnoty odchýlok a koeficienta determinácie medzi meranými, modelovanými a vypočítanými hodnotami evapotranspirácie (Branislav Kandra, vlastný zdroj).

Evapotranspirácia	Δ_{MAX}	Δ_{MIN}	SE	R^2
ET_a (lyzimeter) – ET_a (model)	0,25	-0,37	0,05	0,93
** ET_{ref} – * ET_{ref}	0,06	-0,09	0,01	0,99
ET_a (lyzimeter) – * ET_{ref}	0,25	-0,37	0,05	0,93
ET_a (lyzimeter) – ** ET_{ref}	0,23	-0,31	0,05	0,94
ET_a (model) – * ET_{ref}	0	-0,01	0	1
ET_a (model) – ** ET_{ref}	0,09	-0,06	0,01	0,99

* ET_{ref} (FAO 1990) ** ET_{ref} (Allen et al. 2005)

Rozdiely medzi meranými a vypočítanými hodnotami evapotranspirácie sú za celé analyzované obdobie znázornené na obrázku 5. Z kumulatívnych priebehov vychádza celkový rozdiel medzi modelovanou a meranou ET_a 42,02 mm. V prípade ET_{ref} je rozdiel vyplývajúci z rôznych metodík výpočtu 33,21 mm. Ak porovnáваме meranú ET_a s ET_{ref} tak menší rozdiel je pri novej metodike (8,97 mm) oproti staršej (42,18 mm). Kumulatívny rozdiel medzi modelovanou ET_a a ET_{ref} podľa rôznych metodík je nižší pri staršej metodike (0,16 mm) a vyšší pri novej metodike (33,05 mm). V priebehu analyzovaného obdobia sa priemerné hodinové úhrny evapotranspirácie za jednotlivé mesiace postupne znižovali. Najvyššie hodnoty boli v mesiacoch máj až august, od kedy postupne klesali k najnižším hodnotám v jesenných mesiacoch september a október. Priemerné hodinové úhrny meranej a modelovanej ET_a v jednotlivých mesiacoch sú nasledovné: Máj (0,20 / 0,21 mm), Jún (0,19 / 0,20 mm), Júl (0,17 / 0,19 mm), August (0,16 / 0,17 mm), September (0,08 / 0,09 mm) a Október (0,05 / 0,06 mm).



Obr. 5 Priebeh kumulatívnych hodnôt evapotranspirácie v hodnotenom období (27.5.2017 – 21.10.2017) (Branislav Kandra, vlastný zdroj).

4. Záver

Verifikácia modelu HYDRUS-1D bola uskutočnená na hodinových úhrnoch ET_a za obdobie od 27. 5. 2017 do 21. 10. 2017. V tomto období boli k dispozícii aj merané hodnoty získané na základe vodnej bilancie pomocou váženého lyzimetra. Podmienky pre simuláciu boli v modeli nastavené tak, aby zodpovedali skutočným podmienkam v lyzimetri. Pre dosiahnutie maximálnych hodnôt výparu (kde $\Delta ET = ET_{ref} - ET_a \approx 0$) bola hladina podzemnej vody nastavená na 1 m pod terénom. Týmto bolo možné overiť aj presnosť dvoch rôznych metodík výpočtu ET_{ref} voči meranej a modelovanej ET_a . Lineárnou regresiou bola preukázaná vysoká zhoda medzi meranými a modelovanými hodnotami ET_a ($R^2 = 0,93$; $SE = 0,05$). V prípade ET_{ref} sa ako vhodnejšia ukázala novšia metodika výpočtu vo vzťahu k meranej ET_a ($R^2 = 0,94$, $SE = 0,05$), kde bol sumárny rozdiel iba 9 mm (2%). V kumulatívnom vyjadrení ET_a je rozdiel medzi modelom a meraním 42 mm (9%) za celé hodnotené obdobie.

Výsledky verifikácie ukázali, že model HYDRUS-1D je vhodný pre použitie v podmienkach simulujúcich existujúci pôdny profil v skúmanom lyzimetri. S použitím všetkých dostupných dát z blízkej meteorologickej stanice, hydrofyzikálnych charakteristík pôdneho profilu a fenologických charakteristík porastu dokáže spoľahlivo odhadnúť veľkosť výparu.

PodĎakovanie:

Táto práca bola podporovaná grantovou agentúrou VEGA 2/0044/20.

Literatúra:

ALLEN, R. G., WALTER, I.A., ELLIOT, R. L., HOWELL, T. A. 2005. Intenfisu, D.; Jensen, M. E.; Snyder, R. L. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Reston: American Society of Civil Engineers, 2005, 216 p.

FEDDES, R. A., KOWALIK, P. J., ZARADNY, H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons, New York, NY, 1978.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS 1990. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements, ANNEX V, FAO Penman-Monteith Formula, Rome Italy, 1990.

MATUŠEK, I., RETH, S., HEERD, CH., HRČKOVÁ, K., GUBIŠ, J., TALL, A. 2017. Review of lysimeter stations in Slovakia. In Lysimeter Research – Options and Limits. - Druck : Verlag, 2017, s. 209–211. ISBN 13: 978-3-902849-45-8.

MEISSNER, R., BONDAROVICH, A. A., SCHERBININ, V. V., PONKINA, E. V., MATSYURA, A. V. et al., 2016. Calculation of water balance for the south desert area of Western Siberiaby international monitoring network data. Biological Bulletin of Bogdan Chmelniyskiy Melitopol State Pedagogical University 6 (2): 223–238.

NOLZ, R. A. 2016. Review on the quantification of soil water balance components as a basis for agricultural water management with a focus on weighing lysimeters and soil water sensors/Ein Überblick über die Ermittlung von Wasserhaushaltsgrößen als Basis für die landeskulturelle Wasserwirtschaft mit Fokus auf Lysimeter und Bodenwassersensoren Die Bodenkultur: J. Land Manage., Food Environ., 67 (3) (2016), pp. 133–144, 10.1515/boku-2016-0012.

ŠIMŮNEK, J., ŠEJNA, M., SAITO, H., SAKAI, M., VAN GENUCHTEN, M. TH. 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.0x, Hydrus Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA, 2008.

TALL, A., KANDRA, B., GOMBOŠ, M., PAVELKOVÁ, D. 2018. Kvantifikácia hydrologických procesov pomocou lyzimetra. Branislav Kandra, Milan Gomboš, Dana Pavelková. In Aktuálne problémy zóny aerácie pôdy v podmienkach prebiehajúcej klimatickej zmeny. – Bratislava: Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 2018, s. 285-306. ISBN 978-80-224-1690-0.

VAN GENUCHTEN, M. TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892–898, 1980.

Kľúčové slová: numerická simulácia, výpar, vodný režim pôd, členy vodnej bilancie, hydrofyzikálne charakteristiky

Dlouhodobý pohled na vývoj teplot a srážek na Jižní Moravě

Jaroslav Lang, Tomáš Vymyslický

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

Abstrakt

V článku jsou hodnoceny srážky a teploty v průběhu let a jejich dlouhodobé trendy nárůstu nebo poklesu v období od roku 1961 do roku 2020 na lokalitě Troubsko. U srážek nebyl zjištěn statisticky průkazný trend poklesu za sledované období. Množství srážek je v letech ale nevyrovnané a velmi rozdílné. U teplot byl zaznamenán statisticky průkazný trend nárůstu. Bylo také zjištěno, že v letech s vyššími teplotami spadlo méně srážek.

Klíčová slova: srážky, teplota, sucho

1. Úvod

Průběh počasí má v zemědělské výrobě zásadní význam a ovlivňuje ji v celém jejím spektru. Teploty a srážky ve vegetačním období mají přímý vliv na tvorbu výnosu a na kvalitu zemědělských plodin, v nevegetačním období mají tyto faktory vliv na fyziologické procesy trvalých nebo ozimých plodin, na množství zimní půdní vláhy, která ovlivňuje zejména nástup vegetace a významně ovlivňuje klíčení a vzcházení jarních plodin. Nepřímý vliv počasí se celoročně projevuje například v oblasti rostlinolékařství, resp. ve vývoji chorob a škůdců.

V poslední dekádě zužují nejen Jižní Moravu výskyty sucha a vysoké teploty. Přísušky a suchá údobí lze vypožorovat na vyšší výnosů například u kukuřice na siláž, která je na Jižní Moravě v osevním postupu hojně zastoupena a jako rostlina typu C4 se dokáže lépe vypořádat se suššími agroekologickými podmínkami. Průměrný výnos kukuřičné řezanky podle ČSÚ (2022 [on-line]) v období let 2010–2020 je 34,85 t/ha čerstvé hmoty (min. 28,161, max. 42,25 t/ha), v letech se sníženou dostupností vody jsou výnosy výrazně podprůměrné. Například v roce 2018 byl průměrný výnos 28,87 t/ha, roční suma teplotních odchylek od normálu (1961–1990) pro jihomoravský kraj byla 32,4 °C a procento ročního úhrnu srážek bylo 84,9 (CHMI, 2022 [on-line]). I rok 2019 byl teplotně nadprůměrný (suma měsíčních odchylek byla 29,9 °C) a výnos řezanky kukuřic byl 35,77 t/ha. Za vysokým výnosem stojí dostatek srážek, roční procento bylo 106,9. Z toho je jasné, že za výnosy a kvalitou produktů stojí kombinace více faktorů. Pro detailní analýzu je potřeba samozřejmě nahlížet minimálně do jednotlivých srážkových a teplotních měsíců. Zemědělskou výrobu nesouží pouze vysoké teploty a nízké srážky. Rizikem může být i nečekaná nadměrná vlhkost v některých fázích vývoje rostlin. Například v roce 2019 byly měsíce červenec až říjen dosti deštivé a byly vytvořeny podmínky pro růst patogenních hub. U potravinářské kukuřice byly několikanásobně překročeny limity kontaminace pro obsah sledovaných mykotoxinů (deoxynivalenol a zearalenon). Takto kontaminovaná produkce není vhodná ani na krmení a je určena k likvidaci s ekonomickou ztrátou. Sledování a rozbor klimatických podmínek v zemědělské výrobě je velmi důležité. Také proto se v článku zabýváme detailní analýzou souvislé řady naměřených dat (srážky a teplota).

2. Materiál a metody

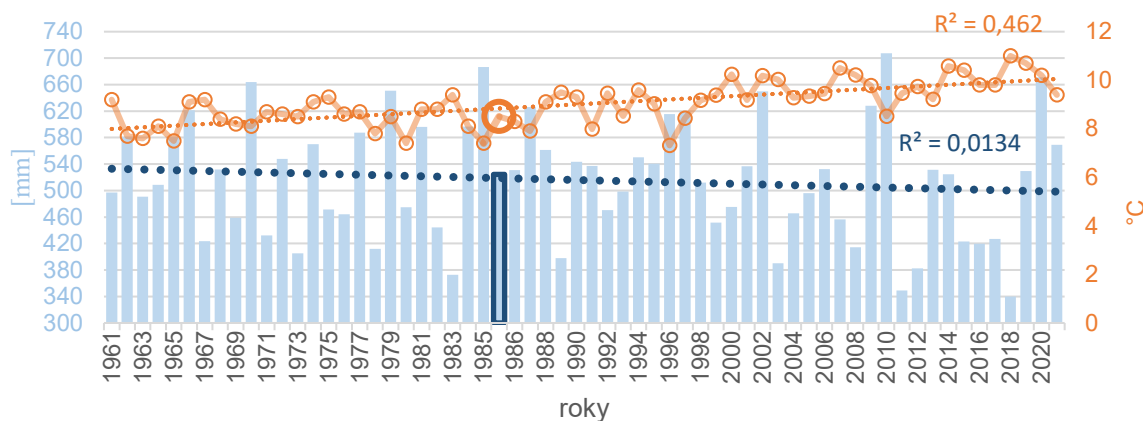
Zdrojová data teplot a srážek jsou čerpána z meteorologické stanice Českého hydrometeorologického ústavu, která je umístěna v areálu Výzkumného ústavu pícninářského, spol. s r. o. a Zemědělského výzkumu, spol. s r. o. v Troubsku. Na této stanici probíhá měření od roku 1981. V současné době je stanice plně automatizována. Teplotní a srážkový normál pro pokusnou stanici Troubsko je brán z let 1961–1990. 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 8,6 °C, ve vegetaci (duben – září) 14,8 °C. Roční suma srážek činí 547 mm, ve vegetaci 346 mm. Pro statistické hodnocení dat byl použit program Statistica 14.0.0.

3. Výsledky a diskuse

Na levé straně grafu (obrázek 1) je umístěna srážková stupnice a k ní patří sloupce na ose x, které vyjadřují průměrné množství srážek v daném roce. Na pravé straně grafu je umístěna teplotní stupnice a k ní patří spojnicové body, které vyjadřují průběh průměrných ročních teplot. Zhruba uprostřed grafu, mezi roky 1985 a 1986, jsou tučně zvýrazněny sloupec a kruh, ty udávají dlouhodobý srážkový a teplotní průměr (1961–1990). Naměřenými hodnotami, srážkovými i teplotními, je proložena lineární spojnice trendu s vyjádřeným koeficientem determinace (R^2). Na první pohled je patrné, že se obě spojnice trendu od sebe v průběhu času rozcházejí, u teploty tedy dochází k nárůstu, u srážek k poklesu hodnot.

3.1 Srážky

Z grafu (obrázek 1) je patrné, že úhrny srážek jsou v jednotlivých letech velmi rozdílné a nelze z nich vyčíst žádný viditelný trend. Lineární regresní model naznačuje, že srážek postupně v letech ubývá. Tato linearita se ale nedá potvrdit na základě koeficientu determinace, který říká, že je model spolehlivý pouze z 1,34 %. To samé potvrzuje korelační koeficient, jehož záporná hodnota $-0,12$ značí velmi slabý vztah (poklesu) srážek v letech. Tato vyjádření vztahu jsou velmi slabá na to, abychom zde hledali příčinnou závislost mezi průběhem let a poklesem srážek. Jestliže si položíme nulovou hypotézu H_0 ve znění: v průběhu let srážky neklesají, tak potom na základě zjištěné hodnoty p ($0,3728$) a tato hypotéza platí. Prakticky to znamená, že k poklesu úhrnu srážek v průběhu let nedochází. Z toho také vyplývá, že se lineární model nedá použít jako predikce průběhu srážek v dalších letech. Tyto výsledky jsou v souladu s jedním ze závěrů studie s názvem Očekávané klimatické podmínky v České republice (Štěpánek a kol., 2019), který říká, že do konce století lze očekávat stagnaci nebo pouze mírný nárůst množství srážek, záleží na regionu.



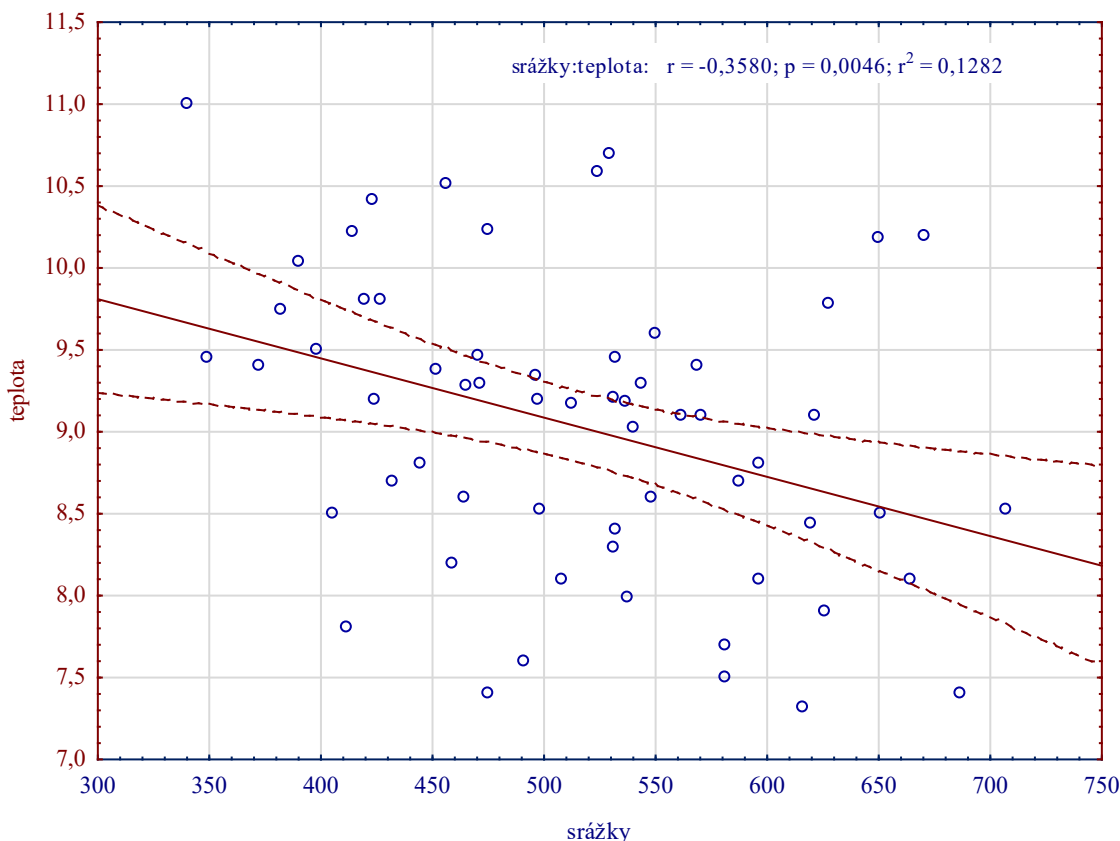
Obr. 1 Průměrné srážky a teploty od roku 1961 do roku 2020 na stanici Troubsko.

3.2 Teplota

Průběh průměrných teplot nenabývá tak velkých rozdílů v letech, jak je tomu u průběhu srážek. Lineární spojnice trendu má vzestupný charakter a lze usuzovat, že se teploty v letech zvyšují. Koeficient determinace dosahuje hodnoty $0,46$, to znamená, že kladná závislost a stoupající trend průběhu teplot v letech lze ze 46 % vysvětlit tímto lineárním modelem. Korelační koeficient ($r = 0,68$) potvrzuje středně silnou závislost stoupání teploty s přibývajícím roky. Statisticky průkaznou závislost dokládá i zjištěná p – hodnota, která dosahuje hodnoty $1,832e^{-09}$: v tomto případě lze hovořit o zvyšování teplot v průběhu času. Štěpánek a kol (2019) ve výhledové zprávě uvádějí, že se do roku 2050 s nejvyšší pravděpodobností oteplí nejméně o další 2 °C ve srovnání se současností. Pokud se emise skleníkových plynů do roku 2050 zásadně neomezí, ke konci tohoto století pak lze očekávat oteplení o 3 až 6 °C oproti současnosti. Příbyla a kol. (2020) uvádějí, že od roku 1961 do roku 2019 se již zvýšila teplota o $2,2\text{ °C}$.

3.3 Vztah teploty a srážek

Velmi zajímavé výsledky jsme zjistili ze vztahu průběhu teplot a srážek. Vysvětlení závislosti podle lineárního modelu v grafu (obrázek 2), resp. predikce chování obou proměnných je spolehlivá z 12,8 %, nicméně korelační (negativní) vztah mezi srážkami a teplotami je středně silný. Bez ohledu na linearitu ale na základě hodnoty čísla p (0,0046) ze vztahu teplot a srážek lze říci, že v letech s vyšší průměrnou teplotou se vyskytuje nižší množství srážek.



Obr. 2 Závislost srážek na teplotě s hladinou spolehlivosti 95 %.

V minulé práci (Lang, 2021) jsme se detailně zabývali hodnocením teplotních a srážkových roků a půlroků. Je zde uvedeno, že od roku 2005 do roku 2020 byly teplotně normální pouze tři roky, dalších třináct let bylo hodnoceno různým stupněm nadnormality. Srážkové hodnocení bylo o něco mírnější, normálně srážkových let bylo pět, nadnormálních let byly tři. Zbývajících osm let bylo hodnoceno různým stupněm podnormality. Počet let s kombinací nadnormálních teplot s podnormálními srážkami bylo celkem osm, tj. polovina hodnocených let. Štěpánek a kol. (2019) uvádějí, že extrémní teploty vedou ke zvýšenému odparu vody z krajiny, což je jednou z hlavních příčin současného sucha. Podle našich výsledků lze k tomuto závěru dodat, že sucho na lokalitě Troubsko v letech s extrémními teplotami znásobuje nižší výskyt srážek.

4. Závěr

Z porovnávání naměřených hodnot od roku 1961 do současnosti a jejich statistického vyhodnocení lze konstatovat, že na lokalitě Troubsko, ležící v severní části Panonského termofytika, dochází meziročně k nárůstu průměrných teplot.

Ze statistického hodnocení srážek nevyplývá, že by dešťů ubývalo. Problém ale je jejich rozložení, kdy v jednotlivých letech jsou ve spadu atmosférických srážek zaznamenány velké rozdíly.

Sucha, která nás v posledním desetiletí sužují, nejsou způsobena pouze nedostatkem srážek v některých letech, ale vyššími teplotami a kombinací vyšších teplot a nižších srážek. Překvapivě byla prokázána závislost, kdy v letech s vysokými teplotami spadne statisticky průkazně méně srážek. Právě tento jev je velkým problémem v zemědělství.

Samotné vyšší teploty například ve vegetaci nemusí nutně znamenat problém. Vyšší teploty mohou přispívat k lepšímu vzházení a růstu rostlin, mohou také eliminovat výskyt chorob, teplo, resp. suché počasí je žádoucí při sklizních všech plodin a krmiv. Podobně je tomu i se srážkami; s občasným přísuškem za normálních teplot se dokáží plodiny vyrovnat, záleží na délce přísušku a vývojové fázi rostliny. Problém jsou ale vyšší teploty v kombinaci s nižšími srážkami. U rostlin dochází ke zvýšené transpiraci, celkově ke zvýšené evapotranspiraci a tím zrychlenému úbytku dostupné vody z půdy. V takovém případě dochází ke špatnému vzházení a celkovému vývoji plodin, dochází ke snižování výnosů, leckdy k úplné devastaci porostů. Z lineárních teplotních, ale hlavně srážkových modelů lze jen velmi těžko predikovat průběh teplot a srážek v dalších letech pro zemědělské účely.

Poděkování

Výsledek vznikl za podpory Ministerstva zemědělství, institucionální podpora MZE-RO1722.

Literatura:

Český hydrometeorologický ústav: Průměrná měsíční teplota vzduchu ve srovnání s normálem 1961–1990 na území ČR a jednotlivých krajů [on-line]. Tabulky od roku 2010 do roku 2020. [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: < <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#>>

Český hydrometeorologický ústav: Měsíční úhrny srážek ve srovnání s normálem 1961–1990 na území ČR a jednotlivých krajů [on-line]. Tabulky od roku 2010 do roku 2020. [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: < <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky#>>

Český statistický úřad: Sklizeň zemědělských plodin v roce 2020 podle krajů [on-line]. Zveřejněno 18. 2. 2021. Tabulky č. 21 od roku 2010 do roku 2020. [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: < <https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2020>>

Lang, J.: Dlouhodobé hodnocení roků a vegetačních období z hlediska průběhu teplot a srážek na pokusnické stanici Troubsko. In: Hospodaření s vodou v krajině 2021. Sborník abstraktů konference pořádané Českou bioklimatologickou společností 14-15. 9. 2021 v Třeboni. ISBN: 978-80-7653-018-8.

Příbyla, O., Zákopčanová, K., Pechník, O.: Atlas klimatické změny. Změny v atmosféře a rizika oteplování. První vydání, 32 stran. Vydala: Lipka, Brno, 2020.

Štěpánek P. a kol: Očekávané klimatické podmínky v České republice, část I. Vydal: Ústav výzkumu globální změny, Akademie věd České republiky, Brno, 2019. ISBN. 978-8-87902-28-8. dostupné z: < <https://faktaoklimatu.cz/studie/2019-klimaticke-podminky-cr-1?q=sr%C3%A1%C5%BE>>

Optimalizace množství dodané vody při kapkové závlaze jableoní s využitím snímačů půdní vlhkosti

Tomáš Litschmann

AMET sdružení, Žižkovská 1230, 691 02 Velké Bílovice, amet@email.cz

Abstrakt

Častější výskyty sucha, nerovnoměrné rozložení srážek a klesající zásoby vody využitelné pro závlahy vyžadují sofistikovanější přístupy k aplikaci a řízení závlah. Rozšiřování kapkových závlah v ovocných sadech přispívá ke snižování mimoprodukčních ztrát vody neproduktivním výparem, je však zapotřebí zabránit i perkolaci do hlubších vrstev nevhodným řízením. Časové spínače, běžně v sušších krajinách používané, se ukazují v našich klimatických podmínkách jako nepřilíš vhodné, jelikož jejich nastavení do značné míry závisí na subjektivním odhadu pěstitele.

V předloženém článku jsou popsány zkušenosti s řízením závlahy na základě přímo měřené půdní vlhkosti v kořenové zóně jableoní pěstovaných ve tvaru štíhlého vřetene. Pokus byl založen v roce 2019 a běží doposud, v tomto článku je vyhodnoceno čtyřleté období 2019 – 2022. Bylo zjištěno, že řízením na základě půdní vlhkosti lze ušetřit polovinu až dvě třetiny závlahové vody oproti množství dodaném na základě časového spínače nastaveného zkušeným sadařem, bez dopadu na výnosy.

Byly provedeny pokusy sestavit rovnice vláhové bilance a počítat množství potřebné závlahové vody na základě meteorologických údajů a dalších dostupných parametrů, nebylo však doposud dosaženo prakticky využitelných výsledků. Na základě tříletých výsledků bylo zjištěno, že v dlouhodobějším časovém úseku jsou jableoně na daném pokusném pozemku s daným typem ozelenění schopny využít přibližně 50 % spadlých srážek během vegetačního období, druhá polovina připadá na ztrátové položky, jako např. evapotranspirace meziřadí, případná perkolace apod.

1. Úvod

Zvyšující se intenzifikace pěstování jableoní a současně probíhající klimatická změna, projevující se větší variabilitou srážek a častějšími epizodami půdního sucha, vedly v minulých desetiletích k masovému rozšíření kapkové závlahy v nově vysazovaných sadech a zároveň i ve starších výsadbách. Současně s vybudováním kapkové závlahy je uživatel nucen řešit problematiku optimálního řízení zavlažování tak, aby nedocházelo k nadměrnému plýtvání vodou, ale ani aby nebyl snížen výnos v důsledku nedostatku vláhy v půdě. Optimální řízení kapkové závlahy vyžaduje častější dodávku určitého množství vody ve správný okamžik a ve správném množství. Ve velké většině případů tak převládá řízení na základě subjektivního hodnocení vztahu mezi vláhovou potřebou jableoní, srážkami a dodaným závlahovým množstvím. Časový způsob řízení kapkové závlahy nejen v sadech je v našich podmínkách poměrně rozšířen, záleží při něm hodně na uživateli, jak často a po jakou dobu závlahu provozuje. K odbornému stanovení těchto parametrů je zapotřebí mít dostatek informací o výsušnosti atmosféry, srážkách a fyziologických potřebách pěstovaných plodin. Tyto většinou komplikované výpočty pěstitele nahrazují odhadem, takže dochází v některých případech k nedostatečnému, anebo naopak nadměrnému zavlažování. Jak uvádí Mounzer et al. (2008), měření půdních vlhkostí je rozhodující pro stanovení vláhové potřeby porostu a efektivní řízení závlahy. Obdobně Jiang a Hi (2021) uvádějí, že závlaha řízená na základě údajů snímačů půdních vlhkostí přispěla k úspoře vody a zvýšila výnosy. Na základě zkušeností bez přesných naměřených údajů lze jen těžko stanovit, zda-li bylo dodané závlahové množství vody dostatečné. Ve světě moderních technologií lze bez problémů a s minimálními finančními nároky zajistit kontinuální monitorování půdních vlhkostí přímo v zavlažovaném sadu a na základě takto získaných hodnot provádět závlahu.

Vera et al. (2021) ve svém přehledovém článku uvádějí mezi přednostmi při řízení kapkové závlahy na základě měřené půdní vlhkosti úsporu až 40 % vody a s tím spojených dalších nákladů oproti metodám řízení založených na vypočítané potenciální evapotranspiraci. V případě, že jsou údaje o půdních vlhkostech přenášeny na webové rozhraní, patří mezi další výhody tohoto řízení přehled o vlhkostech půdy v jednotlivých částech sadu, možnost připojení a přenášení dat i z jiných snímačů, např. teploty, vodoměru apod., jakož i možnost varování při selhání některého z prvků ovládání

závlahy a tím i zabránění vzniku škod např. podmáčením, vyplavením živin při nezavření ventilu, ale zároveň též i vzniku vodního stresu při poruše dodávky vody k jednotlivým kapkovačům. Autoři rovněž uvádějí i slabá místa takového řízení, mezi něž patří malý objem půdy měřený snímači vlhkosti půdy (nutnost jejich optimálního umístění), v případě větší variability půdních vlastností je zapotřebí použít více snímačů, náklady spojené s vybudováním měřících stanovišť a rovněž náklady spojené se zajištěním správné funkce celého systému. Lze však předpokládat, že vývoj povětrnostních podmínek v dalších letech pod vlivem klimatických změn povede ke zvýšenému nedostatku, popřípadě i zvýšení ceny, závlahové vody, čímž se toto řízení stane ještě více rentabilnější.

Předložený příspěvek popisuje výsledky tříletého poloprovozního pokusu s řízením závlahy v jablňovém sadu na základě údajů půdní vlhkosti v porovnání se subjektivním řízením zkušeného sadaře.

2. Materiál a metody

Pokud byl založen průběhu měsíce června 2019 ve výsadbě jabloni odrůdy Red Cap, mutace Jeronime na podnoži M9, výsadba jaro 2013, spon 3,5x1m, patřící firmě Agrosad s.r.o. Velké Bílovice, s cílem posoudit přínos řízení závlahy na základě hodnot půdní vlhkosti v kořenové zóně oproti tradičnímu řízení časovým spínačem dávkujícím vodu pravidelně v každodenních intervalech. K pokusu byly vybrány dva řádky jabloní o délce 160 metrů, každý o výměře 0.0594 ha. Umístění výsadby je na Obr. 1, její orientace je ve směru jihozápad - severovýchod. V jednom řádku byl ponechán uživatelsky řízený způsob závlahy, ve druhém byla závlaha řízena regulátorem půdní vlhkosti RPV 2b (AMET Velké Bílovice). Meziřadí je ozeleněno jetelotrávní směskou, pravidelně sežínanou. Místo k pokusu bylo vybráno na základě předchozích měření hodnot půdních vlhkostí v rámci jiného výzkumu, kdy bylo konstatováno, že množství vody, dodávané uživatelským způsobem, má za následek vysoké hodnoty půdních vlhkostí v navlaženém objemu pod jednotlivými kapkovači. Polní vodní kapacita pro danou středně těžkou půdu se pohybuje kolem 32 obj. %.

Kromě regulátoru půdní vlhkosti bylo měřící stanoviště osazeno i dalšími snímači půdní vlhkosti VIRRIB (AMET Velké Bílovice), přičemž jejich hodnoty byly zaznamenávány dataloggerem VIRRIBLOGGER od stejné firmy. Napájení všech zařízení bylo pomocí solárních panelů. Měřící sestava na pokusném stanovišti je na Obr. 2. Celkem byly nainstalovány 4 snímače půdní vlhkosti:

- 1 – uprostřed zatravněného meziřadí
- 2 – přímo pod kapkovač do řádku s regulací závlahy, dodávající informace i pro regulátor půdní vlhkosti
- 3 – 50 cm vedle kapkovací hadice probíhající řádkem s regulací závlahy
- 4 – pod kapkovač s uživatelsky řízenou závlahou časovačem

Všechny snímače v prováděném pokusu byly umístěny tak, aby monitorovaly půdní vlhkost ve vrstvě cca 10 – 30 cm pod povrchem půdy. Umístění snímačů vlhkosti půdy přímo pod kapkovač doporučují rovněž Domínguez-Niño et al. (2020), neboť v této poloze poskytují bezprostřední reakci na závlahu i na příjem vody kořeny. Dále uvádějí, že snímače umístěné mezi dvěma kapkovači mají tendenci zachycovat pomalejší dynamiku, která lépe reprezentuje kumulativní zůstatek za předchozí období několika dnů. Umístění snímače do hloubky 30 cm se shoduje s maximální kořenovou aktivitou.

K měření skutečně spotřebované vody jednotlivými řádky byl u každého z nich do kapkovací hadice vsazen vodoměr. V roce 2020 byl pokus upraven tak, že na kraji každého z obou sledovaných řádků bylo ponecháno 10 stromů bez závlahy jako další varianta, mající za cíl zjistit, jak by vypadaly výnosy bez doplňkové závlahy. Tato varianta byla rovněž vybavena snímači půdní vlhkosti podobně jako závlahové varianty.

Na začátku pokusu se ukázalo, že dochází k rozdílům v naměřených půdních vlhkostech mezi jednotlivými snímači umístěnými v řadách při stejné závlahové dávce. Tento problém byl vyřešen pomocí distančních rozpěrek, zajišťujících prohnutí kapkovací hadice v místě nad umístěným snímačem, takže voda z nejbližšího kapkovače stéká do měřeného místa. Rozpěrky je nutno pevně přichytit k vodícímu drátu, neboť vlivem změn teploty kapkovací hadice dochází k jejím délkovým změnám a posunům, nepřipevněné rozpěrky vypadnou (Obr. 3). Toto opatření je nutné ve všech případech, kdy má být měřena půdní vlhkost pod kapkovači a její hodnoty využity k řízení závlahy. Zajistí se tím správnost měření po celou vegetační dobu, v případě více snímačů pak vzájemná porovnatelnost naměřených hodnot. Při vzdálenostech kapkovačů 1 m a více je navlažený objem víceméně nespojitý a v podélném směru dochází k výrazným rozdílům v hodnotách půdní vlhkosti, takže při špatné instalaci může dojít i k tomu, že nejsou pozorovány rozdíly v naměřených půdních vlhkostech v průběhu závlahy (viz. např. naměřené půdní vlhkosti 50 cm od kapkovací hadice na Obr. 6). U kapkovacích linek položených na zemi se ukázalo jako vhodné opatření umístění snímače pod kapkovač, přičemž na

obou stranách od něj je na hadici v malé vzdálenosti umístěna zábrana (stačí namotat provázek, popřípadě stahovací pásku apod), omezující stékání vody po hadici mimo prostor monitorovaný snímačem.



Obr. 1 Umístění pokusné výsadby jabloní



Obr. 2 Umístění měřicí a regulační sestavy v pokusném sadu. Regulátor půdní vlhkosti RPV 2b je druhý shora, VIRRIBLOGGER druhý zdola. Vše je napájeno solárními panely.

Ve vzdálenosti cca 200 m od pokusné výsadby je umístěna meteorologická stanice, z níž jsou použity údaje o teplotách a srážkách za jednotlivé roky.

V průběhu sklizně byly každý rok sklizeny všechny plody na každém řádku samostatně ze všech stromů (celkem 160 na jednom řádku), po vyčlenění varianty bez závlahy byly zvlášť sklizeny nejprve stromy bez závlahy v obou řádcích a pak odděleně zbývající části obou řádků (150 stromů). Sklizené množství bylo následně přepočítáno z důvodů porovnatelnosti výsledků na kg/strom.



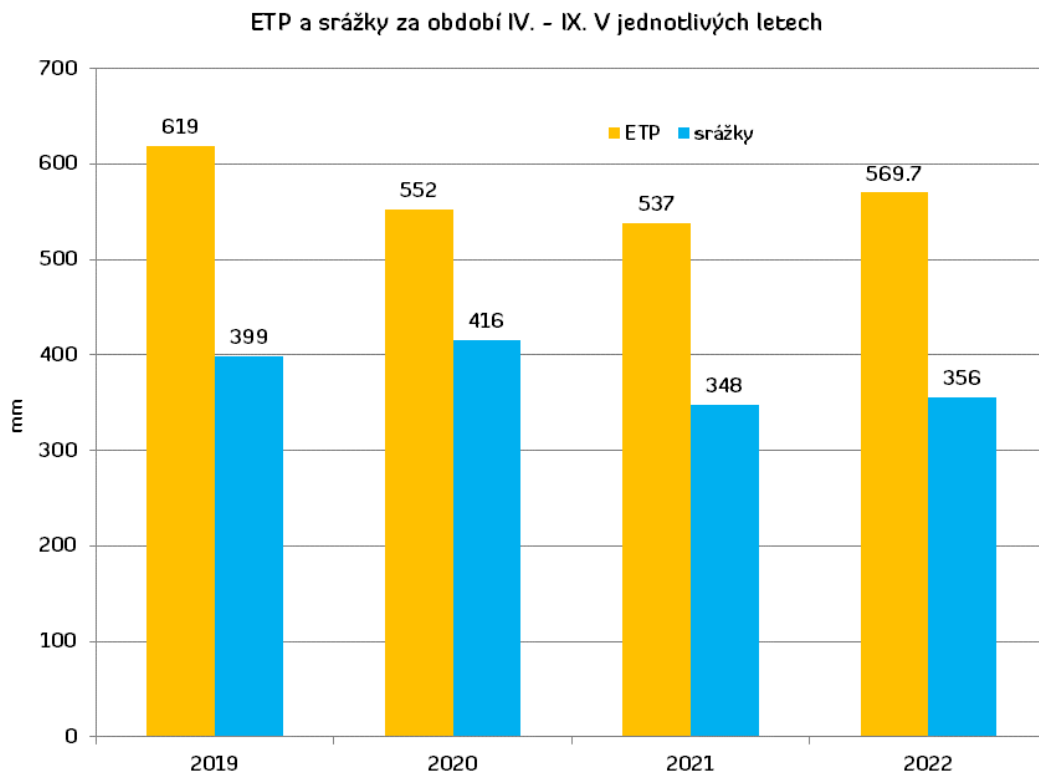
Obr. 3 Prohnutí kapkovací hadice pomocí rozpěrky v místě nad snímači půdní vlhkosti umístěnými v řadách

3. Výsledky a diskuse

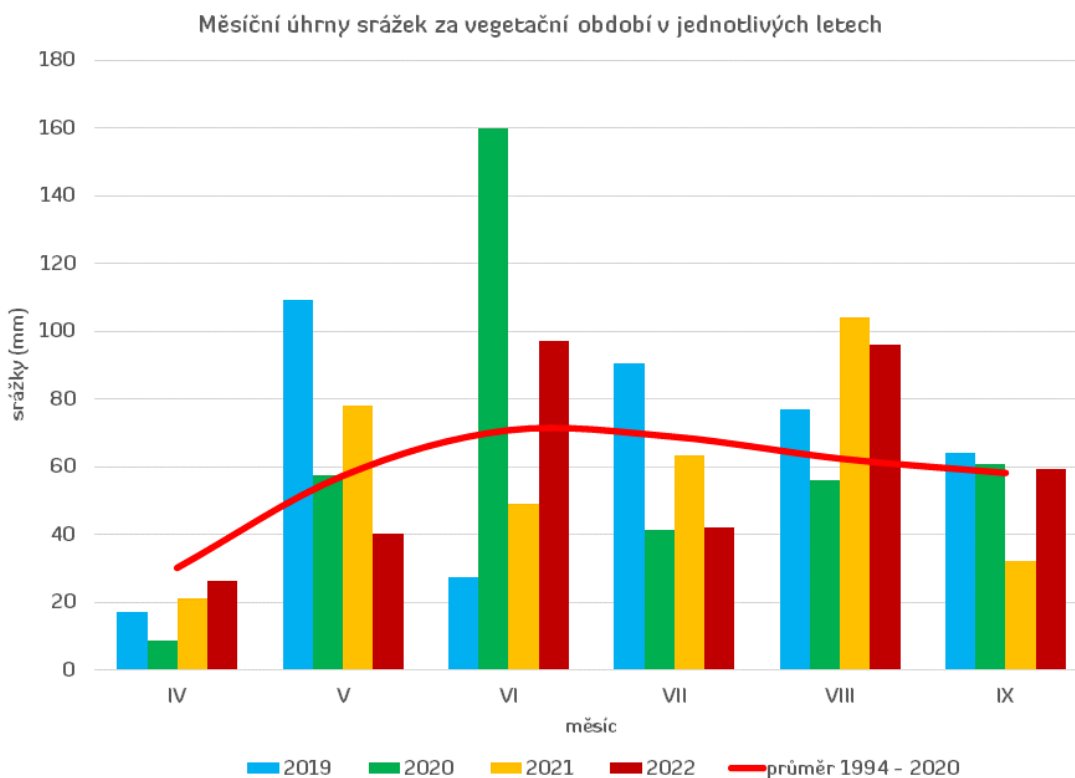
3.1 Průběh povětrnosti v jednotlivých letech

Po předchozích letech 2015 – 2018 s nízkými úhrny srážek, se od roku 2019 do roku 2021 začaly srážkové úhrny zvyšovat a i přes rozkolísanost v jednotlivých měsících se jejich množství za vegetační období pohybovalo kolem dlouhodobého průměru. Na Obr. 4 jsou znázorněny tyto úhrny za vegetační období společně s hodnotami potenciální evapotranspirace. Ve všech sledovaných letech byla potenciální evapotranspirace vyšší než úhrn srážek, což je charakteristické pro danou oblast s výskytem černozemí. Při podrobnější analýze jednotlivých měsíců (Obr. 5) je zřejmé, že docházelo ke střídání srážkově podnormálních a nadnormálních měsíců, i z tohoto důvodu bylo zapotřebí aplikovat doplňkovou závlahu ve výsadbách jabloní. Společně se závlahou bylo v některých termínech prováděno i přihnojování.

Na jaře a na počátku léta v roce 2019 ještě doznívalo předchozí suché teplejší období, které se projevilo mj. i nízkými červnovými úhrny srážek a vyššími hodnotami ETP za vegetační období. Rok 2020 se vyznačoval srážkově normálním květnem, po němž následoval vysoce nadnormální červen a mírně podnormální červenec, zbývající měsíce byly srážkově normální. Nižší celkový úhrn srážek v roce 2021 byl způsoben zejména nízkými úhrny v září, kdy již probíhají sklizně ovoce, navíc tento měsíc následoval po srážkově vydatnějším srpnu, takže závlaha již byla vypnuta. Přestože rok 2022 vykazuje obdobné úhrny srážek jako rok předcházející, v důsledku jejich nerovnoměrného rozdělení se v červenci a v srpnu vyskytlo několikatýdenní období s nedostatkem vláhy, umocněné ještě vyššími hodnotami evapotranspirace. V měsíčních úhrnech srážek (Obr. 5) se tato skutečnost neprojevuje, jelikož v srpnu začalo pršet až ke konci měsíce a v důsledku toho dosáhl jeho úhrn vysoce nadnormálních hodnot.



Obr. 4 Hodnoty potenciální evapotranspirace a srážek v jednotlivých letech

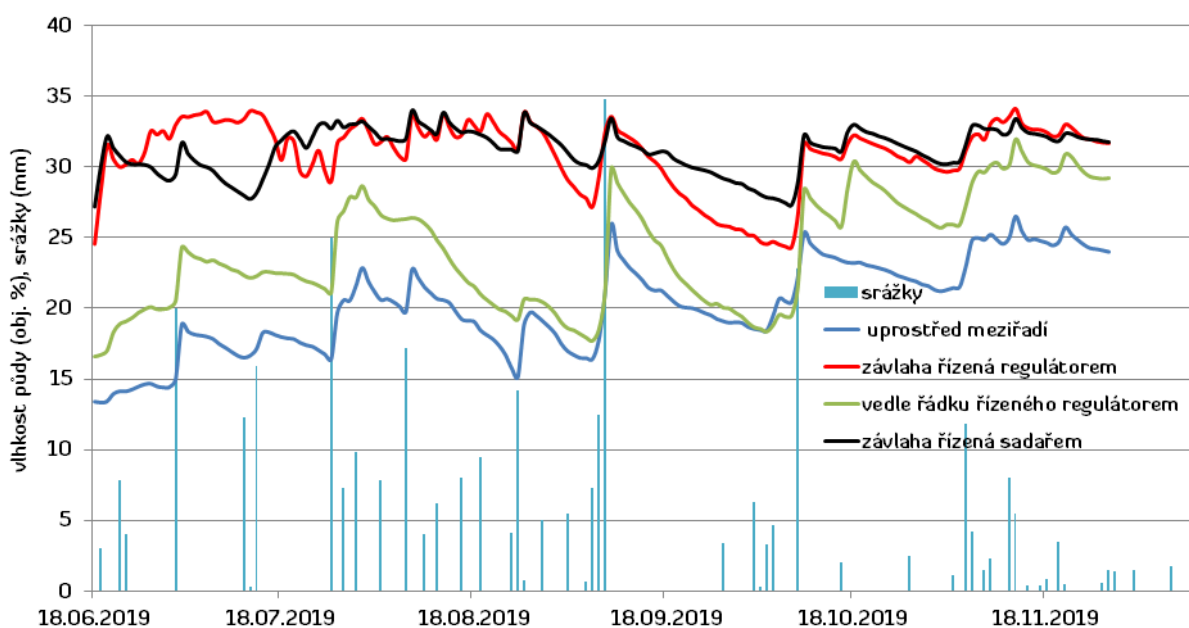


Obr. 5 Měsíční úhrny srážek v jednotlivých letech

3.2 Průběhy půdních vlhkostí

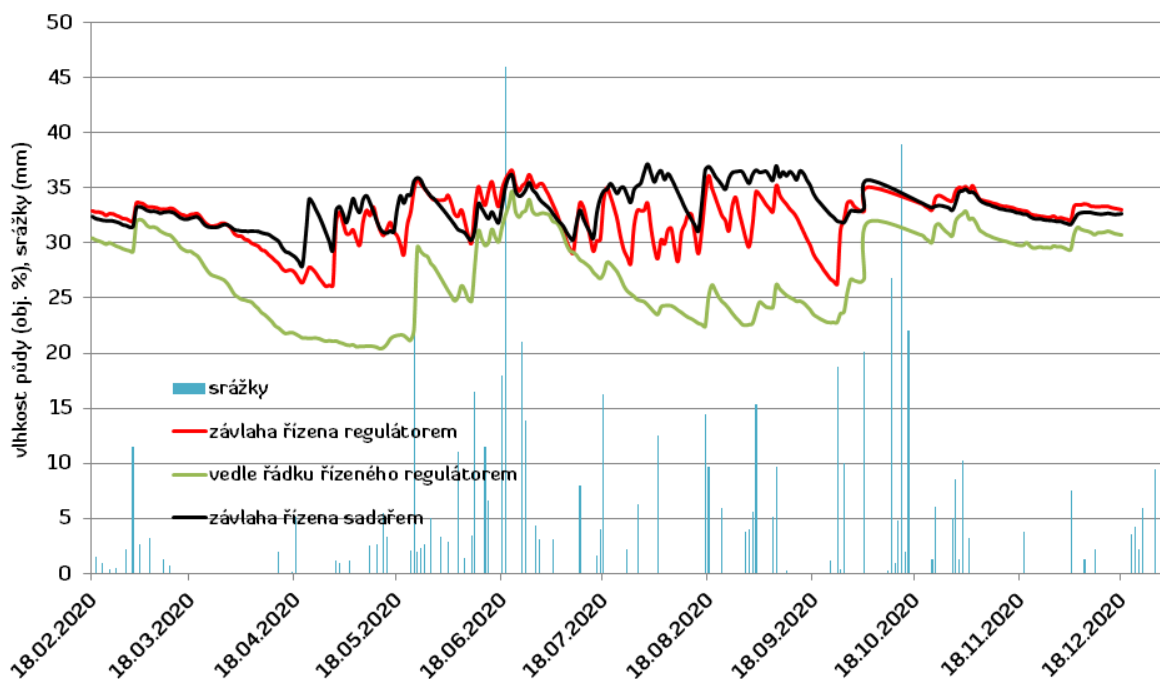
Regulátor závlahy byl nastaven tak, že v případě, kdy klesne půdní vlhkost pod 30 obj. %, provede se v nejbližším termínu, kdy časovač pustí vodu i do sousedních linek, závlaha. Pokud je vlhkost vyšší, tak se závlaha provádí pouze na vedlejších linkách. Nastavená hodnota 30 obj. % odpovídá více než 80 % využitelné vodní kapacity, takže je zde vždycky ještě dostatečná rezerva pro případ, že by se závlaha z nějakého důvodu neprovedla. Průběhy půdních vlhkostí v jednotlivých letech jsou na Obr. 6–9. Hodnota 25 obj. %, na níž vlhkost půdy klesla v polovině července 2021 v důsledku vynechání jedné anebo dvou závlahových dávek, stále ještě odpovídá cca 60 % využitelné vodní kapacity, tj. hodnotě, při níž by nemělo docházet k vodnímu stresu. Ve všech letech se půdní vlhkosti uprostřed příkmeného pásu pohybovaly na poměrně vysokých hodnotách kolem PVK a neklesaly ani v období, kdy byla závlaha vypnuta. Výjimku tvoří pouze konec roku 2021, kdy v důsledku suššího podzimu došlo k výraznějšímu poklesu vlhkostí půdy. Za povšimnutí stojí rovněž průběh vlhkostí půdy měřený snímačem umístěným 50 cm kolmo od kapkovací hadice a dalším uprostřed ozeleněného meziřadí. Zde byly půdní vlhkosti podstatně nižší než pod kapkovacími hadicemi, což dokazuje, že ani ve středně těžké půdě nedochází u kapkové závlahy k výraznému zvětšení navlaženého objemu a jeho rozšíření mimo příkmený pás. Během zimního období dochází v meziřadí k doplnění zásoby půdní vláhy ve svrchní vrstvě téměř až na hodnoty PVK, jelikož je však meziřadí ozeleněno, půdní vlhkost zde začíná klesat dříve než v příkmeném pásu a zpět na hodnoty PVK se vrací jenom po déletrvalejších vydatnějších deštích, jaké se vyskytovaly např. v červnu 2020, kdy bylo dosaženo téměř stejných vlhkostí ve všech měřených bodech. Dosažení tohoto stavu mj. svědčí i o dobré kalibraci a funkci použitých snímačů půdní vlhkosti. Nedostatek srážek v červenci a srpnu v roce 2022 je patrný zejména na nízkých hodnotách půdních vlhkostí v meziřadí a 50 cm od kapkovací linky (Obr. 9)

Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2019



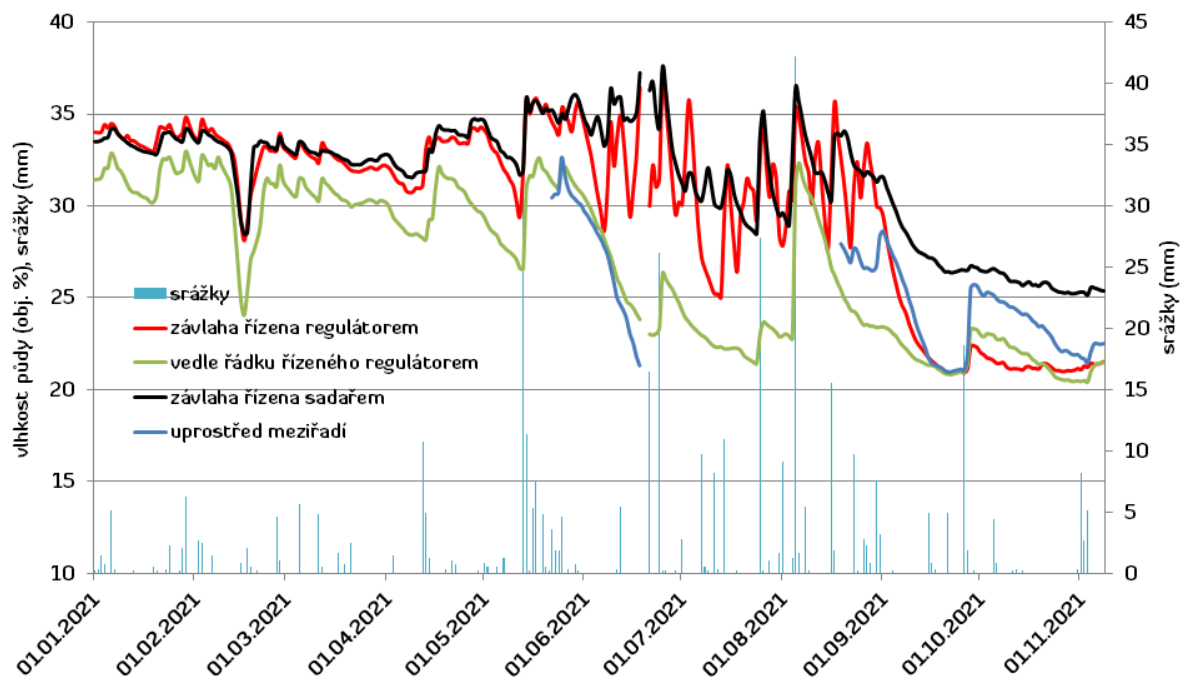
Obr. 6 Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2019

Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2020



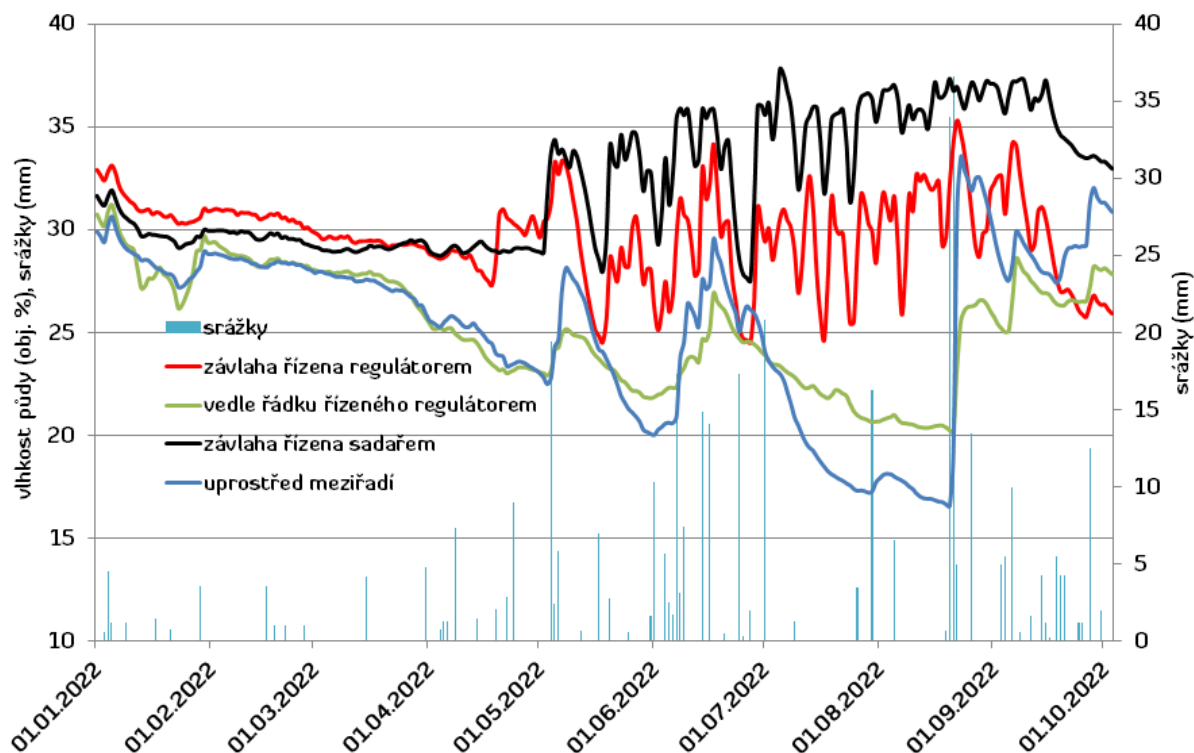
Obr. 7 Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2020

Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2021



Obr. 8 Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2021

Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2022



Obr. 9 Průběh půdních vlhkostí v pokusu se závlahou jabloní v roce 2022

3.3 Spotřeba závlahové vody

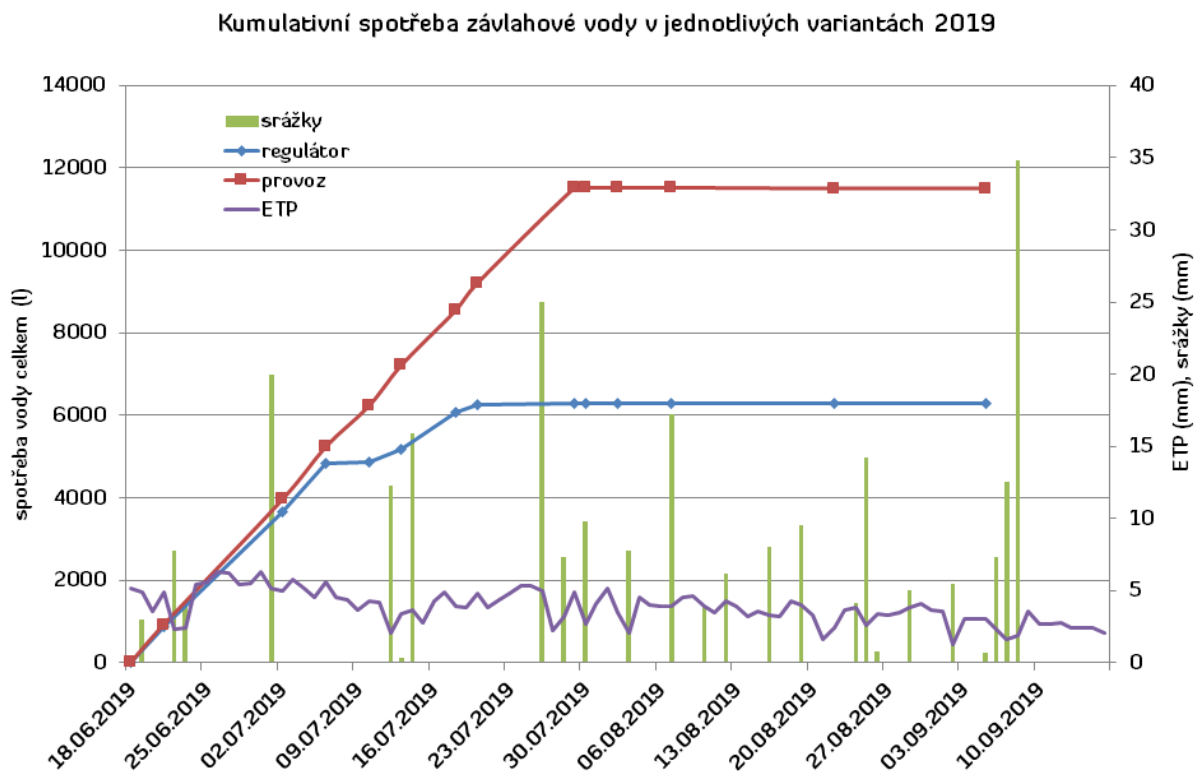
Průběh celkově spotřebované závlahové vody v průběhu jednotlivých sezón je na Obr. 9 až 12, souhrnný přehled množství dodané vody v litrech na jeden zavlažovaný strom je pak v tab. 1. V roce založení pokusu 2019 byla závlahová sezóna poměrně krátká, v průběhu července se začaly vyskytovat četnější a vydatnější srážky, takže regulátor zablokoval závlahu již 20. 7. 2019, uživatel vypnul závlahu o něco později, 29. 7. 2019. Z Obr. 9 je vidět, že závlaha podle uživatele probíhala pravidelně na základě spouštění časovým spínačem bez jakékoliv korekce, takže čára kumulativní spotřeby závlahové vody tvoří v tomto případě přímku. Naproti tomu v případě řízení závlahy regulátorem byla tato omezoována již při výskytu prvních srážek v červenci a následně ukončena. I přes poměrně krátkou dobu provádění závlahy od založení pokusu do příchodu dešťů byla použitím regulátoru ušetřena téměř polovina vody oproti řízení pouze na základě časovače. V roce 2020 (Obr. 10) probíhala závlaha po krátkou dobu v květnu, po období dešťů byla na více než jeden měsíc přerušena a opětovně spuštěna až v polovině července. Po srážkách ke konci srpna již ve variantě s regulátorem nebyla závlaha až do konce sezóny prováděna, zatímco ve variantě řízené uživatelem bylo na základě subjektivních poznatků dodáno ještě před sklizní poměrně značné množství vody. Ve variantě s regulátorem tak bylo spotřebováno pouze 32 % z množství vody dodané uživatelem. Z Obr. 7 je zřejmé, že zvýšené množství vody nevedlo k výraznějšímu zvýšení půdní vlhkosti v příkmeném pásu, tato se pohybovala mírně nad hranicí polní vodní kapacity a nelišila se příliš od půdní vlhkosti ve variantě s regulátorem.

V roce 2021 byla závlaha v důsledku chladného jara prováděna až od poslední květnové dekády a v obou variantách množství dodané závlahové vody narůstalo přibližně lineárně až do ukončení koncem srpna. Během tohoto období se vyskytovaly občas i vydatnější srážky, nevedly však ani u varianty řízené regulátorem k déletrvajícimu přerušování závlahy, v průměru však zde byla prováděna každá třetí závlaha oproti variantě řízené uživatelem. V tomto roce bylo spotřebováno největší množství závlahové vody, ve variantě řízené regulátorem se opět spotřebovala pouze třetina vody oproti variantě řízené uživatelem, přestože průběh půdních vlhkostí v obou variantách (Obr. 8) je opět velmi podobný. Září v roce 2021 bylo oproti předcházejícím letům poměrně suché a proto půdní vlhkosti začaly poměrně rychle klesat, nejvíce ve variantě řízené regulátorem, ve variantě řízené uživatelem o něco méně. Příčinou tohoto rozdílu může být buď větší množství vody nalézající se v půdním profilu ve variantě řízené uživatelem, anebo omezenější schopnost kořenů přijímat vodu v důsledku déletrvalejšího přemokření v příkmeném pásu, popřípadě kombinace obojího.

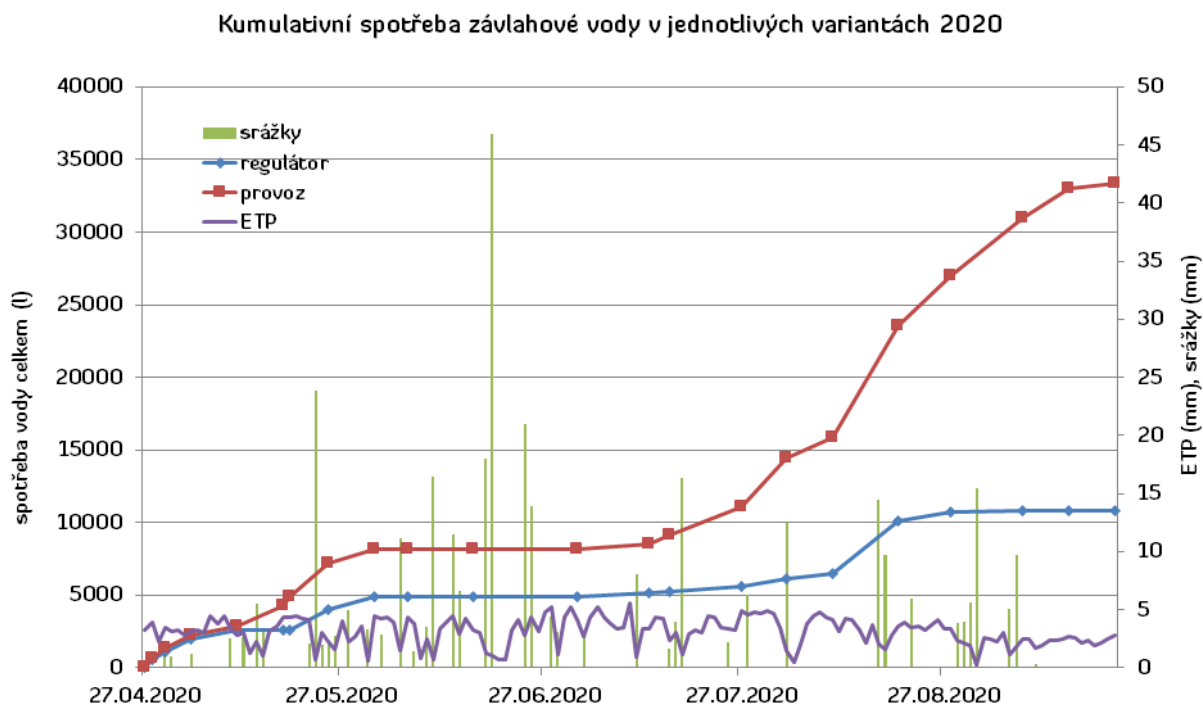
V roce 2022 byla v důsledku několikátýdenního období sucha zaznamenána největší spotřeba vody v obou závlahových variantách, zavlažovat se začalo již v polovině dubna a byla tudíž nejdélsí závlahové sezóna. Zejména v suchém srpnu sadař zvýšil frekvenci zavlažování, zřejmě kvůli obavám z nedostatku vody v kořenové zóně, čímž se zvýšila její spotřeba, jednotlivé stromy však nebyly schopny toto množství absorbovat a došlo k její ztrátě průsakem.

Tab. 1 spotřebované množství závlahové vody v l/strom v jednotlivých letech

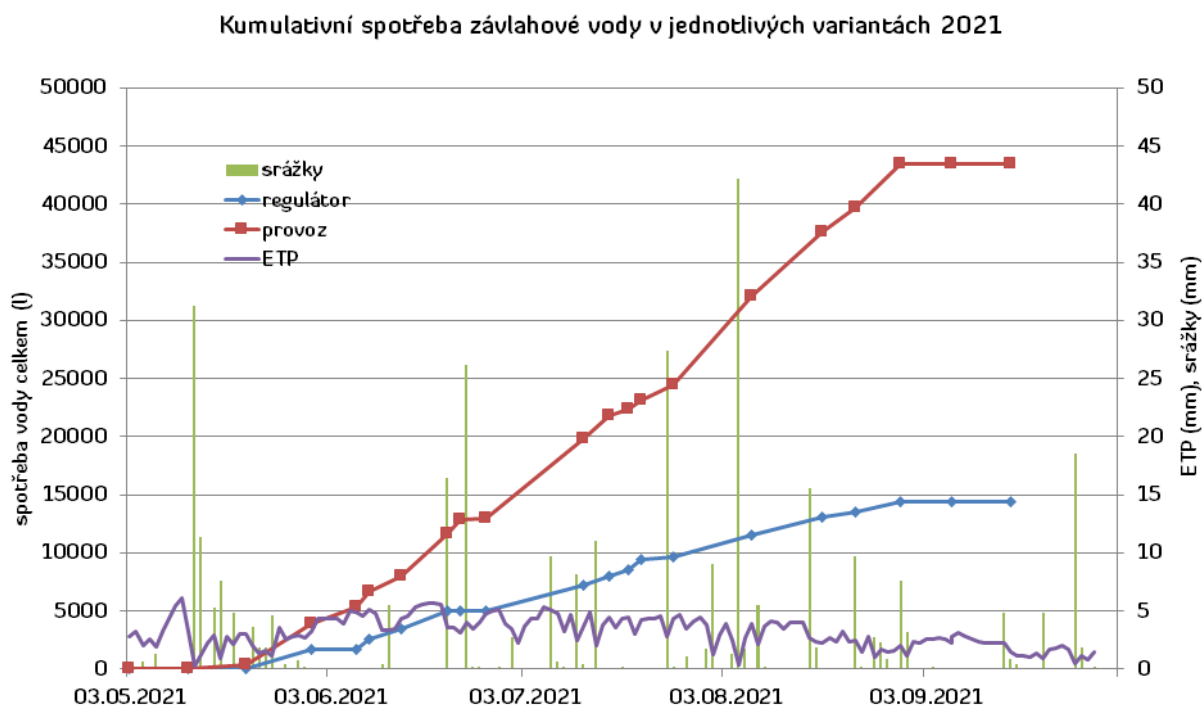
rok	regulátor	uživatel	% (uživatel = 100 %)
2019	42	77	55
2020	72	223	32
2021	96	290	33
2022	213	541	39



Obr. 10 Kumulativní spotřeba závlahové vody v jednotlivých variantách v roce 2019

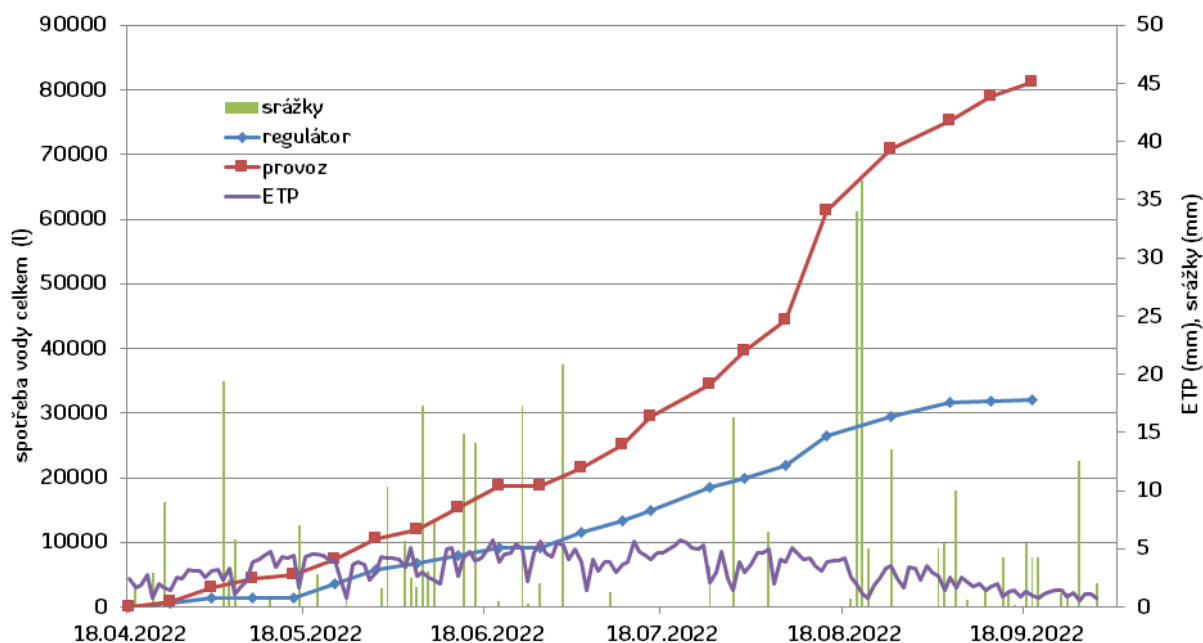


Obr. 11 Kumulativní spotřeba závlahové vody v jednotlivých variantách v roce 2020



Obr. 12 Kumulativní spotřeba závlahové vody v jednotlivých variantách v roce 2021

Kumulativní spotřeba závlahové vody v jednotlivých variantách 2022

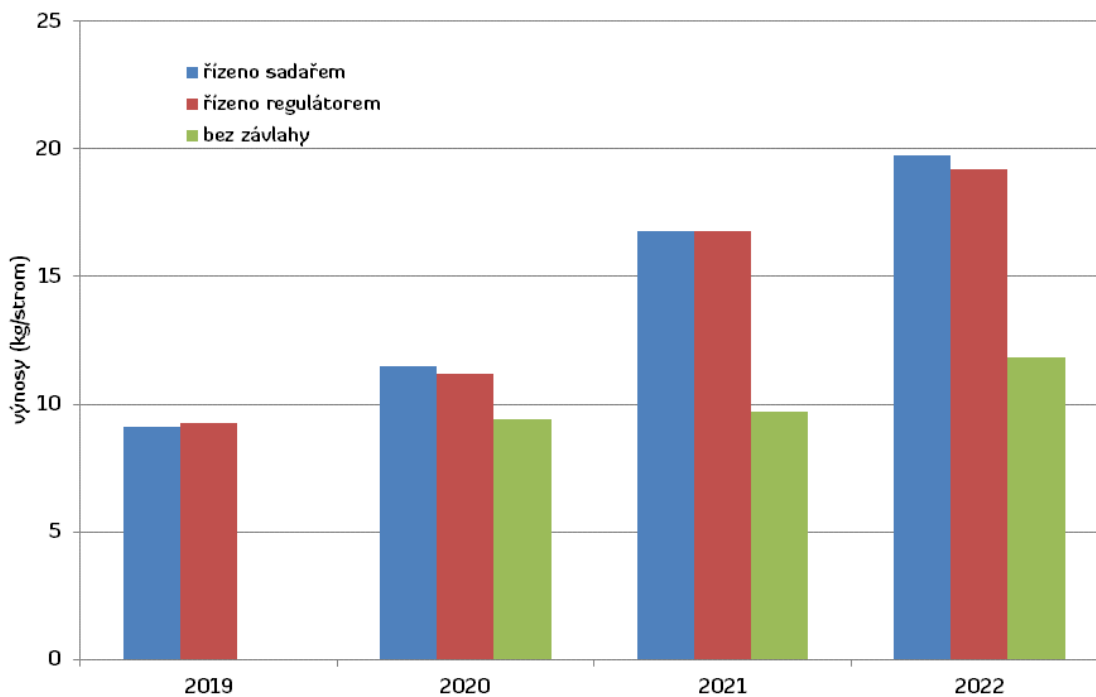


Obr. 13 Kumulativní spotřeba závlahové vody v jednotlivých variantách v roce 2021

3.4 Výnosy

Po pečlivě provedené sklizni jablek v jednotlivých variantách byly celkové výnosy v jednotlivých letech v kg/strom znázorněny na Obr. 14. Ani v jednom ze sledovaných let se neprokázalo, že by řízení závlahy na základě měření půdní vlhkosti vedlo ke snížení výnosů oproti subjektivnímu řízení uživatelem. Úspora vody se však pohybovala od 45 do 68 %. Tyto hodnoty jsou však velmi ovlivněny subjektivním přístupem *konkrétního uživatele a mohou se tudíž pohybovat v poměrně širokém rozmezí v závislosti na tom, jak konkrétní uživatel vyhodnotí potřebu závlahy, popřípadě dostupnosti vody v dané lokalitě*. V našem případě však jsou dokladem toho, že větší množství dodané vody naštěstí nevede ke snížení výnosů, maximálně k jejímu plýtvání a dalším negativním jevům, mezi něž patří nadměrné promývání půdního profilu, vymývání živin a jejich případný průsak do podzemní vody. U nezavlažované varianty došlo v roce 2020 k mírnému snížení výnosů, v roce následujícím zůstaly na stejné hodnotě, avšak oproti zavlažovaným variantám byly podstatně nižší, částečně v důsledku nedostatku vláhy, částečně i vynecháním fertigace. Jak je zřejmé z Obr. 15, během vegetačního období se vyskytovaly nízké vlhkosti v příkmeném pásu v polovině června a ke konci července. Podobně i v roce 2022 byl výnos v nezavlažované variantě podstatně nižší, avšak o něco vyšší než v předchozích dvou letech, pravděpodobně v důsledku vynechání probírky před sklizní, což bylo zřejmě i příčinou vyšších výnosů v zavlažovaných variantách, avšak s vyšším podílem nestandardních plodů.

Výnosy v jednotlivých variantách



Obr. 14 Výnosy v jednotlivých variantách

Průběh půdních vlhkostí v nezavlažované variantě v roce 2021



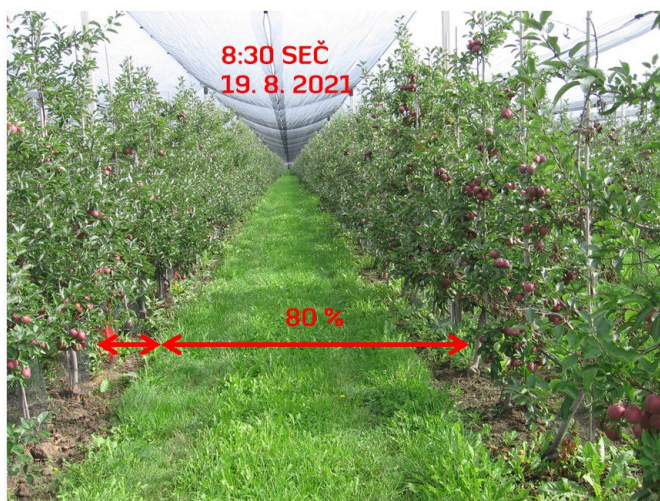
Obr. 15 Průběh půdních vlhkostí v nezavlažované variantě v roce 2021

3.5 Stanovení efektivně zastíněné plochy jabloněmi

Při výpočtech vláhové bilance je zapotřebí znát mj. i poměrnou část, jakou zaujímá pěstovaná plodina na celkové výměře pozemku. Existují velké rozdíly v zastínění plochy v rámci pěstitelských tvarů a orientací jednotlivých řad, při orientaci východ-západ je po většinu dne zastíněna větší část plochy než při orientaci sever-jih, při níž v poledních hodinách je zastíněna minimální část povrchu sadu.

V literatuře (Goodwin 2013) je v této souvislosti používán výraz „efektivní plocha zastínění“ (effective area of shade, EAS), v citované publikaci stanovená jako průměrná poměrná část zastíněné plochy pozemku měřená za slunečního počasí v poledne a 3,5 hodiny před ním a po něm.

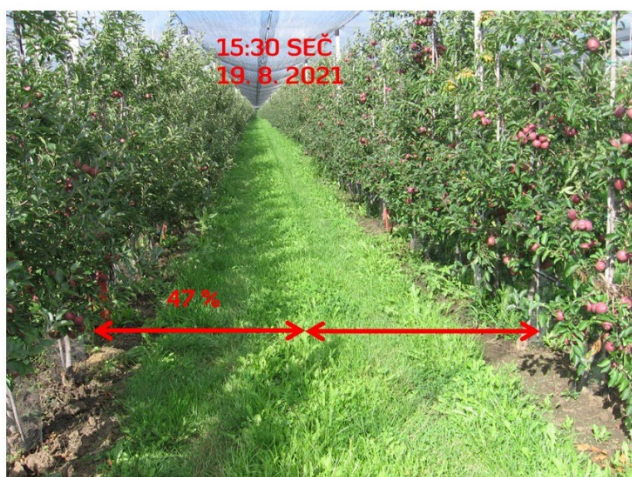
Na Obr. 16 je znázorněna poloha a velikost stínu, který vrhaly jednotlivé řady stromů v provozním pokusu v těchto termínech dne 19. 8. 2021. Průměrná hodnota poměrných částí zastínění vypočítaná z těchto tří termínů je 0,49, pokud uvažujeme přibližně 10% mezerovitost v ploše stínu, lze počítat orientačně s hodnotou EAS kolem 0,44.



V dopoledních hodinách stín pokrývá podstatnou část meziřadí a dosahuje prakticky až ke druhé řadě stromů



V poledne je zastíněn pouze úzký pás vedle jednotlivých řad, meziřadí je osvětleno téměř celé a může tak plně probíhat evapotranspirace z ozelenění mezi řadami



V odpoledních hodinách je zastíněna přibližně polovina meziřadí, evapotranspirace probíhá i na jeho částech, které byly v poledních hodinách zastíněny.

Obr. 16 Velikost zastíněné plochy meziřadí v jednotlivých částech dne

3.6 Rozbor vláhové bilance v jednotlivých letech

Pro výpočet vláhové bilance husté výsadby jabloní pod kapkovou závlahou je nutno uvažovat s těmito nejdůležitějšími komponentami:

Výdajové položky:

- transpirace jabloní
- evapotranspirace meziřadí
- zde neuvažovány – průsak do podloží, povrchový odtok

Příjmové položky:

- srážky
- kapková závlaha
- zde neuvažovány – přítok podzemní vody

Kapková závlaha – v našich podmínkách představuje doplňkový zdroj vláhky pěstovaných jabloní. S ohledem na skutečnost, že jde o lokalizovaný zdroj, který dodává vodu pouze ke kořenům stromů, nelze ve výpočtech dodané množství bilancovat oproti celé ploše sadu anebo alespoň její části, ale pouze ve vztahu k transpiraci jabloní. Jelikož je množství závlahové vody uváděno v litrech, jeví se jako logické provádět bilanční výpočty nikoliv v milimetrech, kde je u této položky poněkud problematický a ne zcela exaktně odůvodnitelný přepočít, ale rovněž jako množství dodané vody v litrech na jeden strom.

Transpirace jabloní – v plodném sadu je nejdůležitější výdajovou složkou, za podmínky dostatečného zásobení vláhou lze předpokládat, že je v lineárním vztahu s vypočítanou potenciální evapotranspirací. Při výpočtu transpirace je zapotřebí správně stanovit relativní část sadu, kterou porost zastihuje za rozdílných výšek Slunce. McClymont et al. (2009) uvádějí poměrně těsnou závislost mezi spotřebou vody stanovenou pomocí sap flow a součinem EAS.Eto. Z našich měření zastínění plochy vychází hodnota EAS 0,44, tedy přibližně necelá polovina vypočítané potenciální evapotranspirace. K podobné hodnotě dospěl ve své práci i Doko (2017) při zkoumání transpiračního koeficientu jabloňových sadů s odrůdami Cripps Pink a Golden Delicious (transpirační koeficient je stanoven jako poměr transpirace měřené pomocí sap flow a potenciální evapotranspirace) s obdobnou morfologií jako ve zkoumaném případě. V průběhu vegetačního období se tyto koeficienty pohybovaly přibližně v rozmezí 0,4–0,7, vyšší hodnoty byly naměřeny u odrůdy GD. Lze tedy zřejmě považovat hodnoty pohybující se kolem poloviny potenciální evapotranspirace v mm převedené na litry (v našem případě vynásobením 3,5 – plocha sadu přínaležející jednomu stromu) za odpovídající skutečné transpiraci porostu.

Srážky představují přirozený zdroj vláhky nejen pro pěstované plodiny. Přestože se dají poměrně jednoduše měřit, jejich zahrnutí do výpočtu vláhové bilance je oproti jiným členům vláhové bilance poměrně komplikovanější, ne všechna vláhka pronikne ke kořenům pěstovaných plodin, částečně se zachytí intercepce a část je využita na evapotranspiraci porostu meziřadí. Podobně jako u transpirace jabloní byly údaje o srážkách vztaženy na plochu sadu přínaležející jednomu stromu vynásobením jejich úhrnu v mm koeficientem 3,5.

Evapotranspirace meziřadí – jak je patrné z Obr. 16, v průběhu slunečného dne je postupně osvětlena celá plocha ozeleněného meziřadí, nejvíce v poledních hodinách, kdy zároveň intenzita slunečního záření dosahuje největších hodnot a evapotranspirace z této části sadu nabývá při dostatku vláhy v půdě značné intenzity. Logicky lze předpokládat, že pokud hodnota EAS, tj. poměrná část plochy zastíněné řadami jabloní, dosahuje hodnoty 0,43, na meziřadí připadá doplněk do celkové plochy, tj. 0,57. V případě, kdy je zavlažována celá plocha sadu postřikovači, je možno počítat vláhovou bilanci z této plochy, avšak v případě kapkové závlahy, pokud je doplňková voda dodávána pouze ke kořenům ovocných stromů, je nutno počítat zvlášť vláhovou bilanci pro pěstovanou kulturu a zvlášť pro meziřadí. Jelikož u kapkové závlahy není voda dodávána do ozelenění, může toto v případě nedostatku srážek trpět vodním stresem a omezovat evapotranspiraci, zatímco pěstovaná kultura vodním stresem trpět nemusí. Jelikož se jedná o trvalé ozelenění, v suchých jarních měsících dochází k tomu, že je vláha v meziřadí spotřebovávána přednostně, a to ještě ve zvětšené míře, neboť stromy nejsou olistěny a zastiňují plochu daleko méně než ve vegetačním období.

Pokud vyjdeme z předpokladů, že:

- v důsledku pravidelného zavlažování příkmeného pásu a udržováním půdní vlhkosti v tomto prostoru na hodnotách nad bodem snížené dostupnosti netrpí pěstovaná kultura vodním stresem
- použitá regulace závlahy na základě měřené půdní vlhkosti doplňovala vodu v navlaženém objemu tak, aby nedocházelo k jejímu průsaku mimo kořenovou zónu

Lze sestavit jednotlivé komponenty vláhové bilance tak, jak jsou zachyceny v tab. 2 pro jednotlivé ročníky, vše přepočítané na litry připadající na jeden strom. Přestože závlahové období v každém roce bylo jinak dlouhé, nejkratší bylo v roce 2019 v důsledku pozdější instalace měřící a regulační aparatury a dřívějšího nástupu vlhčího období, lze vysledovat poměrně totožné výsledky.

Průměrné denní hodnoty transpirace jednotlivých stromů se pohybují v jednotlivých letech v rozmezí cca od 4 do 6 l.den⁻¹. Množství srážek, připadající na jeden strom za jeden den, se pohybuje kolem 8 litrů, tj. více, než spotřebují stromy, je však nutno počítat se spotřebou vody v meziřadí. Závlaha se podílela na celkové transpiraci jabloní od 12 do 20 %, půdní vláhu, pocházející ze srážek, jabloně využívaly z 44 do 60 %. Zbývající přibližně polovina spadlých srážek připadla částečně na již zmíněnou intercepci a zbytek byl spotřebován ozeleněním v meziřadí. Této hodnotě přibližně odpovídá výše uvedený doplněk k EAS připadající na meziřadí, 0,57. Green a Clothier (1999) uvádějí, že vzdálenost kořenů pěstovaných jabloní s intenzivním odběrem vláhy z půdy dosahuje při plošné závlaze vzdálenosti přibližně 1,2 m od kmene stromu a zasahují 0,4 m do hloubky. Lze proto předpokládat, že i v našem případě kořeny stromů zasahují do značné části meziřadí a čerpají z něj vláhu i živiny. V opačném případě by dodané množství závlahové vody nebylo schopno saturovat transpirační požadavky jabloní.

Tab. 2 Hodnoty jednotlivých veličin za závlahové období v litrech/strom. Pro přepočet srážek a potenciální evapotranspirace, uváděných v mm, se předpokládá, že jeden strom zabírá plochu 3,5 m². Koeficient 0,88 při výpočtu transpirace vychází z předpokladu, že v husté výsadbě ve tvaru štíhlých větven pod protikroupovou sítí jsou sníženy hodnoty potenciální evapotranspirace vypočítané z údajů naměřených na volném prostranství.

Závlahové období	Počet dnů	závlaha	ETP	srážky	srážky/den	transpirace ETP*EAS*0.88	Transpirace /den	závlaha/transpirace	transpirace – závlaha / srážky
24. 6.–4. 8. 2019	41	42	657	344	8.40	249	6.07	0.17	0.60
28. 4.–22. 9. 2020	147	72	1613	1213	8.25	610	4.15	0.12	0.44
21. 5.–30. 8. 2021	101	96	1272	796	7.88	481	4.76	0.20	0.48
18. 4.–19. 9. 2022	154	213	1838	1147	7.45	696	4.52	0.31	0.42

Z Obr. 15, který znázorňuje vývoj půdních vlhkostí v meziřadí a v nezavlažovaném řádku sadu, lze odvodit ještě jeden předběžný závěr. Lze si povšimnout, že hodnoty půdních vlhkostí v řádku byly až do počátku července podstatně vyšší než v meziřadí, teprve v následujícím období za jejich hodnoty začaly postupně vzájemně přibližovat. Logicky by se dalo předpokládat, že pokud se kořeny stromů nacházejí v příkmeném pásu a jeho blízkosti, mělo by zde docházet ke zvýšené

spotřebě vody a vlhkosti půdy by měly nabývat hodnot podobných těm, jaké jsou v meziřadí, popřípadě i nižších. Z toho lze usuzovat, že přestože závlaha v této části řádků byla ukončena již na jaře předcházejícího roku, vlivem nadměrných dávek v předchozích letech a zejména pak v obdobích, kdy nebyly nutné, došlo pravděpodobně k omezení schopnosti stromů přijímat vodu, neboť jak uvádí např. Dziki et al. „nadměrný obsah vody v půdě vede k anaerobním podmínkám, což má za následek vážné poškození kořenového systému. Kořeny v podmáčených půdách přestávají růst, přestávají přijímat minerály, listy žloutnou a zůstávají malé a nakonec kořeny začnou odumírat. Kromě primárního poškození stromu a ovoce se kořenový systém stává náchylnější k infekcím“.

Spotřebou vody u intenzivně pěstovaných sadů a jejím nepřímým stanovením se zabývá celá řada autorů, přičemž vždy považují za základ takového výpočtu hodnotu potenciální evapotranspirace. Liší se však v přístupu, jak tuto hodnotu převést na aktuální evapotranspiraci, někteří uvažují s celou plochou sadu a plodinovým koeficientem, jako např. Jing a Hi (2021), kteří používají při svých výpočtech vlahové bilance pro výpočet aktuální evapotranspirace vztah

$$ET_c = K_c \cdot ET_r$$

kde K_c je plodinový koeficient (0,9) a ET_r potenciální evapotranspirace, zatímco jiní, např. Goodwin (2013) uvažují pouze část sadu zastíněnou porostem (EAS). V tomto případě se však počítá pouze transpirace porostu bez vlivu meziřadí. Ještě problematičtější je zahrnutí srážek do vlahové bilance, neboť zde je nutno kalkulovat s tzv. efektivním úhrnem srážek, tj. s množstvím vody, která se dostane ke kořenům pěstovaných plodin, v našem případě jabloní. Část této vody se zachycuje intercepční, část slouží k evapotranspiraci travního porostu v meziřadí a záleží na vlhkovém stavu povrchových vrstev půdy, jaká část srážek je využita přímo kořeny jabloní. V závislosti na způsobu obdělání meziřadí tato část může být velmi rozdílná. Je proto velmi obtížné stanovit hodnotu efektivních srážek v denním kroku.

Například Jing a Hi (2021) počítají vlahový deficit v itém dni ze vztahu

$$Wd_i = Wd_{i-1} + (P_i + I_i - ET_{c_i})$$

kde Wd_{i-1} je vlahový deficit v předcházejícím dni, P_i efektivní úhrn srážek a I_i závlahové množství dodané kapkovou závlahou přepočítané na milimetry. Autoři předpokládají, že navlažený objem zabírá svou šířkou přibližně třetinu plochy sadu, proto množství dodané závlahové vody násobí třemi. Závlaha je aplikována, jestliže vlahový deficit dosáhne hodnoty -25,4 mm, při dosažení kladných hodnot vlivem vydatnějších srážek je vlahový deficit snížen na nulu. Bohužel již není v této práci uveden postup výpočtu efektivních srážek, takže nelze tento postup ověřit.

Pravděpodobně složitost problematiky stanovení jednotlivých komponent celkové vlahové bilance při kapkové závlaze sadů vede většinu autorů k tomu, že se zabývají pouze výdajovou stránkou, tj. stanovením množství spotřebované vody, ale již nikoliv příjmovou stránkou, především ve formě srážek. V oblastech, kde jsou srážky během vegetačního období poměrně malé a hlavním zdrojem vláhy pro pěstované dřeviny je závlaha, může mít takový postup i své opodstatnění, je však nedostačující do našich podmínek, kde je naopak závlaha pouze dodatkovým zdrojem vláhy.

4. Závěr

Předložený příspěvek přináší vyhodnocení provozního pokusu se závlahou řízenou na základě kontinuálního měření půdní vlhkosti v příkmeném pásu pod kapkovačem v letech 2019–2022. Po předcházejících sušších letech tyto roky patřily spíše k vodnějším, proto je nutno dosažené výsledky považovat spíše za předběžné a orientační a pokračovat s pokusem i v následujících letech. Ukázalo se, že s řízeným dávkováním závlahové vody lze ušetřit její podstatné množství ve srovnání s řízením pomocí časovače nastaveným uživatelem. Přes tuto úsporu vody nebylo pozorováno žádné snížení výnosů ani v jednom z vyhodnocovaných let.

V rámci pokusu bylo provedeno i orientační posouzení jednotlivých komponent vlahové bilance, ukazuje se, že v případě ozelenění meziřadí stromy spotřebovávají přibližně polovinu srážkového množství v daném období.

Poděkování

Príspevek byl zpracován v rámci projektu QK1910165 „Moderní postupy v závlahovém režimu ovocných dřevin v podmínkách vodního deficitu“

Literatura:

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300.
- DOKO, Q. 2017. Quantifying the water use of apple orchards, MSc (Agric) Dissertation, University of Pretoria, Pretoria, <http://hdl.handle.net/2263/65885>
- DOMÍNGUEZ-NIÑO, J.M.; OLIVER-MANERA, J.; ARBAT, G.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J., 2020. Analysis of the variability in soil moisture measurements by capacitance sensors in a drip-irrigated orchard. *Sensors*, 20, 5100. <https://doi.org/10.3390/s20185100>
- DZIKITI, S., 2018. Quantifying water use and water productivity of high performing apple orchards of different canopy sizes in winter rainfall areas of south Africa: Report to the Water Research Commission and Hortgro Science. Water Research Commission, ISBN 1431209805, 9781431209804 272 s.
- GOODWIN, I., 2013. Determining effective area of shade in orchards and vineyards to estimate crop water requirement. Agriculture notes (Victoria. Dept. of Primary Industries); AG1383 PANDORA electronic collection
- GREEN, S., CLOTHIER, B., 1999. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil*, 206(1), 61–77. <http://www.jstor.org/stable/42949436>
- JIANG, X., HE, L., 2021. Investigation of effective irrigation strategies for high-density apple orchards in Pennsylvania. *Agronomy*.11(4):732. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040732>
- McCLYMONT, L., GOODWIN, I., WHITFIELD, D.M., GREEN, S., 2009. The relationship between grapevine sap flow, ETo and effective area of shade. *Acta Hort* 846:185–192
- MOUNZER, O.H., VERA, J., TAPIA, L.M., GARCÍA-ORELLANA, Y., CONEJERO, W., ABRISQUETA, I., ABRISQUETA, J.M., 2008. Irrigation scheduling of peach trees by continuous measurement of soil water status. *Agrociencia*, 42, 857–868.
- VERA, J., CONEJERO, W., MIRA-GARCÍA, A. B., CONESA, M. R., RUIZ-SÁNCHEZ, C., 2021. Towards irrigation automation based on dielectric soil sensors, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, DOI: 10.1080/14620316.2021.1906761

Vliv výparu z vodní hladiny na výsledky hodnocení vodohospodářské bilance v povodí Nežárky v období sucha 2015–2019

Magdalena Nesládková¹, Ivo Brejcha², Petr Vyskoč³, Adam Beran⁴

¹ Povodí Vltavy, s.p., Útvar povrchových a podzemních vod, generální ředitelství, Holečkova 3178/8 150 00, Praha, magdalena.nesladkova@pvl.cz

² Povodí Vltavy, s.p., Útvar povrchových a podzemních vod, generální ředitelství, Holečkova 3178/8 150 00, Praha, ivo.brejcha@pvl.cz

³ Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Oddělení HEIS, Podbabská 2582/30, 160 00, Praha, vyskoc@vuv.cz

⁴ Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Oddělení hydrologie, Podbabská 2582/30, 160 00, Praha, beran@vuv.cz

Abstrakt

Jak ukázaly výsledky hodnocení vodohospodářské bilance minulého roku v jednotlivých letech 2015 až 2019, povodí Nežárky projevilo zvýšenou citlivost na hydrologické sucho. Pro objasnění příčin vzniku nepříznivých bilančních stavů množství povrchových vod v kontrolním profilu Lásenice bylo Povodím Vltavy, státní podnik, zadáno Výzkumnému ústavu vodohospodářskému T. G. Masaryka, v.v.i., zpracování studie zaměřené na vyhodnocení vodohospodářské bilance současného stavu množství povrchových vod. Zásadní otázkou bylo, do jaké míry se podílelo užívání vod v povodí na vzniku nepříznivých bilančních stavů a jak zapůsobila na množství povrchových vod rozsáhlá soustava vodních nádrží v povodí.

Z výsledků podrobného rozboru evidovaných nakládání s vodami v povodí (odběry povrchových a podzemních vod, vypouštění odpadních vod a vliv akumulace vody ve vodních nádržích o objemu nad 1 mil. m³) vyplynulo, že ve sledovaném období nedošlo k výrazným změnám v rozsahu a charakteru užívání vod. Nepříznivé výsledky hodnocení bilančních stavů tedy souvisely především s nepříznivou hydrologickou situací. Nad rámec standartních postupů pro hodnocení vodohospodářské bilance současného stavu množství povrchových vod proběhl odhad velikosti výparu z volné hladiny vodních ploch v povodí. Pro povodí Nežárky po profil Lásenice byl na základě pozorování ve výparoměrné stanici Hlasivo odhadnut průměrný výpar z vodních ploch v měsících květen až říjen v letech 2015–2019 na úrovni přibližně 0,7 m³/s, kdy v extrémních měsících (nejčastěji červenec nebo srpen) se pohyboval až kolem hodnoty 1 m³/s. Průměrný průtok v profilu Lásenice v měsících květen až říjen ve sledovaném období činil přibližně 1,5 m³/s, přičemž v měsících červenec a srpen dosahoval průtok průměrně 0,8 m³/s, v srpnu roku 2018 však pouze 0,23 m³/s. Výpar z hladiny rybníků ve vegetační sezóně je tedy možné si představit jako neviditelný vodní tok proudící směrem do atmosféry. Tato voda pak chybí ve vlastním vodním toku a výsledky hodnocení bilančního stavu povodí jsou touto ztrátou výrazně ovlivněny. Na množství vody vypařené z volné hladiny, však nelze pohlížet pouze optikou „ztráty“. Tato voda při své přeměně z kapalné podoby do podoby plynné spotřebuje ohromné množství sluneční energie, která by jinak přispívala k rychlejšímu ohřívání a vysušování zemského povrchu. Pro srovnání průměrná roční ztráta vody výparem chladicího okruhu jaderné elektrárny Temelín se pohybuje obdobně v rozmezí hodnot 0,7 až 1 m³/s.

1. Úvod

Období let 2015–2019 se vyznačovalo zejména podnormálním množstvím srážkových úhrnů, nedostatkem zásoby vody ve sněhové pokrývce a nadnormálními teplotami vzduchu. V důsledku toho náleželo toto období k nejzávažnějším obdobím hydrologického sucha zaznamenaných v povodí Labe od počátků soustavného hydrologického monitoringu od druhé poloviny 19. století (Kašpárek, L. a Kožin, R., 2021).

Z výsledků jednotlivých hodnocení vodohospodářské bilance minulého kalendářního roku zpracovaných v letech 2015–2019 vyplynulo, že povodí Nežárky reagovalo na probíhající hydrologickou situaci poměrně citlivě. Bylo zde zaznamenáno celkem 8 měsíců, kdy byl bilanční stav v profilu Lásenice (ř. km. 35,3, plocha povodí 684,7 km²) vyhodnocen jako bilančně napjatý nebo bilančně pasivní. Za napjatý stav je považován průměrný měsíční průtok nižší než Q_{330d} a vyšší než Q_{355d} . Bilančně pasivní stav nastává, když průměrný měsíční měřený průtok nedosahuje hodnoty minimálního zůstatkového průtoku nebo minimálního bilančního průtoku. Minimální zůstatkový průtok v profilu Lásenice vypočtený podle Metodického pokynu MŽP č.j. ZP16/98 z dlouhodobých charakteristik m-denních průtoků pro referenční období 1981–2010 odpovídá hodnotě 0,605 m³/s. Nejvyšší deficit byl zaznamenán v srpnu roku 2018, kdy chybělo 0,376 m³/s pro dosažení průměrného měsíčního průtoku na úrovni minimálního zůstatkového průtoku v kontrolním profilu Lásenice.

Povodí Nežárky je charakteristické svojí rozsáhlou soustavou vodních nádrží. Rozloha rybníků v povodí Nežárky ke kontrolnímu profilu Lásenice zaujímá celkem 18,8 km². Vodní plochy tak tvoří 2,7 % plochy povodí Nežárky k profilu Lásenice, což je téměř třikrát vyšší hodnota, než je celorepublikový průměr. Jedná se zejména o rybochovné nádrže, které neplní funkci nadlejšování minimálních zůstatkových průtoků v období sucha. Hydrogeologicky spadá povodí Nežárky do rajonu Krystalinikum v povodí Lužnice. Pro povodí Nežárky po profil Lásenice je dále specifický vysoký podíl odvodnění zemědělských pozemků, který dosahuje 23,4% celkové plochy zájmového území. Ve srovnání s celorepublikovým průměrem je to téměř dvojnásobná hodnota. Odvodnění zemědělských pozemků může rovněž přispívat k vyšší zranitelnosti území vůči hydrologickému suchu, neboť urychluje podpovrchový odtok a ovlivňuje hydrologický režim nenasycené zóny (Novák a kol., 2016).

Pro objasnění příčin vzniku nepříznivých bilančních stavů zadal státní podnik Povodí Vltavy vypracování studie zaměřené na vyhodnocení vodohospodářské bilance současného stavu množství povrchových vod ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka (VÚV TGM, v.v.i.). Zásadní otázkou v rámci zadání studie bylo, do jaké míry se podílelo užívání vody v povodí na vzniku nepříznivých bilančních stavů v posledních letech a jak zapůsobila na velikost průtoku v kontrolním profilu rozsáhlá rybníční soustava v povodí. Pochopení těchto souvislostí je klíčové pro další činnosti správce povodí při hodnocení stavu vodních zdrojů v zájmovém povodí. Tato práce vznikla v souladu s plánem dílčího povodí Horní Vltavy schváleným v rámci druhého plánovacího cyklu, kde bylo pro převážnou většinu vodních útvarů v hodnoceném povodí (přes 70 % plochy povodí) navrženo opatření HVL205001 „Revize hospodaření s vodami v povodích nad profily s napjatou hydrologickou bilancí“.

2. Metodika a použitá data

2.1 Vodohospodářská bilance současného stavu

Vodohospodářská bilance současného stavu množství povrchových vod v dílčím povodí Horní Vltavy nad bilančně napjatým profilem Lásenice na Nežárce byla vypracována v souladu s postupy popsány v metodickém pokynu pro sestavení vodohospodářské bilance oblasti povodí Ministerstva zemědělství č.j. 25 248/2002-6000. Principem bilančního hodnocení hospodaření s vodou je porovnání požadavků na zachování minimálních zůstatkových průtoků s minimálními pozorovanými průměrnými měsíčními průtoky v kontrolních profilech. Podkladem pro vodohospodářskou bilanci je rozsáhlá databáze užívání vody, která zahrnuje odběry povrchových a podzemních vod a vypouštění vod přesahující limit 500 m³ měsíčně nebo 6000 m³ za rok a změny akumulace povrchových vod v nádržích nad 1 milion m³ od roku 1979 v měsíčním kroku. V povodí Nežárky po kontrolní profil Lásenice je pro účely vedení vodní bilance evidováno 8 vodních nádrží, jejichž celkový zásobní objem činí přibližně 7,5 mil. m³ (Tab.1). Údaje o změnách v množství akumulované vody v těchto vodních nádržích jsou k dispozici od roku 2003. Na základě uvedených podkladů je vyhodnocováno, do jaké míry užívání vod ovlivňuje přirozené průtoky v kontrolním profilu, tak v celém podélném profilu vodních toků s evidovaným užíváním vod.

Tab. 1 Základní charakteristiky vodních nádrží evidovaných pro účely vodohospodářské bilance v povodí Nežárky po kontrolní profil Lásenice

Název nádrže	Hydrologické pořadí	Celkový ovladatelný objem [mil. m ³]	Objem zásobního prostoru [mil. m ³]	Objem stálého nadržení [mil. m ³]	Zatopená plocha (zásob. obj.) [ha]
Zhejral vodárenská nádrž	1-07-03-0350-0-00	0,157	0,157	0	9,7
Karhov vodárenská nádrž	1-07-03-0350-0-00	0,386	0,288	0,098	22,76
Komorník	1-07-03-0410-1-00	1,02	0,88	0	46,9
Hejtman - Hamerský potok	1-07-03-0420-1-00	1,6	0,2	1,4	69
Krvavý rybník	1-07-03-0430-1-00	2	1,26	0	126
Ratmírovský rybník	1-07-03-0440-1-00	1,36	1,3	0	78,1
Mutina	1-07-03-0470-0-00	1,447	1,447	0	62,04
Pěněnský rybník (Dřevo)	1-07-03-0520-0-00	1,35	0,677	0	52,9
	Σ	9,32	6,209	1,498	467,4

2.2 Odvození velikosti výparu z vodní hladiny

Nad rámec standartních postupů pro hodnocení vodohospodářské bilance současného stavu proběhl odhad velikosti výparu z vodních ploch s uplatněním nejjednodušších empirických vztahů, jež vyžadují pouze měřené hodnoty teploty vzduchu. Vztahy byly vybrány s ohledem na jejich schopnost co nejlépe vystihnout pozorovanou skutečnost. Zvolené vztahy byly již dříve ověřeny pro odhad výparu z vodní hladiny v povodí Lužnice (Beran a kol., 2019). Vzorce s využitím globální sluneční radiace, teploty vody, případně jejich kombinace, dávají přesnější výsledky, nicméně tyto měřené veličiny nebyly k dispozici. Pro výpočet výparu z vodní hladiny v povodí Nežárky byly uplatněny teploty vzduchu odvozené pro plochu povodí k profilu Lásenice za období 1981–2019 v měsíčním kroku na základě pozorování ve staniční síti ČHMÚ, dále byla využita rovněž přímá pozorování výparu z vodní hladiny ve stanici Hlasivo v měsíčním kroku (Vyskoč a kol., 2022).

Rovnice Berana a kol. (rov. 1) byla odvozena na základě závislosti pozorovaného výparu a teploty vzduchu ve výparoměrné stanici Hlasivo za období 1957–2018. Výparoměrná stanice Hlasivo je provozována VÚV TGM, v.v.i. a nachází se v sousedním povodí Lužnice. Dále byla použita rov. 2 převzatá z práce J. Váši odvozená v rámci starších výzkumných prací rovněž ve VÚV TGM, v.v.i. (Váša J., 1968).

$$\text{Rov. 1:} \quad \text{VVH} = 0,0824 \times T_{\text{vzd}}^{1,289}$$

$$\text{Rov.2:} \quad \text{VVH} = 10^{(0,0452 \cdot T_{\text{vzd}} - 0,204)}$$

VVH je výpar z vodní hladiny za den [mm]

T_{vzd} průměrná měsíční teplota vzduchu [°C]

3. Výsledky

3.1 Vliv evidovaných odběrů a vypouštění na průtok v kontrolním profilu Lásenice

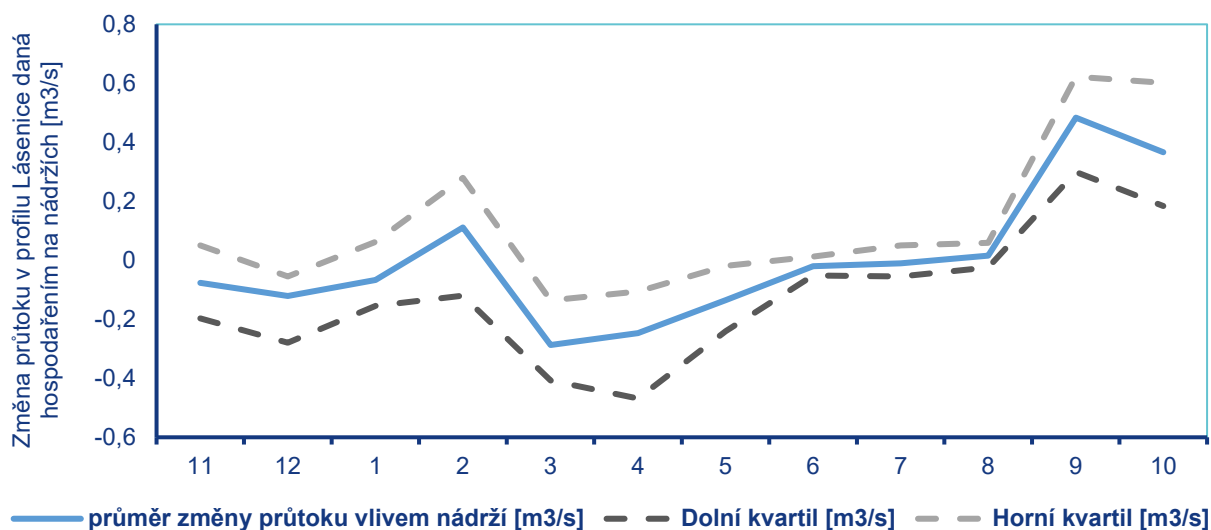
Z výsledků podrobného rozboru evidovaných nakládání s vodami v povodí (odběry povrchových a podzemních vod, vypouštění odpadních vod a vliv akumulace vody v nádržích evidovaných pro účely vodní bilance) vyplynulo, že ve

sledovaném období nedošlo od roku 2003 k výrazným změnám v rozsahu a charakteru užívání vod (Vyskoč a kol., 2022). Sledovaný profil Lásenice je dlouhodobě významně dotován vypouštěním přečištěných odpadních vod z čistírny odpadních vod v Jindřichově Hradci přes přítok Řečička, který ústí do Nežárky v ř. km. 41,9. Tato voda však pochází nejen z lokálních zdrojů podzemní vody, ale určitý podíl pochází ze sousedních povodí (Třeboňsko, vodárenská nádrž Římov na Malši). Celkové odběry povrchových vod hlášené ke kontrolnímu profilu Lásenice činí přibližně 25 l/s, celkové odběry podzemních vod se pohybují kolem hodnoty 30 l/s, celková vypouštění včetně ČOV Jindřichův Hradec se pohybují v rozsahu 140–190 l/s. Navýšení průtoku v profilu Lásenice dané rozdílem odběrů a vypouštění činí průměrně v jednotlivých měsících v roce 120–140 l/s. Odběry a vypouštění nevykazují zřetelnou sezonalitu.

3.2 Vliv evidovaných změn akumulace vody ve vodních nádržích na průtok v kontrolním profilu Lásenice

Ovlivnění průtoku v kontrolním profilu Lásenice dané hospodařením na rybníční soustavě naopak vykazuje svůj charakteristický roční průběh. Hodnota ovlivnění průtoku vlivem změny množství akumulované vody v nádržích v ročním chodu je vykreslena na obrázku 1. Zde je patrné, že napouštění rybníků probíhá dominantně od března do května. Hospodaření na vodních nádržích evidovaných pro účely vodní bilance v profilu Lásenice ovlivňuje v těchto jarních měsících hodnotu průtoku poklesem přibližně o 200 l/s. K vypouštění rybníků dochází zejména v září a v říjnu, kdy probíhají podzimní výlovy. Navýšení průtoků v profilu Lásenice vlivem vypouštění v těchto měsících lze odhadovat přibližně na 400 l/s (při uvážení pouze nádrží evidovaných pro účely vodní bilance). Pozitivní ovlivnění průtoků v profilu Lásenice lze zaznamenat ještě v měsíci únoru v souvislosti s jarními výlovy. V únoru je průtok v Nežárce v dlouhodobém průměru navýšen přibližně o 100 l/s. V letních měsících zpravidla nedochází ke změnám množství akumulovaných vod v rybníční soustavě a průtok není přímo změnami úrovně hladiny vody v nádržích ovlivněn. Dochází však ke ztrátám v množství akumulované vody v souvislosti s výparem z vodní hladiny. Ztráta vody výparem nelze jednoznačně vyhodnotit na základě evidovaných údajů o užívání vody, neboť jsou tyto ztráty průběžně doplňovány přítokem. Ztráty vody výparem je tedy nutno odvodit na základě empirických vztahů ze známé teploty vzduchu.

Vzhledem k tomu, že počet rybníků a jejich celková rozloha v zájmovém území se v posledních letech zásadně nezměnily a způsob hospodaření na rybníční soustavě rovněž nedoznal zásadních změn, je možné konstatovat, že nepříznivé výsledky bilančního hodnocení v letech 2015–2019 souvisejí zejména se změnami v úhrnu srážek a se změnami ve výparu z vodní hladiny.



Obr. 1 Změna průtoku v kontrolním profilu Lásenice způsobená hospodařením na vodních nádržích (evidovaných pro účely vodní bilance), bez započtení výparu z vodní hladiny – data za období 2003–2020.

3.3 Vliv výparu z vodní hladiny na průtok v kontrolním profilu Lásenice

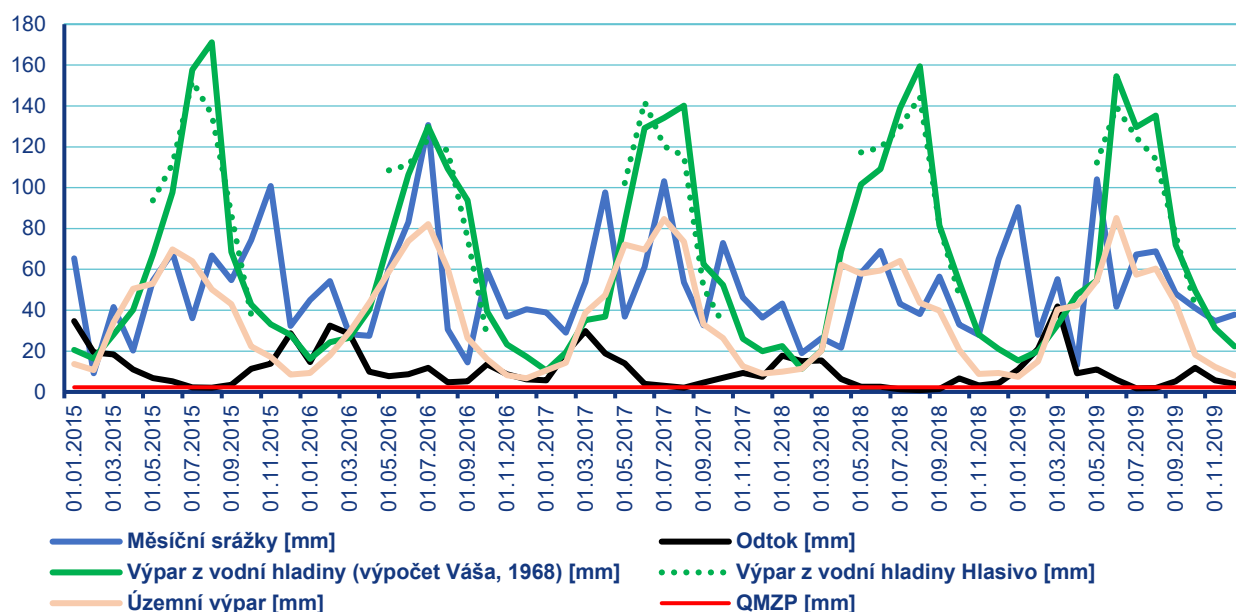
Pro povodí Nežárky po profil Lásenice byl na základě pozorování ve výparoměrné stanici Hlasivo odhadnut průměrný výpar ze všech vodních ploch (18,8 km²) v měsících květen až říjen v letech 2015–2019 na úrovni přibližně 0,7 m³/s, kdy v extrémních měsících (nejčastěji červenec nebo srpen) se pohyboval až kolem hodnoty 1 m³/s. Pro porovnání uvedme,

že průměrný pozorovaný průtok v profilu Lásenice v měsících květen až říjen v tomto období činil 1,48 m³/s, přičemž v měsících červenec a srpen dosahoval průtok průměrně 0,8 m³/s, v srpnu roku 2018 však bylo naměřeno pouze 0,23 m³/s.

Z výsledků VÚV TGM, v.v.i., získaných na základě uplatnění empirických vzorců vyplynulo, že během nadprůměrně teplých let 2015–2019 byl výpar z vodní hladiny během vegetační sezóny (květen až říjen) vyšší přibližně o 60 respektive 90 mm než během referenčního období 1981–2010 v závislosti na použité rovnici. Takový rozdíl odpovídá při dané ploše vodních nádrží poklesu průtoku vlivem zvýšeného výparu z vodní hladiny v měsících květen až říjen průměrně o 70 respektive 100 l/s.

Jednotlivé složky hydrologické bilance včetně veličiny výparu z vodní hladiny v měsíčním kroku pro sledované období jsou vykresleny na obrázku 2. Průměrné měsíční hodnoty složek hydrologické bilance byly převzaty z veřejného informačního systému HAMR (www.hamr.chmi.cz). Na grafu je rovněž znázorněna hodnota minimálního zůstatkového průtoku převedená na minimální odtok. Z grafu je patrné, že minima odtoku jsou pozorována zejména v době, kdy srážky právě odpovídají hodnotě územního výparu a zároveň jsou dosahována maxima výparu z vodní hladiny. Výpar z vodní hladiny je během vegetační sezóny až dvakrát vyšší než modelovaná hodnota územního výparu. Z grafu je rovněž patrné, že hydrologické sucho (průtok nižší než Q_{MZP}) bylo v daném období ukončeno zpravidla v měsíci říjnu. Navýšení průtoků v říjnu souvisí jednak s příchodem podzimních srážek, v některých letech však pravděpodobně spíše s probíhajícími podzimními výlovy (roky 2018 a 2019).

Změny vybraných veličin ve srovnání s výsledkem modelování hydrologické bilance pro referenční období 1981–2010 shrnuje tabulka 2. Z výsledků vyplývá, že v období let 2015–2019 dosahoval srážkový úhrn přibližně 80-ti % dlouhodobého průměru za referenční období. Modelovaná veličina územního výparu i přes vyšší teplotu vzduchu doznala snížení přibližně o 5 %, neboť nebylo více vody v půdní zásobě k dispozici. Naopak odvozený průměrný výpar z vodní hladiny vzrostl o 13 resp. 17 %. Průměrné roční průtoky za sledované období 2015–2019 se pohybovali na úrovni 36 % až 73 % dlouhodobého měřeného ročního průtoku $Q_a=4,7$ m³/s v profilu Lásenice.



Obr. 2 Porovnání jednotlivých složek hydrologické bilance v profilu Lásenice na Nežárce v období hydrologického sucha 2015–2019, data zdroj: HAMR (chmi.cz) a VÚV TGM, v.v.i.

Tab. 2 Porovnání ročních průměrů vybraných složek hydrologické bilance pro referenční období 1981–2010 a období sucha 2015–2019

	Srážky [mm]	Odtok [mm]	Územní výpar [mm]	Výpar z vodní hladiny květen–říjen (Beran a kol. 2019) [mm]	Výpar z vodní hladiny květen–říjen (Váša, 1968) [mm]
1981–2010	726	215	466	449	512
2015–2019	606	128	443	507	600

4. Diskuze

Je evidentní, že dominantní vliv na snížení průtoku v profilu Lásenice měl především několikaletý pokles srážkových úhrnů, který se týkal celé plochy zájmového území. Odhad snížení průtoků při zohlednění pouze poklesu srážek by byl možný pouze pomocí hydrologického modelování. Takový odhad však nebyl součástí zadání prezentované studie.

Dále je nutno uvést, že hodnota změny průtoku hospodařením na vodních nádržích v profilu Lásenice je zatížena značnou nejistotou, neboť pro účely vodní bilance je evidováno pouze 8 vodních nádrží. Plocha těchto nádrží představuje pouze 25 % celkové plochy vodních nádrží v zájmovém území. Je ale pravděpodobné, že objemy vody v ostatních neevidovaných nádržích budou řádově nižší než objemy vody akumulované v nádržích evidovaných. Bohužel podrobnější informace o objemech ostatních nádrží zatím nejsou k dispozici, a tudíž nelze odhady ovlivnění průtoků nádržemi proporcionalně upravit.

5. Závěr

Z výsledků studie Vyskoče a kol. vyplývá, že nepříznivé bilanční stavy v profilu Lásenice v povodí Nežárky vyhodnocené v letech 2015–2019 souvisí zejména s nepříznivou hydrologickou situací. Došlo k poklesu průměrných ročních srážek o 120 mm v ročním průměru (o 20 % ročního úhrnu za referenční období 1981–2010) a dále vzrostl výpar z vodní hladiny v souvislosti s rostoucí teplotou vzduchu v podobném rozsahu. Z výsledků studie vyplývá, že v povodích s významným zastoupením vodních ploch není během vegetačního období veličina výparu z vodní hladiny zanedbatelná a během sledovaného období dosahovala až dvojnásobku odhadovaného územního výparu. Odhadovaná ztráta vody výparem z vodních ploch na sledovaném území odpovídala polovině pozorovaného průměrného průtoku ve vegetačním období. Výpar z hladiny rybníků ve vegetační sezóně je tedy možné si představit jako neviditelnou řeku proudící směrem do atmosféry. Tato voda pak chybí ve vlastním vodním toku a výsledky hodnocení bilančního stavu povodí jsou touto ztrátou výrazně ovlivněny. Na množství vody vypařené z vodní hladiny, však nelze pohlížet pouze optikou „ztráty“. Tato voda při své přeměně z kapalné podoby do podoby plynné spotřebuje ohromné množství sluneční energie, která by jinak přispívala k rychlejšímu ohřívání zemského povrchu. Pro srovnání průměrná roční ztráta vody výparem chladicího okruhu jaderné elektrárny Temelín se pohybuje obdobně v rozmezí hodnot 0,7 až 1 m³/s.

Popsané závěry je třeba vzít v potaz při navrhování opatření pro zvládnutí sucha v dané oblasti a při zpracovávání souvisejících koncepčních dokumentů. Pokud má být uvažováno o nové vodní nádrži, která by mohla nadleřšovat průtoky ve vodním toku, je třeba v rámci vodohospodářského řešení nádrže uvažovat s probíhajícími změnami hydrologických a klimatických poměrů a započítat vliv rostoucího výparu z vodní hladiny do celkové bilance vodní nádrže. Nová vodní nádrž zároveň nesmí zařadit do svých účelů intenzivní chov ryb, který by mohl omezit využití zásobního prostoru v letním období. V případě povodí Nežárky je k využití hájený profil v lokalitě Bednárec na vodním toku Žirovnice. V souvislosti s pozorovaným vývojem hydrologických poměrů je pravděpodobné, že realizací nových jednoúčelových nádrží (rybochovných nebo závlahových) může dojít ke snížení zabezpečení minimálních zůstatkových průtoků v profilech ležících níže po toku.

Potenciálně efektivní opatření vhodná pro zvýšení retenční schopnosti povodí by mohla souviset s úpravou funkcí odvodňovacích zařízení na zemědělské půdě např. pomocí revitalizačních opatření na hlavních a přílehlých podrobných odvodňovacích zařízeních (Zajíček a kol., 2021). Přínosná by mohla být rovněž opatření v ploše povodí navrhovaná primárně s cílem ochrany vod před plošným znečištěním ze zemědělského hospodaření. Povodí IV. řádu vhodná pro prioritní realizaci opatření tohoto typu byla identifikována již v rámci druhého plánovacího cyklu pro celé povodí Vltavy (Novák a kol., 2016). S účinností těchto opatření v praxi však dosud není dostatek zkušeností.

Poděkování

Studie „Vodohospodářská bilance současného stavu množství povrchových vod v dílčím povodí Horní Vltavy nad bilančně napjatým profilem Lásenice na Nežárce“ byla financována z prostředků Povodí Vltavy, státní podnik.

Literatura

BERAN, A., KAŠPÁREK, L., VIZINA, A., ŠUHÁJKOVÁ, P., 2019. Ztráty vody výparem z volné hladiny. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, roč. 61, č. 4, str. 12–18. ISSN 0322-8916.

KAŠPÁREK, L., KOŽÍN, R., 2021. Extrémní víceletá hydrologická sucha v povodí Labe. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, roč. 63, č. 3, str. 28–32. ISSN 0322-8916

NOVÁK, P. a kol. 2016. Příprava listu opatření typu a lokalit plošného zemědělského znečištění pro plány dílčích povodí, certifikovaná metodika, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., České vysoké učení technické, Sweco Hydroprojekt, a.s., Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, v. v. i. a Povodí Vltavy, s.p.

VÁŠA, J., 1968. Přímé měření výparu z volné vodní hladiny, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka

VYSKOČ, P., MAKOVCOVÁ, M., DLABAL, J., BERAN, A. a kol. 2022. Vodohospodářská bilance současného stavu množství povrchových vod v dílčím povodí Horní Vltavy nad bilančně napjatým profilem Lásenice na Nežárce, závěrečná zpráva, č. sml. Objednatele PVL-2121/2021/SML, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, v. v. i.

ZAJÍČEK, A., SYCHRA, L., VYBÍRAL, T., HEJDUK, T., ČMELÍK, M., FUČÍK, P. a KAPLICKÁ M. 2021. Návrhy revitalizačních opatření na hlavních a přilehlých podrobných odvodňovacích zařízeních, certifikovaná metodika, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., ISBN 978-80-88323-54-9.

Klíčová slova: výpar z vodní hladiny, vodohospodářská bilance, vliv malých vodních nádrží na režim průtoků

Retenční prvky a jejich vztah k prostorové distribuci zamokřených ploch v krajině

Patrik Netopil¹, Renata Pavelková², Bořivoj Šarapatka¹, Marek Bednář¹

¹ Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, katedra ekologie a životního prostředí, Šlechtitelů 27, 783 71 Olomouc-Holice, patrik.netopil@upol.cz, borivoj.sarapatka@upol.cz, marek.bednar@upol.cz

² Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, katedra geografie, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc, r.pavelkova@upol.cz

Abstrakt

Príspevek se obecně zabývá problematikou vody v krajině. Konkrétně analyzuje vybrané retenční prvky a zamokřené plochy v zájmových subpovodích v JV části Jihomoravského kraje. Zamokření těchto ploch má různé příčiny (fyzickogeografické faktory), např. morfologie terénu, geologické a půdní poměry, hladina podzemní vody, odvodnění půdy atp. Text poskytuje prostorový pohled na rozložení těchto ploch v krajině jako potenciální budoucí plochy (retenční prvky) pro rozvoj adaptačních opatření pro retenci vody v krajině, zejména s ohledem na probíhající klimatické změny a hydrometeorologické extrémy (sucho a povodně). Cílem příspěvku byla identifikace zájmových ploch (ohnisek) pro rozvoj nových, případně i pro ochranu stávajících retenčních prvků v krajině, a to i s ohledem na nově budovaná (plánovaná) opatření v rámci komplexních pozemkových úprav (KPÚ).

Základními daty byly archivní mapové podklady (vojenská mapování), ortofota, a prvky pozemkových úprav. Celkem bylo identifikováno přes 1700 zamokřených ploch (přes 1900 ha), které často nabývají charakteru periodických (efemerních) mokřadů. V současnosti mají minimální či omezenou produkční funkci, ale jsou zároveň velmi cenné z mimoprodukčního hlediska (retence vody, zpomalení odtoku, centra biodiverzity a genofundová banka).

1. Úvod

Príspevek se zabývá aktuální problematikou retence vody, a to zejména v zemědělské krajině. Mapuje a vyhodnocuje hlavní retenční prvky v zájmovém území, kterými jsou malé vodní nádrže (rybníky), zamokřené vodní plochy a bažiny (močály). Konkrétně se zabývá analýzou historických vodních ploch (zejména rybníků) a ploch zamokřených ve vybraných dílčích subpovodích (IV. řádu) v jihovýchodní části Jihomoravského kraje (asi 1300 km²).

Zamokření těchto ploch má různé příčiny. Obecně lze však říci, že hlavní příčinou jsou místní fyzickogeografické faktory jako morfologie terénu, geologické a půdní poměry, hladina podzemní vody atp. (Pavelková et al. 2014). Text poskytuje prostorový pohled na rozložení těchto ploch v krajině jako potenciální budoucí plochy pro rozvoj adaptačních opatření pro retenci vody, zejména s ohledem na probíhající klimatické změny a hydrometeorologické extrémy – sucho a povodně (Brázdil 2002).

Část příspěvku se také zabývá prostorovým rozložením současných vodních ploch a mokřadů (bažin). Všechny uvedené typy krajinných prvků mají retenční funkci. Cílem příspěvku byla identifikace zájmových ploch (ohnisek) pro rozvoj nových, případně i pro ochranu stávajících retenčních prvků v krajině, a to i s ohledem na nově realizovaná (plánovaná) opatření v rámci pozemkových úprav (jednoduchých a komplexních pozemkových úprav – JPÚ/KoPÚ).

2. Metodika

Základními archivními podkladovými daty pro hodnocení historických vodních ploch bylo 1. a 2. vojenské mapování (1. a 2. VM) a již existující geodatabáze zpracovaná v rámci předchozího již ukončeného projektu NAZV QJ1220233 Hodnocení území na bývalých rybníčních soustavách (vodních plochách) s cílem posílení udržitelného hospodaření s vodními a půdními zdroji v ČR.

Pro aktualizaci stávajících vrstev vodních ploch, bažin (močálů) a vymezení zamokřených ploch ve vybraných subpovodích byla zásadní archivní a aktuální ortofota ČR. Konkrétně se jednalo o veřejně dostupné aktuální a historické ortofotomapy z 9 časových období, přesněji z let 2000, 2003, 2006, 2009, 2012, 2014, 2016, 2018 a 2020, které jsou dostupné formou WMS služby Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK 2022).

Samotná vizuální identifikace a ruční vektorizace (digitalizace) retenčních prvků probíhala v softwarovém prostředí ArcGIS. Dále byly využity i vrstvy A04 vodní toky, A05 vodní nádrže a A06 bažiny a močály z Katalogu dat a služeb Hydroekologického informačního systému Výzkumného ústavu vodohospodářského TGM (VÚV TGM, HEIS 2022), které byly aktualizovány na základě současné ortofotomapy z roku 2020. V rozsahu zájmového území byly identifikovány i prvky (stavby) pozemkových úprav (navržené i realizované), které jsou také veřejně dostupné ve formě geodatabáze na geoportálu Státního pozemkového úřadu (SPÚ 2022).

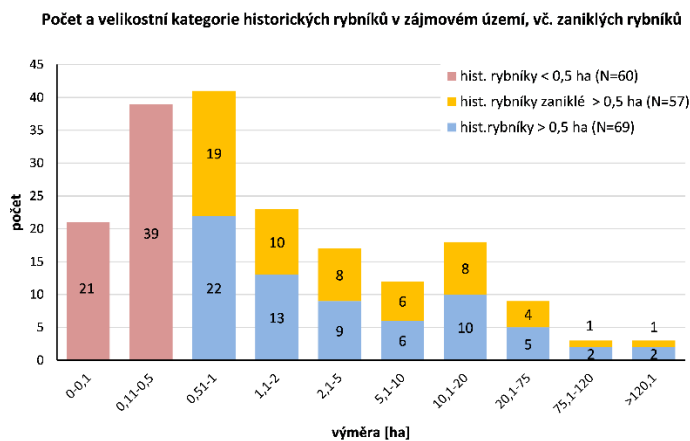
3. Výsledky

Nejprve byla provedena základní statistika (analýza četnosti a velikosti) zájmových retenčních prvků (historické rybníky, zamokřené, malé vodní a bažinné plochy). Z převzaté databáze historických rybníků bylo vybráno v rozsahu zájmového území 69 historických rybníků > 0,5 ha a 60 < 0,5 ha, které byly identifikovány na historických mapách 2. VM. Celkem se tedy jednalo o 129 historických rybníků o ploše 1306 ha (1294 ha rybníků > 0,5 ha a 12 ha rybníků < 0,5 ha), viz tab. 1 a obr. 1. Rybníky s výměrou pod 0,5 ha představují jen 0,9 % celkové rozlohy historických rybníků v zájmové oblasti a jsou v drtivě většině případů soustředěny do intravilánu obcí.

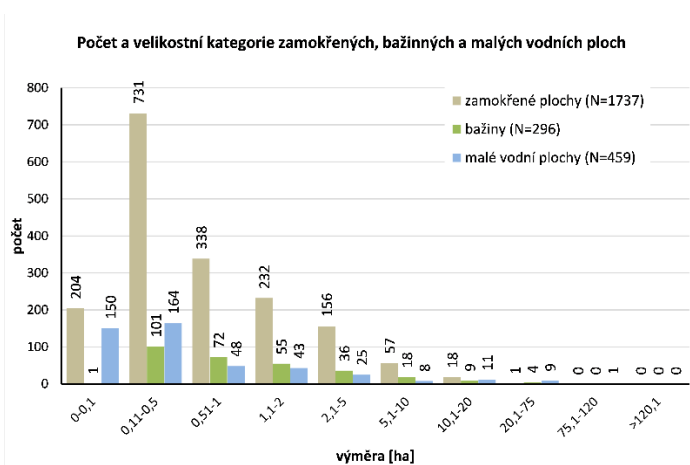
Tab. 1 Přehledová tabulka počtu a plochy hlavních retenčních prvků v zájmovém území.

typ retenčního prvku	počet	ha
zamokřené plochy	1737	1924
vodní nádrže	459	842
bažiny/močály	296	646
hist. rybníky – celkem 1. VM	134	–
hist. rybníky – celkem 2. VM	129	1306
• hist. rybníky – celkem < 0,5 ha	60	12
• hist. rybníky – celkem > 0,5 ha	69	1294
- hist. rybníky - zaniklé > 0,5 ha	57	859

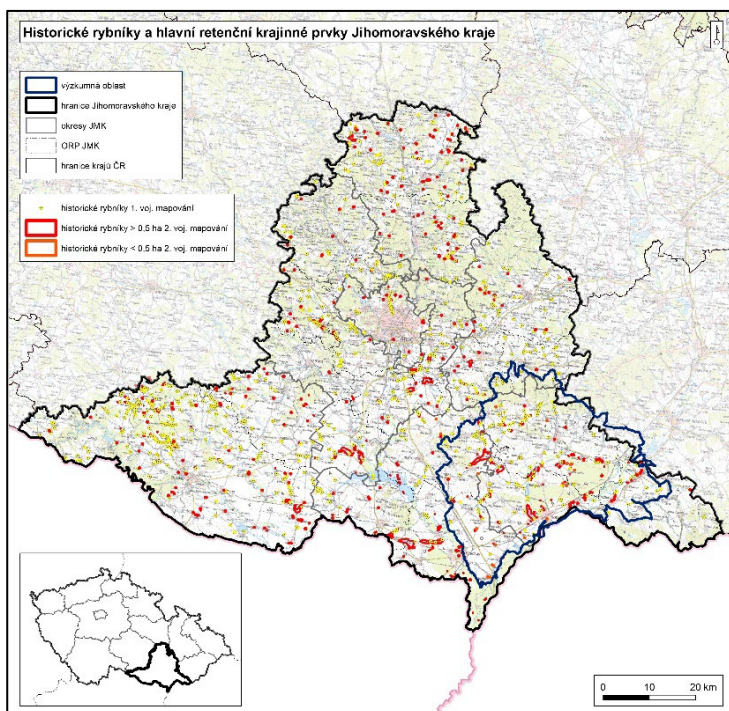
Z celkového počtu 69 historických rybníků větších než 0,5 ha do současnosti zaniklo z různých důvodů 57 rybníků o ploše 859 ha (82 % počtu a 66 % rozlohy historických rybníků). Druhým převzatým zdrojem dat byla opět vektorová geodatabáze ve formě bodové vrstvy rybníků identifikovaných na mapách 1. VM. Zde se jednalo o celkem 134 historických rybníků. Počet historických rybníků se tedy mezi 1. a 2. VM, tj. za více než 70 let, snížil jen o 5 rybníků. Dále bylo identifikováno v zájmovém území 1737 zamokřených ploch o rozloze 1924 ha, 469 vodních ploch o rozloze 842 ha a 269 ploch bažin s výměrou 646 ha, blíže viz obr. tabulka 1 a obr. 2, prostorové rozložení viz obr. 3a a 3b.



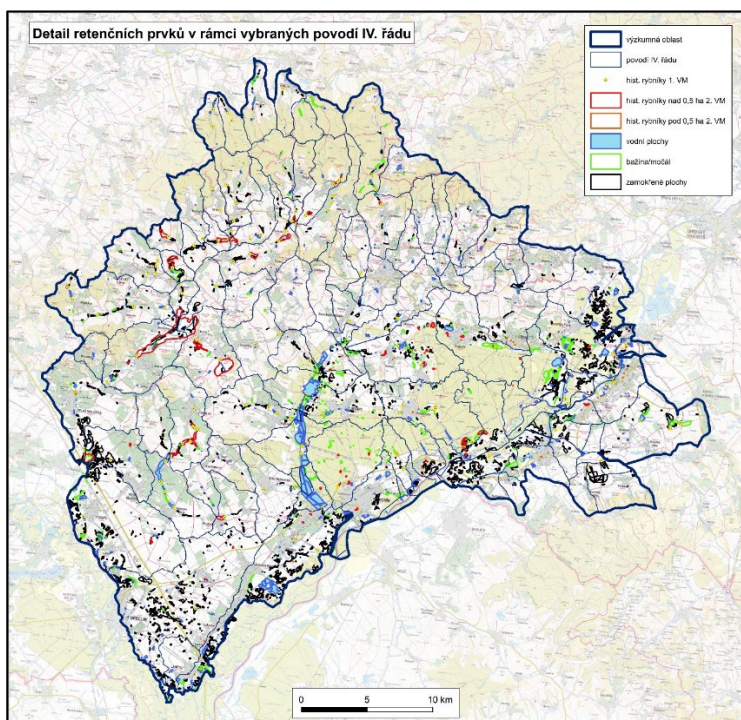
Obr. 1 Počet a velikostní kategorie historických rybníků v zájmovém území.



Obr. 2 Počet a velikostní kategorie současných hlavních retenčních prvků v zájmovém území.

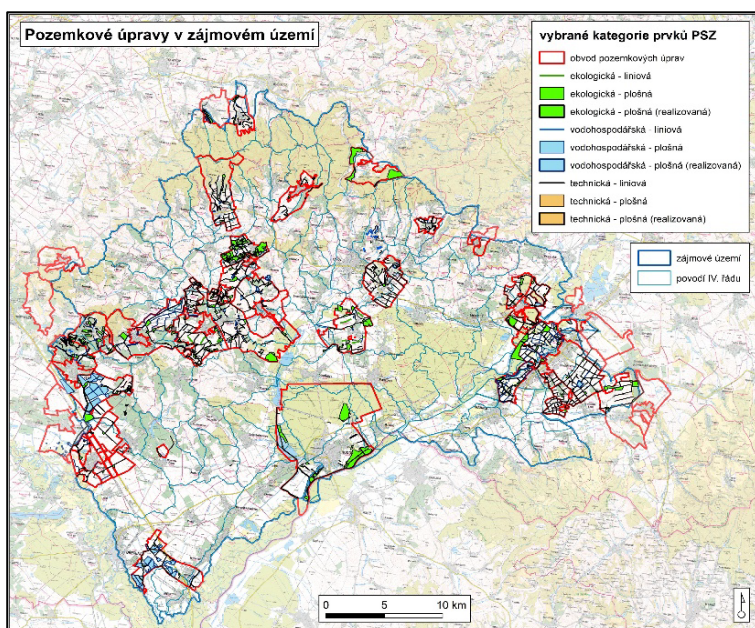


Obr. 3a Historické rybníky JMK a zájmové území.



Obr. 3b Detailní pohled na historické rybníky hlavní retenční prvky v zájmovém území.

Dalším výstupem byla i analýza pozemkových úprav rámci vybraných povodí IV. řádu, která čerpá z veřejně dostupných dat (geodatabázi) dostupných na geoportálu Státního pozemkového úřadu (SPÚ), kde je možné mimo polohy zjistit i aktuální stav, tj. počet a rozsah (plochu) pozemkových úprav, a to vč. detailů (různých atributů) navržených i realizovaných prvků (staveb) plánu společných zařízení (PSZ), a to v dílčích kategoriích vodohospodářských, ekologických, protierozních a opatřeních zpřístupňujících pozemek. V zájmovém území byla provedena komplexní či jednoduchá pozemková úprava ve 40 obvodech pozemkových úprav většinou v rozsahu celého katastrálního území. Z prvků navržených či realizovaných v PSZ byly vybrány kategorie opatření, která mají retenční funkci nebo zpomalují odtok. Celkem zde bylo navrženo v kategorii opatření ekologických 1400, ve vodohospodářských 389 a technických 250 ploch a linií. Převážná většina je ve všech kategoriích nerealizovaná a převažují plošná opatření nad liniiovými, blíže viz obr. 4.



Obr. 4 Přehled vybraných typů prvků plánu společných zařízení v rámci pozemkových úprav.

Příklad vývoje větší zamokřené plochy (historického zaniklého rybníka) nabízí výřezy mapy 1. a 2. VM, vč. ortofotomapy, viz obr. 5. Jedná se o lokalitu v jižní části katastru obce Čejkovice (okres Hodonín), kde se v minulosti nacházela celá soustava historických rybníků v nivě místního vodního toku Prušánka. Projevy zamokření jsou vidět již na výřezu mapy 2. VM a zejména na ortofotomapě. Aktuální stav rozvoje vlhkomilné vegetace je vidět na panoramatickém pohledu, viz obr. 6.



Obr. 5 Mapový výřez z 1. a 2. VM a ortofotosnímku (zleva doprava) na zamokřenou lokalitu v místě zaniklé rybníční soustavy.



Obr. 6 Panoramatický pohled na vlhkomilnou vegetaci v místě zaniklého Helesného (Šatrapského) rybníka.

4. Závěr

Hlavní zaměření příspěvku bylo orientováno na problematiku zvýšení retence vody v krajině/povodí, tj. zvýšení schopnosti krajiny zadržet vodu či minimálně zpomalit její odtok. Výsledky, které vznikly kombinací historických map i dat dálkového průzkumu Země, ukazují jasnou souvislost fyzicko-geografických podmínek, s lokací historických (zaniklých) rybníků, ale i zamokřených ploch, které se nejčastěji vyskytují v údolních zamokřených nivách vodních toků různého řádu. Zejména menší zamokřené plochy na zemědělské půdě mají v současnosti minimální či omezenou produkční funkci. Zároveň však mohou být velmi cenné z mimoprodukčního hlediska. Zadržují vodu v krajině, přispívají ke zpomalení odtoku a jsou v krajině centry zvýšené biodiverzity a genofondovou bankou (Němec et al 2014). Často nabývají charakteru periodických (efemerních) mokřadů. To bývá problémem při vymezení jejich hranic, a to z důvodu jejich nestálého (periodického/epizodického) výskytu (Richter 2020).

Prostorová distribuce všech retenčních prvků a jejich časová dynamika výskytu bývá silně ovlivněna i různými lokálními socioekonomickými faktory (hybnými silami). Případná realizace adaptačních retenčních opatření by proto tyto síly měla respektovat a zohledňovat, např. vhodným výběrem opatření, a to nejen malých vodních nádrží či polo/suchých poldrů, ale i návrhy tzv. přírodě blízkých opatření – revitalizace napřímených/zatrubněných vodních toků, mokřadů, periodických tůň aj. (Dzuráková et al. 2017). Při plánování, např. pozemkových úprav, by se mělo zohlednit nejen množství a rozloha, ale i poloha jednotlivých opatření/retenčních prvků v okolní krajině (sousedních katastrech). Zejména zamokřené plochy se do budoucna nabízí na velké výměře jako potenciální plochy pro obnovu nebo výstavbu nových retenčních opatření. Komplexní přístup, který bude zahrnovat ekologická, vodohospodářská (protipovodňová), ale i protierozní opatření, vč. udržitelného zemědělství a lesnictví, bude základem pro zlepšení budoucího stavu naší krajiny, která se bude muset vypořádat s klimatickou změnou, která s sebou nese i častější hydrometeorologické extrémní (sucho/povodně). Jako řešení

se nabízí komplexní pozemkové úpravy, kde je však hlavním limitem rozsah jejich plánování a stupeň realizace nebo vlastnické poměry, zejména pozemky ve vlastnictví obcí či jiných státních institucí. Otázkou k diskusi je i počet a plocha (hustota) jednotlivých opatření v krajině, neboli jejich prostorová optimalizace nejen v daného katastru, ale i v okolí, kde se již dnes negativně projevuje jejich často diametrálně různý stav, kdy např. v sousedních katastrech jakákoli opatření zcela chybí, což jistě nepřispívá k systémovému (síťovému) pojetí návrhů opatření v krajině.

K diskusi zůstává problematika využití archivních mapových podkladů, měřických snímků i ortofotomap při identifikaci ploch bývalých rybníků, ale i samotných zamokřených ploch v krajině (močály, bažiny, rašeliniště či mokré louky). Podobně je k terminologické diskusi i označení krajinných prvků: mokřad, polní/efemerní/periodický mokřad, močál, bažina, zamokřená/podmáčená plocha atp.

Poděkování:

Autoři děkují Ministerstvu zemědělství ČR za podporu výzkumu prostřednictvím grantu Národní agentury pro zemědělský výzkum, program Země QK21010328 Potenciál rozvoje malých vodních ploch jako adaptačních opatření v krajině k eliminaci hydrometeorologických extrémů a Technologické agentury SS02030018 Centrum pro krajinu a biodiverzitu.

Literatura:

BRÁZDIL, R., 2002. Meteorologické extrémy a povodně v České republice - přirozený trend nebo následek globálního oteplování? *Geografie: sborník České geografické společnosti*. **107**(4), s. 349 – 370.

ČÚZK, 2022. Prohlížeč služba WMS - Archivní ortofoto [online]. Český úřad zeměměřický a katastrální [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z WWW: https://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_ARCHIV/WMSservice.aspx?

DZURÁKOVÁ, M., OSIČKOVÁ, K., UHROVÁ, J., ROZKOŠNÝ, M., SMELÍK, L., NĚMEJCOVÁ, D., ZAHRAKOVÁ, S., ŠTĚPÁNKOVÁ, P., MACKŮ, J., 2017. Potenciál aplikace přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a zlepšení ekologického stavu vodních útvarů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. **59**(4), s. 25 – 32.

NĚMEC, R., DŘEVOJA, P., ŠUMBEROVÁ, K., 2014. Polní mokřady Znojemska jako refugium významných a vzácných druhů cévnatých rostlin (Wetlands on arable land in Znojmo region as a refuge of important and rare vascular plants. *Thayensia*. **11**, s. 3 – 76.

PAVELKOVÁ CHMELOVÁ R., FRAJER, J., NETOPILOV, P., DAVID, V., DZURÁKOVÁ, M., HAVLÍČEK, M., HŮLA, P., PETERKOVÁ, L., ROZKOŠNÝ, M., ŠARAPATKA, B., VRÁNA, K., 2014. Historické rybníky České republiky: srovnání současnosti se stavem v 2. polovině 19. století. Praha. Výzkumný ústav vodohospodářský, T. G. Masaryka, v.v.i. ISBN 978-80-87402-32-0.

RICHTER, P., 2020. Mokřady na archivních mapových podkladech. Praha. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. **62**(4), s. 30 – 37.

SPŮ, 2022. Geoportál SPŮ – Otevřená data ke stažení [online]. Státní pozemkový úřad [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z WWW: <https://geoportal.spucr.cz/web/cz/otevrena-data-ke-stazeni>.

VÚV TGM, 2022. Katalog dat a služeb – Hydroekologický informační systém Výzkumného ústavu vodohospodářského TGM [online]. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka [cit. 30. 6. 2022]. Dostupné z WWW: <https://heis.vuv.cz/default.asp?typ=00>.

Klíčová slova: retence, zamokření, mokřad, adaptační opatření, komplexní pozemkové úpravy

Změny poměru nového sněhu a sezónních srážek v horských a podhorských oblastech Česka

Jan Procházka¹, Pavel Lipina², Veronika Šustková², Miroslav Tesař³

¹ Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta zemědělská a technologická, Studentská 1668, 37005 České Budějovice, prochazkaj@fzt.jcu.cz

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

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

Abstrakt

Sněžení a tvorba sněhové pokrývky je důležitým aspektem chladnější části roku v Česku i střední Evropě. Sněhová pokrývky má význam z hlediska klimatologického, hydrologického, ekologického i rekreačního, potažmo ekonomického. Množství nového sněhu závisí kromě srážek především na teplotě vzduchu. S postupným oteplováním se dá předpokládat, že při podobném celkovém úhrnu srážek se bude snižovat podíl srážek ve formě sněhu a schopnost tvorby sněhové pokrývky. Za účelem vyjádření příslušného stavu a změn byl v tomto příspěvku použit poměr sezónního množství nového sněhu v cm a celkových srážek v mm, Sn/P. V této souvislosti byla zpracována data z databáze ČHMÚ pro 112 vybraných horských a podhorských meteorologických stanic Česka pro dvě normálová období 1961–1990, resp. 1991–2020. Hodnocena byla data z chladné části roku a ze stanic s nadmořskou výškou nad 500 m, a to souhrnně nebo dle jednotlivých výškových pásem. Jako chladná část roku zde bylo považováno období listopad až duben, kdy je větší pravděpodobnost tvorby nové sněhové pokrývky. Výsledky studie ukázaly, že poměr Sn/P zaznamenal v období 1991–2020 znatelný pokles v porovnání s obdobím 1961–1990, v průměru tomu bylo z hodnoty 0,54 na hodnotu 0,44, tedy o 18 %. Dokumentovaná změna se projevila především v souvislosti s poklesem sezónního úhrnu nového sněhu, a to z průměrných 168 na 144 cm, zatímco sezónní úhrn srážek v průměru jen mírně vzrostl z 312 na 326 mm. Stav a změny v hodnocených parametrech byly současně prezentovány i prostorově v podobě klimatologických map Česka pro příslušná normálová období. Výhodou hodnocení pomocí poměru Sn/P, v porovnání s hodnocením poměru tuhých a kapalných srážek S/P, je možnost využití dat z většího souboru klimatologických i srážkoměrných stanic. Poměr Sn/P navíc zahrnuje důležitý fenomén chladnější části roku, a to vytváření sněhové pokrývky.

1. Úvod

Nejen v Česku a střední Evropě se vlivem klimatické změny spojené především s růstem teploty vzduchu mění i parametry týkající se sněhové pokrývky. Sníh neboli sněhová pokrývky je v našich podmínkách z klimatologického hlediska nejcitlivějším typem zemského povrchu na Zemi (Nolin a kol. 2021). K její tvorbě je zpravidla za potřeby vypadávání určitého množství srážek v tuhém skupenství. Z pohledu časových změn v rozdělení tuhých a kapalných srážek se jako citlivý klimatologický parametr běžně hodnotí poměr sněhových a celkových srážek S/P (Snow to Precipitation Ratio).

Dong a Ming (2022) z americké NOAA provedli v rámci projektu APHRODITE rozsáhlou analýzu trendů poměru S/P v oblasti High Mountain Asia zahrnující rozsáhlé vysokohorské oblasti Tibetské plošiny, Himaláje, Ťan-šanu a Hindukúše, které jsou největší zásobárnou pevninských ledovců a vody ve sněhu mimo polární oblasti. Hodnocení měsíčních úhrnů srážek a povrchových teplot mezi lety 1950 až 2014 prokázala významně klesající trendy poměru S/P s nejrychlejším poklesem v polovině 90. let minulého století. Silná korelace mezi poklesem poměru S/P a růstem teploty vzduchu byla zaznamenána již dříve také na území USA (Feng a Hu 2007). Zatímco na východě byl v závislosti na menších změnách růstu teploty vzduchu prokázán pro období 1949 až 2005 pomalejší trend v S/P, tak v centrální a západní části území USA byl tento klesající trend v zimních měsících velmi výrazný, zejména pak v 80. letech minulého století a z hlediska sezóny pak nejvíce v měsíci březnu. Autoři poukazují také na nízký vliv poklesu zimního úhrnu srážek na poměr S/P. Na evropském kontinentu se poměru sněhových a celkových srážek věnuje nejvíce prací z oblasti Alp nebo Skandinávie. Irannezhad a kol. (2017) hodnotili poměr S/P za stoleté období 1909–2008 ve Finsku, kdy roční hodnoty byly odhadnuty pomocí denních úhrnů srážek a teploty vzduchu jako vstupních parametrů do modelu. Kromě toho, že

zde byl zaznamenán pokles S/P v souvislosti s rostoucí teplotou vzduchu, projeví se zde i další faktory ovlivňující poměr S/P jako jsou pokles úhrnu zimních srážek a typ převládající oscilace.

Pro oblast Slovenska zpracovali Markovič a kol. (2020) údaje o počtu dnů se sněžením a počtu dnů se srážkami, který vyjádřili jako poměr SD/SP, za klimatologické zimy 1951/52 až 2017/18 ze 71 tamních klimatologických stanic. Přičemž jako den se srážkami byl považovaný takový den, v rámci kterého byla zaznamenaná denní suma (7 h–7 h) úhrnu atmosférických srážek ≥ 1 mm a za den se sněžením takový den, pro který byl v ranním termínu (7 h následujícího dne) naměřena výška nového sněhu ≥ 1 cm nezávisle na denním úhrnu srážek. Výsledky studie ukázaly, že největší pokles hodnot poměru SD/PD byl zaznamenán v nejnižších polohách a zároveň v jihozápadní části Slovenska, zatímco nižší pokles na SZ území a v polohách nad 1 000 m n. m. Na území Česka se změně poměru tuhých a celkových srážek zabývalo několik prací (např. Hynčica a Huth 2019, Blišťák 2018), kdy ve všech případech dospěli ve sledovaných obdobích k závěrům, že došlo za hodnocené období k poklesu množství tuhých srážek v poměru k celkovým srážkám.

Pokud jde o sumu nového sněhu, nebo sezónní úhrn výšky nového sněhu, nebyla této charakteristice věnována až taková pozornost (Tolasz a kol. 2007). Nicméně Němec a Zusková (2005) hodnotí na území Česka z pohledu úhrnu nového sněhu několik období od roku 1926, přičemž jako sněhově nejbohatší vycházelo období 1951–1975 s průměrným úhrnem 124 cm a naopak v tomto směru jako nejhudší období 1989–2003 s průměrným úhrnem 100 cm. Z hlediska výškového členění Česka pak Tolasz a kol. 2007 uvádějí ze zpracovaných dat z let 1961 až 2000 úhrn výšky nového sněhu pro nížinné oblasti jen něco přes 30 cm, pro horské polohy úhrn přes 300 cm a pro nejvyšší polohy sezónní úhrn až 550 cm nového sněhu. Z měsíců je pak v nižších polohách nejsněžnější leden (10 cm), na horách jsou zimní měsíce vyrovnané s úhrny kolem 50 cm, někdy až 100 cm. Dle Terzaga a kol. (2010) byl na základě porovnání měsíčních hodnot úhrnu nového sněhu z dekády 2000–2009 oproti referenčnímu 30 letému období 1971–2000 v oblasti italských Alp zjištěn pokles hodnot v měsících leden až květen, zatímco v listopadu a prosinci došlo v příslušné dekádě k nárůstu sumy nového sněhu. Celkový pokles sezónní sumy nového sněhu pak byl v souvislosti s rostoucí teplotou vzduchu nejvýraznější v nižších polohách Alp, což podle autorů koresponduje se zjištěním i z oblasti francouzských a švýcarských Alp. Capozzi a kol. (2022) hodnotili zimní úhrny nového sněhu za zimní měsíce v období 1884 až 2020 z observatoře Montevergine na jihu Apeninského poloostrova ve výšce 1280 m n. m., kdy nezjistili žádný významný trend do poloviny 70. let minulého století, ale následný silný pokles hodnot až do konce 90. let, což koresponduje se zmíněným zjištěním Němce a Zuskové (2005) pro podmínky Česka.

Na severní polokouli v oblasti mírného pásma je za zimní půlrok z hlediska srážek považováno období od října do března. Z hlediska výskytu sněhu se pak velmi často hodnotí období od listopadu do března, pro rozlišení tuhých a kapalných srážek od listopadu do dubna nebo ve vztahu k teplotě vzduchu klimatologická zima od prosince do února. Kromě úhrnu srážek a celkové výšky sněhové pokrývky se na všech klimatologických a srážkoměrných stanicích Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) sleduje i denní přírůstek nového sněhu v cm (v databázi ČHMÚ označen jako SNO a je měřen podobně jako denní úhrn srážek vždy v ranním termínu 07 h SEČ). Dle výškového členění používaného v rámci činnosti ČHMÚ se polohy střední vymezují nadmořskou výškou 400–600 m, vyšší 600–800 m a horské od 800 m n. m. V tomto případě bylo vzhledem k zaměření příspěvku na horské a podhorské oblasti, potřebě dostatečného počtu hodnocených stanic, dále v souladu se zjištěním a členěním Markoviče a kol (2020) a i vzhledem k udávané průměrné nadmořské výšce Česka 430 m, přistoupeno k hodnocení dat ze stanic v polohách nad 500 m n. m. Vycházelo se z předpokladu, že zejména v případě úhrnu nového sněhu, vymezeného sezónou od listopadu do dubna, bude v těchto polohách nejen dostatek odpovídajících dat, ale že změny a rozdíly v hodnoceném období 1961–2020 zde budou daty o novém sněhu ve vztahu ke srážkám také lépe podloženy. Pro příslušné hodnocení, na rozdíl od výše uvedených zavedenějších obdobných charakteristik, byl zvolen výpočet poměru sezónního úhrnu nového sněhu a celkových srážek Sn/P (new snow / precipitation).

2. Metodika

2.1 Výběr meteorologických stanic a struktura dat

Ke zpracování charakteristik bylo použito 112 meteorologických stanic. Ve většině případů byla použita data úhrnu nového sněhu a úhrnu srážek, která jsou uložena v klimatologické databázi ČHMÚ CLIDATA. Předpokladem databázového uložení v této databázi je definování geografického a popisného záznamu stanice v databázi, kde je definován indikativ stanice, název stanice, typ stanice, začátek a konec záznamu (měření a pozorování), zařazení stanice do povodí a okresu, identifikace typu stanice, identifikace stanice podle souřadnic a nadmořská výška stanice. Geografické informace o stanici obsahují řadu dalších položek, které pro potřeby tohoto zpracování nejsou podstatné.

Dalším předpokladem uložení dat v databázi CLIDATA je popis pozorování. V této části databáze je definován název prvku, jeho zkratka, tabulka, ve které jsou data uložena v databázi, typ dat, období měření, přístroj, klimatologické schéma, výška přístroje, definování výpočtu dat a další potřebné informace.

Meteorologický prvek nový sníh (zkratka SNO) a úhrn srážek (SRA) je měřen v 7 hodin SEČ (na každé stanici podle tzv. místního slunečního času, tj. podle zeměpisné délky), kdy se zaznamenává úhrn nového sněhu a úhrn srážek za posledních 24 hodin. Změřené hodnoty jsou uloženy do tabulky jako denní data. Měření úhrnu srážek je v posledních letech na mnohých stanicích již automatizováno. Data jsou k dispozici v 10minutovém intervalu. Pro potřeby tohoto příspěvku jsou využívány pouze denní úhrny. Data jsou po skončení každého kalendářního měsíce vložena nebo importována do databáze. Na mnohých stanicích je využíváno průběžného vkládání dat pozorovateli prostřednictvím webového formuláře. Po skončení každého měsíce jsou data podrobena řadě kontrol a v případě, že jsou data kompletní, tak se automaticky vypočítají měsíční hodnoty a další charakteristiky.

Pro úhrn nové sněhu a úhrn srážek se měsíční hodnota vypočte pouze v případě, že nechybí žádná denní hodnota.

V příložené tabulce je kompletní přehled všech zpracovávaných stanic v tomto příspěvku (tab. 1). Jsou to meteorologické stanice, které mají dlouhou, pokud možno kompletní řadu pozorování pro zpracovávané období 1961–2020 a leží v Česku v nadmořské výšce nad 500 m. Výjimku tvoří jen několik meteorologických stanic ve velkých městech Česka pro porovnání, jaké jsou hodnoty zpracovávaných charakteristik v nižší a středních oblastech Česka. Geografické informace o stanici (souřadnice a nadmořská výška) byly pro mapové a tabulkové zpracování použity z posledního (aktuálního) období měření. Prostorové rozložení zpracovávaných meteorologických stanic je uvedeno v příložené mapě (obr. 1).

Tabulka přehledu meteorologických stanic uvádí indikativ stanice, název stanice, nadmořskou výšku a období měření stanice v období tohoto zpracování. Indikativ meteorologických stanic v databázi CLIDATA je osmimístný. První písmeno je identifikace příslušné pobočky ČHMÚ (B..Brno, C..České Budějovice, H..Hradec Králové, L..Plzeň, O..Ostrava, P..Praha, U..Ústí nad Labem). Prostorové členění poboček ČHMÚ mohou zájemci nalézt např. na stránkách ČHMÚ (chmi.cz) v části Grafy automatických stanic (Portál ČHMÚ : Aktuální situace : Aktuální stav počasí : Česká republika : Stanice : Grafy automatických stanic). Druhá pozice je u standardních meteorologických stanic vyčleněna pro zařazení do povodí (např. u ostravské pobočky: 1..povodí Odry, 2..povodí horní Moravy a 3..povodí Bečvy). Následuje zkratka stanice (čtyři znaky) a poslední dvě pozice jsou určeny pro pořadí stanic na lokalitě (zpravidla hodnoty 01). Název stanice by měl uvádět katastrální označení sídla, ale není tomu vždy tak (převážně z historických důvodů u významných stanic mimo velká města a běžně u významných horských stanic).

Období pozorování a měření je uvedeno pro zpracovávané období let 1961–2020 a rok 2020 znamená, že data jsou dostupná minimálně do 30. dubna 2021. Pro nedostatek prostoru v tabulce přehledu stanic nejsou uvedena období s delším přerušením měření, která uvádíme zde. Jedná se o období přerušení měření 1 kalendářní rok nebo déle, např.: Bohdalov (1980), Prášíly (1983), Besednice (1970), Černovice, Dobešov (1980), Malonty (1969–1971), Pohorská Ves (1987), Lenora, Houžná (2018–2020 doplněno vedlejší dobrovolnickou stanicí Řasnice), Pec pod Sněžkou (1972–1987), Dobřany (1998), Orličky (1994), Krucemburk (1975), Lubná (1980–1982), Lovčice, Kvasetice (1980), Úněšov, Číhaná (1967), Klínovec (2003–2010), Bílá, Hlavatá (2018), Jeseník (1961–1985 doplněno stanicí Jeseník, lázně, 1986–1988), Červená Voda (1980–1988), Harrachov (2013–2017), Klíny (1977), Výsluní (1977, 1981), Morávka, Lúčka (1996–2015 doplněno stanicí Morávka, Uspolka),

Tab. 1. Přehled stanic (indikativ, název, nadmořská výška a období měření stanice ve sledovaném období) použitých pro zpracování charakteristik Sn/P (poměru úhrnu nového sněhu v cm k úhrnu srážek v mm).

indikativ stanice	název stanice	nadm. výška [m]	období	indikativ stanice	název stanice	nadm. výška [m]	období
B1PROT01	Protivanov	675	1961–2020	L1PLZB01	Plzeň, Bolevec	331	1969–2020
B2BOHD01	Bohdalov	583	1961–2020	L1SPIC01	Špičák	973	1964–2020
B2BTUR01	Brno, Tuřany	241	1961–2020	L1ZRUD01	Železná Ruda	754	1961–2020
B2BYSP01	Bystřice nad Pernštejnem	553	1961–2020	L2BEZV01	Bezvěrov	699	1963–2020
B2KMYS01	Kostelní Myslová	569	1961–2020	L2PRIM01	Přimda	743	1961–2020
B2NEDV01	Nedvězí	722	1961–2020	L2STRA01	Strašice	526	1961–2020

B2NMES01	Nové Město na Moravě	601	1961–2020	L2TSEK01	Tři Sekery	672	1961–2020
B2POLI01	Polička	552	1961–2020	L2UNES01	Úněšov, Číhaná	573	1963–2020
B2ROZS01	Rozstání	571	1963–2020	L2VERU01	Verušičky	582	1961–2020
B2TRES01	Třešť	574	1961–2020	L2ZLUT01	Žlutice	569	1961–2020
B2VSTU01	Vysoké Studnice	568	1961–2020	L3AS0001	Aš	675	1961–2020
C1BLAD01	Borová Lada	898	1963–2020	L3KLIN01	Klínovec	1236	1963–2020
C1FILH01	Filipova Huť	1110	1968–2020	L3KVAL01	Karlovy Vary, Olšová Vrata	603	1961–2020
C1FRAN01	Frantoly	726	1962–2020	L3NEJD01	Nejdek	609	1961–2020
C1HKVI01	Horská Kvilda	1052	1990–2020	L3SIND01	Šindelová, Obora	589	1963–2020
C1CHUR01	Churáňov	1118	1961–2020	O1BILA01	Bílá, Konečná	720	1961–2020
C1KHOR01	Kašperské Hory	728	1961–2020	O1BILH01	Bílá, Hlavatá	770	1961–2020
C1KVIL01	Kvilda	1059	1961–2020	O1BUDI01	Budišov nad Budišovkou	530	1961–2020
C1LENO01	Lenora, Houžná	804	1961–2018	O1CERV01	Červená	748	1961–2020
C1PRAS01	Prášíly	883	1961–2020	O1HAMR01	Staré Hamry, Samčanka	527	1961–2020
C1RADO01	Radošice	570	1961–2020	O1HERM01	Heřmanovice	665	1962–2020
C1STOZ01	Stožec	797	1963–2020	O1HOLO01	Horní Lomná	582	1961–2020
C1VACP01	Vacov, Peckov	738	1961–2020	O1JESE01	Jeseník	502	1961–2020
C1VIMP01	Vimperk	628	1961–2020	O1KARL01	Karlovice	502	1961–2020
C2BESE01	Besednice	593	1961–2020	O1LYSA01	Lysá hora	1322	1961–2020
C2BRLO01	Brlöh	559	1961–2020	O1MOLU01	Morávka, Lúčka	600	1961–2020
C2CBUD01	České Budějovice, Rožnov	395	1961–2020	O1MOSN01	Mošnov	253	1961–2020
C2CERN01	Černovice, Dobešov	580	1961–2020	O1PRAD01	Praděd	1490	1961–1997
C2JIST01	Jistebnice	580	1961–2020	O1RAMZ01	Ostružná, Ramzová	740	1961–2020
C2KAML01	Kamenice nad Lipou, Vodná	557	1961–2020	O1SVET01	Světlá Hora	593	1961–2020
C2MALO01	Malonty	694	1963–2020	O1VIDL01	Vidly	774	1963–2020
C2NADV01	Nadějkov, Větrov	616	1961–2020	O2CERO01	Červená Voda	535	1961–2020
C2NBYS01	Nová Bystřice	583	1961–2020	O2STKU01	Staré Město pod Sněžníkem, Kunčice	658	1961–2020
C2NETR01	Netřebice	616	1961–2020	O3BECV01	Horní Bečva	565	1961–2020
C2PVES01	Pohorská Ves	773	1964–2020	O3VEKA01	Velké Karlovice	518	1961–2020
C2SOBN01	Soběnov	526	1961–2020	P1PRUZ01	Praha, Ruzyně	364	1961–2020
C2STRM01	Strmilov	582	1962–2020	P2BENE01	Benecko	780	1961–2020
C2VBRO01	Vyšší Brod	559	1961–2020	P2DESN01	Desná, Souš	772	1961–2020
H1DDVU01	Dolní Dvůr, Rudolfov	560	1963–2020	P2HARR01	Harrachov	675	1961–2020
H1HMAR01	Horní Maršov	585	1961–2020	P2ROKY01	Rokytnice nad Jizerou, Vilémov	525	1961–2020

H1LBOU01	Labská bouda	1320	1979–2020	P2ROP01	Roprachtice	550	1961–2020
H1PECS01	Pec pod Sněžkou	816	1962–2020	P2SMRZ01	Smržovka	550	1961–2020
H2DOBN01	Dobřany	627	1961–2020	P3HUMP01	Humpolec	515	1961–2020
H2KRAL01	Králíky	538	1966–2020	P3KOSE01	Košetice, Křešín, Kramolín	532	1961–2020
H2ORLI01	Orlíčky	570	1964–2020	P3SIMA01	Šimanov	630	1961–2020
H2ROKY01	Rokytnice v Orlických horách	577	1961–2020	P3STRE01	Střezimíř	588	1961–2020
H2ZDOB01	Zdobnice	671	1963–2020	U1BOLR01	Boleboř	600	1961–2020
H3HAMR01	Hamry	605	1961–2020	U1CEJI01	Český Jiřetín, Fláje	740	1961–2020
H3HRAD01	Hradec Králové, Nový Hradec Králové	278	1961–2020	U1KLIN01	Klíny	807	1963–2020
H3KRUC01	Krucemburk	559	1961–2020	U1LUKO01	Lukov	502	1961–2020
H3LUBN01	Lubná	560	1961–2020	U1MILE01	Milešovka	831	1961–2020
H3SVRA01	Svratouch	734	1961–2020	U1NOVE01	Nová Ves v Horách	725	1961–2020
L1CACH01	Čachrov	729	1961–2020	U1PEKL01	Petrovice, Krásný Les	631	1963–2020
L1CKUB01	Česká Kubice	549	1963–2020	U1VYSL01	Výsluní	738	1961–2020
L1KLAT01	Klatovy	421	1961–2020	U2BEDR01	Bedřichov	777	1961–2020
L1LOVC01	Lovčice, Kvasetice	597	1961–2020	U2LIBC01	Liberec	398	1961–2020

2.2 Příprava a zpracování dat

K výpočtu byly použity měsíční hodnoty (sumy/úhrny) za „chladné“ období roku, tj. od 1. listopadu do 30. dubna. Tj. pro období let 1961–1990 jsou to hodnoty „zimní“ sezóny která začíná 1. listopadu 1961 a končí 30. dubna 1991. Pro období 1991–2020 je začátek období 1. listopadu 1991 a konec 30. dubna 2021.

Stanice mají z mnoha důvodů v některých měsících neúplná data. To se stane v případě, že chybí třeba jen jedna hodnota v měsíci, nebo došlo k přerušení měření. V případě výpadku/nedostupnosti měsíčních dat zpracovaného období byla data doplněna několika způsoby. Tam kde to bylo možné, tedy při definovaném pozorování stanice a popisu pozorování příslušného meteorologického prvku byly doplněny měsíční hodnoty prostřednictvím v ČHMÚ zavedeného SW MissingValues. Tato aplikace z vrstvy (lokality/stanice, prvek, rok, měsíc) nabídne vypočtené hodnoty pro požadovanou lokalitu podle různých interpolačních metod. Všechny použité interpolační metody využívají lineární regresi a zohledňují vliv nadmořské výšky (příp. orientace a sklonitost svahů nebo krajinný pokryv) na interpolovanou veličinu. Pro doplnění chybějících hodnot byla zpravidla použita metoda CLIDATA-DEM R2. Tato metoda kombinuje metody Clidata-Simple a Clidata-Dem. Je to vážený průměr těchto gridů, kde váhou je koeficient determinace R2. Metodika výpočtů se skládá z několika kroků: 1. Výpočet gridu gSimple pomocí metody Clidata-Simple, 2. Výpočet regresních koeficientů a, b a hodnoty delta a R2 pro každou stanici, 3. Interpolace nalezených koeficientů a 4. Výpočet výsledného gridu pomocí mapové algebry (Stříž 2008).

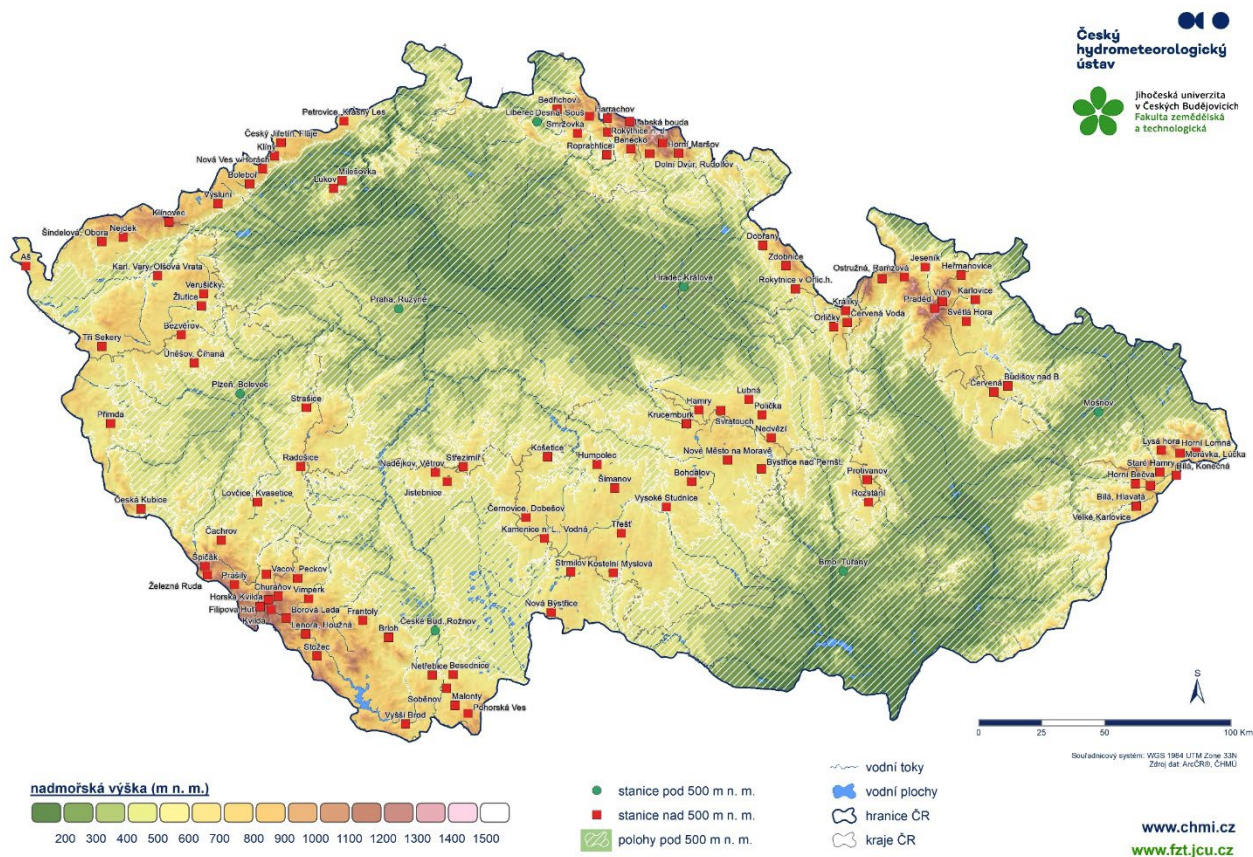
Tam, kde nebylo možné použít pro doplnění chybějících hodnot SW MissingValues byl proveden výběr nejbližších stanic a výběr z blízkého okruhu stanic s podobnou nadmořskou výškou. Tak bylo zpravidla postupováno u chybějících hodnot v období 1961–1963 a nebo při delším přerušení uvnitř sledovaného období.

Všechny výpočty sumy nového sněhu a úhrnu srážek byly spočítány z doplněných dat, tedy bez výpadků. Velké množství stanic z uvedeného výběru se v průběhu studovaného období stěhovalo, měnili se pozorovatelé, popř. se měnil typ srážkoměru (do 90. let 20. století to byly výhradně srážkoměry METRA 886 se záchytnou plochou 500 cm²). Mnohé stanice byly v průběhu konce 20. století a v prvních 20 letech tohoto století automatizovány. Nejprve člunkovými (klopnými) srážkoměry a v posledních letech srážkoměry váhovými. I když všechny tyto okolnosti mohou mít vliv na kvalitu měření a dat, v tomto zpracování nebyly tyto okolnosti nijak zohledněny.

2.3 Mapové přehledy

Pokud jde o mapovou projekci, tak data z měření výšky nového sněhu i úhrnu srážek mají charakter bodových měření a pro jejich prostorovou analýzu se využívá GIS (Geografický Informační Systém). V tomto případě konkrétně ArcGIS (ESRI, 2018) a metody Orografická interpolace (Šercl 2008a, Šercl 2008b), metody LLR a ClidataDEM (Stříž 2008), standardně využívané na ČHMÚ. Všechny použité interpolační metody využívají lineární regresi a zohledňují vliv nadmořské výšky (příp. orientace a sklonitost svahů nebo krajinný pokryv) na interpolovanou veličinu. Velmi důležité také je, že zachovávají původní naměřenou hodnotu ve známém bodě. Výsledkem interpolace je rastrová mapa.

Jako podkladový terén byl využit digitální model reliéfu (DMR), který má rozlišení 100x100 m. Menší nevýhoda relativně vysokého rozlišení je časová náročnost výpočtu, který trvá až 30 minut. Podstatné však je, aby velikost jednotlivých buněk (pixelů) rastru pro prostorové analýzy ve výsledku zachycovala požadovaný detail co nejlépe.



Obr. 1. Prostorové rozložení meteorologických stanic Česka v polohách nad 500 m n. m. použitých pro hodnocení (červeně) včetně několika vybraných stanic z nižších poloh (do 400 m n. m., zeleně), jejichž data byla uvedena jen pro srovnání v Tab. 2. Polohy do 500 m n. m. překryty šrafováním.

3. Výsledky

V rámci hodnocení poměru Sn/P zahrnující sezónní úhrn nového sněhu (cm) a sezónní úhrnu srážek (mm) byla analyzována data z vybraných 112 stanic ČHMÚ s nadmořskou výškou nad 500 m pro období chladnější části roku od listopadu do dubna v sezónách 1961/62 až 2020/21. Hodnocení tak v podstatě zahrnovala dvě poslední normálová období 1961–1990 a 1991–2020, která byla vzájemně v tomto směru také porovnávána. Pro částečné zohlednění nadmořské výšky byly navíc stanice pro účely tohoto příspěvku, zaměřeném na horské a podhorské oblasti, zařazeny do výškových pásem 501 až 750 m n. m., 751 až 1000 m n. m. a nad 1000 m n. m.

Ze souhrnného hodnocení výsledků vyplývá, že v průběhu zmiňovaného období od roku 1961 poměr Sn/P ztlačně poklesl. V normálovém období 1961–1990 činil jeho průměr za všechny hodnocené stanice nad 500 m n. m. hodnotu

0,54, kdežto v období 1991–2020 to bylo už jen 0,44, což v procentním vyjádření znamená pokles Sn/P o 18 %. Pokud jde o rozdělení dle výškových pásem, byl průměrný pokles hodnoceného poměru v pásmu nad 1000 m n. m. z 0,79 na 0,60 (o 24 %), v pásmech 751–1000 a 501–750 m n. m. z 0,65 na 0,52 (o 20 %), resp. z 0,50 na 0,41 (o 17 %). Největší změna průměrného poměru Sn/P nastala v pásmu nad 1000 m, kde bylo ovšem nejméně stanic pro hodnocení, naopak v pásmu 501–750 m n. m. bylo stanic nejvíce a pokles nejmenší (tab. 2). Přestože nejnižší polohy nebyly na našem území v tomto příspěvku souhrnně hodnoceny, bylo vybráno do tabulky pro doplnění představy o hodnotách poměru Sn/P pozorování z meteorologických stanic z nižších poloh v několika městech napříč Českem.

Tab. 2. Průměrné hodnoty poměru Sn/P a jeho pokles v % pro jednotlivá výšková pásma nad 500 m n. m. a vybraná města nižších poloh (do 400 m) v normálových obdobích 1961–1990 a 1991–2020.

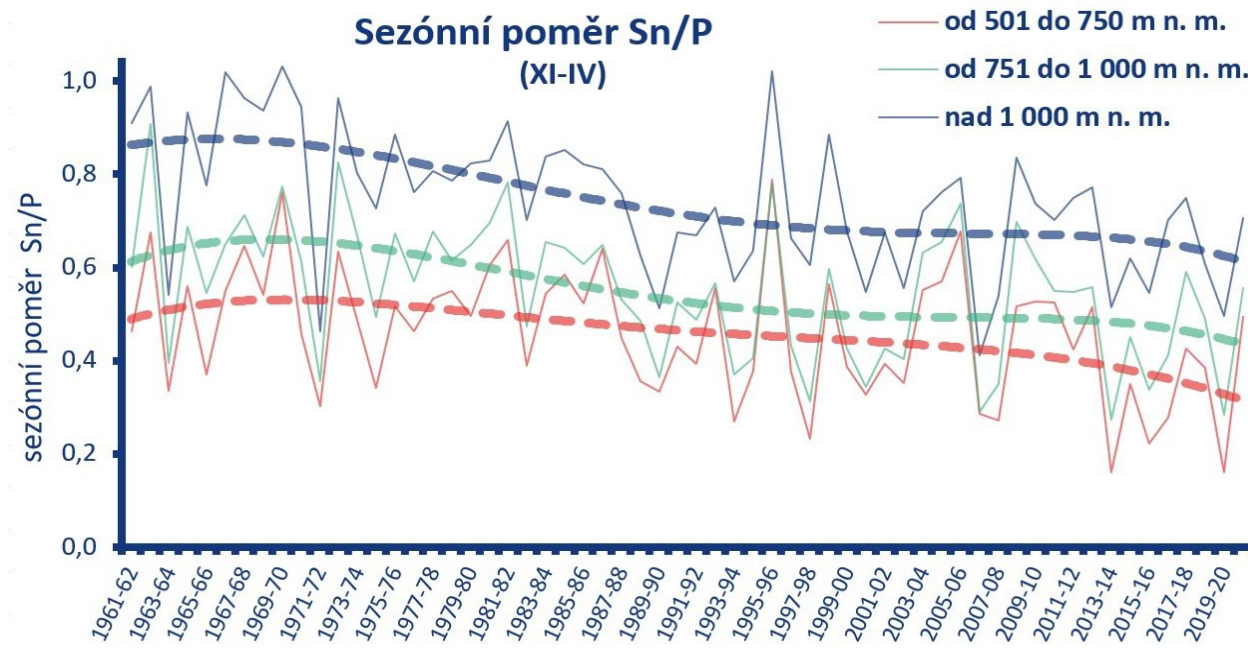
výšková pásma	období	1961–1990	1991–2020	pokles Sn/P v %
nad 1 000 m n. m.		0,79	0,60	-24
od 751 do 1 000 m n. m.		0,65	0,52	-20
od 501 do 750 m n. m.		0,50	0,41	-17
všechny nad 500 m n. m.		0,54	0,44	-18
<i>vybrané stanice nižších poloh (krajská města) s nadmořskou výškou stanice</i>				
Liberec, 398 m n. m.		0,42	0,35	-17
Č. Budějovice, 395 m n. m.		0,38	0,25	-34
Praha, Ruzyně, 364 m n. m.		0,41	0,35	-15
Plzeň, Bolevec, 331 m n. m.		0,31	0,25	-19
Hradec Králové, 278 m n. m.		0,30	0,21	-30
Mošnov, 253 m n. m.		0,43	0,34	-21
Brno, Tuřany, 241 m n. m.		0,32	0,22	-31
průměr z vybraných měst		0,37	0,28	-23

Průběh průměrného sezónního poměru Sn/P pro jednotlivá výšková pásma vyjadřují křivky v grafu (obr. 2). Z křivek je zřejmá výrazná mezisezónní variabilita, nicméně pokles ve všech výškových pásmech je znatelný a v průměru hodnocených stanic podobně vyrovnaný. Ovšem při pohledu na trend vyjádřený tučně polynomickou spojnici je patrný vrchol poměru Sn/P na přelomu 60. a 70. let, zatímco v 80. letech minulého století je strmější pokles. Po určitém vyrovnání trendu na začátku století lze náznak dalšího strmějšího poklesu hodnot také odhadnout v posledních několika letech.

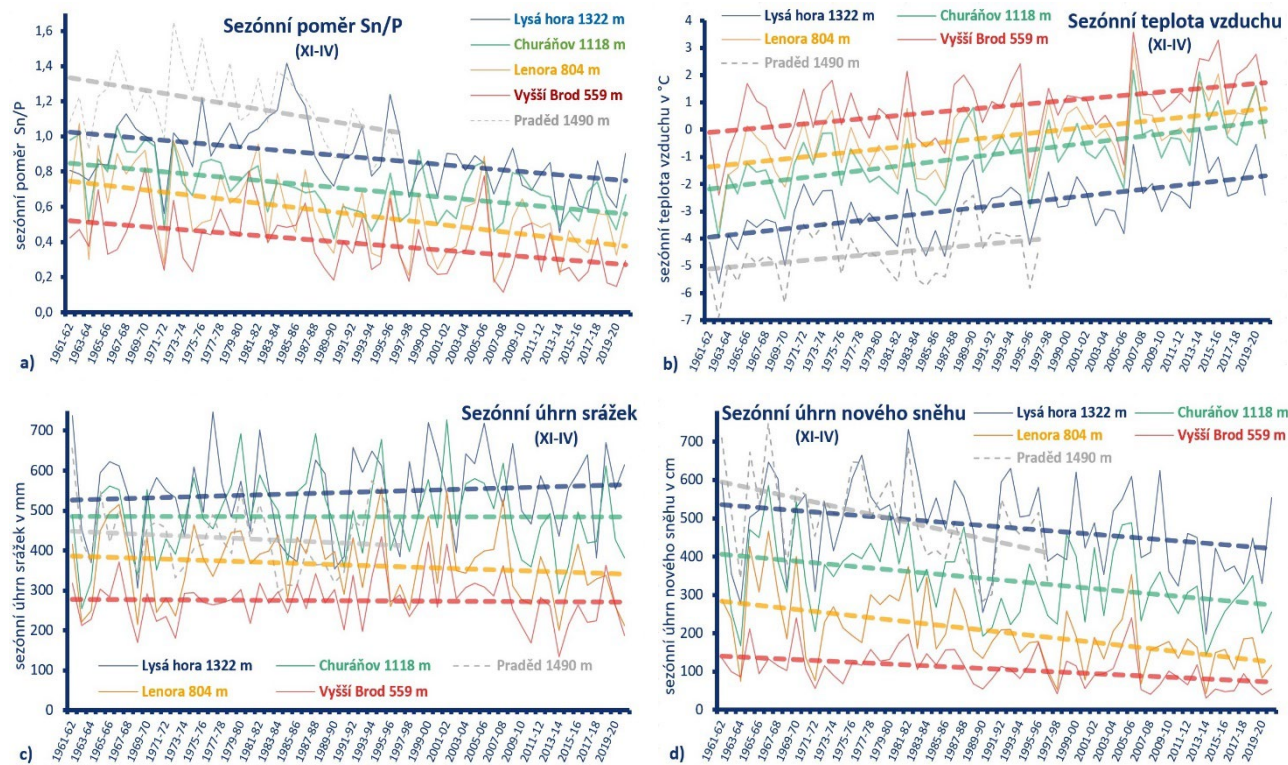
Pro vybrané stanice v různých nadmořských výškách byla zvolena pro vizualizaci trendu Sn/P lineární spojnice sezónních hodnot (obr. 3a). Pro doplnění byla do grafů k příslušným stanicím v různých nadmořských výškách přidána i jinak zde nezařazená stanice Praděd (kvůli ukončení pozorování v roce 1997), a to vzhledem ke své výjimečné nadmořské výšce. Klesající trend je pro všechny zde hodnocené stanice víceméně podobný. Zcela opačný je trend růstu teploty vzduchu, jak dokumentuje graf průběhu průměrných sezónních hodnot v období listopad až duben z let 1961 až 2020 (obr. 3b). Pokud se obdobně vyhodnotí sezónní úhrn nového sněhu a sezónní úhrn srážek, je zde v prvním případě u všech vybraných stanic zřejmý pokles hodnot zvýrazněný lineárním trendem (obr. 3c), zatímco v druhém případě jsou trendy mírnější a poněkud rozdílné (obr. 3d).

Z hodnocených dat vybraných stanic horských a podhorských oblastí Česka (nad 500 m n. m.) byly vypočteny mapy průměrného sezónního úhrnu sněhu a průměrného sezónního úhrnu srážek pro obě normálová období. Účelem prezentace těchto klimatologických map je jednak zobrazení prostorového rozložení hodnocených charakteristik a jednak jejich porovnání. Zatímco u srážek jsou rozdíly spíše méně výrazné a na menší části území (obr. 5), tak v případě nového sněhu jsou rozdíly spočívající v poklesu hodnot zřejmé na většině prostorově hodnocených ploch klimatologické mapy (obr. 4).

Podobně je tomu v mapovém zobrazení poměru Sn/P, kdy z průměrných hodnot pro normálová období je možné zaznamenat ztelný pokles na prakticky celém území (obr. 6). U srážek je roční proměnlivost zpravidla vysoká, v polohách nad 500 m n. m. však v průměru pozorujeme nevýrazný vzestup hodnot sezónního úhrnu.



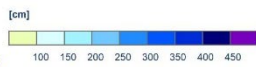
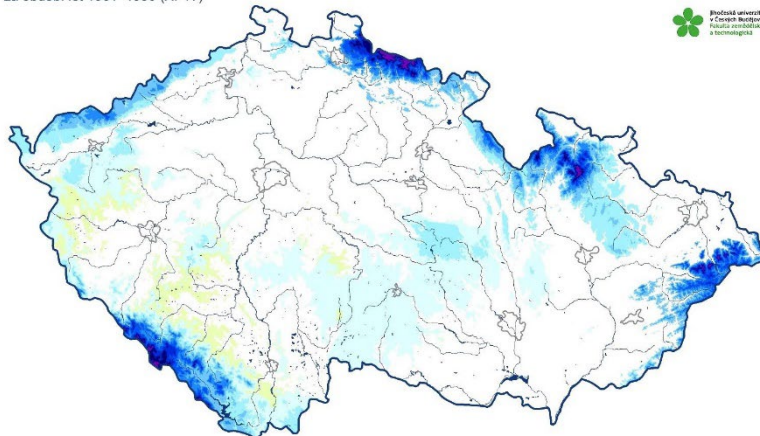
Obr. 2. Průběh a trend (polynomická spojnice st. 5) průměrného sezónního poměru Sn/P (úhrn nového sněhu / úhrn srážek) pro výšková pásma nad 500 m n. m. za období listopad až duben 1961–2020.



Obr. 3. Průběh a lineární trend sezónních (listopad až duben) charakteristik pro vybrané stanice za období 1961–2020, a) poměr Sn/P (úhrn nového sněhu / úhrn srážek), b) průměrná teplota vzduchu, c) úhrn srážek, d) úhrn nového sněhu.

Průměrný úhrn nového sněhu v zimních sezónách

za období let 1961–1990 (XI–IV)

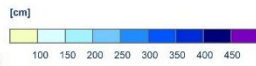
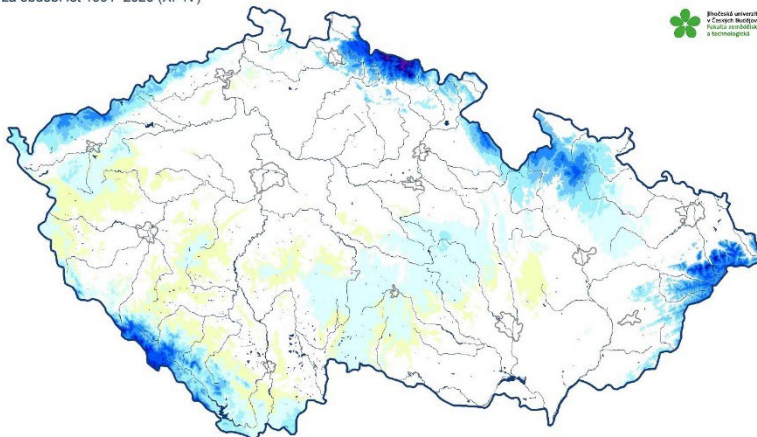


www.chmi.cz
www.fzt.jcu.cz

a)

Průměrný úhrn nového sněhu v zimních sezónách

za období let 1991–2020 (XI–IV)

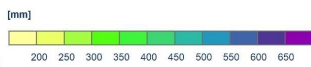
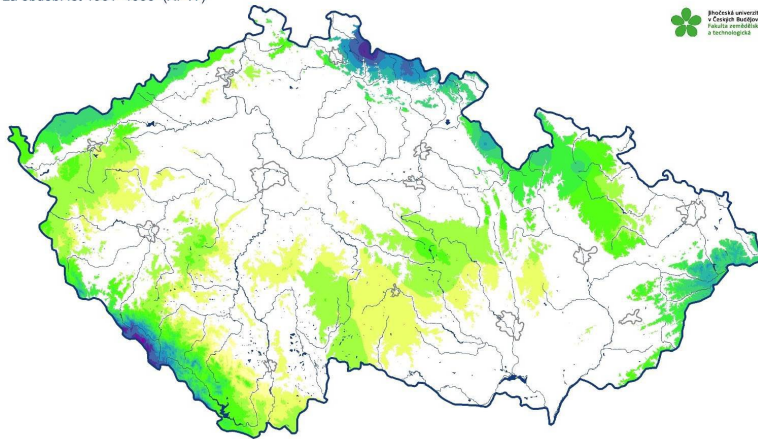


www.chmi.cz
www.fzt.jcu.cz

b)

Obr. 4. Mapa průměrného sezónního (listopad až duben) úhrnu nového sněhu z vybraných stanic v polohách nad 500 m n. m. za období a) 1961–1990, b) 1991–2020.

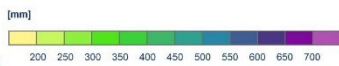
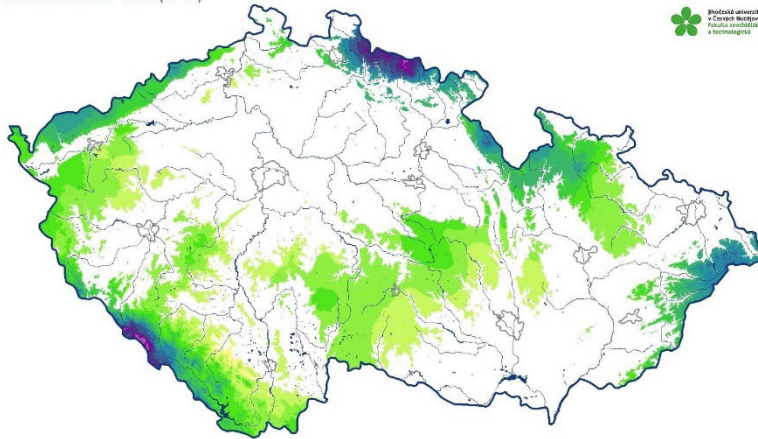
Průměrný úhrn srážek v zimních sezónách
za období let 1961–1990 (XI–IV)



www.chmi.cz
www.fst.jcu.cz

a)

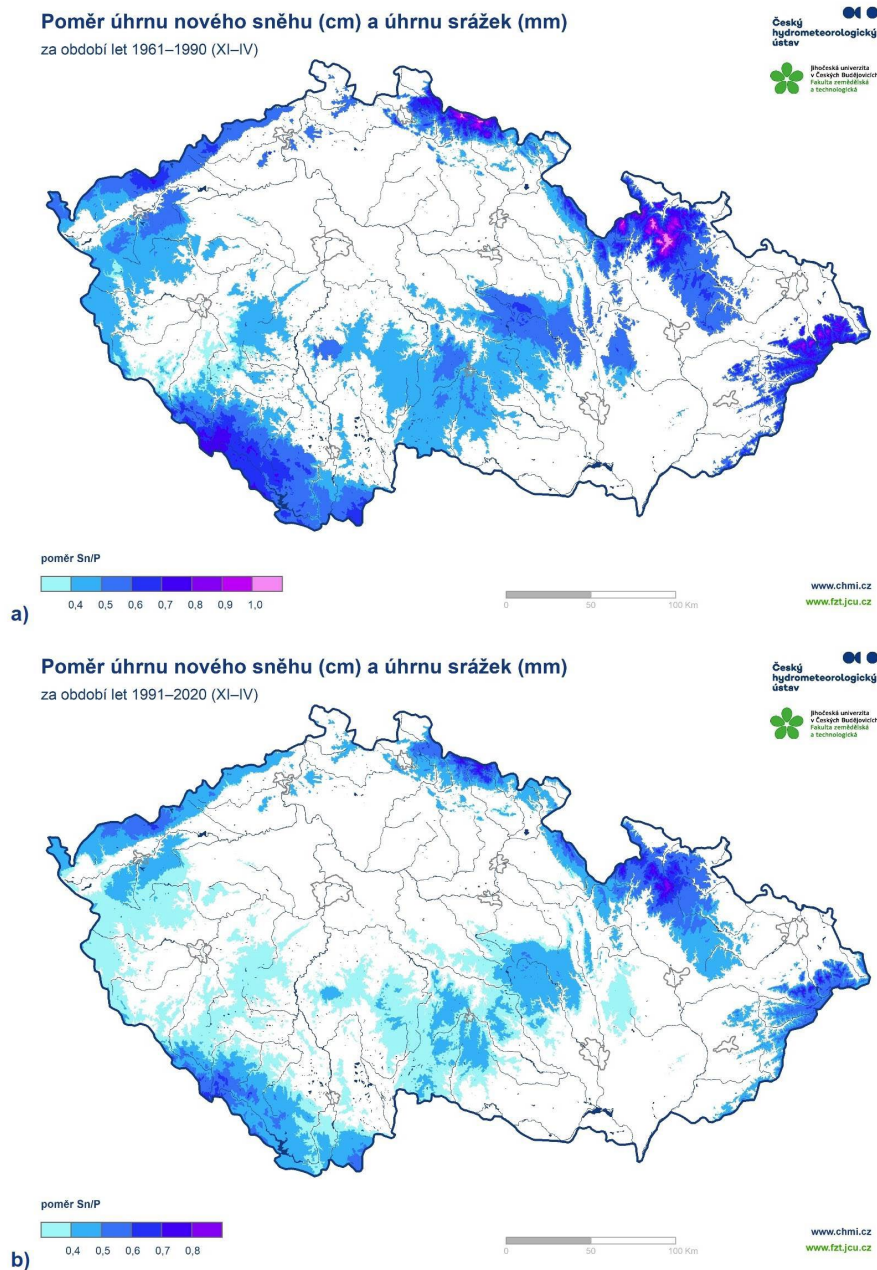
Průměrný úhrn srážek v zimních sezónách
za období let 1991–2020 (XI–IV)



www.chmi.cz
www.fst.jcu.cz

b)

Obr. 5. Mapa průměrného sezónního (listopad až duben) úhrnu srážek z vybraných stanic v polohách nad 500 m n. m. za období a) 1961–1990, b) 1991–2020.



Obr. 6. Mapa průměrného sezónního (listopad až duben) poměru Sn/P z vybraných stanic v polohách nad 500 m n. m. za období a) 1961–1990, b) 1991–2020.

4. Diskuse

Jak uvádějí Tolasz a kol. (2007) zpracováním hodnot úhrnu nového sněhu se nevěnovala taková pozornost jako jiným sněhovým a srážkovým charakteristikám. Velký počet prací se zaměřuje na poměr S/P, tedy sněhových a kapalných srážek (Snow to Precipitation Ratio), kde se hodnotí především trend vzhledem k měnícím se podmínkám klimatu. Většina prací dává změny S/P do souvislosti s růstem teploty vzduchu (Dong a Ming 2022, Feng a Hu 2007, Hynčica a Huth 2019), některé práce uvádějí vliv změn úhrnů zimních srážek a změny v charakteru cirkulace (Irannezhad a kol. 2017). Podobně Markovič a kol. (2020) hodnotí poměr počtu dnů se sněžením k počtu dnů se srážkami (SD/PD) na území Slovenska a přikládá hlavní vliv na změnách souvisejících s poklesem hodnot rostoucí teplotě vzduchu. Největší změny přitom zaznamenali v nižších polohách, zatímco v těch nejvyšších jsou změny relativně malé. Přestože v předložené studii z Česka nejsou řešeny počty dnů se srážkami, ani poměr tuhých a kapalných srážek, přináší výsledky poměru sezónního úhrnu nového sněhu a celkových srážek Sn/P podobné výsledky a trendy. I zde se dá předpokládat jako hlavní důvod

klesajícího trendu rostoucí teplota vzduchu, přestože zde nebyly souvislosti s dalšími meteorologickými prvky, situacemi nebo pozorováním podrobněji řešeny a analyzovány.

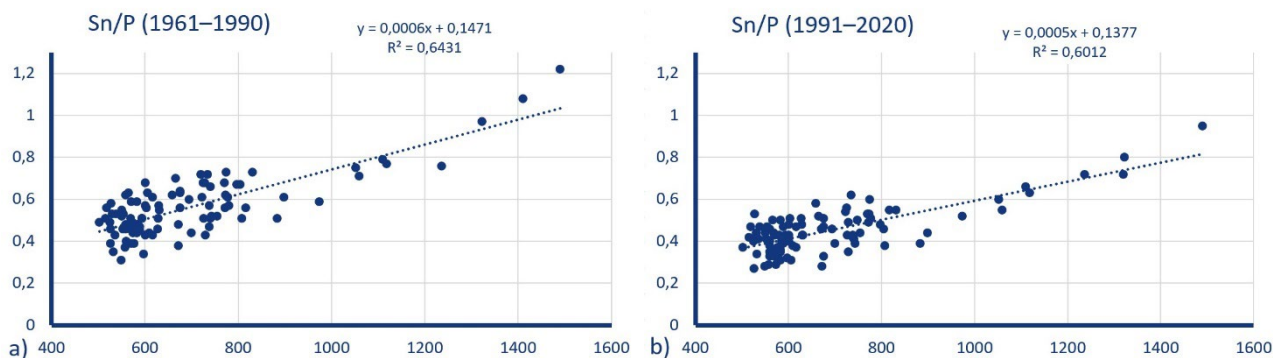
Naše studie se zabývá horskými a podhorskými oblastmi, jež byly pro tento účel vymezeny souhrnně polohami nad 500 m nadmořské výšky, ale i v jednotlivých dílčích pásmech lze vysledovat poněkud výraznější pokles S/P v polohách nad 1000 m n. m. v porovnání s těmi nižšími. Z těch úplně nejvyšších horských poloh v Česku má nejdelší souvislou řadu pozorování (sněh a srážky) od roku 1961 stanice na Pradědu, avšak provoz stanice byl ukončen v roce 1997, a tak stanice nebyla zahrnuta do celkového hodnocení. Nicméně pro názornost byla křivka průběhů teploty vzduchu, úhrnu srážek a poměru Sn/P za chladnou část roku ve zmíněných sezónách zobrazena v příslušných grafech. Kromě nejvyšších hodnot poměru Sn/P a nejnižších hodnot průměrné teploty vzduchu, je za 38 zobrazených sezón zřejmý jejich klesající, resp. stoupající, trend jako u stanic s nižší nadmořskou výškou (obr. 3). Podobně byly z důvodu naprostého nedostatku stanic a dat v těch nejvyšších polohách částečně využity krátkodobější řady ze stanic Vrbatova bouda, resp. Labská bouda v Krkonoších.

Pokud se číselně vyjádří pouze průměrný sezónní úhrn nového sněhu a sezónní úhrn srážek z hodnocených stanic v různých výškových pásmech, je ve všech případech zřejmý mírný nárůst úhrnu srážek, ale výraznější pokles úhrnu nového sněhu, pokud jde o srovnávaná normálová období 1961–1990 a 1991–2020 (tab. 3). V případě nárůstu úhrnu srážek nelze jistě vyloučit jistý pokrok v důslednosti jejich měření i díky technickému vybavení, zejména pak v horských polohách. V tabulce bylo navíc přidáno i výškové pásmo nad 1200 m n. m., kde jsou zahrnuty i výše zmíněné dvě stanice s nekompletní řadou dat.

Tab. 3. Průměrné hodnoty sezónního úhrnu sněhové pokrývky (SNO v cm) a srážek (SRA v mm) pro jednotlivá výšková pásma nad 500 m n. m. a hodnocená normálová období.

výšková pásma	období	SNO 1961–1990	SNO 1991–2020	SRA 1961–1990	SRA 1991–2020
nad 1 200 m n. m.		463	382	519,7	590,3
všechny nad 1 000 m n. m.		393	326	499,0	543,4
od 751 do 1 000 m n. m.		258	220	398,4	423,0
od 501 do 750 m n. m.		145	125	291,3	302,7
všechny nad 500 m n. m.		168	144	312,2	326,3

Do diskuse výsledků byla také vyjádřena závislost poměru Sn/P na nadmořské výšce pro obě období hodnotami v grafech (obr. 7), nicméně se zde projevuje určitý nepoměr mezi nedostatkem stanic ve výšce cca nad 900 m n. m. a naopak relativně velké množství stanic ve výšce 500–800 m n. m. V obou případech zde lze zjednodušeně interpretovat z více než 60 % jistou lineární závislost poměru Sn/P na nadmořské výšce.



Obr. 7. Závislost poměru Sn/P na nadmořské výšce, a) 1961–1990, b) 1991–2020

Úhrn nového sněhu, tvorba a trvání sněhové pokrývky mají kromě klimatologického a hydrologického významu i širší ekologické aspekty. Na území Německa byly hodnoceny parametry související s výskytem sněhové pokrývky a minimální teplotou půdy, resp. promrzáním půdy, na datech ze 177 meteorologických stanic v období 1950 až 2010 (Kreyling and Hal 2011). Na převážné většině stanic v Německu byl prokázán pokles počtu dnů se sněhovou pokrývkou, kdy v posledních 15 letech hodnoceného období se pokles zrychlil z 0,5 na 0,9 dne za rok. Z hlediska území pak byly nejvýznamnější změny zaznamenány na východě spolkové republiky Sasko, kdy je zde uvedena i krušnohorská stanice

Fichtelberg (1213 m n. m.). Autoři studie v této souvislosti také zmiňují, že snižování trvání sněhové pokrývky, zvyšováním minimální teploty půdy a nižším počtem cyklů zamrzání půdy mohou mít za následek horší přezimování rostlin, snižování jejich odolnosti vůči změnám, rozšiřování nepůvodních organismů apod. I z těchto důvodů bylo v rámci naší studie upřednostněno hodnocení úhrnu nového sněhu nad výskytem tuhých srážek nebo počtu dnů se sněžením v poměru k celkovým srážkám, resp. dnům se srážkami. Navíc jak bylo zmíněno, z hlediska rozlišení skupenství srážek se při hodnocení zpravidla naráží na malý počet stanic, které tuto charakteristiku sledují a mají odpovídající datovou řadu. Hynčica a Huth (2019) hodnotili data z 10 stanic a za období 1983–2018, Blšťák (2018) hodnotil data z 11 stanic a za období 1965–2014. Tento parametr předpokládá rozlišení srážek na pevné a kapalné, a počítá se vstupními hodnotami v mm. To je z dlouhodobého hlediska poměrně problematické, protože konkrétní rozlišení srážek v dřívějších letech záviselo často na pečlivosti a subjektivním hodnocení daného pozorovatele, v pozdější době pak na schopnosti přístrojové techniky nebo příslušných modelů srážky takto rozlišit, např. pomocí prahové hodnoty teploty vzduchu, která ale může být poměrně variabilní (Dai 2008). Kdežto pořizování záznamů dat, jako jsou úhrn srážek v mm a výška nového sněhu v cm, je z hlediska podstaty dlouhodobě víceméně konstantní. Pro účely této studie bylo tedy použito hodnocení poměru sezónního úhrnu nového sněhu a celkových srážek Sn/P. Tento přístup byl také uplatněn v rámci hodnocení změny sněhových charakteristik na Šumavě za období prosinec až březen v sezónách 1961/62 až 2016/17 na příkladu dat z Churáňova (Procházka a kol. 2018). Samozřejmě že množství vody, které spadne s každým naměřeným cm sněhu, může být rozdílné a závisí na více faktorech. To ovšem není pro dané hodnocení v rámci této studie až tak podstatné, jako možnost využít odpovídající datové řady s konkrétně naměřenými hodnotami z nepoměrně většího počtu meteorologických stanic. Uvedené bylo výhodou zejména vzhledem k variabilitě dat některých stanic zapříčiněné ať už stěhováním stanice nebo změnou místních podmínek, pozorovatele, přístrojového vybavení apod. Variabilitu dat dokumentují částečně i výsledky Sn/P z několika vybraných stanic nižších poloh, které byly uvedeny na konci tabulky jen pro porovnání (tab. 2). Z poměrně velkého souboru dat tedy bylo možno v této práci prostřednictvím poměru Sn/P instruktivně vyjádřit stav a dlouhodobé změny vztažené k tvorbě sněhové pokrývky v horských a podhorských oblastech Česka vymezených v tomto případě územím s nadmořskou výškou nad 500 m.

5. Závěr

Na základě hodnocení klimatologických dat ze 112 meteorologických stanic byly hodnoceny změny poměru sezónního úhrnu nového sněhu a sezónních srážek Sn/P (new snow/precipitation) v horských a podhorských oblastech Česka za období 1961 až 2020. Dotčené polohy nad 500 m nadmořské výšky byly rozděleny na tři výšková pásma, přičemž v porovnání s ostatními byly v průměru větší změny zaznamenány ve výškovém pásmu nad 1000 m n. m. Z průběhu průměrných hodnot poměru Sn/P za hodnocené období je pro všechna výšková pásma zřejmý vrchol křivky na přelomu 60. a 70. let, výrazný pokles v 80. letech, určitá stagnace na počátku 21. století a jistý náznak dalšího výraznějšího poklesu v posledních letech. Tyto změny jsou výsledkem postupného snižování úhrnu nového sněhu zejména v souvislosti s růstem teploty vzduchu, zatímco změny v úhrnu srážek nejsou tak významné. To bylo dokumentováno na prostorovém vyjádření průměrných hodnot za normálová období 1961–1990 a 1991–2020 prostřednictvím map i na grafickém příkladu průběhu hodnot z vybraných stanic. V porovnání s hodnocením poměru tuhých a kapalných srážek S/P, umožňuje poměr Sn/P využití dat z většího souboru klimatologických i srážkoměrných stanic. Zahrnuje navíc vytváření sněhové pokrývky, nikoliv jen výskyt tuhých srážek, které tvorbu sněhové pokrývky nemusí znamenat. Dá se předpokládat, že pokud bude docházet k dalšímu nárůstu průměrné teploty vzduchu v chladnější polovině roku, bude v horských i podhorských oblastech Česka docházet k postupnému snižování sezónního úhrnu nového sněhu. Při podobných sezónních srážkových úhrnech by to znamenalo další pokles poměru Sn/P s pravděpodobným různým trendem v jednotlivých výškových pásmech. V souvislosti s podrobnějším monitoringem sněhu a srážek v posledních letech bude předpokládané trendy jednotlivých charakteristik jistě možné lépe hodnotit i v těch nejvyšších horských oblastech Česka.

Poděkování:

Studie vznikla za podpory a v rámci činnosti FZT JU (RVO 60076658), ČHMÚ, ÚH AVČR, v.v.i. (RVO 67985874), Grantové agentury ČR (GA20-00788S, a Programu Strategie AV21 – Voda pro život. Poděkování patří zejména všem pozorovatelům a provozovatelům meteorologických stanic, bez jejichž dlouhodobé a obětavé práce by nebylo možno obdobná data archivovat a hodnotit.

Literatura:

- BLŠŤÁK, Adam, 2018. Změny podílu pevných a kapalných srážek v chladném půlroce a jejich vliv na jarní odtok z vybraných horských povodí. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie. Vedoucí práce Jeníček, Michal.
- CAPOZZI, V., DE VIVO, C., AND BUDILLON, G., 2022. Synoptic control over winter snowfall variability observed in a remote site of Apennine Mountains (Italy), 1884–2015, *The Cryosphere*, **16**, 1741–1763, <https://doi.org/10.5194/tc-16-1741-2022>.
- DAI, A., 2008. Temperature and pressure dependence of the rain-snow phase transition over land and ocean. *Geophysical Research Letters*, **12**, 35. <https://doi.org/10.1029/2008GL033295>.
- DONG, W., MING, Y. in press: Seasonality and variability of snowfall to total precipitation ratio over High Mountain Asia simulated by the GFDL high-resolution AM4. *Journal of Climate*. DOI:10.1175/JCLI-D-21-0026.1. May 2022.
- ESRI, 2018. Resources for ArcMap [online]. [cit. 15. 07. 2002]. Dostupné z WWW: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>
- FENG, S., HU, Q., 2007. Changes in winter snowfall/precipitation ratio in the contiguous United States, *J. Geophys. Res.*, **112**, D15109, <https://doi.org/10.1029/2007JD008397>.
- HYNČICA, M., HUTH, R., 2019: Long-term changes in precipitation phase in Czechia. *Geografie*, **124**, 41–55.
- IRANNEZHAD, M., RONKANEN, A.K., KIANI, S. CHEN, D. AND KLØVE, B., 2017. Long-term variability and trends in annual snowfall/total precipitation ratio in Finland and the role of atmospheric circulation patterns, *Cold Regions Science and Technology*, **143**, 2017, 23-31, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.008>.
- KREYLING, J., HAL, H., 2011. Vanishing winters in Germany: soil frost dynamics and snow cover trends, and ecological implications. *Clim Res* **46**:269-276. <https://doi.org/10.3354/cr00996>.
- MARKOVIČ, L., PECHO, J., FAŠKO, P., 2020. Zmeny v skupenskom zastúpení atmosférických zrážok v zime na území Slovenska. *Meteorologické zprávy*, roč. **73**, č. 1, s. 19–26. ISSN 0026–1173.
- NĚMEC, L., ZUSKOVÁ, I., 2005. Změny sněhové pokrývky v České republice od roku 1926. *Meteorologické zprávy*, roč. **58**, č. 5, s. 135–138.
- NOLIN, A. W., SPROLES, E. A., RUPP, D. E., CRUMLEY, R. L., WEBB, M. J., PALOMAKI, R. T., & MAR, E., 2021. New snow metrics for a warming world. *Hydrological Processes*, **35**(6), 1–13.
- PROCHÁZKA, J., TESAŘ, M., BEDNAŘÍK, J., 2018. Hodnocení sněhové pokrývky na Šumavě jako možného indikátoru klimatických a souvisejících změn. Snow Cover Assessment in the Bohemian Forest as a Potential Indicator of Climatic and Relating Changes. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): Hospodaření s vodou v krajině Třeboň 21. – 22. 6. 2018, ISBN 978-80-87361-83-2.
- STRŽÍŽ, M. 2008. Popis metod CLIDATA-GIS. [online] Dostupné z: <http://www.infomet.cz/fil/1295510217.pdf>.
- ŠERCL, P., 2008a. Hodnocení metod odhadu plošných srážek. *Meteorologické zprávy*, 61, č. 2, s. 33–43.
- ŠERCL, P., 2008b. AGHydroInterpolace (Interpoláční procedury pro ArcGIS). Uživatelská příručka. Praha: Český hydrometeorologický ústav.
- TERZAGO, S., CASSARDO, C., CREMONINI, R., AND FRATIANNI, S., 2010. Snow Precipitation and Snow Cover Climatic Variability for the Period 1971–2009 in the Southwestern Italian Alps: The 2008–2009 Snow Season Case Study, *Water*, **2**, 773–787, <https://doi.org/10.3390/w2040773>.
- TOLASZ, R. a kol., 2007. Atlas podnebí Česka. Praha, Olomouc: Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1 (ČHMÚ), 978-80-244-1626-7 (UP).

Klíčová slova: sněhová pokrývka, meteorologická stanice, srážkoměr, databáze CLIDATA, klimatický normál

Hospodaření s vodou v závlahách

Pavla Schwarzová¹, Jan Šálek², Tomáš Dostál¹, Martin Dočkal¹

¹ ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Thákurova 7, 16629 Praha 6, pavla.schwarzova@fsv.cvut.cz

² ČVHS při ČSSI, Staroměstská 1, 370 04 České Budějovice, salek.j@centrum.cz

Abstrakt

Popis zřízení potřebných měřících středisek v hlavních závlahových oblastech v ČR pro vysledování charakteristických klimatických podmínek a stanovení efektivního hospodaření se závlahovou vodou (stanovení termínů a velikostí závlahových dávek a jejich přínosu pro výnos zavlažovaných plodin). Analogie z jejich dlouhodobého využití v zahraničních podmínkách. Pohled na určení ztráty vody v závlahových soustavách, jako další významný krok v úspoře závlahové vody. Současný stav zohlednění ztrát vody v hlavním závlahovém zařízení i distribuci po zavlažované ploše. Potenciální vývoj závlahového detailu do budoucna.

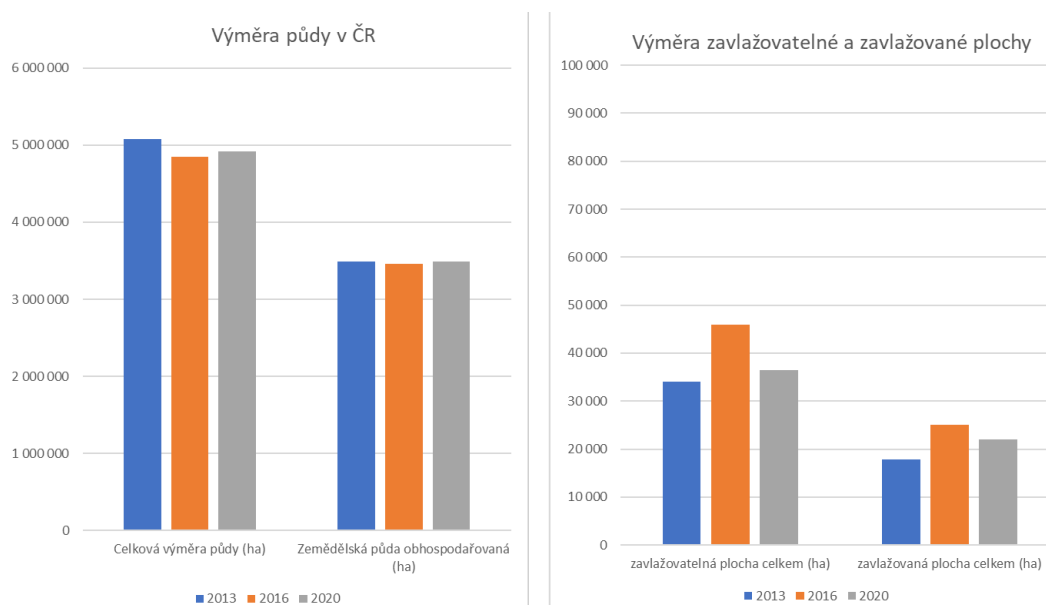
1. Úvod

Analýzy průběhů počasí za období 1961–2020 dokládají, že na našem území statisticky prokazatelně roste teplota vzduchu a tím i evapotranspirace (výpar z rostlin), ale zároveň bez významného trendu zůstává velikost srážek [ROŽNOVSKÝ, 2021, ZAHRADNÍČEK, 2022]. Tyto současné „krátkodobé“ trendy vývoje klimatu potvrzují důsledky klimatické změny, která zejména vodohospodářům působí starosti s nedostatkem zdrojů vody. Zároveň je zde pohled na vývoj klimatu dlouhodobý, z hlediska globální sluneční aktivity. Podle nejnovějších vědeckých výsledků studia klimatu žijeme nyní v krátkém interglaciálu a podle cyklů sluneční aktivity, které jsou z 99 % převažujícím hlavním zdrojem energie na Zemi oproti vlivu antropogennímu – klimatické změně, se po roce 2040 očekává příchod chladnějšího a vlhčího klimatu. Experimentální výzkum fyziky atmosféry a zemské kůry prokazuje, že všechny základní cykly jsou blízko svého maxima, včetně nárůstu koncentrace CO₂, které je způsobeno nárůstem teplot oceánů, a oproti kulminaci sluneční radiace je zatíženo mírným časovým posunem [KALENDA, 2022].

I přes optimistickou dlouhodobou prognózu jsou připravovány strategické plány řízení sucha a výhledově zabezpečován dostatek vodních zdrojů pro obyvatelstvo, zemědělství, průmysl atd. Co se týče zemědělství, současný světový rozvoj závlah zákonitě vyžaduje zásadní změny v řízení závlahových soustav. Změny by měly být zaměřeny též na ekonomii provozu, spočívající ve snížení nákladů na provoz závlah, v úsporách závlahové vody získané optimalizací řízení závlahového režimu, vývojem nových druhů a odrůd zemědělských plodin lépe hospodařících s vodou, v úpravě vodního režimu půd, ve zkvalitnění funkce závlahových zařízení aj. Přestože řada zemědělců v ČR již přechází na moderní technologie přesného monitoringu meteorologických podmínek a vyhodnocování dat v reálném čase, domníváme se, že není stále zabezpečeno optimalizované řízení závlahových provozů. Za současných, ještě poměrně příznivých podmínek dodávek závlahové vody a také poměrně dobré vodní bilance (mezi evapotranspirací a úhrnem srážek), jsou inspirací okolní státy, kde již klimatické podmínky dostupnost vody výrazně zhoršily (Španělsko, Izrael, Itálie, atd). Vzorem a inspirací pro úspěšná řešení mohou být provozní centra, po řadu let provozovaná, ve Francii, Itálii, Rakousku a v dalších zemích. V tabulce 1 a na obrázku 1 je vidět přehled výměr ČR, které se opatření týká. Zavlažovatelná plocha je stanovena jako celková maximální plocha obhospodařované zemědělské půdy, kterou by bylo možné v referenčním roce zavlažovat zařízením a množstvím vody, které je v zemědělských podnicích obvykle k dispozici. Zavlažovaná plocha je pak plocha využívaná k pěstování plodin, která byla ve sledovaném období alespoň jednou zavlažena.

Tab. 1 Vývoj výměry zemědělské, zavlažované a zavlažovatelné půdy v letech 2013, 2016, 2020. Zdroj ČSÚ, Agrocensus

	2013	2016	2020
Celková výměra půdy (ha)	5 076 425,06	4 846 772,68	4 923 129,97
Zemědělská půda obhospodařovaná (ha)	3 491 817,68	3 456 645,53	3 493 608,54
zavlažovatelná plocha celkem (ha)	34 065,85	45 859,10	36 395
zavlažovaná plocha celkem (ha)	17 842,45	25 002,72	22 019,33



Obr. 1 Vývoj výměry zemědělské, zavlažovatelné a zavlažované půdy v ČR v letech 2013, 2016, 2020. Zdroj dat ČSÚ, Agrocensus.

1.1 Konzultační a provozní střediska řízení závlahového provozu umístěná v centrech závlahových soustav.

Tato střediska se většinou umísťují v centrech závlahových soustav. U nás by přicházelo v úvahu jejich umístění např. v Polabí, Podkrušnohoří, na jižní a střední Moravě. Střediska se většinou vybavují špičkovou meteostanicí a malými lokálními hydrometeorologickými zařízeními, hydropedologickou laboratoří, testovacími plochami umožňujícími stanovení všech základních veličin, umožňujícími přesné stanovení vodního režimu rostlin apod. Vzhledem k nepřetržitému provozu střediska ve vegetačním období je nezbytný stálý provoz, případně ubytování pracovníků v blízkosti střediska aj.

Tato zahraniční konzultační a provozní závlahová střediska zajišťují:

- Podrobná sledování a vyhodnocování velikosti a frekvence dešťových srážek,
- věnují se prognóze výskytu a velikosti dešťových srážek, jejich jímání, akumulaci a využívání;
- způsoby infiltrace srážek do půdy, minimalizaci odtoku při přívalových srážkách a protierozní ochranou;
- doplňkový hydropedologický průzkum (sledují vývoj, hloubku a rozložení kořenové soustavy zavlažovaných plodin);
- na výzkumných plochách zjišťují vláhovou potřebu zavlažovaných plodin dané oblasti, využívají klasické metody i dálkový průzkum;
- zjišťují průběh vláhové potřeby plodin pěstovaných v dané oblasti. Optimální je stanovení průběhu evapotranspirace zavlažovaných plodin na vývojové fázi rostlin;
- podílejí se na přípravě, stanovení a realizaci závlahového režimu;
- vyhodnocují provozní náklady a vyhodnocují ekonomickou efektivnost závlah;

- na provozní středisko jsou napojená veškerá měrná zařízení na odběru vody, v trubní síti, na závlahovém detailu, tak, že umožňují přesné vyhodnocení ztrát vody a posouzení způsobu hospodaření závlahovou vodou.
- zvláštní pozornost je třeba věnovat automatizaci provozu, specialista na tuto problematiku je nezbytný;
- zařízení tohoto typu se využívají i k ověření nové závlahové techniky a školení obsluhy;
- závlahová střediska se vybavují zařízením na dálková sledování vlhkosti půdy, vývoje rostlin a stupěň zásobení vegetace vodou.



Obr. 2 Automatické meteostanice s dálkovým přenosem dat pro sledování meteorologických podmínek v ovocném sadu v reálném čase. VŠÚO Holovousy.

Výše uvedená průzkumná a řídicí centra průběžně předávají získané údaje jednotlivým dílčím závlahovým soustavám. Provoz závlahových center je během vegetačního období nepřerušovaný, se stálou obsluhou vyškolenými pracovníky a měřicí technikou. Způsob hospodaření se závlahovou vodou se průběžně zpracovává, vyhodnocené výsledky šetření se shromažďují ve výroční ročence.



Obr. 3 Automatické závlahové systémy kapkové závlahy na drátěnce v ovocném sadu VŠÚO Holovousy, včetně instalovaných ochranných protikroupových sítí.

Výše stručně popsany způsob se osvědčil v zemích s vyspělou závlahovou technikou, převážně ve střední a západní Evropě. Umožňuje využití matematického modelování při posuzování hospodaření se závlahovou vodou. Matematické modelování při posuzování způsobu hospodaření se závlahovou vodou je u nás v počátcích, ale k dispozici jsou zkušenosti u našich sousedů v řadě států s vyspělým závlahovým hospodářstvím ve střední a západní Evropě. Výpočet optimalizace závlahových režimů a přesných dávek závlahové vody použitím čidel (přesné stanovení velikostí závlahových dávek a jejich rozdělení) v současné době řeší v ČR řada autorů LITSCHMANN 2021, DUFFKOVÁ 2020, atd.

Stanovení ztrát vody v závlahových soustavách

Další z položek, která výrazně ovlivňuje hodnotu závlahové potřeby (M_z) a tím i velikost odebíraného množství závlahové vody ze zdrojů vody je ztráta (nežádoucí únik) vody. Rozlišujeme ztráty vody na zavlažované ploše (distribucí podrobným závlahovým zařízením, závlahovým detailem) a ztráty vody z rozvodů závlahových soustav (vedení vody od zdroje k závlahovému detailu).

2.1 Stanovení ztrát vody na zavlažované ploše.

První ze jmenovaných ztrát jsou uvedeny pro jednotlivé závlahové způsoby např. v ČSN 75 0434 „Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu“ jako tzv. ztrátový součinitel k_z v bilanční rovnici (1) a jsou uvedeny v tabulce 2.

$$M_z = k_z (r_1 * V_c - r_2 * \alpha S_v - r_3 * W_z - W_k) \quad (1)$$

Kde je	k_z	ztrátový součinitel vyjadřující průměrný podíl všech ztrát závlahové vody, s výjimkou ztrát v přivaděči
	V_c	celková vláhová potřeba zavlažované plodiny za vegetační období v m^3/ha
	α	součinitel využitelnosti srážek
	S_v	dlouhodobý průměr srážek za vegetační období plodiny v m^3/ha
	W_z	využitelná zásoba vody na začátku vegetačního období v m^3/ha
	W_k	využitelné množství vztlínající podzemní vody v m^3/ha
	r_1	redukční součinitel pro úpravu V_c v závislosti na nadmořské výšce a
	r_2	redukční součinitel pro úpravu α v závislosti na nadmořské výšce a
	r_3	redukční součinitel pro úpravu W_z v závislosti na druhu půdy a sklonu terénu

Tab. 2 Ztrátový součinitel k_z

Způsob závlahy	k_z
Mikrozávlahy	1,05 – 1,15
Postřik	1,15 – 1,25
Podmok	1,25 – 1,45
Přeron	1,45 – 1,65
Výtopa	1,65 – 2,5

Ztrátový součinitel k_z zahrnuje ztrátu závlahové vody výparem, povrchovým odtokem (díky nesprávně zvolené intenzitě zavlažování a překračování infiltrace do půdy) a průsakem (neefektivní ztráta vody průsakem do podloží, mimo hlavní masu kořenů, kde sice nadlepšujeme zásoby podzemní vody, ale překračujeme minimální a efektivní odběr vody z vodních zdrojů). Hodnota k_z byla do původní ČSN převzata ze zahraničních hodnot a vzhledem k absenci závlahového výzkumu v posledních 40-ti letech nebyla verifikována.

Z hlediska kapacity vodního zdroje hodnota ztrátového součinitele k_z značí navýšení potřeby závlahové vody o nutný podíl (procento) ztráty. Například u rozmezí kapkové závlahy je logicky u distribuce podzemním umístěním kapkovacího potrubí hodnota minimální (1,05, navýšení M_z o 5%), neboť nedochází k výparu závlahové vody ani povrchovému odtoku vlivem nevhodné intenzity závlahy. Nepřesným výpočtem závlahové dávky může docházet pouze k průsaku vody do větších hloubek, tedy neefektivně mimo hlavní masu kořenů. Naproti tomu u závlahy chmelnic, kde je kapkovací potrubí

umístěno většinou na stropě chmelnicové konstrukce, budeme očekávat hodnotu ztráty výrazně vyšší (1,15, tj. navýšení M_z o 15%), neboť ke ztrátě výparem i povrchovým odtokem může docházet, vlivem vykapávání ze značné výšky, viz obr. 4. U gravitačních závlahových způsobů (podmok, přeron, výtopa) dochází ke ztrátám značně vyšším (1,25 až 2,5, viz tabulka 2), díky kontaktu vodní hladiny s ovzduším a tím k intenzivnímu výparu, a také díky potřebnému průsaku (obtížně regulovatelnému na hloubku hlavní masy kořenů). Proto je v současné době spíše odklon od těchto závlahových způsobů. Využívány byly zejména v rozvojových zemích, kde byl nedostatek moderních technologií a levná pracovní síla. Výjimkami byly např. zkušenosti s rozsáhlými závlahami brázdovým podmokem např. v jižním Španělsku, kde byly tisíce hektarů automatických povrchových závlah s věžovými vodojemy.



Obr. 4 Umístění kapkovacího potrubí na stropě chmelnicové konstrukce, Účelové hospodářství Stekník, CHI Žatec.

2.2 Stanovení ztrát vody v hlavním závlahovém zařízení (v přívodních řadech).

Druhou z položek ztrát vody v závlahových soustavách jsou ztráty vody v rozvodech od zdroje vody k zavlažované ploše (v hlavním závlahovém zařízení, v závlahové kostře). Tyto přívody mohou být trubní nebo otevřenými kanály. Jak již bylo řečeno, v podmínkách zvyšujících se teplot a nutných úspor vodních zdrojů je snaha o striktní budování podzemních trubních sítí a tím minimalizace ztrát výparem a nežádoucími průsaky. Pro otevřené kanály uvádí výpočet potenciálního odběru vody pomocí závlahové účinnosti soustavy REHÁK, 2015.

Experimentální výzkum stanovení ztrát vody byl publikován v poměrně dávné době, LYSÝ, 1968. Výzkumná práce týkající se ztrát vody ze závlahových trubních sítí byla zpracovávána ve Výzkumném ústavu závlahového hospodářství Bratislava a hlavní pozornost věnovala určení ztrát vody na hlavním závlahovém zařízení (HZZ). Byla zaměřena na stanovení ztráty vody průsakem z potrubí a spojek, stanovení ztrát vody na armaturách trubní sítě a konečně na stanovení četnosti výskytu provozních závad na HZZ (v ČS a v trubní sítí). Výzkumem bylo zjištěno, že v celkové bilanci vodních ztrát zaujímají významný podíl ztráty vody na armaturách trubní sítě (75 %), ztráty průsakem z potrubí a spojek a na ostatních armaturách trubní sítě tvořily pouze 25 %. Výzkumná práce dále uvádí, že údaje o vodních ztrátách nebyly zjišťovány v ČR ani v zahraničí, získávají se z vodárenské praxe, a to přestože je problematika vodárenských sítí značně odlišná a ztráty mají jiný charakter.

Výpočet ztrát (úniků) vody uvádí ČSN 75 0434 „Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu“ ve vzorci (2) pro výpočet specifického přítoku závlahové vody. Specifický přítok q_p ($l/s \cdot ha$) se vypočítá z podmínky, aby na plochu se současným nárokem na závlahu F_x bylo možno přivádět specifický dávkový přítok q_d

$$q_p = k_n * q_d * \frac{F_x}{F} \quad (2)$$

kde je

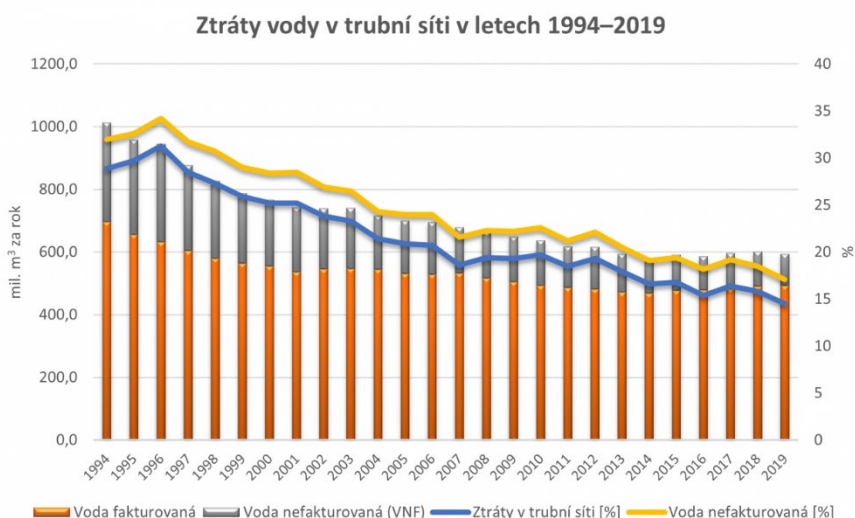
- k_n součinitel vyjadřující ztráty závlahové vody v přivaděčích a závlahové síti (viz poznámka)
- F_x plocha plodin se současným nárokem na závlahu v ha
- F celková závlahová plocha v ha

Poznámka: Hodnota součinitele kn, se stanoví podle způsobu závlahy a podle délky a způsobu těsnění přívodu a rozvodu vody. Ztráty v podzemní tlakové síti se zpravidla zanedbávají.

Ztráty vody v trubní síti závisí na stáří trubní sítě, materiálu, jejím technickém stavu i na tlaku vody v rozvodné síti. V současné době je velký rozdíl ve stavu přírodních potrubí. Některé rozvody jsou již realizované nově v plastových potrubích, jinde dožívá několik desítek let stará trubní infrastruktura. Z pohledu kvality rozvodné sítě je zcela jistě možné očekávat její obnovu (tam, kde bude využívána), čímž bude docházet ke snižování ztrát vody, analogicky jako u rozvodů vodárenských, viz tabulka 3 a obrázek 5.

Tab. 3 Vývoj ztrát vody na vodovodní síti v Praze, zdroj: www.pvk.cz

Vývoj ztrát vody	%
1996	43,13
2000	34,17
2005	25,78
2012	21,43
2013	20,42
2014	17,27
2015	17,60
2016	14,20
2017	15,09
2018	13,48



Obr. 5 Vývoj ztrát vody na vodovodní síti v ČR, zdroj ČSÚ, sovak.cz.

Při realizaci větších trubních sítí se závlahy stále ještě uvažují jako II. třída podle náročnosti na materiály/provedení/zkoušky oproti trubním rozvodům pro účely vody pitné. Postupem doby se doporučuje používat BAT (nejlepší dostupné technologie), a pro rozsáhlejší závlahové sítě bude doporučeno ukládat HDPE potrubí do země do nezamrzlé hloubky. Pro vodovodní sítě jsou v posledních letech uváděny ztráty na rozvodech na 14 % (2018), zatímco 1996 bylo cca 43 %.

Z hlediska praktických zkušeností jsou se ztrátami vody velké odlišnosti, podle druhu sítě (velký podíl armatur nebo u značně členitých trubních rozvodů), podle stáří, technického stavu a materiálu. V reálných podmínkách nových plastových trubních rozvodů pro automatické závlahové systémy s bezpečnostními prvky pro detekci úniků vody, se ztráty vody skutečně zanedbávají, zejména pokud jde o svařované spoje. Ke ztrátám vody může eventuálně dojít při

nekvalitní montáži nebo nedotěsnění šroubovaných spojů. Při nekvalitní údržbě PE rozvodů je odhad ztrát vody max. do 1–2 %, JEŘÁBEK, 2018.

U starých rozvodů se výše ztrát vody může pohybovat zhruba kolem 15 %, u oceli se časem projeví koroze, azbestocementové potrubí je křehké a praská. Ve starších zemědělských soustavách jsou v současné době stále velké úniky na armaturách a výstupních zařízeních (hydrantech, bajonetových uzávěrech přenosných rychlospojkových potrubí, nebo u napojeníh závlahových prvků). Pro výpočet ztrát vody v současné době je potřeba stanovit jednoduchý výpočetní vzorec a zohlednit vzdálenost vedení vody od zdroje vody k místu distribuce. Finální hodnoty ztráty by se pak mohly pohybovat kolem empirické hodnoty zohledňující podíl procenta armatur ku délce trubních rozvodů v rozmezí 16–20 %.

Závěr

Dopady klimatické změny a omezování využívání vodních zdrojů vyžadují maximální úspory závlahové vody. K úsporám v přesném dávkování závlahové vody mohou pomoci konzultační a provozní závlahová střediska, která fungují v zahraničí, v zemích s vyspělou závlahovou technikou. Převážně ve střední a západní Evropě zajišťují v klíčových zemědělských oblastech kvalifikovaný zemědělský monitoring, průběžně předávají získané údaje jednotlivým dílčím závlahovým soustavám. Podobně to funguje v chmelařství a vinařství ČR, kde výzkumné areály zabezpečují poradenství a potřebné analýzy pro kritické fenofáze. V zahraničí se v těchto střediscích se průběžně zpracovává a vyhodnocuje způsob hospodaření se závlahovou vodou a poskytují prakticky ověřené podklady k optimalizovaným řízením závlahových režimů. Přínos je vhodný zejména s ohledem na nedostatečně aktuální legislativu ČR a absenci závlahového výzkumu 1990–2020.

Ztráty závlahové vody v závlahových soustavách se v současné době stanovují paušálně, nezohledňují aktuální stav věcí. Středomoří a oblasti v současné době již dramaticky deficitní jsou již nuceny k maximálním úsporám závlahové vody, zatímco v ČR se v současné době situace teprve pomalu zhoršuje. Z tohoto důvodu je nutno aktualizovat výpočty závlahových režimů (i s ohledem na každoroční proměnlivost klimatických podmínek) a přejít na šetrnější hospodaření s vodními zdroji.

Poděkování TAČR

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu Fakulty stavební ČVUT SGS17/173/OKH1/3T/11 „Experimentální výzkum erozních a transportních procesů v zemědělsky využívané krajině“ a projektu TAČR SS02030027, Centrum Voda: „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“.

Literatura:

ROŽNOVSKÝ, J., STŘEŠTÍK, J., 2021. Srážkové poměry na území ČR podle dvou normálových období. In: sborník konference Hospodaření s vodou v krajině, 14.-15.9.2021 Třeboň. ČHMI Brno, 2021, ISBN

ZAHRADNÍČEK, P., 2022. Sucho a prognóza jeho vývoje v ČR. In: Seminář Závlahy – opatření k ochraně před následky změn klimatu v ČR. Skalský Dvůr, 20.-21.4.2022

KALENDA, P. 2022: Klimatická změna a voda. In: konference VODA 2020, Praha 21.6.2022 ČSSI, ČKAIT, ISBN

LITSCHMANN, T. 2021, Optimalizace množství vody při kapkové závlaze jabloní s využitím snímačů půdní vlhkosti

DUFFKOVÁ, R., a kol, 2020 Metodika hodnocení vláhových potřeb zemědělských plodin pro účely závlah, certifikovaná metodika, VUMOP v.v.i., 2020, ISBN 978-80-88323-12-9

ČSN 75 0434 Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu, Sweco Hydroprojekt a.s., Praha, 2017

REHÁK, Š. a kol, 2015. Zavlažovanie poľných plodín, zeeniny a ovocných sadov. Veda, Bratislava. Vydavateľstvo SAV, 2015, ISBN 978-80-224-1429-6.

LYSÝ, M., 1968, Ztráty vody ze závlahových trubních sítí. Výzkumný ústav závlahového hospodářství Bratislava, 1968.

<https://www.pvk.cz/aktuality/sucho-zapricinilo-narust-poctu-havarii-na-vodovodni-siti-ztraty-vody-na-minimu/>

<https://www.sovak.cz/cs/clanek/ztraty-vody-v-ceske-republice>

JEŘÁBEK, J., 2018. Moderní technologie pivotových zavlažovacích strojů, Konference Krajinné inženýrství, Praha, 2018

KULHAVÝ, F., KULHAVÝ, Z., 2008. Navrhování hydromelioračních staveb, ČKAIT, Praha 2008, ISBN: 978-80-87093-83-2

LITSCHMANN, T., 2018. Řízení závlahy, FAQ, závlahové školení Irimon, Praha 22.2.2018

ŠÁLEK, J., SCHWARZOVÁ, P., 2018. Hospodaření s vodou v zemědělství s ohledem na ochranu před následky sucha. Konference Sucho a hospodaření s vodou, Sborník referátů z konference, 13.-14.6.2018, České Budějovice, Česká společnost vodohospodářská, 2018. ISBN 978-80-87140-53-6.

Projekt TAČR SS02030027, Centrum Voda: Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu, 03/2020–12/2026

Klíčová slova: závlahy, závlahové soustavy, konzultační a provozní střediska, ztráty vody v závlahové síti

Porovnania metód merania zrážok: preklápací zrážkomer vs. lyzimeter

Andrej Tall¹, Branislav Kandra¹, Dana Pavelková¹, Milan Gomboš¹, Helena Hlavatá²

¹ Ústav hydrológie Slovenskej akadémie vied, v. v. i., Dúbravská cesta 9, 841 04, Bratislava, tall@uh.savba.sk

² Slovenský hydrometeorologický ústav regionálne pracovisko Košice, Ďumbierska 26, 041 17, Košice

Abstrakt

Poznanie množstva spadnutých zrážok a ich rozloženie v čase a priestore je nevyhnutným podkladom pre každý hydrologický výskum. Atmosférické zrážky možno definovať ako vodu, ktorá sa v kvapalnom alebo pevnom skupenstve dostane z atmosféry na zemský povrch. Cieľom práce je porovnanie dvoch spôsobov merania zrážok: meranie preklápacím zrážkomerom a meranie zrážok pomocou vážiteľných lyzimetrov.

Porovnávací experiment bol prevedený na lyzimetrickej stanici v Petrovciach nad Laborcom, ktorá sa nachádza na Východoslovenskej nížine. Ako referenčná metóda merania bolo zvolené lyzimetrické meranie. Dôvodom je vyššia citlivosť merania pomocou lyzimetra (0,01 mm oproti 0,1 mm) a rádovo vyššia záchytná plocha lyzimetra (10 000 cm² oproti 200 cm²). Použitý preklápací zrážkomer nie je vyhrievaný a preto boli porovnávané len tekuté dažďové zrážky. Porovnávací experiment trval spolu s dvomi zimnými prestávkami 3 roky (2019 až 2021).

Z porovnania vyplynulo, že preklápací zrážkomer podhodnocuje zrážky v porovnaní s lyzimetrom. Kumulatívne zrážky za celé sledované obdobie zachytené zrážkomerom boli o 2,5 % nižšie v porovnaní s lyzimetrickými meraniami. Veľmi vysoká miera korelácie ($R^2 > 0,99$) bola zaznamenaná pri porovnaní hodinových a denných úhrnov zrážok a zrážkových udalostí. Tieto výsledky poukazujú na vysokú spoľahlivosť merania tekutých atmosférických zrážok pomocou štandardného preklápacieho zrážkomera.

1. Úvod

Meranie zrážok je nesmierne dôležité pre hydrologické, klimatologické a poľnohospodárske účely, akými sú plánovanie závlah, manažment zdrojov pitnej vody, skúmanie sucha a povodní, hydrologické modelovanie a pod. (Šoltész 2021). Atmosférické zrážky možno definovať ako vodu, ktorá sa v kvapalnom alebo pevnom skupenstve dostane z atmosféry na zemský povrch. Zďaleka najväčšie množstvo zrážok spadne gravitačne v podobe dažďa alebo snehu. Ďalšími formami sú mrholenie a ľadové krúpy. Vlhkosť z atmosféry sa môže prenášať na zemský povrch aj procesom kondenzácie vo forme rosy, námrazy, alebo hmly, avšak tieto formy nie sú podľa Svetovej meteorologickej organizácie (WMO 2018) zahrnuté v definícii zrážok. Množstvo zrážok sa stanovuje vo forme vertikálnej výšky vodného stĺpca v milimetroch [mm], prípadne pri snehových zrážkach v ekvivalentoch vodného stĺpca. Intenzita zrážok je definovaná ako množstvo zrážok za jednotku času (napr. mm/h, mm/d...).

Vo svete najbežnejším inštrumentom na meranie zrážok sú zrážkomery. Sú to zariadenia s presne definovanou záchytnou plochou. Podľa spôsobu merania poznáme niekoľko druhov zrážkometerov. Najjednoduchšie sú akumulčné zrážkomery, kde sa množstvo zrážok priamo odčítava pomocou mierky na záchytnej nádobe. Ďalším druhom sú váhové zrážkomery, pri ktorých sú zrážky merané priamo na váhach. Poslednú skupinu tvoria tzv. preklápacie zrážkomery, pri ktorých je voda zo zbernej plochy cez lievik v jej strede nasmerovaná do preklápacej nádoby s presne definovaným objemom. Meria sa počet preklopení preklápacej nádoby (napr. jedno preklopenie = 0,1 mm zrážok). Nevýhodou preklápacích zrážkometerov je, že pokiaľ nie sú vyhrievané, dokážu merať len tekuté zrážky vo forme dažďa. Pre meteorologické účely sú zrážkomery zvyčajne umiestnené vo výške od 0,5 do 1,5 m nad zemou (WMO 2018).

Tvar, veľkosť a výška inštalácie zrážkomeru sú zdrojom systematických a náhodných chýb pri meraní zrážok. Najčastejšou systematickou chybou je deformácia tlakového poľa nad záchytnou plochou zrážkomeru spôsobená veterným obtekaním (Sevruk et al. 1989). Táto chyba narastá s výškou inštalácie zrážkomeru (Sevruk 1996). Ďalšou

systematickou chybou sú straty spôsobené zmačáním stien zrážkomeru a následným odparením. Náhodné chyby sú najčastejšie spojené s relatívne malou záchytnou plochou zrážkomerov, ktorá nemusí byť dostatočne reprezentatívna.

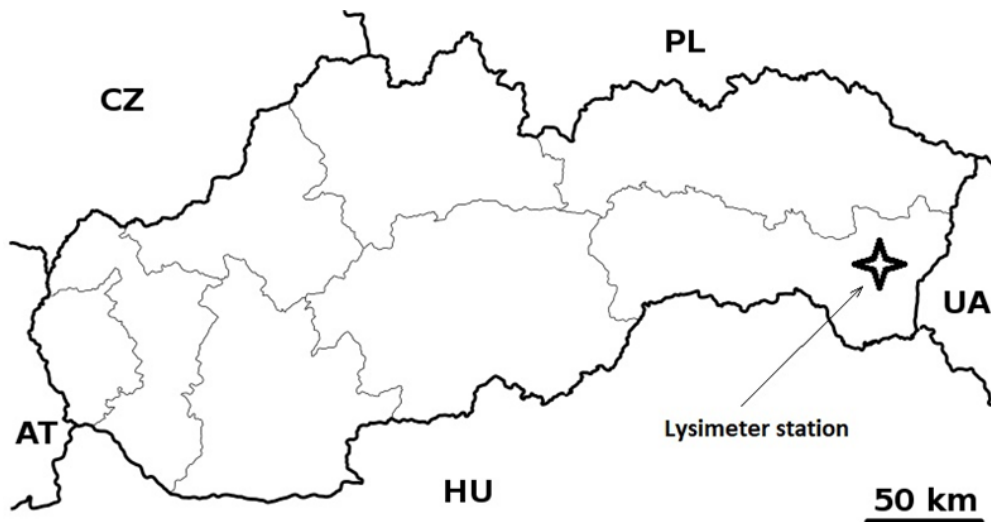
Veľký pokrok v presnosti merania zrážok prišiel so zavedením precíznych vážitelných lyzimetrov (Kohfahl and Saalting 2020; Nolz et al. 2014). Ich veľká záchytná plocha umiestnená na úrovni terénu do značnej miery eliminuje vplyv systematických aj náhodných chýb. Vysoká presnosť váženia v kombinácii s relatívne veľkou záchytnou plochou zaručuje citlivosť merania zrážok až na úrovni 0,01 mm. Výhodou lyzimetrov je, že dokážu zachytiť zrážky vo všetkých formách, ako aj skondenzované vodné pary (rosa, námraza...).

Cieľom tejto práce je vyhodnotiť a porovnať meranie zrážok preklápacím zrážkomerom a precíznym vážitelným lyzimetrom v podmienkach mierneho klimatického pásma Východoslovenskej nížiny.)

2. Metodika

Experiment bol prevedený na lyzimetrickej stanici v Petrovciach nad Laborcom (obr. 1). Stanica sa nachádza vo východnej časti územia Slovenska v severnej časti Východoslovenskej nížiny (VSN). Nížina má rovinný až nepatrne zvlnený reliéf s nadmorskou výškou od cca 100 do 180 m n. m. Územie sa nachádza na rozhraní oceánskej a kontinentálnej klímy (Šútor a kol., 2007). Podľa Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ, 2015) ide o teplú, mierne vlhkú oblasť s miernou zimou (priemerná ročná teplota vzduchu 10°C; priemerný ročný úhrn zrážok 600–700 mm).

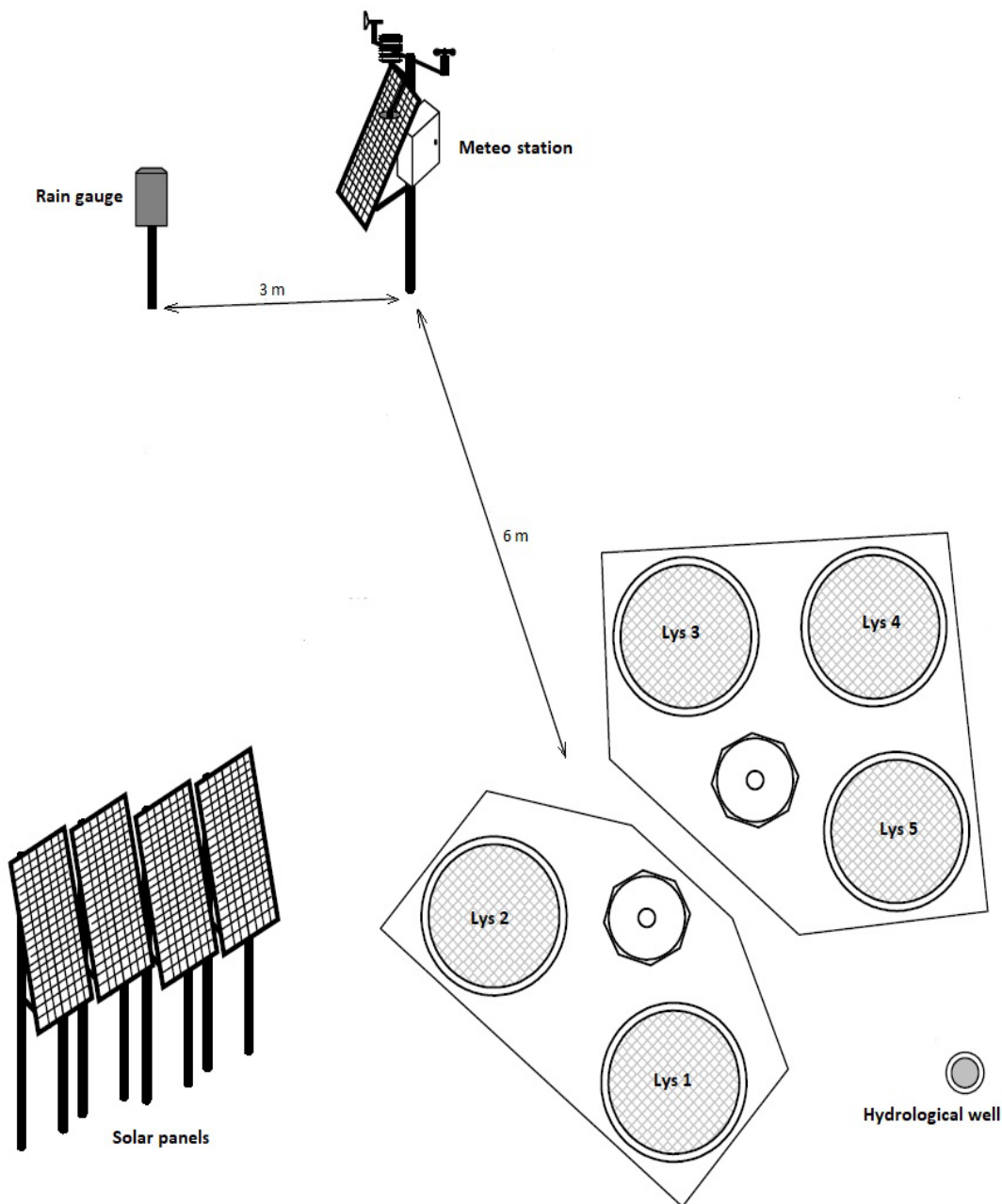
Lyzimetrická stanica (Umwelt-Geräte-Technik (UGT), GmbH., Germany) patrí Ústavu hydrológie Slovenskej Akadémie vied, v. v. i., bola vybudovaná v roku 2014 a do prevádzky bola odovzdaná v roku 2015. Pozostáva z piatich vážitelných lyzimetrov (Lys 1, Lys 2, ... Lys 5), hydrologického vrtu, meteorologickej stanice a solárnych panelov, ktoré zabezpečujú všetky energetické potreby stanice (obr. 2 a 3). Podrobnejší popis lyzimetrickej stanice spolu s technickými parametrami je uvedený v literatúre (Tall et al. 2018; Tall a Pavelková 2020; Matušek et al. 2017). Lyzimetre sú vybavené regulačným systémom, ktorý umožňuje udržiavať zvolenú výšku hladiny podzemnej vody (Tall a Pavelková, 2020). Počas trvania experimentu bola táto výška udržiavaná na úrovni -1m pod terénom.



Obr. 1 Situovanie lyzimetrickej stanice.

Valce sú postavené na trojbodovom elektronickej váhovej systéme, ktorý monitoruje hmotnosť lyzimetrov s rozlíšením 10 g, čo pri povrchovej ploche 1 m² korešponduje s ekvivalentom 0,01 mm vodného stĺpca. Merané údaje sú priebežne ukladané do datalogrov a odtiaľ sú jedenkrát denne prostredníctvom bezdrôtového pripojenia odosielané na server. Na vyhladenie šumu pri meraní hmotnosti bol použitý Savitzky-Golay filter (Savitzky and Golay 1964; Tall et al. 2018). Všetky údaje z lyzimetrickej stanice sú spracovávané a ukladané s časovým intervalom jednej hodiny.

Meteo stanica je súčasťou lyzimetrickej stanice a nachádza sa v bezprostrednej blízkosti lyzimetrov (obr. 2). Vo výške 2 m sú merané vlhkosť, globálne žiarenie, teplota vzduchu, rýchlosť a smer vetra. Na meranie zrážok slúži preklápací zrážkometer (TB (tipping bucket)).



Obr. 2 Schematický náčrt lyzimetrickej stanice.

2.1 Preklápací zrážkometer

V tejto štúdii bol použitý automatický preklápací zrážkometer (Id-No. 00.15189.002 000, Lambrecht, Germany) v nevyhrievanej verzii (obr. 3). Umiestnený je vo výške 1 m. Jeho preklápacia nádoba pojme 2 cm³ (2 g) vody. Zberná plocha 200 cm² (podľa normy Svetovej meteorologickej organizácie č. 8 (WMO 2018)) znamená, že jedno preklopenie nádoby zodpovedá úhrnu zrážok 0,1 mm na meter štvorcový. Ak sa nádoba preklopí, vytvorí sa impulzný výstup. Tento impulzný výstup je elektricky snímaný, diaľkovo prenášaný a zaznamenávaný. Zaznamenané kumulatívne hodnoty zrážok sa prepočítavajú a ukladajú ako hodinové úhrny. Presnosť prístroja je podľa výrobcu $\pm 2\%$ a rozsah merania sa pohybuje od 0 do 8 mm/min.



Obr. 3 Lyzimetrická stanica v Petrovciach nad Laborcom a preklápací zrážkomer LAMBRECHT.

2.2 Zrážkové údaje z lyzimetra

Dáta o zrážkach z lyzimetrov sú derivované z ich hmotnosti. Na celkovú hmotnosť lyzimetra majú vplyv toky na jeho vrchnej, ako aj spodnej hranici. Na vrchnej hranici prispieva k znižovaniu hmotnosti lyzimetra prebiehajúca evapotranspirácia. Táto v sebe zahŕňa výpar z povrchu pôdy a vegetácie. Naopak nárast hmotnosti je spôsobený zrážkami (vo forme dažďa, mrholenia, snehu, krupobitia...) a tiež kondenzáciou vodných pár na povrchu vo forme rosy a námrazy. Keďže skúmané lyzimetre sú vybavené reguláciou podzemnej vody (GWL (groundwater level)), k zmene hmotnosti prispievajú aj toky vody na ich spodnej hranici (BF (boundary fluxes)). Prítok vody (+) alebo jej odtok (-) na spodnej hranici má za následok zvýšenie alebo zníženie hmotnosti. Keďže GWL bola udržiavaná na konštantnej úrovni, kladné hodnoty BF predstavujú kompenzáciu kapilárneho výzdvihu a záporné hodnoty BF predstavujú gravitačné toky do GWL.

Pre výpočet zrážok z lyzimetrov (P_{Lys}) bol použitý postup podľa Schradera et al. (2013), upravený podľa Tall (2020):

$$\text{If } (\Delta W \pm BF) < 0 \text{ then } ET_a = \Delta W \text{ and } P_{Lys} + D = 0$$

$$\text{If } (\Delta W \pm BF) \geq 0 \text{ then } ET_a = 0 \text{ and } P_{Lys} + D = \Delta W \quad (1)$$

kde: ΔW je zmena obsahu vody v lyzimetri, BF sú toky na spodnej hranici lyzimetra, P_{Lys} sú zrážky zachytené lyzimetrom, D (dew) je adsorpcia pár (rosa) na povrchu a ET_a je aktuálna evapotranspirácia. Keďže povrch lyzimetrov je 1 m^2 (1 kg vody $\approx 1 \text{ l/m}^2 = 1 \text{ mm}$ vodného stĺpca), všetky vyššie uvedené parametre sú uvedené v jednotkách dĺžky [mm]. Rovnice (1) predpokladajú, že zrážky a vyparovanie nemôžu nastať súčasne.

Strata hmotnosti lyzimetra ($(\Delta W \pm BF) < 0$) je spôsobená ET_a a prírastok hmotnosti ($(\Delta W \pm BF) > 0$) je spôsobený buď P_{Lys} , alebo D. Ak je na preklápacom zrážkomete zaznamenaná zrážková udalosť ($P_{TB} > 0$) a súčasne dôjde k zvýšeniu hmotnosti lyzimetra, potom sa prírastok hmotnosti priradí k P_{Lys} . V opačnom prípade sa prírastok hmotnosti pripíše D.

2.3 Dostupnosť a príprava dát

Experiment prebiehal od februára 2019 do novembra 2021 (tab. 1). Synchronizované údaje o zrážkach z TB aj lyzimetrov boli získané počas troch po sebe nasledujúcich období, prerušených dvoma zimnými prestávkami. Keďže použitý TB nie je vyhrievaný, boli vynechané obdobia s výskytom snehových zrážok. Z procedúry uvedenej vo vzťahoch (1) vyplýva, že do porovnávacej štúdie boli zahrnuté len tekuté zrážky, ktoré je schopný zachytiť TB a časovo im zodpovedajúce zrážky zaznamenané lyzimetrami. Horeuvedenými postupmi boli z porovnania vylúčené všetky netekuté príp. nedažďové zrážky (sneh, rosa, námraza, mrholenie, hmľa a pod.). Pre účely tejto štúdie boli zrážky hodnotené vo forme hodinových a denných úhrnov a tiež vo forme zrážkových udalostí s premenlivým trvaním. Počas 27 sledovaných mesiacov bolo zaznamenaných 358 zrážkových dní, 1 762 zrážkových hodín a 576 zrážkových udalostí. Pri porovnávaní boli dáta

o zrážkach z lyzimetra považované za referenčné vo vzťahu k dátam z preklápacieho zrážkomeru z nasledujúcich dôvodov: o jeden rád vyššia citlivosť merania zrážok (0,01 vs. 0,1 mm), 50 krát väčšia zachytaná plocha (10 000 vs. 200 cm²), výška merania nad terénom (0 vs. 1 m) a päť opakovaní merania (5 x Lys vs 1 x TB).

Tab. 1 Časový rámec experimentu a počty pozorovaných časových a zrážkových jednotiek.

	pozorované obdobie	mesiace	dni pozorované (so zrážkami)	hodiny pozorované (so zrážkami)	zrážkové udalosti počet (priemerné trvanie (hod))
2019	01.02.2019 – 30.11.2019	10	303 (113)	7 272 (601)	186 (3,2)
2020	01.02.2020 – 30.11.2020	10	304 (141)	7 296 (706)	222 (3,2)
2021	01.03.2021 – 30.11.2021	9	275 (104)	6 600 (455)	168 (2,7)
	Σ	29	882 (358)	21 168 (1 762)	576 (3,1)

3. Výsledky

3.1 Vyhodnotenie zrážok z lyzimetrov

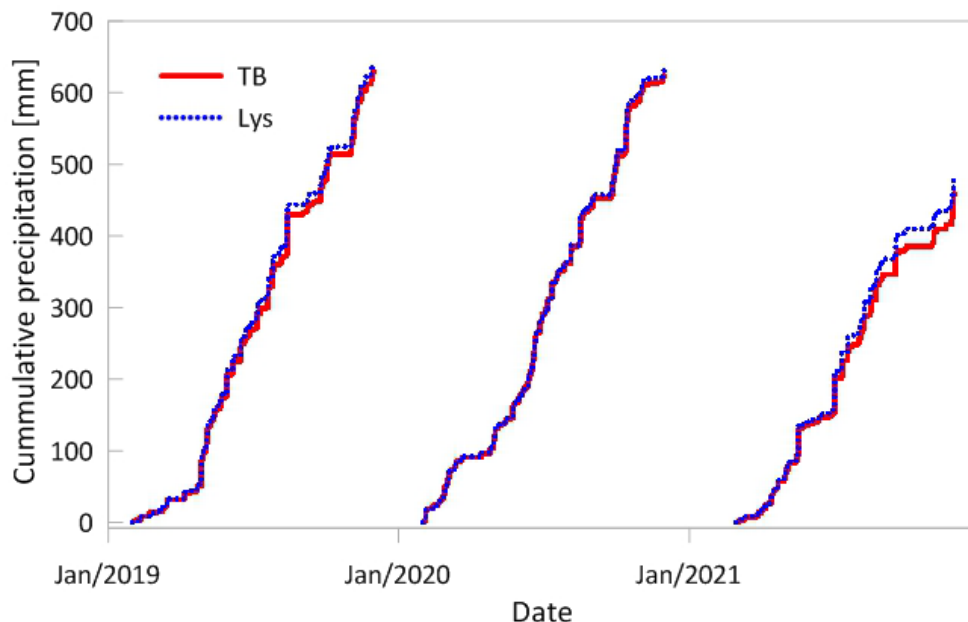
Počas skúmaného obdobia boli zrážky merané pomocou piatich lyzimetrov v piatich opakovaníach (Lys 1, Lys 2,..., Lys 5). Bolo získaných päť súborov hodinových úhrnov (P_{Lys1} , P_{Lys2} ,..., P_{Lys5}). Ich jednoduché štatistické ukazovatele sú uvedené v tab. 2. Najnižšia hodnota kumulatívnych zrážok (1 729 mm) bola nameraná v Lys 4 a najvyššia v Lys 2 (1 759 mm), čo predstavuje rozdiel 52 mm. V ostatných troch lyzimetroch boli hodnoty nameraných kumulatívnych zrážok veľmi vyrovnané a ich hodnoty sa pohybovali v rozmedzí od 1 752 do 1 759 mm. Priemerná hodnota z piatich lyzimetrov má hodnotu 1 755 mm. V relatívnom vyjadrení vo vzťahu k priemernej hodnote sú kumulatívne zrážky zachytené Lys 2 vyššie o 1 % oproti priemeru a naopak, kumulatívne zrážky zachytené Lys 4 o 1 % nižšie. Pri zvyšných troch lyzimetroch boli tieto odchýlky zanedbateľné. Ostatné štatistické parametre dátových súborov uvedené v tab. 2 vykazujú taktiež minimálne rozdiely. Dôvodom je minimalizovanie systémových chýb, spôsobené tým, že merania sú realizované na povrchu terénu čím je skreslenie spôsobené vplyvom vetra menšie. Taktiež náhodné chyby sú malé kvôli relatívne veľkej zachytnej ploche lyzimetrov. Zanedbateľné rozdiely v nameraných zrážkach pomocou piatich lyzimetrov oprávňujú použiť v ďalšej časti štúdie ich priemerné hodnoty ($P_{Lys}=(P_{Lys1}+P_{Lys2}+P_{Lys3}+P_{Lys4}+P_{Lys5})/5$).

Tab. 2 Vybrané štatistické parametre hodinových úhrnov zrážok zmeraných piatimi lyzimetrami.

	P_{Lys1}	P_{Lys2}	P_{Lys3}	P_{Lys4}	P_{Lys5}	$P_{Lys (avg)}$
Count [h]	1 762	1 762	1 762	1 762	1 762	1 762
Cumulative P [mm]	1 759	1 781	1 755	1 729	1 752	1 755
Relative error (relative to average cummulative P)	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00
Range [mm/h]	33,75	32,43	33,68	33,40	34,14	33,48
Mean [mm/h]	1,00	1,01	1,00	0,98	0,99	1,00
Median [mm/h]	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40	0,41
Stnd. deviation [mm/h]	1,97	1,97	1,97	1,95	2,00	1,97
Stnd. skewness	122	118	123	123	123	122
Stnd. kurtois	681	631	687	690	698	678

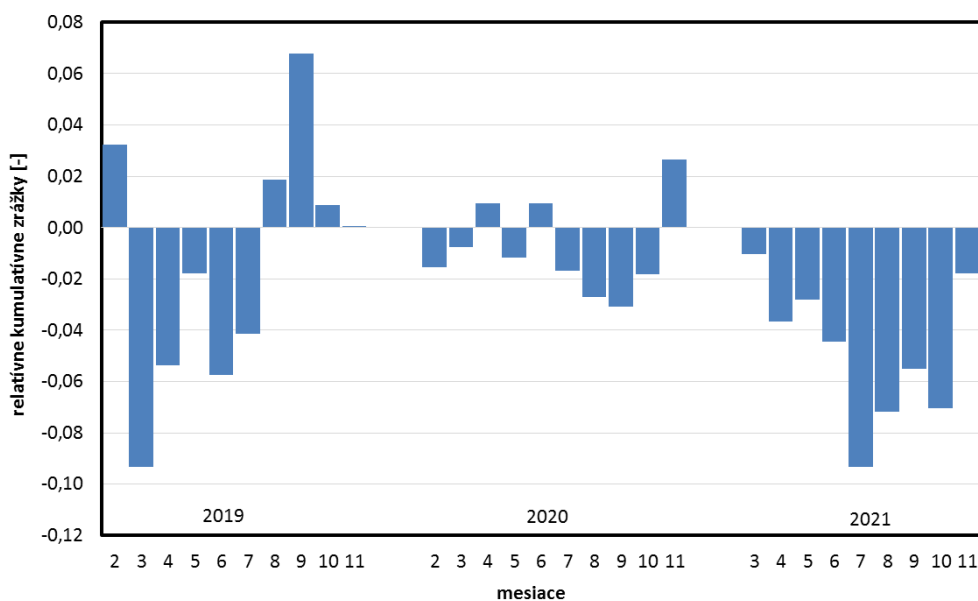
3.2 Porovnanie kumulatívnych zrážok

Obrázok č. 4 znázorňuje porovnanie kumulatívnych zrážok zachytených zrážkomerom a lyzimetrami počas trojročného sledovacieho obdobia. Celkovo bolo povrchom lyzimetrov zaznamenaných 1 755 mm, pričom zrážkomerom bolo nameraných 1 712 mm zrážok. Rozdiel 43 mm predstavuje v relatívnom vyjadrení celkové podhodnotenie meraní TB oproti Lys o 2,5 %. Rovnako aj pri medziročnom porovnaní boli počas všetkých ročných období zaznamenané podhodnotenia meraní zrážok TB oproti Lys. Najväčší rozdiel (26 mm; 5,3 %) bol nameraný v roku 2021. V rokoch 2019 a 2020 to bolo 10 mm (1,6 %) a 7 mm (1,1 %).



Obr. 4 Porovnanie kumulatívnych zrážok (preklápací zrážkomer vs. lyzimeter).

Na obr. 5 je znázornený priebeh relatívnych kumulatívnych zrážok na mesačnej báze. Záporné hodnoty predstavujú podhodnotenie meraní TB oproti Lys, kladné hodnoty ich nadhodnotenie. Ako vidno, celkovo prevláda trend podhodnocovania merania zrážok TB oproti Lys. K najväčšiemu podhodnoteniu (o 9 %) došlo v mesiacoch marec 2019 a júl 2021. Naopak, počas sledovaného obdobia sa vyskytlo niekoľko mesiacov, počas ktorých boli namerané vyššie zrážky TB oproti Lys (k maximálnemu nadhodnoteniu o 7 % došlo v septembri 2019).



Obr. 5 Priebeh relatívnych mesačných kumulatívnych zrážok (preklápací zrážkomer vs. lyzimeter).

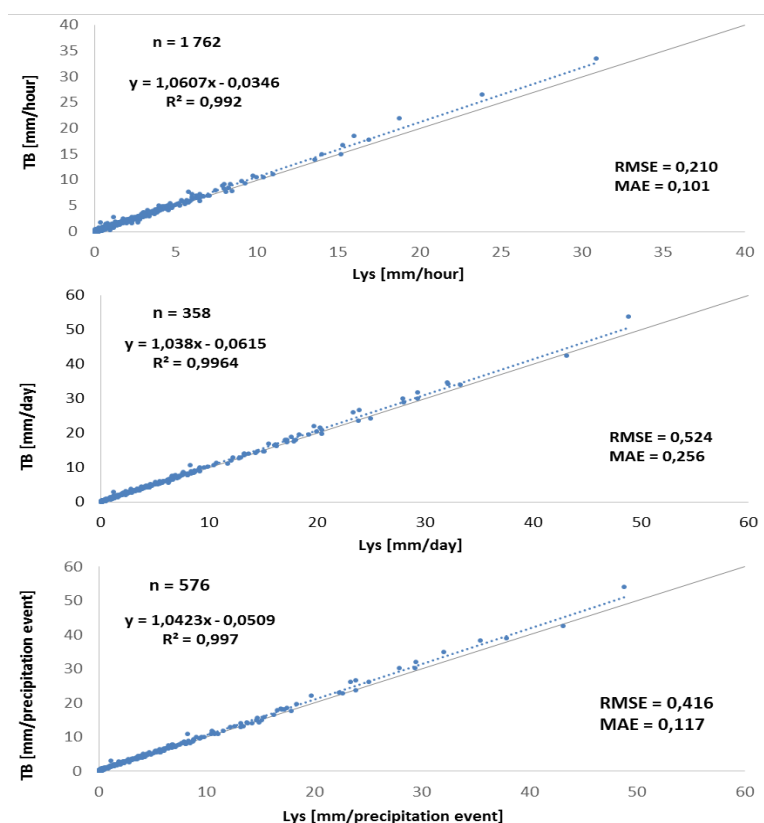
Výsledky porovnania kumulatívnych zrážok meranými preklápacím zrážkomermi a lyzimetrami publikovaných v literatúre v porovnaní s touto štúdiou sú zhrnuté v tabuľke 3. Vo všetkých prípadoch boli kumulatívne zrážky namerané TB nižšie ako zrážky namerané pomocou LYS. Celkové podhodnotenie meraní TB oproti LYS dosahovalo v publikovaných prácach od 6,8 do 12,7 %. V tejto práci bolo namerané podhodnotenie 2,5 %, čo je výrazne menšia hodnota.

Tab. 3 Porovnanie výsledkov vybraných publikovaných štúdií s výsledkami meraní zrážok pomocou lyzimetrov (P_{LYS}) a preklápacích zrážkomerov (P_{TB}).

miesto	rok	pozorované dni	kum. P_{LYS} [mm]	kum. P_{TB} [mm]	rel. rozdiel [%]	zdroj
Berlín, Nemecko	2012, 2013	389	664	580	-12,7	Hoffmann et al. 2016
JZ Sibír, Rusko	2016	114	170	158	-6,8	Haselow et al. 2019
Viedeň, Rakúsko	2011	229	416	365	-12,3	Nolz et al. 2014
VSN, Slovensko	2019, 2020, 2021	882	1 755	1 712	-2,5	táto štúdia

3.3 Porovnanie merania zrážok na hodinovej a dennej báze a na báze zrážkových udalostí

Porovnanie hodinových a denných úhrnov a úhrnov zrážkových udalostí je na obrázku č. 6. Pri všetkých troch porovnaníach bola dosiahnutá veľmi vysoká miera korelácie, keď koeficient determinácie (R^2) presiahol hodnotu 0,99. Je to hodnota približujúca sa funkčnej závislosti ($R^2=1$).



Obr. 6 Vzťah medzi údajmi o zrážkach získanými preklápacím zrážkomerom (TB) a lyzimetrom (Lys) na dennej a hodinovej báze a na báze zrážkových udalostí.

Najvyššia korelácia bola dosiahnutá pri porovnaní zrážkových udalostí ($R^2=0,997$), najnižšia pri denných úhrnoch zrážok ($R^2=0,992$). Sklon všetkých čiar lineárnej regresie je väčší ako 1, čo znamená, že vo všetkých troch porovnaníach došlo k celkovému podhodnoteniu meraných zrážok pomocou TB oproti referenčným hodnotám z lyzimetrov. Hodnoty strednej absolútnej chyby (MAE) a strednej kvadratickej chyby (RMSE) vypovedajú o tom, do akej miery sú si porovnávané hodnoty podobné, pričom ich hodnota rovná nule by znamenala, že porovnávané hodnoty sú zhodné. Hodnoty MAE aj RMSE sú najnižšie pri hodinových úhrnoch a zrážkových udalostiach, najvyššie pri denných úhrnoch.

Jednoduchý štatistický súhrn ukazovateľov z meraní zrážok pomocou TB a Lys na báze hodinových a denných úhrnov a na báze zrážkových udalostí je uvedený v tab. 4. Z tabuľky vyplýva, že na skúmanej lokalite je priemerný hodinový úhrn zrážok cca 1 mm, priemerný denný úhrn je necelých 5 mm a počas zrážkovej udalosti priemerne naprší cca 3 mm zrážok.

Tab. 4 Štatistické parametre nameraných zrážok získaných preklápacím zrážkometerom (TB) a lyzimetrom (Lys) na dennej a hodinovej báze a na báze zrážkových udalostí.

		TB	Lys
hodinové úhrny [mm/h]	min	0,1	0,00
	max	30,9	33,48
	priemer	0,97	1,00
	medián	0,40	0,41
denné úhrny [mm/d]	min	0,1	0,00
	max	48,9	53,83
	priemer	4,78	4,90
	medián	2,20	2,28
zrážkové udalosti [mm]	min	0,1	0,00
	max	48,9	53,83
	priemer	2,97	3,05
	medián	0,60	0,61

Záver

Cieľom práce bolo porovnať dva spôsoby merania zrážok: meranie preklápacím zrážkometerom a meranie zrážok na základe lyzimetrických meraní. Ako referenčný spôsob merania bolo zvolené lyzimetrické stanovenie zrážok. Dôvodom je vyššia citlivosť merania pomocou lyzimetra (0,01 mm oproti 0,1 mm), rádovo vyššia záchytná plocha lyzimetra (10 000 cm² oproti 200 cm²). Ďalším dôvodom bola možnosť využitia piatich lyzimetrov súčasne, čím došlo k päťnásobnému zväčšeniu záchytnej plochy. Porovnávací experiment trval 3 roky (2019 až 2021) a prerušený bol dvoma zimnými prestávkami. Použitý preklápací zrážkometer nie je vyhrievaný a preto boli porovnávané len tekuté dažďové zrážky. Z porovnávaní boli vynechané aj všetky nedažďové zrážky (rosa, mrholenie, hmla a pod.) ktoré sa dajú zachytiť lyzimetrom, ale preklápací zrážkometer ich nedokáže zaznamenať. Z porovnaní vyplynulo, že preklápací zrážkometer podhodnocuje zrážky oproti lyzimetru. Kumulatívne zrážky za celé sledované obdobie zachytené preklápacím zrážkometerom boli o 2,5 % nižšie oproti lyzimetrickým meraniam. V porovnaní s podobnými meraniami zdokumentovanými v literatúre, kde bolo namerané podhodnotenie až cez 12 %, ide o výrazne menší rozdiel. Pri porovnaní hodinových a denných úhrnov zrážok a zrážkových udalostí bola zaznamenaná veľmi vysoká miera korelácie ($R^2 > 0,99$). Uvedené výsledky poukazujú na relatívne vysokú spoľahlivosť meraní dažďových zrážok pomocou štandardných preklápacích zrážkometerov. Výhodou lyzimetrického merania zrážok je vyššia presnosť a možnosť zachytenia zrážok vo všetkých ich možných formách. Nevýhodou sú neporovnateľne vyššie náklady pri vybudovaní a prevádzke lyzimetrickej stanice.

PodĎakovanie:

Táto práca bola podporovaná grantovou agentúrou VEGA 2/0044/20.

Literatúra:

HASELOW, L., MEISSNER, R., RUPP, H., MIEGEL, K., 2019. Evaluation of precipitation measurements methods under field conditions during a summer season: A comparison of the standard rain gauge with a weighable lysimeter and a piezoelectric precipitation sensor. *Journal of Hydrology*, **575**, 537–543.

HOFFMANN, M., SCHWARTENGRÄBER, R., WESSOLEK, G., PETERS, A., 2016. Comparison of simple rain gauge measurements with precision lysimeter data. *Atmospheric Research*, **174–175**, 120–123.

KOHFAHL, C., SAALTING, M. W., 2020. Comparising precision lysimeter rainfall measurements against rain gauges in a coastal dune belt, Spain. *Journal of Hydrology*, **591**, 125580.

MATUŠEK, I., RETH, S., HEERDT, CH., HRČKOVÁ, K., GUBIŠ, J., TALL, A., 2017. Review of lysimeter stations in Slovakia. In: *17. Gumpensteiner Lysimetertagung : Lysimeter Research - Options and Limits, Gumpenstein, Germany, 9-10 May 2017*. Druck Verlag, 2017; 209–212. ISBN 978-3-902849-45-8.

NOLZ, R., CEPUDER, P., KAMMERER, G., 2014. Determining soil water-balance components using an irrigated grass lysimeter in NE Austria. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **177**, No. 2, 237–244.

SAVITZKY, A., GOLAY, M. J. E., 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, **36**, No. 8, 1627–1639.

SCHRADER, F., DURNER, W., FANK, J., GEBLER, S., PÜTZ, T., HANNES, M., WOLLSCHLÄGER, U., 2013. Estimating Precipitation and Actual Evapotranspiration from Precision Lysimeter Measurements. *Procedia Environmental Sciences*, **19**, 543–552.

SEVRUK, B., 1996. Adjustment oftipping-bucket precipitation gauge measurements. *Atmospheric Research*, **42**, 237–246.

SEVRUK, B., HERTIG, J. A., SPIESS, R., 1989. Wind field deformation above precipitation gauge orifices. *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.*, **179**, 65–70.

SHMÚ, 2015. Klimatický atlas Slovenska [Climate atlas of Slovakia]. Banská Bystrica: Slovenský hydrometeorologický ústav, 228 s.

ŠOLTÉSZ, A., ZELENÁKOVÁ, M., ČUBANOVÁ, L., ŠUGAREKOVÁ, M., ABD-ELHAMID. H. (2021): Environmental Impact Assessment and Hydraulic Modelling of Different Flood Protection Measures. *Water*, **13**, No. 6, 786.

ŠÚTOR, J., GOMBOŠ, M., MATI, R., TALL, A., IVANČO, J., 2007. Voda v zóne aerácie pôd Východoslovenskej nížiny. Bratislava - Michalovce : ÚH SAV, 279 s. ISBN 80-89139-10-8.

TALL, A., KANDRA, B., GOMBOŠ, M., PAVELKOVÁ, D., 2018. Kvantifikácia hydrologických procesov pomocou lyzimetra In: *Aktuálne problémy zóny aerácie pôdy v podmienkach prebiehajúcej klimatickej zmeny*. Bratislava : Veda, 285–306. ISBN 978-80-224-1690-0.

TALL, A., PAVELKOVÁ, D., 2020. Results of water balance measurements in a sandy and silty-loam soil profile using lysimeters. *Journal of Water and Land Development*, **45**, No. IV-VI, 179–184.

WMO, 2018. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8. Geneva: World Meteorological Organisation, 549 s. ISBN 978-92-63-10008-5.

Kľúčové slová: presnosť merania zrážok, vážiteľný lyzimeter, preklápací zrážkomer

Retencia vody organickým horizontom lesnej pôdy

Anton Zvala, Viliam Nagy, Peter Šurda, Justína Vitková

Ústav hydrologie Slovenskej akadémie vied, v. v. i., Dúbravská cesta 9, 84104 Bratislava, zvala@uh.savba.sk

Abstrakt

Lesné pôdy obsahujú organickú a minerálnu zložku. Organická zložka tvorí na povrchu lesnej pôdy organický horizont. Zdrojom pre vznik organických horizontov lesných pôd sú odumreté podzemné a nadzemné orgány rastlín (opad). Organický materiál lesnej pôdy v rôznom stupni mechanického a biochemického rozkladu spôsobuje špecifické fyzikálne a hydrofyzikálne vlastnosti organického horizontu, ktoré pôsobia na kvantitu a pohyb vody v pôde. Retencia vody organickým horizontom závisí od stupňa rozkladu a od hrúbky vrstvy organickej hmoty, ktorá je na povrchu lesnej pôdy nerovnomerne rozložená. Organický horizont rozdeľujeme podľa stupňa rozkladu organickej hmoty na vrstvy opadanku (surový opad, málo rozložený), drvinu (tvorená stredne rozloženou organickou hmotou) a melinu (výrazne rozložená amorfná organická hmota). Cieľom príspevku je kvantifikácia množstva vody, ktoré je organický horizont schopný zadržať dlhší čas. Lokalita, z ktorej boli odobraté pôdne vzorky organického horizontu lesnej pôdy bola v oblasti Kokavských lúk v Západných Tatrách, na svahu s dobre vyvinutým hlbokým organickým horizontom pod smrekovým porastom. Meranie retencie vody organickým horizontom lesnej pôdy prebiehalo na podtlakovom a pretlakovom zariadení. Vrstva drviny pod smrekovým porastom, zadržíava v porovnaní s opadankou a melinou najväčší objem vody. Ak porovnáme organický a minerálny obsah pôdneho horizontu lesnej pôdy, organický materiál zadrží o 21 % väčší objem vody. Melina vykazuje podobne ako minerálny horizont výraznú vodoodpudivosť, čo znižuje jej retenčnú kapacitu v porovnaní s drvinou napriek jej komplexnejšiemu systému pórov. Organické horizonty majú veľký význam pre distribúciu zrážkovej vody medzi procesy infiltrácie, výparu (vrátane intercepcie), retencie vody a odtoku.

1. Úvod

Na množstvo vody v pôde do značnej miery pôsobia klimatické podmienky ale aj fyzikálne a chemické vlastnosti pôdy. Tieto vlastnosti predovšetkým vrchných vrstiev pôdy sú ovplyvňované prítomnosťou a typom rastlinného krytu. Lesy (ihličnaté, listnaté a zmiešané), etážová lesná vegetácia, ale aj fauna vplývajú na vývin lesných pôd. Zdrojom pre vznik organických horizontov lesných pôd sú odumreté podzemné a nadzemné orgány rastlín (opad). Organický materiál lesných pôd v rôznom stupni mechanického a biochemického rozkladu spôsobuje ich špecifické fyzikálne a hydrofyzikálne vlastnosti, ktoré pôsobia na kvantitu a pohyb vody v pôde. Rozmiestnenie organického horizontu na lesnej pôde nie je rovnomerné. Hmotnosť organického horizontu je nízka a z tohto dôvodu podlieha eróznokumuláčnym procesom.

Dynamika tvorby organického horizontu a jeho kvantitatívne diferenciácie v lesných porastoch s rôznymi druhmi zloženia naznačujú, že pôvod organickej hmoty nahromadenej v organických horizontoch lesných pôd má vplyv na hydrofyzikálne vlastnosti lesnej pôdy. Organický horizont pod smrekom má podľa literatúry najväčšiu retenciu kapilárnej vody (Ilek a kol., 2015).

Infiltrovaná zrážková voda v lesnej pôde, ktorá neodtečie podpovrchovým odtokom determinuje vlhkosť pôdy, ktorej najdôležitejšou hydrologickou charakteristikou je schopnosť zadržiavať vodu v (prevažne) kapilárnych póroch, čiže retencia vody v pôde. Retenčná kapacita pôdy zodpovedá maximálnemu množstvu vody, ktoré môže daná pôda udržať v systéme pórov dlhší čas. Ide o vlhkosť pôdy, ktorá zodpovedá stavu, kedy všetka voda z makropórov už odtiekla a voda je viazaná prevažne kapilárnymi silami (tiež poľná vodná kapacita). Rozdielne druhové zloženie opadu z vegetácie spôsobuje rozdiel v retencii vody v organických horizontoch (Ilek a kol., 2017).

Retencia vody v lesnej pôde je veľmi dôležitá z hydrologického a environmentálneho hľadiska. Organický materiál lesnej pôdy zadrží podľa literatúry dvojnásobný objem vody ako minerálna pôda (Leuschner, 1998). Doterajšie výskumy

prevažne zanedbávali vplyv organických horizontov na hydrologické procesy v povodí z dôvodu technických ťažkostí pri presných meraniach a veľmi náročnej parametrizácii pri matematickom modelovaní. Niektoré štúdie píšú o vplyve rôznych charakteristík zrážok a opadu na lesnej pôde na dynamiku a retenciu vody v pôde (Xiang a kol., 2013). V prípade organických horizontov pôdy je vo vlhkých obdobiach časť vody voľne uložená na štruktúrach rastlinného opadu a táto voda by sa mala od retencie odpočítat' a prirátat' k intercepcii, resp. k výparu (výpar z voľnej hladiny na danom mieste totiž predchádza výparu z pórov rozličnej veľkosti a zakrivenia – Kelvinova rovnica).

Neexistuje systematická štúdia, ktorá by analyzovala fyzikálne vlastnosti horizontov s obsahom organickej hmoty nad 50% a popisala ich hydrologické konzekvencie v reálnom prostredí alebo na laboratórnych experimentoch. Nie je dostatočne objasnené, do akej miery organické horizonty ovplyvňujú hydrologické procesy v povodí.

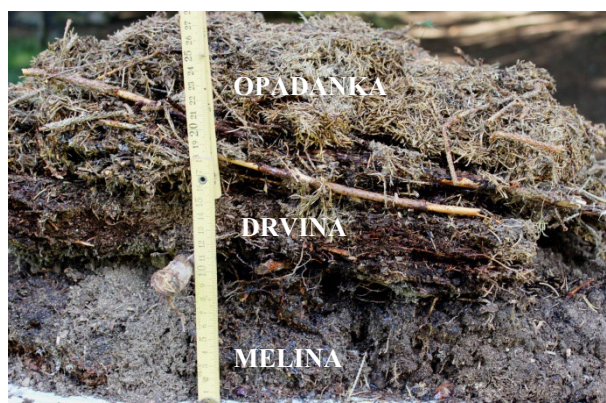
Zmena lesa a súčasne lesnej pôdy holorubnou ťažbou pôsobí na hydraulické pôdne parametre infiltračnú kapacitu, retenciu vody v pôde a môže mať za následok zvýšenie povrchového a podpovrchového odtoku. Na takýchto miestach môže dochádzať vo zvýšenej miere k erózii pôdy (Wahl a kol., 2003).

Cieľom príspevku je kvantifikácia množstva vody, ktoré je organický horizont schopný zadržať dlhší čas a porovnanie retencie vody organického a minerálneho horizontu lesnej pôdy.

2. Materiál a metodika

Lokalita, z ktorej boli odobraté pôdne vzorky organického horizontu lesnej pôdy bola v oblasti Kokavských lúk v Západných Tatrách, na svahu s dobre vyvinutým hlbokým organickým horizontom pod smrekovým porastom (Orfánus a kol., 2011). Celkovo 24 pôdnych vzoriek s objemom 100 cm³ bolo odobratých z organického horizontu a jeho vrstiev opadanky, drviny a meliny a z minerálneho A-horizontu lesnej pôdy. Pôdne vzorky sme odobrali nepravidelne na výskumnej ploche 15 x 45 metrov. Pod organickým horizontom ležiaci A-horizont tvorí minerálnu zložku lesnej pôdy. Pôda A-horizontu lesnej pôdy je Kambizem podzolová.

Na výskum retencie vody v organických horizontov lesnej pôdy pod smrekom (*Picea abies*) boli odobraté neporušené pôdne vzorky odberným zariadením do Kopečského valčekov s objemom 100 cm³. Vnútorne steny valčekov boli predtým natreté tesniacou vazelínou na zabránenie stenového efektu. Boli vybrané odberné miesta s hlboko vyvinutým organickým horizontom. Na týchto miestach organické horizonty lesnej pôdy obsahovali všetky tri vrstvy opadanku, drviny a melinu (Obr. 1). Na porovnanie boli odobraté aj vzorky z minerálneho A-horizontu.



Obr. 1 Organický horizont lesnej pôdy s rozlíšiteľnými vrstvami opadanka, drvina, melina

Po privezení do laboratória boli vzorky odvážené. Na spodnú časť každej vzorky bola prichytená gumičkou tkanina aby nedochádzalo k rozpadávaniu a rozplavovaniu vzorky pri ďalšej laboratórnej manipulácii. Takto upravené pôdne vzorky sa nasycovali v nasycovacej nádobe (s postupným dvíhaním hladiny) až pokiaľ nebolo vidieť na povrchu každej pôdnej vzorky celistvú lesklú vrstvu vody. Nasycovanie trvalo niekoľko týždňov, pretože pôdne vzorky vykazovali výraznú mieru hydrofobicity (vodoodpudivosť pôdy). Nasýtené pôdne vzorky boli odvážené a hladina vody v nasycovacej nádobe bola znížená na 0 cm a po 24 hodinách boli vzorky odvážené znova. Takto sme získali jeden bod retenčnej krivky. Na zistenie ďalších bodov retenčnej krivky lesnej pôdy boli použité podtlaková (tempeské bunky) a pretlaková metóda.

Jednou z najdôležitejších hydrofyzikálnych charakteristík pôdy, ktorá graficky znázorňuje závislosť energetického stavu pôdnej vody od jej obsahu, teda vzťah medzi vlhkosťným potenciálom a vlhkosťou pôdy, je vlhkosťná retenčná čiara (Veľbný, 2000). Závisí od štruktúry, jej objemovej hmotnosti, od zrnitosti a mineralogického zloženia, od obsahu humusu a od obsahu a vlastností katiónov sorpčného komplexu. Vlhkosťná retenčná čiara spoločne s hydraulickou vodivosťou je najdôležitejšou charakteristikou pre štúdium dynamiky vody v pôde a je vyvinutých niekoľko laboratórnych a terénnych metód na jej stanovenie. Na stanovenie vlhkosťných retenčných čiar používame viacero metód, z ktorých každá je použiteľná len v určitom rozsahu vlhkosťného potenciálu pôd.

Podtlaková metóda. Na podtlakovom prístroji je možné stanoviť závislosť medzi vlhkosťným potenciálom a vlhkosťou pôdy len v malom rozsahu vlhkosťného potenciálu. Vodou nasýtenú vzorku pôdy uložíme na polopriepustnú platňu, ktorá býva zatavená v sklenom lieviku. Najčastejšie používame polopriepustnú doštičku SIAL – S4, pri ktorej vstupná hodnota pre vzduch sa pohybuje v rozpätí (19.3 až 58 kPa), (–200 až –600 cm) tlakovej výšky vody. Necháme na ňu pôsobiť konštantný podtlak, vyvolaný vodným stĺpcom pod doštičkou, ktorý je daný rozdielom hladín vo vzorke a v odtokovej nádobe (byreta). Objem vody, ktorý z časti pórov odtečie, zmeriame a vypočítame vlhkosť, prislúchajúcu nastavenému podtlaku (vlhkosťnému potenciálu). Postupným zvyšovaním podtlaku vzorku odvodňujeme a zisťujeme ďalšie body odvodňovacej vetvy retenčnej čiary, t.j. vlhkosti pôdy, zodpovedajúcej aplikovaným hodnotám podtlaku. Na podtlakovom prístroji sme merali body retenčnej krivky pri podtlakoch –10 cm, –30 cm, –50 cm, –80 cm, –120 cm, –150 cm vyvolaným vodným stĺpcom pod doštičkou.

Pretlaková metóda spočíva v procedúre, kedy vodou nasýtenú vzorku pôdy umiestnime v pretlakovom zariadení (pretlakovom hrnci) na vodou nasýtenú platňu s definovanou vstupnou hodnotou pre vzduch, v rozsahu ktorej platňa prepúšťa vodu, ale neprepúšťa vzduch. V zariadení udržujeme konštantný tlak vzduchu, vyšší ako je atmosférický tlak. V dôsledku pôsobenia nastaveného pretlaku začne zo vzorky odtekať tá časť objemu vody, ktorá je k tuhej fáze viazaná menšou silou ako je tlak vzduchu v nádobe. Odtok vody zo vzorky sa ukončí, keď nastane rovnováha medzi vlhkosťným potenciálom (sacím tlakom) pôdnej vody a nastaveným pretlakom. Rovnovážnemu stavu dosiahnutému pri danom tlaku vzduchu zodpovedá určitá hodnota vlhkosti pôdy, ktorú zistíme z úbytku hmotnosti vzorky pôdy gravimetrickou metódou alebo zo známej počiatkovej vlhkosti vzorky a zmeraného odtečeného množstva vody. Takto sa určí jeden bod vlhkosťnej retenčnej čiary. Určovaním dvojíc vlhkosťného potenciálu a vlhkosti pôdy v postupne dosahovaných rovnovážnych stavoch pri zväčšovaní pretlaku vzduchu v pretlakovom zariadení stanovíme ďalšie body retenčnej čiary (Veľbný, 2000). Keďže pri tomto postupe voda z pôdy odtekala, hovoríme o odvodňovacej vetve vlhkosťnej retenčnej čiary. Na pretlakovom prístroji boli merané body retenčnej krivky pri pretlakoch 0,3 bar (–300 cm), 0,6 bar (–600 cm), 1,5 bar (–1 500 cm), 2,8 bar (–2 800 cm). Po vybratí pôdnych vzoriek z pretlakového prístroja boli vzorky umiestnené do sušiarne. Sušenie prebiehalo pri teplote 60 °C do hmotnosti ktorá sa časom nemenila.

3. Výsledky

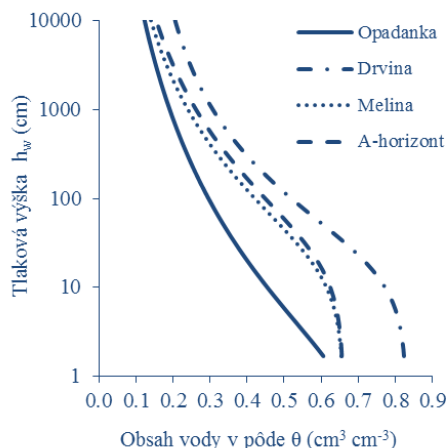
Organický horizont obsahuje najvrchnejšiu vrstvu (opadanku) slabo rozložený organický materiál (ihličie, drevo, šišky), strednú vrstvu (drvínu) s výrazne rozloženým organickým materiálom a najnižšiu vrstvu (melínu), obsahujúci amorfný rozložený organický materiál s prímiesou minerálneho materiálu lesnej pôdy.

Z laboratórnej analýzy retencie vody v jednotlivých horizontoch lesnej pôdy boli namerané rozdielne objemy vody, ktoré je lesná pôda schopná zadržať dlhší čas. Tabuľka 1 obsahuje objemy vody zistené nasýtením pôdnych vzoriek (všetky póry zaplnené vodou). Po znížení hladiny vody na 0 cm voda začala vytekať zo vzorky voda. Z gravitačných pórov voda vytiekla a v pôdnej vzorke zostala voda zadržiavaná prevažne kapilárnymi silami a voda v malých nekapilárnych póroch, ktorá sa taktiež pohybuje gravitačne, ale s veľmi malými rýchlosťami. Vrstva drviny obsahovala najviac takejto vody. Drvina je zložená z organického materiálu, ktorý dosahuje vysoký stupeň rozkladu a vytvára najlepšie podmienky pre retenciu zrážkovej vody v lesnej pôde. Drvina zadržiava priemerne o 21 % viac vody ako organominerálny A-horizont.

Tab. 1. Objem v ml retencie vody organickým horizontom lesnej pôdy

Vrstva/horizont	Miesto merania						
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	priemer
Opadanka	78,59	64,51	77,25	80,06	63,00	76,00	73,20
Drvina	89,34	90,30	74,58	73,50	85,93	85,74	83,23
Melina	61,03	64,92	67,62	60,60	65,51	75,83	65,91
A-horizont	67,84	61,72	68,95	64,88	65,27	64,82	65,58

Priemerné vlhkosťné retenčné krivky pre jednotlivé vrstvy organického a minerálneho A-horizontu sú na Obr. 2. Vlhkosťná retenčná krivka opadanky má netypický priebeh, ktorý len ťažko možno s uspokojením preložiť analytickým vyjadrením, funkciou podľa van Genuchtena (1980). Vysoká pórovitosť drviny presahujúca priemerne 80 % objemu pôdnej vzorky. Pôdne vzorky meliny a organominerálneho A-horizontu majú zvyčajne podobný priebeh s mierne nižšou hodnotou nasýtenej vlhkosti u A-horizontu.



Obr. 2. Priemerné vlhkosťné retenčné krivky lesnej pôdy pod smrekovým porastom

4. Záver

Vrstva drviny (tvorená stredne rozloženou organickou hmotou) pod smrekovým porastom, zadržiava v porovnaní s opadankou (surový opad, málo rozložený) a melinou (výrazne rozložená amorfná organická hmota) najväčší objem vody. Ak porovnáme organický a minerálny obsah pôdneho horizontu lesnej pôdy, organický materiál zadrží o 21 % väčší objem vody. Melina vykazuje podobne ako organominerálny horizont výraznú vodoodpudivosť, čo znižuje jej retenčnú kapacitu v porovnaní s drvinou napriek jej komplexnejšiemu systému pórov. Organické horizonty majú veľký význam pre distribúciu zrážkovej vody medzi procesy infiltrácie, výparu (vrátane intercepce), retencie vody a odtoku.

PodĎakovanie:

Tento článok vznikol s podporou VEGA Grantová Agentúra (grant číslo 2/0096/19) Fytoindikácia zmien hydrologického režimu pôdy.

Literatúra:

ILEK, A., KUCZA, J., SZOSTEK, M., 2015. The effect of stand species composition on water storage capacity of the organic layers of forest soils, *Forest research*, 187–197.

- ILEK, A., KUCZA, J., SZOSTEK, M., 2017. The effect of the bulk density and the decomposition index of organic matter on the water storage capacity of the surface layers of forest soils, *Geoderma*, 27–34.
- LEUSCHNER, C., 1998. Water extraction by tree fine roots in the forest floor of the temperate Fagus-Quercus forest. *Ann. Sci. For.* 55, 141–157.
- ORFÁNUS, T., FODOR, N. 2011. K problematike protipovodňovej funkcie lesa v Tatrách. In *Štúdie o Tatranskom národnom parku : monografická štúdia o dôsledkoch vetrovej kalamity z roku 2004 na prírodné prostredie Vysokých Tatier. - Tatranská Lomnica : Štátne lesy TANAP-u.* ISBN 978-80-89309-09-2. s. 99–108.
- XIANG, L., JIANZHI, N., BAOYUAX, X., 2013. Study on Hydrological Functions of Litter Layers in North China *PLoS ONE* 8(7): e70328. doi:10.1371/journal.pone.0070328
- VAN GENUCHTEN, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892–898.
- VELEBNÝ, V., NOVÁK, V., SKÁLOVÁ, J., ŠTEKAUEROVÁ, V., MAJERČÁK, J., 2000. *Vodný režim pôd*, Bratislava, Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve STU.
- WAHL, N.A., BENS, O., SCHAFER, B., HUTTL, R.F., 2003. Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: hydraulic conductivity, water repellency and water retention, *Physics and Chemistry of the Earth* 28 1377–1387.
- ZVALA, A., ORFÁNUS, T., STOJKOVÁ, D., NAGY, V., 2017. Hydraulická vodivosť pokrývkových horizontov lesnej pôdy, *Acta Hydrologica Slovaca*, 2017, roč. 18, č. 1, p. 112–119. ISSN 1335-6291.

Kľúčové slová: organický horizont, retencia vody v pôde, vlhkostné retenčné krivky.

Hospodaření s vodou v krajině 2022

Sborník příspěvků z mezinárodní konference

Vydalo nakladatelství Českého hydrometeorologického ústavu, Praha 2022

Publikace neprošla jazykovou úpravou, za obsah příspěvků odpovídají autoři

ISBN 978-80-7653-045-4

