

Evapotranspirace v prostředí mokřadů

KAREL PÁTEK, JIŘÍ BRUTHANS

Klíčová slova: evapotranspirace – mokřad – vodní bilance – kolísání hladiny podzemní vody – zadržování vody v krajině

ABSTRAKT

Mokřad je prostředím, kde je voda pro vegetaci dobře dostupná, dochází zde proto k intenzivní evapotranspiraci (ET) blížíci se hodnotě potenciální ET. V budoucnu lze navíc očekávat vyšší intenzitu ET kvůli pozorovanému nárůstu teplot souvisejícímu s klimatickou změnou. Vliv ET na mokřad je nutné uvažovat např. při plánování revitalizací nebo hydrologickém modelování a je při tom důležité vycházet z aktuálních poznatků přinášených velkým množstvím článků věnujících se ve světě tomuto tématu. Práce začíná stručnou rešerší dosavadních výzkumů ET v mokřadech; na ní navazuje praktická demonstrace vlivu ET v mokřadu na západě české křídové pánve.

V první (rešeršní) části práce byly články rozděleny do několika skupin podle toho, zda vycházely ze zkoumání kolísání hladiny podzemní vody (HPV), sledování průtoku vodního toku ovlivněného mokřadem, či z měření transpirace stromů nebo kombinace různých metod. Je tak ukázáno, kam se od původních pozorování kolísání HPV, např. ve Whiteově článku z roku 1932 [1], posunul současný výzkum. Ve druhé (praktické) části práce bylo v mokřadu v horním povodí Liběchovky (mírné klima, západ české křídové pánve) sledováno kolísání HPV v letním období roku 2024. V mokřadu byly instalovány čtyři piezometry reprezentující různé části mokřadu. Z naměřených dat byla vybrána období, ve kterých po několik dní docházelo k výraznému diurnálnímu kolísání HPV. Šlo o osm období o délce tří až 14 dní. Kolísání se projevovalo ve všech sledovaných částech mokřadu, maxima a minima HPV nastávala v různých místech mokřadu v podobný čas, lišily se pouze amplitudy kolísání. Nejlépe bylo diurnální kolísání HPV patrné ve střední oblasti mokřadu (ve vrcholném létě dosahovala amplituda až 14,5 cm). Jako doplňující informace o podmínkách v mokřadu byla změřena vlhkost půdy v různých hloubkách na podzim a v létě. Bylo pozorováno, že se půdní profil mění mezi různými, i několik metrů vzdálenými místy, což je způsobeno dynamickou činností protékajícího vodního toku. Vlhkost písčitých vrstev (okolo 40 %) se výrazně lišila oproti vlhkosti jílovito-prachovitých vrstev (kde se pohybovala většinou mezi 70 a 80 %). Ukázalo se také, že půda v mokřadu je v celém profilu velmi blízko saturovanému stavu, a to jak na podzim, kdy neprobíhá významnější ET, tak i během léta. To znamená, že malé množství přidané/spotřebované vody stačí, aby způsobilo výrazný vertikální pohyb HPV, a tudíž může být lépe patrné diurnální kolísání HPV. Pro osm vybraných období, v nichž po několik dní docházelo k výraznému diurnálnímu kolísání HPV, byla na základě tohoto kolísání Whiteovou metodou [1] vypočtena průměrná ET sledovaného mokřadu v horním povodí Liběchovky jako $20 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Rešerše i vlastní měření dohromady vypovídají o důležitosti a aktuálnosti tématu ET mokřadů a ukazují, že mokřad je potřeba vidět jako prostředí, kde je voda intenzivně využívána vegetací.

ÚVOD

Evapotranspirace (ET) je obecně důležitou součástí vodního cyklu. Mokřad jako zamokřené území s hladinou podzemní vody (HPV) blízko povrchu je prostředím, kde je voda dobře dostupná pro vegetaci. Skutečná ET je proto velmi vysoká a blíží se potenciální evapotranspiraci (PET), tedy maximální možné hodnotě limitované jen množstvím energie dostupné pro výpar.

Zatímco v půdě dochází k primární ET, v mokřadu se vypařuje vyvěrající podzemní voda nebo přitékající povrchová voda, která už jednou (primární) ET prošla. Vliv mokřadů na hladinu podzemní vody a vodnost toků je proto obzvláště výrazný v době sucha, kdy je sice obecný nedostatek vody v krajině, ale v mokřadu je díky přítoku podzemní vody ještě stále voda dostupná a intenzivní ET tam pokračuje.

Je tak třeba uvažovat vliv ET nejen při plánování revitalizací, počítání vodní bilance, v hydrologických modelech, ale měl by být brán v potaz i v legislativě, např. v souvislosti s konceptem minimálního zůstatkového průtoku nebo minimální hladiny podzemní vody. Dle platné legislativy je během suchých období omezován umělý odběr vody tak, aby byl zajištěn minimální zůstatkový průtok. Při vysokých teplotách je však možné, že spotřeba vody ET bude tak vysoká, že nebude možné dodržet minimální zůstatkový průtok (minimální hladinu) ani v případě, že budou jakékoli další umělé odběry vody zastaveny, protože mokřadní a poříční vegetace je schopná vypařovat podzemní vodu okolo vodního toku [2]. Tato otázka se stává aktuální zejména v kontextu pozorované klimatické změny, jež má za důsledek nárůst teplot a tím zároveň ještě výraznější vliv ET.

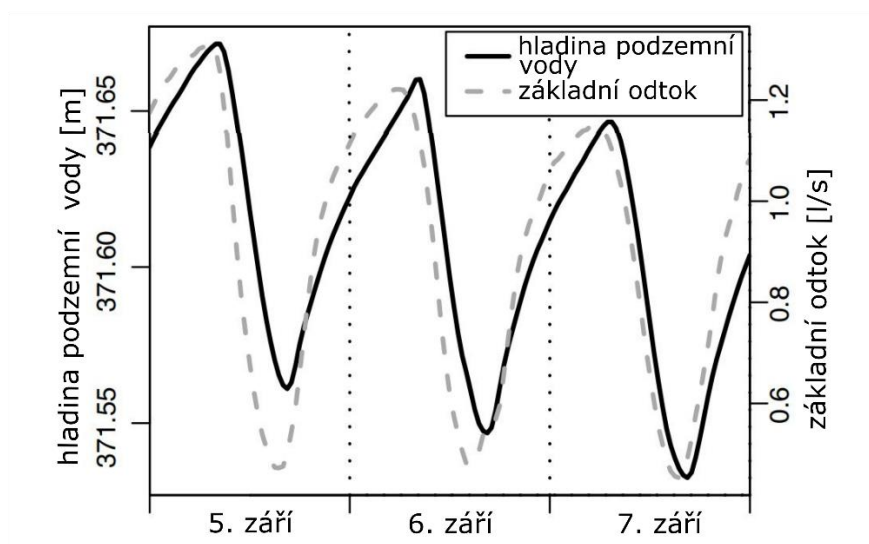
Cílem příspěvku je shrnout hlavní dosavadní výzkum v oblasti ET mokřadů a ukázat, že ET mokřadů je důležitým tématem a že i ve střední Evropě je potřeba ET uvažovat a brát ohled na aktuální poznatky. V první – teoretické – části je zpracována rešerše článků věnujících se vlivu ET v mokřadu. Ve druhé části byl jako praktická demonstrace sledován vliv ET na kolísání HPV a průtoku drobného vodního toku v mokřadu v horním povodí Liběchovky.

STRUČNÁ REŠERŠE PŘEDCHOZÍCH VÝZKUMŮ

ET mokřadů byla intenzivně zkoumána již v minulém století, ale zároveň jde i v současnosti o aktuální a řešené téma. Publikované články lze rozdělit do několika skupin, které budou v dalších odstavcích rozebírány podrobněji. První skupina článků detailně zkoumá vliv ET na kolísání HPV. Další skupina sleduje vztah mezi ET a průtokem vodního toku. Jiná skupina kombinuje pozorované kolísání HPV s kolísáním průtoku v drobném vodním toku protékajícím skrze mokřad. Velmi komplexně se uvedené problematice věnuje i další skupina článků, jež spojuje vliv ET, kolísání HPV a pozorování průtoku vodního toku s měřením transpirace vegetace.

Vliv ET na kolísání HPV

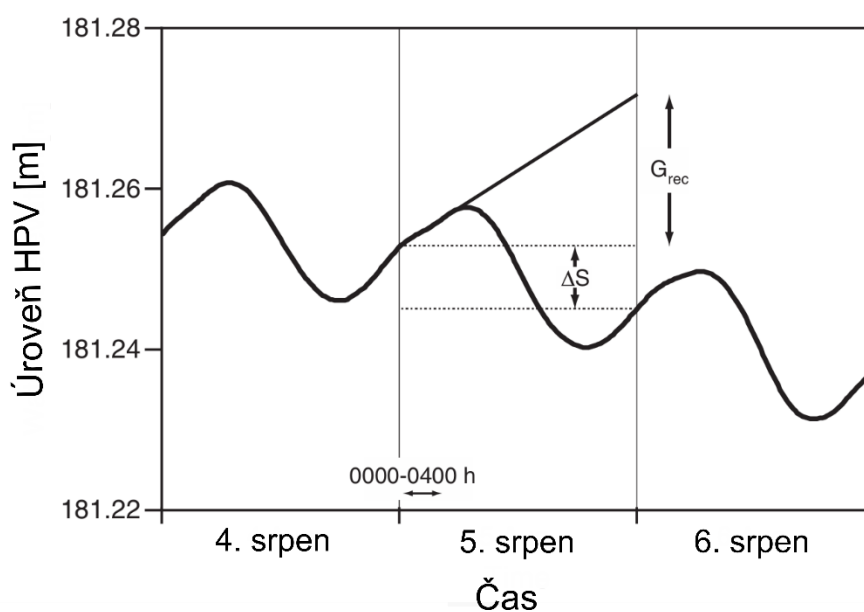
Vztah mezi ET mokřadu a kolísáním HPV sledoval už White v roce 1932 [1]. Pozoroval, že vlivem ET je HPV přes den níže než v noci. Vzniká tím pravidelné kolísání HPV v rámci dne (diurnální kolísání). Typický průběh diurnálního kolísání je dobře popsán např. v článcích Gribovského z let 2006 [3] a 2008 [4] a schematicky ho znázorňuje *obr. 1*.



Obr. 1. Typické diurnální kolísání HPV a základního odtoku naměřené v experimentálním povodí na úpatí Alp (upraveno podle [4])

Fig. 1. The typical diurnal fluctuation of the groundwater level and the baseflow measured in the experimental catchment at the foot of the Alps (modified after [4])

White [1] vytvořil metodu, jak na základě diurnálního kolísání určit velikost ET v denním kroku. Princip metody znázorňuje obr. 2. Na vertikální ose je výška HPV, na horizontální ose čas. Pro daný den G_{rec} ukazuje lineární extrapolaci očekávaného vývoje HPV pro případ, kdyby nebyla snižována ET. Extrapolace je prováděna na základě vývoje hladiny v noci mezi půlnocí a čtvrtou hodinou ranní, protože v této části dne lze ET považovat za zanedbatelnou. ΔS reprezentuje změnu zásob podzemní vody za den (tedy změnu hladiny mezi půlnocí aktuálního a předešlého dne). ET je poté získána jako součet G_{rec} a ΔS přenásobený hodnotou storativity.

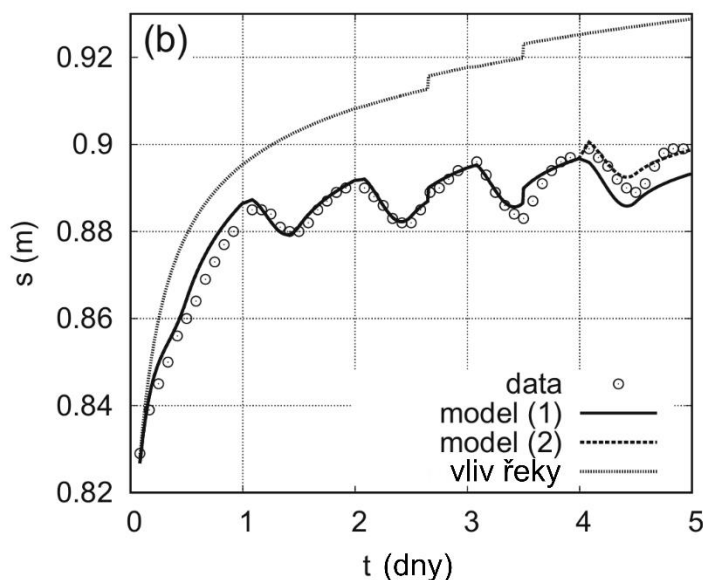


Obr. 2. Výpočet ET metodou podle Whitea [1] (upraveno podle [5])
 Fig. 2. The ET calculation by the White method [1] (modified after [5])

Limity a chování Whiteovy metody byly detailně zkoumány např. s pomocí numerických simulací v článku Loheide [6] z roku 2005. Za nejvýraznější zdroj chyby byla označena nejistota při určování storativity (specific yield). Storativita 2 % znamená, že pokud v horninovém prostředí poklesne hladina o 1 m, tak bylo z horninového prostředí odebráno stejně vody, jako kdybychom z volného prostředí (např. nádoby) odebrali pouze 2cm sloupec vody.

Někteří autoři přinesli jiné postupy určování ET z kolísání HPV. Gribovsky v roce 2008 [4] vytvořil modifikaci původní Whiteovy metody vedoucí ke zpřesnění výpočtu. Jinou metodu nabídl např. Loheide v článku rovněž z roku 2008 [7]. Carlson Mazur v roce 2014 [5] poté vytvořila modifikaci umožňující její využití pro větší rozpětí přírodních podmínek. Různé metody výpočtu ET z kolísání HPV jsou diskutovány v článku Fahle a Dietrich z roku 2014 [8]. Hodnoty byly porovnávány oproti referenčnímu měření za použití lysimetru; nejvyšší korelace s referenční hodnotou byla získána při použití metody Gribovského [4].

Významným posunem byl také článek Malamy z roku 2010 [9]. Ten odvodil analytické řešení popisující, jak se ET (zadaná jako vstupní „řídící funkce“) projeví na kolísání HPV (obr. 3). Z řešení Malamy [9] vyplývá i několikahodinové zpoždění maxima a minima HPV oproti chodu slunce, které bylo předtím v terénu pozorováno např. Gribovským [4]. Odvozené analytické řešení lze použít dvěma směry – z naměřeného diurnálního kolísání HPV při znalosti hydraulických parametrů modelovat ET, nebo zpětně z diurnálního kolísání HPV při znalosti ET odvozovat hydraulické parametry prostředí. Ve článku Malamy byl vytvořený model použit na naměřené diurnální kolísání HPV, čímž byla získána informace o ET, hydraulické vodivosti a změnách hladiny řeky (obr. 3). Bylo tak demonstrováno, že v principu lze z diurnálního kolísání HPV odvozovat ET i hydraulické parametry zároveň.



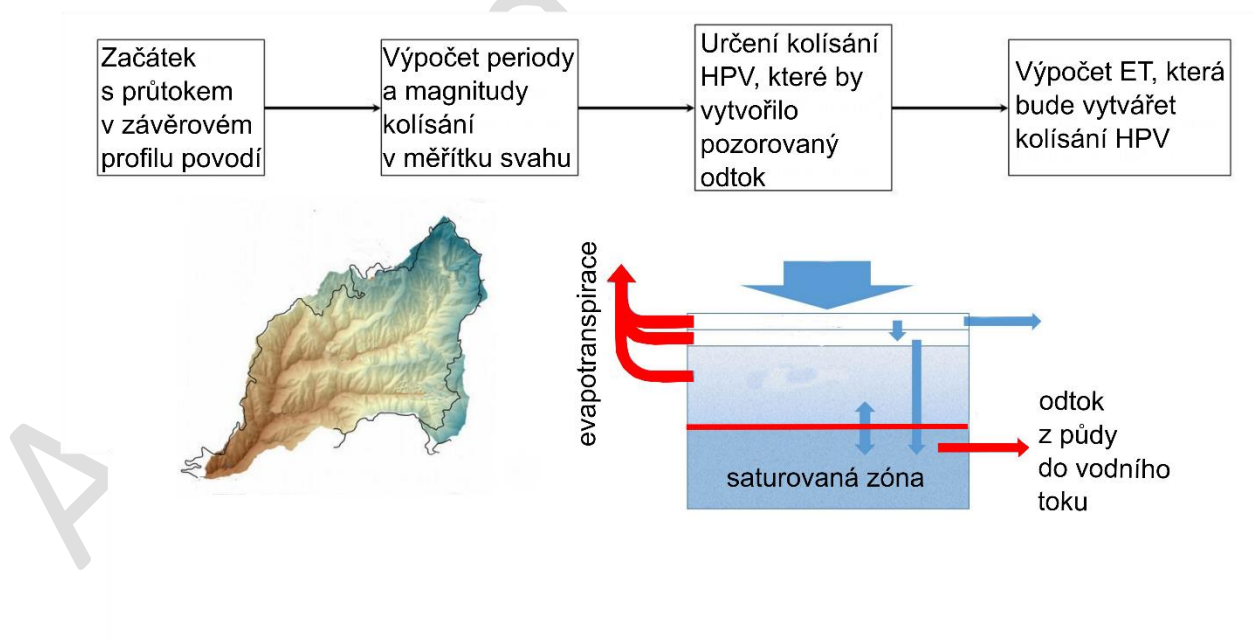
Obr. 3. Použití vytvořeného modelu na naměřené hodnoty diurnálního kolísání HPV v blízkosti řeky. Model (1) používá stejnou amplitudu ET pro 4. a 5. den, zatímco model (2) zohledňuje různou amplitudu ET během 4. a 5. dne. Tečkovaná čára ukazuje vliv kolísající hladiny blízké řeky

Fig. 3. The model fit to the measured values of diurnal groundwater fluctuation in the vicinity of the river. Model (1) uses the same ET amplitude for the 4th and 5th day, whereas the model (2) takes into account the different ET amplitude for the 4th and 5th day. The dotted line represents the effect of fluctuating river stage

Vztah ET a průtoku vodního toku

Následující skupina článků se věnuje přímo vztahu mezi ET a kolísáním průtoku ve vodním toku. Někdy byl vztah posuzován v regionálním měřítku, příkladem je článek Daniela z roku 1976 [10]. Tento příspěvek se věnoval vztahu mezi ET ze zvodně a průtokem v blízkém vodním toku a bylo v něm popsáno analytické řešení, které je možné využít ve srážkoodtokových modelech a modelech HPV. Dalším příkladem je článek Whittenberga z roku 1999 [11]. Stanovoval hydraulické parametry z křivek popisujících dlouhodobý pokles průtoku v rámci roku a při tom pozoroval, jak jsou průtokové křivky ovlivněny ET.

Jiné články ke vztahu mezi ET a průtokem přistupovaly v měřítku povodí. Příkladem je Zecharias [12] používající v článku z roku 1988 konceptuální model pro popis vztahu mezi odtokem a zvodní. V pozdější době přinesl významný posun také Fonley [13], jenž v roce 2019 odvodil analytický vztah pro zpětný výpočet ET ze záznamu diurnálního kolísání průtoku ve vodním toku (obr. 4).



Obr. 4. Schematický přehled Fonleyova postupu zpětného výpočtu ET ze záznamu diurnálního kolísání průtoku ve vodním toku (upraveno podle [13])

Fig 4. The schematic overview of the Fonley method of calculating ET from the diurnal fluctuation of river flow (modified after [13])

ET a kolísání HPV kombinované s kolísáním průtoku ve vodních tocích

Další skupina článků řeší kolísání HPV způsobené ET, ale přidává k tomu i sledování vodního toku protékajícího mokřadem. Částečně by se sem dal přiřadit dříve zmíněný článek Gribovského [4], jehož hlavním přínosem bylo vylepšení metod pro výpočet ET z kolísání HPV, ale zmiňoval i vztah s kolísáním hladiny potoka. Dalším příkladem je Yeh [14], který v článku z roku 2008 v regionálním měřítku sledoval vodní bilanci půdy a využíval k tomu řadu 19 let pozorování měsíčních odtoků, úrovně HPV a půdní vlhkosti. Kromě toho i sledoval, jak se mění mocnost podpovrchové vrstvy ovlivněné ET.

Vztah mezi vlhkostí půdy a kolísáním průtoku ve vodním toku poté detailně zkoumal v článku z roku 2011 Moore [15], a to v experimentálním lese HJ Andrews v západním Oregonu. Došel k zajímavému výsledku, že pro všechny časové škály vlhkost půdy velmi dobře koreluje s množstvím vody aktuálně protékajícím v potoce. Korelace byla nejlepší při vysokých vlhkostech půdy.

ET, kolísání HPV a průtok ve vodních tocích v kombinaci s nezávislým stanovením transpirace vegetace

Nejkomplexněji je ET mokřadů zkoumána ve člancích, jež sledují nejen průtok ve vodních tocích, případně i kolísání HPV, ale i nezávislé měření transpirace vegetace, např. skrze měření mízního toku stromů (sap flow). Tyto články lze rozdělit do dvou skupin podle lokality. Jedna část pochází ze semiaridního klimatu Arizony, druhá ze středomořského (mediteránního) klimatu Oregonu.

První skupinou jsou články z Arizony. Tvoří součást rozsáhlého mezinárodního programu SALSA (semi-arid-land-atmosphere), který byl zaměřen na environmentální změny způsobené člověkem v semiaridních oblastech [16]. ET ze zamokřených území podél vodních toků (riparian zone) tvoří důležitou složku vodní bilance, a byla proto v rámci projektu intenzivně zkoumána různými metodami [17], např. byla metodou mízního toku (sap flow) měřena transpirace vrb a topolů a hodnoty byly porovnány s velikostí ET nepřímo odvozenou z vodní bilance [18]. Transpirace porostu odvozená z měření mízního toku odpovídala hodnotám naměřeným za pomoci Ramanova lidarů a byla použita pro kalibraci koeficientů v Penman-Monteithově metodě výpočtu ET. Na základě metody Bowenova poměru byla také určována ET travin. Shrnutí těchto výsledků společně s odhadem nepřesnosti stanovování složek vodní bilance a porovnáním oproti hodnotám získaným za použití modelu je detailně rozebíráno v článku Goodriche z roku 2000 [17].

Druhou skupinu tvoří články z Oregonu (experimentální les HJ Andrews). Důležité poznatky přináší článek Bonda z roku 2002 [19], kde byl měřen průtok vodního toku a sledována korelace s naměřenými hodnotami mízního toku ve vegetaci. Z naměřených dat bylo odvozováno, kolik vody bylo ET spotřebováno a z jak širokého pásu okolo potoka ET probíhala. Bylo zde také detailně popsáno, v jakých částech roku se objevovalo diurnální kolísání průtoku způsobené ET.

Zajímavým příspěvkem z Oregonu je článek Wondzella z roku 2007 [20], kde bylo detailně zkoumáno zpoždění mezi denním chodem ET a kolísáním průtoku v potoce. Bylo zjištěno, že doba zpoždění závisí na rychlosti toku vody v potoce, přesněji rychlosti šíření hydraulického pulzu korytem. Pokud voda v potoce tekla rychle, konstruktivně se skládal vliv vegetace z různých částí mokřadu. Tím byl původní diurnální signál znásoben. Oproti tomu, když voda v potoce proudila pomalu, vliv vegetace z různých míst mokřadu se skládal destruktivně (vzájemně se rušil) a původní diurnální signál byl tlumen. Wondzel [20] také

zmiňuje diurnální kolísání hodnot chemických ukazatelů a naznačuje, že by stejným principem mohlo být zpožděno v závislosti na rychlosti proudění vody v potoce.

Dalším příspěvkem z Oregonu je Barnardův článek z roku 2010 [21]. Cílem bylo popsat vztah transpirace a podpovrchového odtoku. Za tímto účelem byl na vybrané malé ploše měřen podpovrchový odtok z půdy, vlhkost půdy a transpirace stromů. Rovněž bylo provedeno umělé zavlažení a sledován průběh změn, které způsobilo. Bylo zjištěno, že zpoždění diurnálního kolísání vůči ET závisí na vlhkosti půdy. V tomto případě však Barnard [21] považuje za nepravděpodobné, že by se v rámci povodí mohl složit signál z různých částí povodí synchronizovaně tak, aby bylo diurnální kolísání vidět.

Z oblasti Oregonu také pochází zajímavý článek Grahama z roku 2013 [22] vypovídající o tom, jak častým jevem je diurnální kolísání způsobené ET. Bylo sledováno 15 různých povodí a výsledky byly porovnávány s měřeními mizního toku. Diurnální kolísání průtoku způsobené ET se objevilo ve všech letech a ve všech 15 povodích, což naznačuje, že nejde jen o speciální jev vázaný na malé množství lokalit.

Shrnutí stručné rešerše

Evapotranspirace v prostředí mokřadů patří i v současnosti mezi intenzivně zkoumaná témata, což vedlo v posledních 20 letech k výraznému posunu v pochopení. Diurnální kolísání HPV způsobené ET se ukazuje jako jev spojený s mnoha povodími, jak ukázal např. Graham ve svém článku z roku 2013 [22]. Pro výpočet ET z kolísání HPV byly vytvořeny modifikace původní klasické Whiteovy metody, např. metoda Gribovského z roku 2008 [4]. Od původních pozorování a popisu se výzkum posunul až k modelování a odvozování analytických vztahů. Ve vztahu ET a kolísání HPV je příkladem článek Malamy z roku 2010 [9], pro vztah mezi ET a kolísáním průtoku vodního toku článek, který publikoval Fonley v roce 2019 [13]. V literatuře lze rovněž najít komplexní projekty kombinující pozorování diurnálního kolísání s nezávislým stanovením ET jinými metodami, např. pomocí měření mizního toku stromů. Hlavní skupiny článků postupujících takto komplexně pocházejí ze semiaridního klimatu Arizony nebo středomořského (mediteránního) klimatu Oregonu.

Obecně je možné aktuální stav shrnout do tří následujících bodů. Zaprvé – od původních pozorování změn hladiny nebo průtoku v mokřadu nastal obrovský posun v poznání. Zadruhé – navzdory tomuto obrovskému posunu v poznání je stále potřebné provádět měření v různých lokalitách. Tato měření využívající stále se vyvíjející technologii pomohou ověřit či doplnit hydrologické modely [13]. Třetím a velmi důležitým bodem je nutnost převést tyto již získané poznatky do obecného povědomí odborníků, kteří se věnují praktické činnosti související s hydrologií a ekologií a kteří mohou přenést nové poznatky do běžné praxe. Jde o důležitý krok navazující na předchozí výzkumný posun, který je však nezbytný pro to, aby byly aktuální poznatky zohledňovány v běžné praxi. Příkladem takovéto snahy je i tento článek o ET mokřadů kombinující rešerši s měřením kolísání HPV v dlouhodoběji zkoumaném mokřadu v povodí horní Liběchovky.

Měření vlivu ET v mokřadu na Liběchovce

Na provedenou rešerši navazuje praktická demonstrace vlivu ET na mokřad na západě české křídové pánve. Bylo sledováno kolísání HPV a odtoku z malého mokřadu na drobném přítoku v horním povodí Liběchovky. Bylo prokázáno, že i v těchto podmínkách lze pozorovat diurnální kolísání HPV způsobené ET. Provedené měření také vypovídá o tom, co lze pro měření jednoduše použít, jaké podmínky musejí být splněny a jak v praxi toto diurnální kolísání vypadá.

LOKALITA

Měření bylo prováděno v mokřadu v horní části povodí Liběchovky (obr. 5). Jde o součást hydrologického rajonu 4522 Křída Liběchovky a Pšovky. Průměrná roční teplota (počítaná na základě let 1981–2010) dosahuje 8,2 °C, průměrný roční úhrn srážek činí 595 mm [23].

Byla zvolena taková lokalita, aby lokální podmínky nebránily projevům ET. Mokřadem protéká drobný vodní tok (Soví potok), jehož hlavním zdrojem vodnosti je podzemní voda z kvádrových pískovců; rychlý odtok je zanedbatelný. Vodní tok má proto vyrovnaný průtok, na němž se může dobře projevit vliv spotřeby vody ET. Rozloha mokřadu byla na základě terénního průzkumu určena jako 19 000 m² [24].



Obr. 5. Poloha mokřadu ([24])

Fig. 5. Wetland Area ([24])

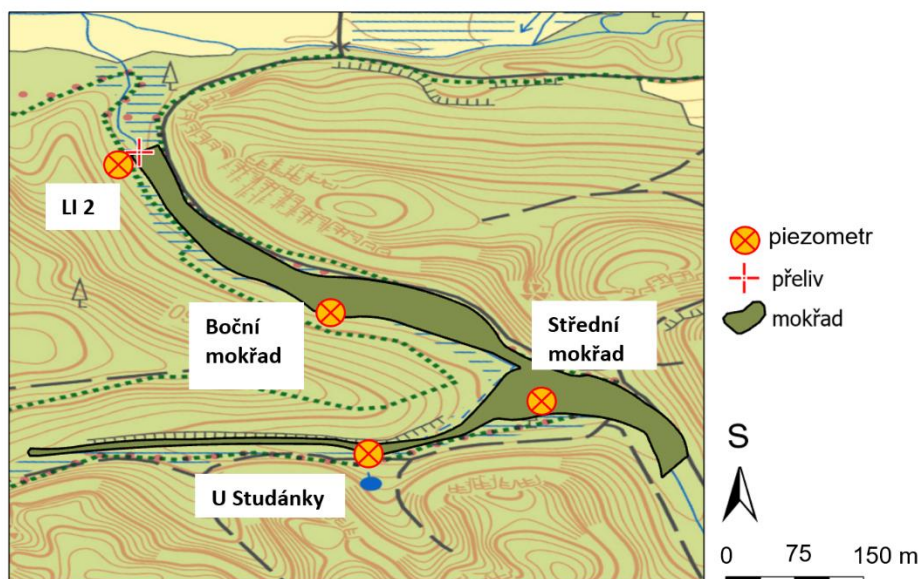
METODIKA

Jako praktická demonstrace vlivu ET v mokřadu byla sledována úroveň HPV a vlhkost půdy. HPV byla měřena piezometry, vlhkost půdy zjišťována odebráním vzorků půdy.

Měření HPV

Současná etapa navázala na předchozí měření stejných autorů [25] ze druhé poloviny léta 2022, kde bylo prokázáno, že diurnální kolísání HPV ve sledovaném mokřadu je způsobeno ET a projevuje se v teplých dnech bez deště. Nově bylo provedeno sledování celého letního období a piezometry byly rozmístěny do různých částí mokřadu, což umožnilo pozorovat postupný vývoj diurnálního kolísání HPV od jara po letní období roku 2024.

Pro zpracování byla využita měření od začátku roku 2024 do 9. září 2024. Polohu nově vybudovaných piezometrů popisujících prostorovou variabilitu HPV v mokřadu ukazuje obr. 6. Piezometr s pracovním názvem LI 2 zachycuje situaci uprostřed dolní části mokřadu, blízko zkonstruovaného přelivu. Centrální oblast mokřadu reprezentuje piezometr Střední mokřad. Piezometr Boční mokřad popisuje okraj mokřadu, kde je terén 2 m nad dnem údolí. Dle charakteru vegetace jde však v tomto místě ještě stále o mokřad s HPV blízko pod povrchem, což naznačuje, že z této strany do mokřadu přitéká podzemní voda. Odpovídá tomu i jílová vrstva, jež se v tomto místě nachází v hloubce okolo 60 cm pod terénem, a může tak tvořit málo propustnou vrstvu, po níž voda stéká. Další oblast přítoku do mokřadu reprezentuje piezometr s pracovním označením U Studánky. Byl umístěn na horní okraj mokřadu, poblíž místa, kde pramení jedno z ramen vodního toku protékajícího mokřadem.



Obr. 6. Rozmístění piezometrů v mokřadu; pro celkový přehled byl vyznačen i přeliv zbudovaný v rámci předchozích prací stejného autora, viz [25] (podkladová mapa: Základní mapa 1 : 10 000 získána z [26])

Fig. 6. Location of the piezometers in the wetland; for general overview there is also shown the location of the weir constructed by the same author during previous work ([25]) (background map: Base map 1 : 10,000 from [26])

Konstrukci piezometrů detailně popisuje [24]. Šlo o trubky s perforovanou spodní částí, ve kterých byla výška vodního sloupce měřena tlakovými čidly Solinst Logger. Pro přepočet naměřeného tlaku na vodní sloupec bylo nejprve potřeba od naměřených hodnot odečíst atmosférický tlak, který byl sledován tlakovým čidlem Solinst Logger umístěným ve stejné oblasti jako mokřad. Pro kontrolu měření byla na počátku a na konci období úrovně HPV přeměřena také ručně hladinoměrem. Pracovní názvy piezometrů a hloubku báze pod terénem ukazuje tab. 1.

Tab. 1. Hloubka piezometru pod terénem

Tab. 1. The depth of the piezometer

označení piezometru	hloubka báze pod terénem [m]
LI 2	0,92
Boční mokřad	1,2
Střední mokřad	0,85
U Studánky	1,16

Měření půdní vlhkosti

Půdní vlhkost byla měřena v okolí všech instalovaných piezometrů, a byly tak zachyceny různé části mokřadu. Aby nebyl piezometr ovlivněn rozrušením okolí trubky, byly pro odběr vzorků vybírány svislice ve vzdálenosti přibližně 1,5 m od piezometru. První vzorkování proběhlo na podzim 2023 (12.–13. listopadu 2023). Jednalo se o chladné vlhké období, v němž bylo předpokládáno, že bude v půdním profilu vázáno nadprůměrné množství vody a HPV bude vysoko. Druhé vzorkování bylo prováděno za horkých letních dní v období beze srážek (11. a

12. srpna 2024), kdy bylo očekáváno, že v půdním profilu bude podprůměrné množství vody a HPV bude nízko.

Nejprve byl vykopán profil sahající do takové hloubky, než ze stěn začala viditelně prosakovat voda, a charakter jednotlivých vrstev byl orientačně popsán. Poté byly odebrány vzorky. Úrovně vzorkování byly přizpůsobovány tak, aby byly zachyceny výrazné půdní vrstvy. Při druhém vzorkování bylo potřeba vybrat místo v blízkosti piezometru, které nebylo porušeno při předchozím vzorkování, proto se pro stejný piezometr mírně odlišují profily mezi prvním a druhým vzorkováním. K odběru byly použity Kopeckého válečky o objemu 100 cm³, zarážené v horizontálním směru. V rámci daného profilu byl z každé sledované úrovně odebrán pro stanovení storativity jeden vzorek. Okamžitě po odběru byly válečky zaklopeny víčky, omotány fólií a uzavřeny do plastového sáčku, aby bylo zabráněno ztrátám vlhkosti. Ihned po návratu z terénu byly odebrané vzorky zváženy na váze s přesností 0,1 g. Na stejné váze byla poté prováděna i všechna následující vážení.

Prvním krokem při zpracování bylo zjištění saturované vlhkosti. Válečky se vzorky byly jednotlivě umístěny do nádoby, odspodu zality vodou a ponechány tři dny ponořené. Poté byly vytaženy z nádoby a zváženy. Ve dvou výjimečných případech došlo k nezanedbatelnému opadu materiálu ze vzorku, čímž byla zkreslena vlhkost vzorku v saturovaném stavu (u příslušných vzorků je přidána poznámka ve výsledných grafech). Druhým krokem bylo změření hmotnosti vysušené půdy. Nejprve byl vzorek po několik dní sušen za laboratorní teploty, poté 1,5 týdne v peci při teplotě 105 °C a na závěr byl okamžitě po vyjmutí z pece zvážen, aby nestačil nasát vzdušnou vlhkost.

Z naměřených dat byla vypočtena objemová vlhkost vzorku ve stavu při odběru (θ_{odb}) a saturovaná (objemová) vlhkost vzorku (θ_{sat}) jako:

$$\theta_{odb} = \frac{V_{v\,odb}}{V_{vzorek}} = \frac{m_{odb} - m_s}{\rho_v \cdot V_{vzorek}} \quad (1)$$

$$\theta_{sat} = \frac{V_{v\,sat}}{V_{vzorek}} = \frac{m_{sat} - m_s}{\rho_v \cdot V_{vzorek}}, \quad (2)$$

kde:

$V_{v\,odb}$	je	objem vody ve vzorku ve stavu při odběru
$V_{v\,sat}$		objem vody ve vzorku v saturovaném stavu
V_{vzorek}		objem odebraného vzorku (100 cm ³)
m_{odb}		hmotnost vzorku při odběru
m_s		hmotnost vysušeného vzorku
m_{sat}		hmotnost vzorku v saturovaném stavu
ρ_v		hustota vody (1 000 kg . m ⁻³)

Výsledné hodnoty vlhkosti byly poté převedeny z desetinného čísla na hodnotu v %.

Odhad ET z kolísání HPV

V prvním kroku bylo na základě měření půdní vlhkosti odhadnuto, jakou storativitu mají půdní vrstvy, v nichž probíhá diurnální kolísání HPV. To umožnilo, aby v následných krocích zpracování dat mohl být měřený pohyb HPV převeden na množství vody, které při pohybu hladiny přibývalo/ubylo z podzemní vody. Pro odhad storativity byly z vytvořených piezometrů vybrány jen ty, kde při vzorkování v půdním profilu nebylo v hloubkách okolo úrovně HPV zachyceno mnoho různorodých vrstev.

Výpočet ET z diurnálního kolísání HPV byl proveden zjednodušeně na základě původní klasické metody Whitea [1]. Princip metody shrnuje obr. 2 v řešeršní části článku. Nejprve byla na základě intervalu mezi půlnocí a čtvrtou hodinou ranní vypočtena průměrná změna HPV za hodinu (r). Tato hodnota vypovídá o dlouhodobém vývoji HPV bez vlivu denní ET. Následně byla vypočtena změna zásob vody v půdě za den (ΔZ) jako:

$$\Delta Z = h_1 - h_2 , \quad (3)$$

kde:

h_1 je úroveň HPV o půlnoci aktuálního dne

h_2 úroveň hladiny o půlnoci následujícího dne

Kladná hodnota ΔZ znamená pokles HPV během dne, tedy úbytek vody v prostředí.

V dalším kroku byla vypočtena ET vyjádřená ve formě vodního sloupce za den:

$$ET = S * (24 * r + \Delta Z) , \quad (4)$$

kde:

S je storativita prostředí

r průměrná změna hladiny bez vlivu ET

ΔZ změna zásob za den

Získaná hodnota ET byla přepočtena z vyjádření ve formě vodního sloupce na vyjádření ve formě průtoku (objemu vody spotřebovaného za jednotku času). Výsledná hodnota ET mokřadu byla vypočtena jako aritmetický průměr dílčích hodnot pro jednotlivé piezometry. Takto získaná hodnota byla na závěr porovnána s určením ET na základě kolísání průtoku vodního toku a Oudinovy metody výpočtu PET, které bylo provedeno z dřívějších dat na stejné lokalitě týmiž autory [25].

Průměrná hodnota ET vypočtená z piezometrů Whiteovou metodou byla označena jako $ET_{prům.}$. Některé piezometry však kvůli výskytu mnoha různých půdních vrstev nebyly k výpočtu ET použity. Pro tyto piezometry bylo na závěr zpětně odhadnuto, jakou storativitu by musely mít, kdyby u nich ze záznamu kolísání HPV měla být Whiteovou metodou vypočtena hodnota ET rovná $ET_{prům.}$. Pro tento výpočet byla využita funkce Řešitel v programu MS Excel.

VÝSLEDKY

Měření HPV

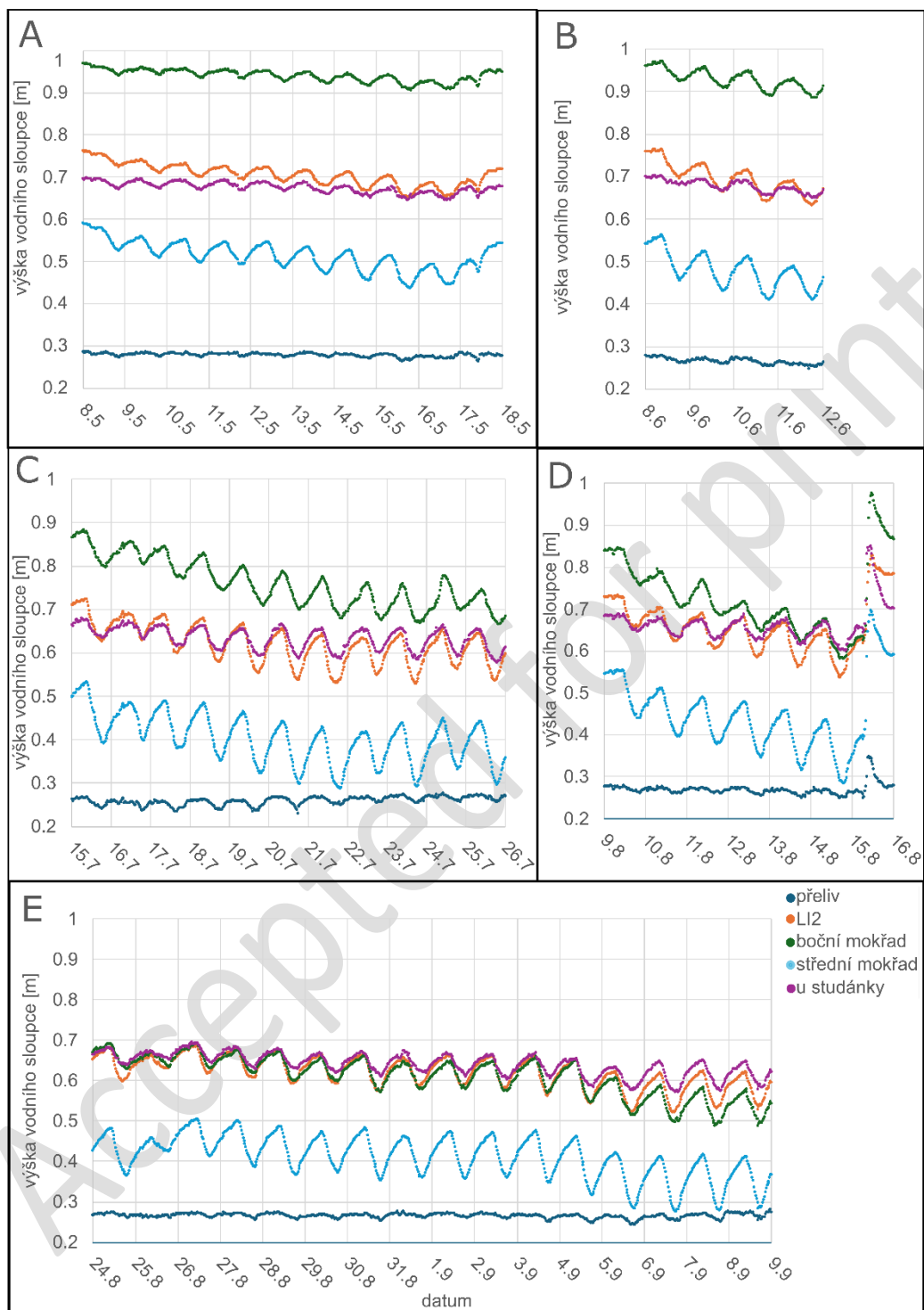
Z naměřených dat byla vybrána období, ve kterých po několik dní docházelo k výraznému diurnálnímu kolísání HPV (tab. 2). Šlo o osm období, délka jednotlivých epizod se pohybovala v rozmezí tří až 14 dní a kolísání bylo patrné vždy ve všech měřených místech mokřadu. V těchto obdobích kolísala zároveň hladina drobného vodního toku na přelivu. Amplituda kolísání hladiny potoka je však výrazně menší, maximálně 2,5 cm ve vrcholném létě, oproti amplitudě kolísání HPV, která ve vrcholném létě dosahuje až 14,5 cm u piezometru Střední mokřad.

Tab. 2. Období s diurnálním kolísáním HPV v mokřadu (rok 2024)

Tab. 2. Periods with the diurnal fluctuation of the groundwater level in the wetland (year 2024)

od	do	počet dní
09.05.	16.05.	8
08.06.	12.06.	5
16.06.	18.06.	3
24.06.	30.06.	7
07.07.	10.07.	4
15.07.	26.07.	12
28.07.	01.08.	5
10.08.	15.08.	6
26.08.	08.09.	14

První výrazné projevy diurnálního kolísání HPV byly pozorovány na začátku května (A v obr. 7). V osm dní dlouhém období (9. až 16. května) bylo kolísání větší ve střední části mokřadu (piezometr Střední mokřad) oproti kolísání v ostatních místech mokřadu. Dalším obdobím s dobře viditelným kolísáním HPV byla první polovina června, konkrétně 8. až 12. června (B v obr. 7) a 16. až 18. června. Amplituda kolísání byla oproti květnu výraznější, zejména v případě piezometru Střední mokřad. Výjimkou byl piezometr U Studánky, kde se kolísání oproti ostatním piezometrům projevovalo slaběji.



Obr. 7. Diurnální kolísání HPV ve sledovaném mokřadu na jaře (A), pozdním jaře (B), ve vrcholném létě (C, D) a na konci léta (E)

Fig. 7. The diurnal fluctuation of groundwater level in the early spring (A), late spring (B), in the middle of the summer (C, D) and in the end of a summer (E)

Od konce července se projevovale výrazné diurnální kolísání hladiny u všech piezometrů (C a D v obr. 7). Šlo o období 24. až 30. června, 7. až 10. července, 15. až 26. července, 28. července až 1. srpna a 10. až 15. srpna, v případě piezometru U Studánky však stále zůstávala amplituda kolísání menší. Nejdelším souvislým obdobím diurnálního kolísání HPV bylo 14 dní na konci léta ve dnech 26. srpna až 8. září (E v obr. 7).

Měření půdní vlhkosti

Výsledky měření půdní vlhkosti jsou uvedeny v tab. 3 a souhrnně znázorněny v obr. 8. Vlhkost písčitých vrstev se při odběru pohybovala okolo 40 %, vlhkost jílovito-prachovitých vrstev byla výrazně vyšší, většinou mezi 70 a 80 %.

Půdní profily vzorkované na podzim a v létě u stejného piezometru byly od sebe vzdáleny jen několik metrů, ale skladba vrstev je často velmi odlišná. Ukazuje to na výrazné rozdíly mezi půdními profily v různých místech mokřadu, jež jsou důsledkem dynamické činnosti vodního toku, což zároveň obecně znamená, že je obtížné reprezentativně určit hydraulické parametry takovéhoto prostředí např. pro účely přesného modelování.

Během podzimního vzorkování byla HPV výše než v létě. V obou obdobích však byla půda v celém půdním profilu velmi blízko nasycenému stavu. Rozdíl mezi vlhkostí při odebrání a saturovanou vlhkostí byl největší v povrchových vrstvách, ale i v tomto případě dosahoval maximálně 4 %.

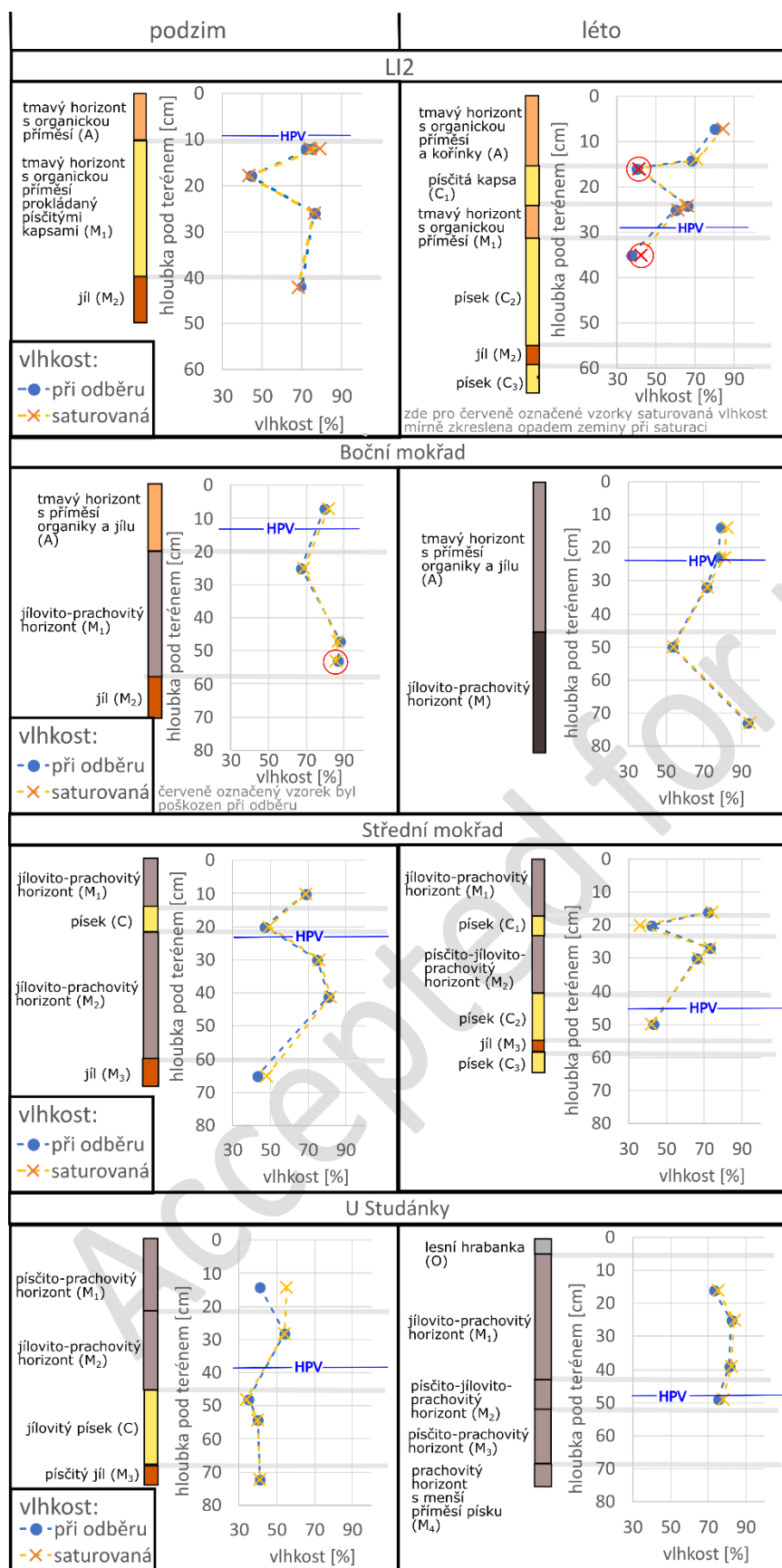
Tab. 3. Výsledky měření půdní vlhkosti

Tab. 3. The results of the soil moisture measurements

Podzim				Léto				
piezometr	hloubka pod terénem [cm]	vlhkost při odběru [%]	saturovaná vlhkost [%]	piezometr	hloubka pod terénem [cm]	vlhkost při odběru [%]	saturovaná vlhkost [%]	rozdíl saturované vlhkosti a vlhkosti při odběru [%]
boční mokřad	7	80	82	boční mokřad	14	79	82	3
boční mokřad	25	67	69	boční mokřad	23	78	81	3
boční mokřad	47	88	87	boční mokřad	32	71	72	1
boční mokřad	53	87	86	boční mokřad	50	53	54	1
LI 2	12	72	74	boční mokřad	73	93	94	2
LI 2	12	75	79	LI2	7	80	84	4
LI 2	18	44	43	LI2	14	68	71	3
LI 2	26	76	76	LI2	16	40	41	1
LI 2	42	70	68	LI2	24	66	66	0
střední mokřad	10	69	69	LI2	25	60	61	1
střední mokřad	20	47	49	LI2	35	37	42	5
střední mokřad	30	75	76	střední mokřad	16	72	74	2
střední mokřad	41	81	82	střední mokřad	20	42	36	0
střední mokřad	65	43	48	střední mokřad	27	73	73	0
u studánky	14	41	55	střední mokřad	30	66	67	1
u studánky	28	54	78	střední mokřad	50	43	42	0
u studánky	48	35	34	u studánky	16	73	75	2
u studánky	54	40	40	u studánky	25	82	84	2
u studánky	72	41	41	u studánky	39	81	82	1
				u studánky	49	75	78	3

Bylo odhadnuto, že nepřesnost stanovení vlhkosti se pohybovala mezi 1 a 2 %. Vyplývá to ze skutečnosti, že u některých vzorků byla naměřena vlhkost při odběru přesahující saturovanou vlhkost nebo že vrstvy pod HPV nebyly saturované. Hodnota 0 rozdílu mezi vlhkostí v saturovaném stavu a při odběru znamená, že vlhkost vzorku při odběru byla stejná nebo větší než saturovaná vlhkost.

V jednom případě vyšlo, že vzorek odebraný hluboko pod HPV nebyl saturovaný o 5 %, u druhého vyšla vlhkost vzorku výrazně převyšující saturovanou vlhkost (5 %). Tyto hodnoty byly považovány za chybu zpracování vzniklou tím, že z daného písčitého vzorku při manipulaci před vážením částečně vytekla voda. U třetího vzorku vyšlo, že těsně pod HPV byl vzorek o 3 % nesaturovaný, což bylo považováno za důsledek toho, že HPV odečtená z blízkého piezometru nemusela přesně odpovídat HPV přímo v místě vzorkovaného profilu a příslušný vzorek byl ve skutečnosti odebrán z úrovně nad hladinou vody.



Obr. 8. Měření půdní vlhkosti v mokřadu (u popisu profilu uveden v závorce půdní horizont dle půdní klasifikace)

Fig 8. Measuring the soil moisture content in the wetland (in the profile description, the soil horizons are described in brackets according to the soil classification)

Odhad ET z kolísání HPV

Prvním krokem bylo určení storativity vrstev půdy nacházejících se v hloubce výskytu HPV. Bylo použito letní měření vlhkosti, protože diurnální kolísání hladiny bylo zaznamenáno v teplé části roku. Ze vzorkovaných profilů byly pro zpracování vybrány piezometry Boční mokřad a U Studánky, jelikož půdní složení zde bylo s hloubkou málo proměnlivé. Z těchto piezometrů byly vybrány vzorky z úrovní nad HPV a storativita u nich byla určena jako rozdíl saturované vlhkosti a vlhkosti při odebrání. Tímto postupem byla určena storativita jako 2 % s absolutní chybou ± 1 %.

Ve druhém kroku byla použita Whiteova metoda [1] pro výpočet ET na základě naměřeného diurnálního kolísání HPV v piezometrech U Studánky a Boční mokřad. Výsledky shrnuje tab. 4. Uvedené hodnoty jsou průměrnou hodnotou ET vypočtenou na základě osmi období, v nichž po několik dní docházelo k výraznému kolísání HPV. Výsledný odhad ET byl vypočten jako aritmetický průměr hodnot získaných z obou piezometrů a dosáhl hodnoty $20 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (s rozpětím $\pm 10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ při uvažovaném rozpětí hodnot storativity ± 1 %).

Tab. 4. ET v mokřadu vypočtená Whiteovou metodou

Tab. 4. ET in the wetland calculated by the White method

Boční mokřad				U studánky			
storativita	ET [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]	ET [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$]	ET [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$]	storativita	ET [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]	ET [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$]	ET [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$]
1%	0,94	0,2	11	1%	0,78	0,2	9
2%	1,89	0,4	22	2%	1,56	0,3	18
3%	2,83	0,6	33	3%	2,33	0,5	27

V závěrečném kroku byla získaná hodnota ET porovnána s výsledky stanovení ET jinou metodou týmiž autory ve stejném mokřadu [25]. V uvedené práci byla ET vypočtena z kolísání průtoku vodního toku za předpokladu, že nejvyšší hodnota průtoku v daném dni reprezentuje průtok neovlivněný ET. Touto metodou byla stanovena hodnota ET $11 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Na základě výpočtu PET Oudina byla v uvedené práci získána hodnota ET průměrně $25 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Tyto výsledky z roku 2022 jsou v rámci přesnosti určení storativity ve shodě s hodnotami ET získanými Whiteovou metodou, jež činí $20 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

Aby hodnota ET $20 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ za použití Whiteovy metody vyšla také u piezometru Střední mokřad, bylo zpětně vypočteno, že by storativita v případě tohoto piezometru měla být okolo 2 %. V případě piezometru LI2 bylo stejným způsobem zpětně vypočteno, že by storativita měla činit cca 1 %. Obě hodnoty jsou v rozsahu očekávaných hodnot storativity. V rámci budoucích měření bude přínosné stanovenou hodnotu storativity porovnat se storativitou získanou experimentálně jiným způsobem, např. čerpací zkouškou s malým množstvím vody čerpané z piezometrů, v jejichž okolí bude dalšími jednorázově instalovanými piezometry sledován pokles hladiny a geometrie depresního kuželu. To by mělo vést k určení storativity s výrazně vyšší přesností.

DISKUZE

Uvedená měření navázala na předchozí výzkumné kroky provedené stejným autorem na totožné lokalitě. Výsledky odpovídají poznatkům zahraničních článků prezentovaných v první

(rešeršní) části. V práci Pátka z roku 2022 [24] bylo detekováno diurnální kolísání HPV a průtoku na jednom místě v mokřadu. Denní amplituda kolísání (rozdíl mezi maximální a minimální úrovní HPV v daném dni) rostla s vyšší teplotou. Uvedená závislost byla lépe patrná, pokud byly uvažovány jen dny bez deště, a nejvýrazněji se projevovala, šlo-li o dny s denním úhrnem slunečního svitu nad devět hodin. Tyto poznatky potvrdily předpoklad, že detekované kolísání je způsobeno vlivem ET. V navazujícím článku Pátka a Bruthanse z roku 2023 [25] bylo diurnální kolísání průtoku použito k odhadu množství vody spotřebované vegetací a výsledek byl porovnán s teoretickou metodou výpočtu potenciální ET podle Oudina. Bylo rovněž pozorováno zpoždění minima a maxima průtoku oproti chodu slunce. Obvyklý čas denního maxima (okolo 8:00) a denního minima průtoku (okolo 16:30) je ve shodě např. s výsledky Gribovského [3] získanými z experimentálního povodí na úpatí Alp, kde v srpnu docházelo k maximálnímu průtoku okolo 7:00 a k minimálnímu průtoku okolo 16:00.

Ve sledovaném mokřadu bylo k předcházejícím výzkumným krokům doplněno sledování úrovně HPV v celém mokřadu současně, což umožnilo zhodnotit prostorovou variabilitu diurnálního kolísání HPV. Kolísání probíhá v celém mokřadu včetně okrajových částí stejně a současně, přičemž nejvýrazněji se projevilo v centrální části mokřadu.

Další zajímavé poznatky přineslo měření půdní vlhkosti. Půda nad HPV byla blízko nasycenému stavu a bylo tomu tak i v letních měsících, kdy probíhala intenzivní ET. Je překvapivé, že ačkoli jde o volnou zvodeň, storativita je velmi nízká a dosahuje pouhých několika málo jednotek procent. Důvodem je převažující jemnozrný materiál, kde je velká většina porů vyplněna vodou (kapilární tráseň) a jen velmi malý objem zabírá vzduch.

Vysoká vlhkost vyskytující se v celém půdním profilu umožňuje, aby se ET projevovala na kolísání HPV výrazněji. Prvním důvodem je snadná dostupnost vody pro kořeny rostlin. Druhým důvodem je skutečnost, že stačí malé množství vody, aby se části půdy nad HPV zcela dosytily do saturovaného stavu, a tím se zvýšila úroveň HPV (storativita je tedy nízká a dosahuje 1–4 %). Malé množství přidané/odebrané vody se tak projevuje výraznými vertikálními pohyby HPV. Vysoká vlhkost půdy v létě zároveň znamená, že voda je dobře dostupná i v sušších obdobích, kdy je ET z oblastí mimo mokřad omezoována nedostatkem vody, a relativní vliv sekundární ET mokřadu na vodní bilanci krajiny je větší.

Naměřená data umožnila provést pouze přibližný odhad storativity. Rozdíly vlhkosti nasycených vzorků oproti vlhkosti vzorků při odběru vycházely v jednotkách %, tedy řádově podobné jako přesnost použité metody. Kromě toho byly silně odlišné vlastnosti jednotlivých vrstev půdního profilu. Tato silná prostorová proměnlivost hodnot storativity naznačuje, že k výraznému zpřesnění by nevedlo ani to, kdyby bylo z jedné konkrétní hloubky daného profilu odebíráno více Kopeckého válečků. Ukazuje se tím, že v budoucích pracích bude pro stanovení storativity v mokřadu vhodnější použít jiné metody, např. miniaturní čerpací zkoušku (čerpaní v $\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$ a snížení hladiny v decimetrech okolo piezometru). Výhodou této metody navíc bude, že vypovídá o souhrnném chování většího objemu prostředí, a nebude proto tolik citlivá na nesourodé složení půdního profilu v mokřadu ovlivněné dynamickou činností vodního toku.

Diurnální kolísání způsobené ET se projevovalo v mokřadu jak na průtoku vodního toku (tedy poklesu průtoku vodního toku během dne oproti noci), tak na kolísání HPV (poklesu úrovně HPV během dne oproti noci). Spojitost mezi kolísáním obou veličin vyplývá z toho, že hlavním zdrojem vodnosti drobného vodního toku protékajícího mokřadem je podzemní voda. Měření kolísání HPV bylo snazší oproti měření kolísání hladiny vodního toku, protože pohyb HPV měl větší vertikální rozsah, než mělo kolísání hladiny potoka, a měření bylo tudíž relativně přesnější. V prostředích, kde je HPV blízko povrchu a zároveň je malá časová prodleva mezi kolísáním HPV a průtokem, naznačuje tento poznatek alternativní způsob, jak jednoduše a s malými nároky na přístrojové vybavení měřit průtok vodního toku. Těsný vztah mezi úrovní HPV a průtokem vodního toku odpovídá také např. výsledkům článku Moora [15], kde byla

popsána dobrá korelace mezi aktuálním průtokem v potoce a vlhkostí půdy a bylo zjištěno, že vztah je přesnější při vysokých vlhkostech půdy.

Provedená měření jsou zároveň ukázkou způsobu, jak lze diurnální kolísání HPV detekovat s relativně jednoduchým a málo nákladným vybavením. K měření dostačovaly piezometry tvořené tlakovými čidly vloženými do perforovaných trubek zapuštěných do země, jejichž instalace byla jen nepatrným zásahem do životního prostředí. Malá náročnost na údržbu umožňuje dlouhodobé sledování, což by bylo možné využít např. ke kontrole stavu mokřadu včetně včasné detekce změn (sucho, úhyn stromů). Doplnění měřicí sítě o jednoduchý přeliv umožnilo přeměřovat ručně objemovou metodou průtok v potoce. Byla vytvořena měrná křivka průtoku a záznam výšky hladiny snímaný čidly mohl být přepočítáván na záznam průtoku v potoce [25].

ZÁVĚR

Rešeršní část práce obsahuje přehled výzkumu věnujícího se vlivu ET v mokřadech na vodní bilanci. Výzkum lze rozdělit do čtyř skupin popisujících spektrum článků od těch zkoumajících detailně kolísání hladiny podzemní vody (HPV) až ke komplexnějším studiím kombinujícím kolísání HPV s průtokem vodního toku a případně také s měřením transpirace vegetace jinými způsoby, např. měřením mízního toku stromů.

Teoretické poznatky byly ve druhé části doplněny praktickým měřením ukazujícím situaci v západní části české křídové pánve. Byl sledován vliv ET na mokřad v horním povodí Liběchovky. V souladu s výsledky rešerše provedené v první části práce byly pozorovány tři hlavní skutečnosti:

- značný vliv sekundární ET v mokřadu na vodní bilanci,
- diurnální kolísání HPV, které se vlivem ET objevuje v letních měsících v celém mokřadu současně,
- časové zpoždění diurnálního kolísání HPV a průtoku vodního toku oproti chodu slunce.

Na základě diurnálního kolísání byla určena ET mokřadu jako $20 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Jde o průměrnou hodnotu reprezentující teplá období v letní části roku, kdy po několik dní docházelo k výraznému diurnálnímu kolísání HPV. To je ve shodě s výsledky předchozích měření na stejné lokalitě týmiž autory [25], kde byla ET odvozována z kolísání průtoku drobného vodního toku protékajícího mokřadem a z Oudinovy metody výpočtu PET.

Byla tak podpořena nutnost uvažovat i ve střední Evropě vliv ET mokřadů na vodní bilanci, kterou ukázal Bruthans v článku z roku 2020 [2] na základě měření průtoku vodních toků. Z provedené práce a ostatních prací podobného druhu plyne následující důležitý souhrnný závěr s velkým přesahem do hydrologické praxe. Mokřad a jemu podobná prostředí nejsou prvky zadržující vodu v krajině, ale jde o prostředí, kde je voda naopak intenzivně spotřebovávána vegetací a za vysokých letních teplot intenzivně mizí do atmosféry.

Poděkování

Terénní měření byla podpořena projektem Technologické agentury ČR č. SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku“.

Literatura[NJ1]

- [1] WHITE, W. N., G. SURVEY (ÉTATS-UNIS). *A Method of Estimating Ground-Water Supplies Based on Discharge by Plants and Evaporation from Soil: Results of Investigations in Escalante Valley, Utah*. B. m.: U. S. Government Printing Office, 1932.
- [2] BRUTHANS, J., KADLECOVÁ, R., SLAVÍK, M., KRÁLOVÁ, M., FRYČ, T., ČURDA, J. Cause of Rapid Decrease of Discharge of Minor Streams in Central Bohemia in Summer 2019, and Extremely Low Specific Runoff: Effect of Evapotranspiration from Riparian Zone and Areas with Shallow Groundwater Table. *Geoscience Research Reports* [on-line]. 2020, s. 47–54 [citováno 2025-03-03]. ISSN 2336-5757, 0514-8057. Dostupné z: <https://doi.org/10.3140/zpravy.geol.2020.06>
- [3] GRIBOVSKY, Z., KALICZ, P., KUCSARA, M. Streamflow Characteristics of Two Forested Catchments in the Sopron Hills. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* [on-line]. 2006, 2(1), s. 81–92 [citováno 2025-03-03]. ISSN 1787-064X, 1786-691X. Dostupné z: <https://doi.org/10.37045/aslh-2006-0007>
- [4] GRIBOVSKY, Z., KALICZ, P., SZILÁGYI, J., KUCSARA, M. Riparian Zone Evapotranspiration Estimation from Diurnal Groundwater Level Fluctuations. *Journal of Hydrology* [on-line]. 2008, 349(1), s. 6–17 [citováno 2025-03-03]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.049>
- [5] CARLSON MAZUR, M. L., WILEY, M. J., WILCOX, D. A. Estimating Evapotranspiration and Groundwater Flow from Water-Table Fluctuations for a General Wetland Scenario. *Ecohydrology* [on-line]. 2014, 7(2), s. 378–390 [citováno 2025-03-03]. ISSN 1936-0592. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/eco.1356>
- [6] LOHEIDE II, S. P., BUTLER JR., J. J., GORELICK, S.M. Estimation of Groundwater Consumption by Phreatophytes Using Diurnal Water Table Fluctuations: A Saturated-Unsaturated Flow Assessment. *Water Resources Research* [on-line]. 2005, 41(7), W07030. [citováno 2025-03-03]. ISSN 1944-7973. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2005WR003942>
- [7] LOHEIDE II, S. P. A Method for Estimating Subdaily Evapotranspiration of Shallow Groundwater Using Diurnal Water Table Fluctuations. *Ecohydrology* [on-line]. 2008, 1(1), s. 59–66 [citováno 2025-03-03]. ISSN 1936-0592. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/eco.7>
- [8] FAHLE, M., DIETRICH, O. Estimation of Evapotranspiration Using Diurnal Groundwater Level Fluctuations: Comparison of Different Approaches with Groundwater Lysimeter Data. *Water Resources Research* [on-line]. 2014, 50(1), s. 273–286 [citováno 2025-03-03]. ISSN 1944-7973. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2013WR014472>
- [9] MALAMA, B., JOHNSON, B. Analytical Modeling of Saturated Zone Head Response to Evapotranspiration and River-Stage Fluctuations. *Journal of Hydrology* [on-line]. 2010, 382(1), s. 1–9 [citováno 2025-03-03]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.010>

- [10] DANIEL, J. F. Estimating Groundwater Evapotranspiration from Streamflow Records. *Water Resources Research* [on-line]. 1976, 12(3), s. 360–364 [citováno 2025-03-03]. ISSN 1944-7973. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00360>
- [11] WITTENBERG, H., SIVAPALAN, M. Watershed Groundwater Balance Estimation Using Streamflow Recession Analysis and Baseflow Separation. *Journal of Hydrology* [on-line]. 1999, 219(1), s. 20–33 [citováno 2025-03-03]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00040-2)
- [12] ZECHARIAS, Y. B., BRUTSAERT, W. Recession Characteristics of Groundwater Outflow and Base Flow from Mountainous Watersheds. *Water Resources Research* [on-line]. 1988, 24(10), s. 1651–1658 [citováno 2025-03-03]. ISSN 1944-7973. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR024i010p01651>
- [13] FONLEY, M., MANTILLA, R., CURTU, R. Doing Hydrology Backwards – Analytic Solution Connecting Streamflow Oscillations at the Basin Outlet to Average Evaporation on a Hillslope. *Hydrology* [on-line]. 2019, 6(4), s. 85 [citováno 2025-03-03]. ISSN 2306-5338. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/hydrology6040085>
- [14] YEH, P. J.-F., FAMIGLIETTI, J. S. Regional Groundwater Evapotranspiration in Illinois. *Journal of Hydrometeorology* [on-line]. 2009, 10(2), s. 464–478 [citováno 2025-03-03]. ISSN 1525-7541, 1525-755X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/2008JHM1018.1>
- [15] MOORE, G. W., JONES, J. A., BOND, B. J. How Soil Moisture Mediates the Influence of Transpiration on Streamflow at Hourly to Interannual Scales in a Forested Catchment. *Hydrological Processes* [on-line]. 2011, 25(24), s. 3 701–3 710 [citováno 2025-03-03]. ISSN 0885-6087, 1099-1085. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.8095>
- [16] GOODRICH, D. C., CHEHBOUNI, A., GOFF, B., MACNISH, B., MADDOCK, T., MORAN, S., SHUTTLEWORTH, W. J., WILLIAMS, D. G., WATTS, C., HIPPS, L. H., COOPER, D. I., SCHIELDGE, J., KERR, Y. H., ARIAS, H., KIRKLAND, M., CARLOS, R., CAYROL, P., KEPNER, W., JONES, B., AVISSAR, R., BEGUE, A., BONNEFOND, J.-M., BOULET, G., BRANAN, B., BRUNEL, J. P., CHEN, L. C., CLARKE, T., DAVIS, M. R., DEBRUIN, H., DEDIEU, G., ELGUERO, E., EICHINGER, W. E., EVERITT, J., GARATUZA-PAYAN, J., GEMPKE, V. L., GUPTA, H., HARLOW, C., HARTOGENSIS, O., HELFERT, M., HOLIFIELD, C., HYMER, D., KAHLE, A., KEEFER, T., KRISHNAMOORTHY, S., LHOMME, J.-P., LAGOUARDE, J.-P., LO SEEN, D., LUQUET, D., MARSETT, R., MONTENY, B., NI, W., NOUVELLON, Y., PINKER, R., PETERS, C., POOL, D., QI, J., RAMBAL, S., RODRIGUEZ, J., SANTIAGO, F., SANO, E., SCHAEFFER, S. M., SCHULTE, M., SCOTT, R., SHAO, X., SNYDER, K. A., SOROOSHIAN, S., UNKRICH, C. L., WHITAKER, M., YUCEL, I. Preface Paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program Special Issue. *Agricultural and Forest Meteorology* [on-line]. 2000a, 105(1), s. 3–20 [citováno 2025-03-03]. ISSN 0168-1923. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00178-7)
- [17] GOODRICH, D. C., SCOTT, R., QI, J., GOFF, B., UNKRICH, C. L., MORAN, M. S., WILLIAMS, D., SCHAEFFER, S., SNYDER, K., MACNISH, R., MADDOCK, T., POOL, D., CHEHBOUNI, A., COOPER, D. I., EICHINGER, W. E., SHUTTLEWORTH, W. J., KERR, Y., MARSETT, R., NI, W. Seasonal Estimates of Riparian Evapotranspiration Using Remote and In Situ Measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* [on-line]. 2000b,

105(1), s. 281–309 [citováno 2025-03-03]. ISSN 0168-1923. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00197-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00197-0)

[18] MAC NISH, R. D., UNKRICH, C. L., SMYTHE, E., GOODRICH, D. C., MADDOCK, T. Comparison of Riparian Evapotranspiration Estimates Based on a Water Balance Approach and Sap Flow Measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* [on-line]. 2000, 105(1), s. 271–279 [citováno 2025-03-04]. ISSN 0168-1923.

Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00196-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00196-9)

[19] BOND, B. J., JONES, J. A., MOORE, G., PHILLIPS, N., POST, D., MCDONNELL, J. J. The Zone of Vegetation Influence on Baseflow Revealed by Diel Patterns of Streamflow and Vegetation Water Use in a Headwater Basin. *Hydrological Processes* [on-line]. 2002, 16(8), s. 1 671–1 677 [citováno 2025-03-04]. ISSN 0885-6087, 1099-1085.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.5022>

[20] WONDZELL, S. M., GOOSEFF, M. N., MCGLYNN, B. L. Flow Velocity and the Hydrologic Behavior of Streams during Baseflow. *Geophysical Research Letters* [on-line]. 2007, 34(24), s. 2007GL031256 [citováno 2025-03-04]. ISSN 0094-8276, 1944-8007.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2007GL031256>

[21] BARNARD, H. R., GRAHAM, C. B., VAN VERSEVELD, W. J., BROOKS, J. R., BOND, B. J., MCDONNELL, J. J. Mechanistic Assessment of Hillslope Transpiration Controls of Diel Subsurface Flow: A Steady-State Irrigation Approach. *Ecohydrology* [on-line]. 2010, 3(2), s. 133–142 [citováno 2025-03-04]. ISSN 1936-0584, 1936-0592.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/eco.114>

[22] GRAHAM, C. B., BARNARD, H. R., KAVANAGH, K. L., MCNAMARA, J. P. Catchment Scale Controls the Temporal Connection of Transpiration and Diel Fluctuations in Streamflow. *Hydrological Processes* [on-line]. 2013, 27(18), s. 2 541–2 556

[citováno 2025-03-04]. ISSN 0885-6087, 1099-1085. Dostupné z:

<https://doi.org/10.1002/hyp.9334>

[23] KŮRKOVÁ, I., BURDA, J., ADAMOVIČ, J., BRUTHANS, J., BŮZEK, F., HERČÍK, F., KADLECOVÁ, R., KONDROVÁ, L. Závěrečná zpráva, Příloha č. 2/35, Stanovení zásob podzemních vod, Hydrogeologický rajon 4522 – Křída Liběchovky a Pšovky [on-line]. B. m.: Česká geologická služba, 2016. Rebilance zásob podzemních vod.

Dostupné z: http://www.geology.cz/rebilance/vysledky/4522_zprava.pdf

[24] PÁTEK, K. *Metody stanovení evapotranspirace v mokřadech a spotřeba podzemní vody evapotranspirací mokřadů v povodí Liběchovky a Pšovky. Bakalářská práce* [on-line]. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, 2022. [citováno 2025-03-04]. Dostupné z:

<https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/173263>

[25] PÁTEK, K., BRUTHANS, J. Snížení základního odtoku kvůli evapotranspiraci povrchové a podzemní vody z mokřadu v povodí Liběchovky: porovnání měření a výpočtu Oudinovou metodou. *Zprávy o geologických výzkumech* [on-line]. 2023, 5601, s. 3–9 [citováno 2025-05-02]. Dostupné z: <https://app.geology.cz/zgv/cs/detail/zpravy.geol.2023.07>

[26] ČÚZK 2022. ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘICKÝ A KATASTRÁLNÍ, WMS Služby. Základní mapa 1: 10 000 (ZM 10) [on-line]. 12. březen 2022. Dostupné z:

[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(1rrwqvbhvmcmwksyycxa0d3o\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&metadataID=CZ-CUZZK-WMS-ZM10P&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3115](https://geoportal.cuzk.cz/(S(1rrwqvbhvmcmwksyycxa0d3o))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&metadataID=CZ-CUZZK-WMS-ZM10P&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3115)

Autoři

Mgr. Karel Pátek^{1, 2}

patek@ih.cas.cz

ORCID: 0009-0000-4042-5159

doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.^{3, 4}

bruthans@natur.cuni.cz

ORCID: 0000-0002-4749-0583

¹Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., Praha (Česká republika)

²Fakulta životního prostředí ČZU v Praze, Praha (Česká republika)

³Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha (Česká republika)

⁴Česká geologická služba, Praha (Česká republika)

Príspevek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2025.03.002

ISSN 0322-8916/© 2025 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

WETLAND EVAPOTRANSPIRATION

PÁTEK, K.^{1, 2}; BRUTHANS, J.^{3, 4}

¹Institute of Hydrodynamics of the Czech Academy of Sciences, Prague (Czech Republic)

²Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague (Czech Republic)

³Faculty of Science, Charles University, Prague (Czech Republic)

⁴Czech Geological Survey, Prague (Czech Republic)

Keywords: evapotranspiration – wetland – water balance – groundwater level fluctuation – water retention in the landscape

The wetland is an environment where water is readily available for vegetation, and therefore intensive evapotranspiration (ET) close to the potential ET value occurs. In addition, higher ET intensities can be expected in the future due to the observed increase in temperatures associated with climate change. The impact of wetland ET needs to be considered, for example, in revitalization planning or hydrological modelling, and it is important to draw on the current knowledge provided by the large number of papers worldwide. Therefore, the first part of the paper is a brief review of the wetland ET. The second part of the paper is a practical demonstration of the impact of ET on wetlands in the western part of the Bohemian Cretaceous Basin.

In the first (review) part of the paper, the articles were divided into several groups according to whether they were based on investigations of water table fluctuations, monitoring of wetland-influenced stream flow, or tree transpiration measurements, or a combination of different methods. Thus, it is shown where current research has moved since the original observations of water table fluctuations, for example in White's 1932 paper [1]. In the second (practical) part of the paper, water table fluctuations were monitored in a wetland in the upper part of the Liběchovka catchment (temperate climate, western part of the Bohemian Cretaceous Basin) in the summer of the year 2024. Four piezometers representing different parts of the wetland were installed in the wetland. From the measured data, periods in which significant diurnal water table fluctuations occurred for several days were selected; these were 8 periods of 3 to 14 days. The fluctuations were evident in all parts of the wetland surveyed, with water table maxima and minima occurring at similar times in different parts of the wetland, only the amplitudes of the fluctuations differed. The diurnal fluctuation of water table was most evident in the central part of the wetland (amplitude up to 14.5 cm in peak summer). As additional information on wetland conditions, soil moisture was measured at different depths in autumn and summer. It was observed that the soil profile changes between different locations, even several meters apart, due to the dynamic action of the flowing stream. The moisture content of the sandy layers (around 40 %) differed significantly from that of the clay-loam layers (where it was mostly between 70 and 80 %). The soil in the wetland was also found to be very close to saturated throughout the profile, both in autumn, when no significant ET takes place, and during summer. This means that the small amount of water added/consumed is sufficient to cause significant vertical movement of water table and therefore diurnal variation of water table may be more apparent. For the 8 selected periods in which significant diurnal fluctuations of water table occurred for several days, the average ET of the monitored wetland in the upper catchment of the Liběchovka stream was calculated as $20 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ by White's method [1] based on the water table fluctuation. The two parts of the paper together show that the topic of wetland ET is important and actual and demonstrate that wetlands need to be seen as environments where water is intensively used by vegetation.