

Aktualizace empirických vztahů pro výpočet výparu z vodní hladiny na základě pozorování výparu ve stanici Hlasivo

PETRA ŠUHÁJKOVÁ, ROMAN KOŽÍN, ADAM BERAN, EVA MELIŠOVÁ, ADAM VIZINA, MARTIN HANEL

Klíčová slova: výpar – srovnávací výparoměr – výparoměrná stanice Hlasivo – výparoměrná stanice Tišice – odvození regresních vztahů

SOUHRN

Výpar z vodní hladiny je jednou ze základních složek oběhu vody v přírodě a významně ovlivňuje celkovou hydrologickou bilanci povodí. Vzhledem ke komplikovanému přímému měření je často zjišťován ze vzorců, které jako vstupní data vyžadují dostupné měřené meteorologické veličiny.

V příspěvku je popsán způsob odvození regresních vztahů pro výpočet výparu ve stanici Hlasivo. Dále jsou uvedeny nově odvozené vzorce pro tuto lokalitu, které kombinují různé meteorologické veličiny. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití vzorce využívajícího k výpočtu globální sluneční radiaci a teplotu vody a vzorec založený na kombinaci teploty vody, relativní vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu (popř. rychlosti větru).

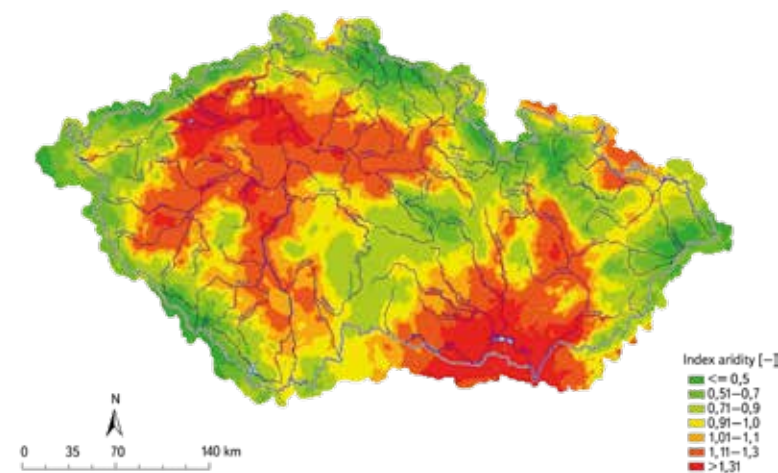
Hodnocení vzorců bylo provedeno na základě nejnižší hodnoty průměrné relativní chyby (MRE) a nejvyšší hodnoty Kling-Gupta účinnosti (KGE). Vzorce byly testovány na historické datové sadě ze zrušené výparoměrné stanice Tišice. Výsledky ukazují, že pro výpočet výparu pro jinou lokalitu je vhodnější využít vzorce, které se zakládají na jednoduché párové regresi s jednou meteorologickou veličinou (teplotou vody, nebo teplotou vzduchu), na rozdíl od vzorců využívající vícenásobné regrese. Při použití vzorců je vždy nutné ověřit rozsah jejich platnosti.

ÚVOD

Výpar z vodní hladiny je důležitým členem hydrologické bilance vodních nádrží. V posledních letech je význam výparu z volné hladiny navíc umocňován dopady klimatických změn. Zvyšování průměrné teploty vzduchu má za následek zvýšený úbytek vody výparem, nicméně tyto ztráty nejsou kompenzovány srážkovými úhrny, které jsou víceméně stejné a nerovnoměrně rozdělené. Na území České republiky se proto vyskytují oblasti, kde potenciální evapotranspirace významně převyšuje srážkové úhrny, viz *obr. 1*. Na povodích s vyšším zastoupením vodních ploch, případně při určování bilance vodních nádrží, je zapotřebí přesné určení výparu z vodní plochy.

Přímé měření výparu je komplikované a není tak časté. Běžná výparoměrná zařízení (např. GGI, Class-A-pan aj.) neudávají výpar, ale tzv. výparnost, která bývá zpravidla vyšší než skutečný výpar [1]. Z tohoto důvodu je výpar vodních nádrží odhadován na základě tabulkových hodnot podle nadmořské výšky [2] nebo určován z matematických vzorců, které obsahují snadněji měřitelné veličiny [3]. Závislost výparu na jednotlivých meteorologických veličinách je popsán českou [4, 5] i zahraniční literaturou [6–8].

V článku Berana a kol. [4] byly odvozeny empirické vztahy pro výpočet výparu z vodní plochy na základě dat ze stanice Hlasivo za období 1957–2012. Od té doby se průměrná teplota vzduchu stále zvyšovala a navíc se vyskytly roky s extrémně nízkými srážkovými úhrny (2015, 2018). To přispělo k potřebě aktualizování vztahů pro výpočet výparu z vodní hladiny se zahrnutím těchto skutečností.



Obr. 1. Index aridity na území ČR [9]

Fig. 1. Aridity index in the Czech Republic [9]

VÝCHOZÍ DATA

K odvození nových regresních vztahů pro výpočet výparu byla použita data z výparoměrné stanice v Hlasivu u Tábora, 547 m n. m. K letošnému roku tak máme díky nepřetržitému fungování stanice 62letou datovou řadu. Jedná se nejen o hodnoty výparu, ale i další meteorologické veličiny, jež stanice zaznamenává.

Vzhledem k tomu, že naměřené denní hodnoty výparu bývají zatíženy značnou náhodnou chybou [10], byla k odvozování používána data průměrného denního výparu v měsíci. K dispozici byly pozorované měsíční řady: teplota vzduchu ve 2 m [°C], teplota hladiny vody ve výparoměru [°C], relativní vlhkost vzduchu [%], globální sluneční radiace [W/m²] a rychlost větru [m/s]. Výpar byl měřen srovnávacím výparoměrem o ploše hladiny cca 20 m². Vzhledem k ploše srovnávacího výparoměru se naměřená výparnost považuje za reálný výpar.

Sezona měření výparu ve stanici Hlasivo je od května do října. V případě nízkých teplot (zamrzání vody ve výparoměru) může začít později nebo být ukončena o několik dní dříve. V takových případech jsou pro vyhodnocování vztahů a korelačních koeficientů výparu s vybranými meteorologickými veličinami data zkrácena tak, aby korespondovala s konkrétními dny, kdy se výpar měřil.

VZTAH VÝPARU K VYBRANÝM METEOROLOGICKÝM VELIČINÁM

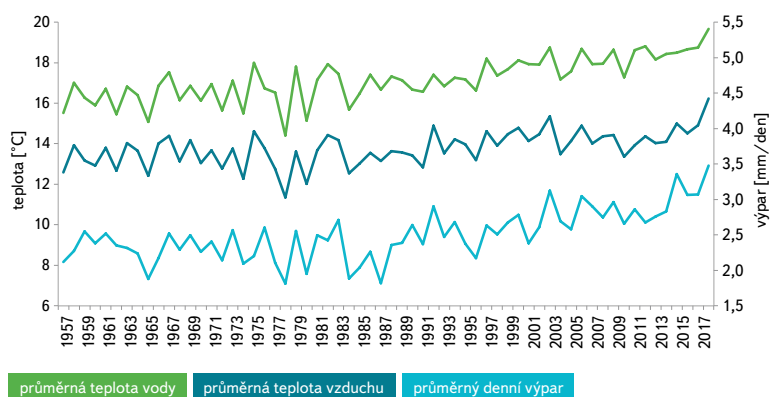
Spolu s průběhem výparu v čase byl zpracován i průběh teploty vzduchu a teploty hladiny vody ve výparoměru, viz *obr. 2*.

Z *obr. 2* a *3* je patrná vzájemná korelace mezi hodnotou výparu a teplotou vzduchu (korelační koeficient $r = 0,854$), závislost nejlépe vystihuje mocninná funkce s koeficientem determinace $R^2 = 0,752$.

Závislost výparu na teplotě vody nejlépe vystihuje exponenciální funkce na *obr. 4* s $R^2 = 0,819$ a $r = 0,886$.

Výpar z vodní hladiny nejvíce koreluje s globální sluneční radiací ($r = 0,914$) a jejich vztah nejlépe vystihuje mocninná funkce ($R^2 = 0,884$), viz *obr. 5*.

Výpar s relativní vlhkostí vzduchu vykazuje závislost nepřímo úměrnou ($r = -0,644$). Tuto závislost nejlépe vystihuje lineární funkce ($R^2 = 0,411$) viz *obr. 6*.



Obr. 2. Průběh průměrné denní hodnoty výparu, průměrné teploty vzduchu a vody ve stanici Hlasivo (květen–říjen)

Fig. 2. Average daily evaporation, average air and water temperature in Hlasivo station (May–October)

METODIKA ODVOZOVÁNÍ VZORCŮ

Vzhledem k tomu, že některé veličiny nebyly měřeny od začátku pozorování (vítr, globální sluneční radiace), byly zvoleny dva časové úseky (1957–2018 a 2006–2018), ze kterých byly vzorce odvozovány. Nejprve byly určeny párové závislosti průměrného denního výparu z vodní hladiny (v měsíčním kroku) na jednotlivých meteorologických veličinách. Regresní analýzou byla určena rovnice. Pomocí takto získaných rovnic byl vypočítán výpar.

Následně byly spočteny odchylky (rezidua) vypočítaného výparu od pozorovaného (naměřeného). V následujícím kroku byla regresí vyjádřena závislost vypočítaných rezidií na další meteorologické veličině. Kombinací dvou regresních vztahů došlo k vytvoření nového vzorce pro výpočet výparu, do kterého vstupují dvě meteorologické veličiny. Tento vzorec byl následně rozšířen o další veličinu, a to stejným způsobem. Z vypočítaného výparu byla spočtena rezidua od výparu pozorovaného. Na základě závislosti další meteorologické veličiny s těmito rezidui byl zkombinován nový vzorec.

Výše popsaným postupem byly vytvořeny desítky vzorců z datové řady Hlasivo 2006–2018, které kombinují veličiny: globální sluneční radiace, teplota vzduchu a vody, relativní vlhkost vzduchu a rychlost větru. Dále bylo vytvořeno několik vzorců z nejdelší možné datové řady, které kombinují teplotu vody a vzduchu (1957–2018) a relativní vlhkost vzduchu (1965–2018).

Vhodnost vzorců byla hodnocena na základě průměrné relativní chyby (MRE) a hodnoty Kling-Gupta účinnosti (KGE) [11]. Závislosti výparu na datech z let 1957–2018 vykazují vyšší MRE a nižší KGE, jsou ovšem platné pro širší rozsah hodnot. Na základě nejvyšších hodnot KGE a nejnižších hodnot MRE v jednotlivých datových řadách byl zúžen výběr vzorců na 16, viz *tabulka 1*.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Tabulka 1 uvádí výběr vzorců pro výpočet výparu z vodní hladiny. První sloupec značí datovou řadu, ze které daný vzorec vznikl. V případě, že byl vzorec z delší datové řady kombinován s relativní vlhkostí vzduchu, je výpočet aplikován pouze na data od roku 1965.

Nejllepší shody vypočteného a měřeného výparu na základě KGE je dosaženo při použití odvozených vztahů se zastoupením měřených meteorologických veličin: teplota vody, relativní vlhkost vzduchu a rychlost větru (vzorec E5, MRE = 12,31 %, KGE = 0,937). Nejnižší hodnotu MRE vykazuje vzorec E2, do kterého vstupují veličiny: globální sluneční radiace a teplota vzduchu (MRE = 11,08 %, KGE = 0,892). V obou případech se jedná o vzorce vzniklé z datové řady Hlasivo 2006–2018.

Výpočet výparu na základě vzorců vzniklých z delší datové sady odpovídá nejlépe při použití vzorce E15, který kombinuje teplotu vody a relativní vlhkost vzduchu (MRE = 13,24 %, KGE = 0,907) a vzorce E14, kombinující teplotu vody, relativní vlhkost vzduchu a teplotu vzduchu (MRE = 13,20 %, KGE = 0,857). Průběh výparu vypočteného podle vybraných vzorců je znázorněn na *obr. 7*.

Validace vzorců

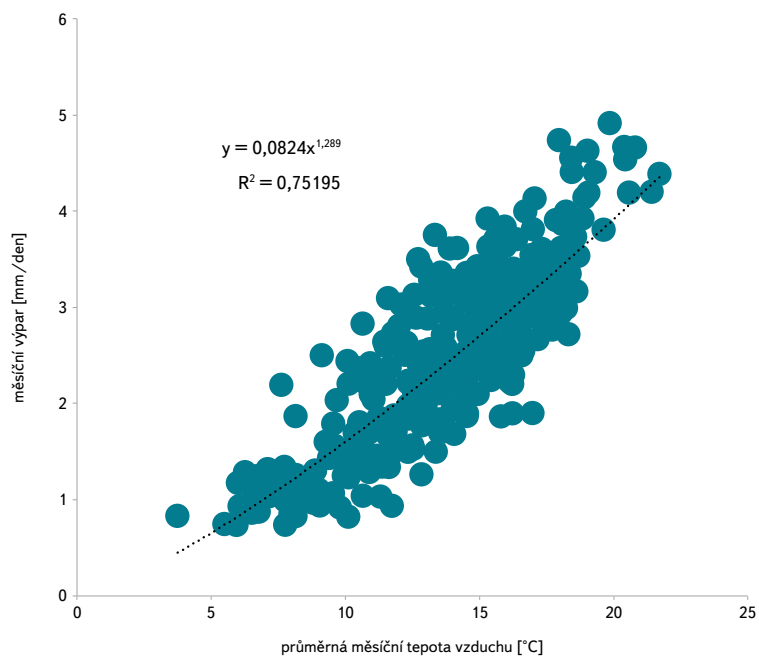
Všechny vytvořené vzorce byly validovány na datové řadě Hlasivo 1999–2005. K dispozici byly všechny veličiny, které vstupují do odvozených vzorců. U globální sluneční radiace není datová řada kontinuální. Jedná se o sezonu 1999 a poté 2001–2005. Výsledky testování jsou uvedeny v *tabulce 1*, sloupec „1999–2005“. Průběh naměřeného a vypočteného výparu je zobrazen na *obr. 8*. Maximální a minimální hodnoty veličin uvádí *tabulka 2*.

Z výsledků vyplývá, že nejlepší shody vypočteného a naměřeného výparu na základě nejnižší hodnoty MRE je dosaženo při použití vzorce založeného na lineárním vztahu s globální sluneční radiací a teplotou vody (vzorec E3, MRE = 10,38 %, KGE = 0,905). Z hodnocení na základě KGE vyplývá, že nejlepší vzorec k výpočtu výparu je vztah založený na kombinaci teploty vody, relativní vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu (vzorec E14, MRE = 11,51 %, KGE = 0,933).

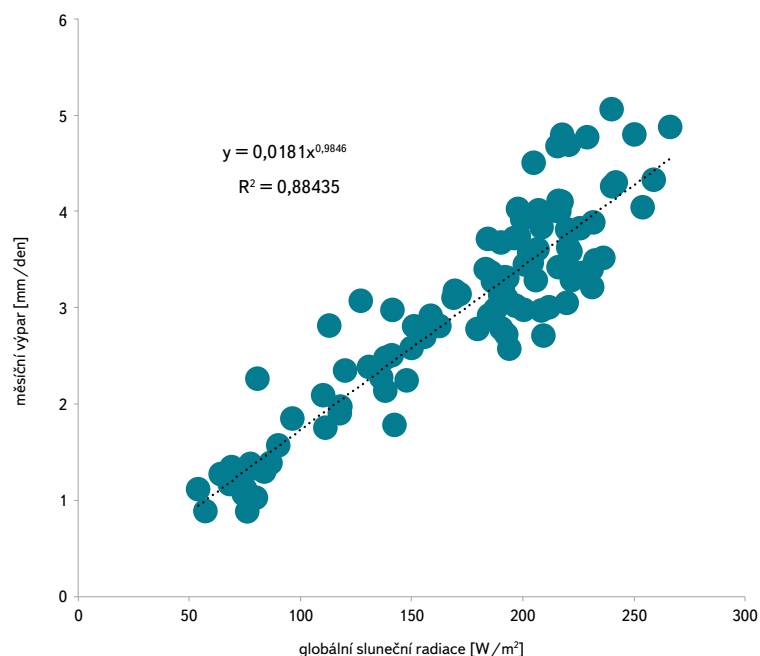
Obecně lze říci, že z hodnocení na základě KGE se jako významná veličina vstupující do výpočtu výparu prokázala teplota hladiny vody. Přičemž, je vhodné využívat vzorců z delší datové řady, jelikož jsou robustnější a mají širší rozsah platnosti, viz *tabulka 2*. Hodnota KGE u vzorců vycházejících z teploty vody se pohybuje mezi 0,85–0,93.

Z hodnocení na základě MRE se jako nejvýznamnější veličina vstupující do vzorců prokázala globální sluneční radiace. U takovýchto vzorců se MRE pohybuje mezi 10,4–12,7 %. Vzorce využívající k výpočtu globální sluneční radiaci jsou k dispozici pouze z datové řady 2006–2018.

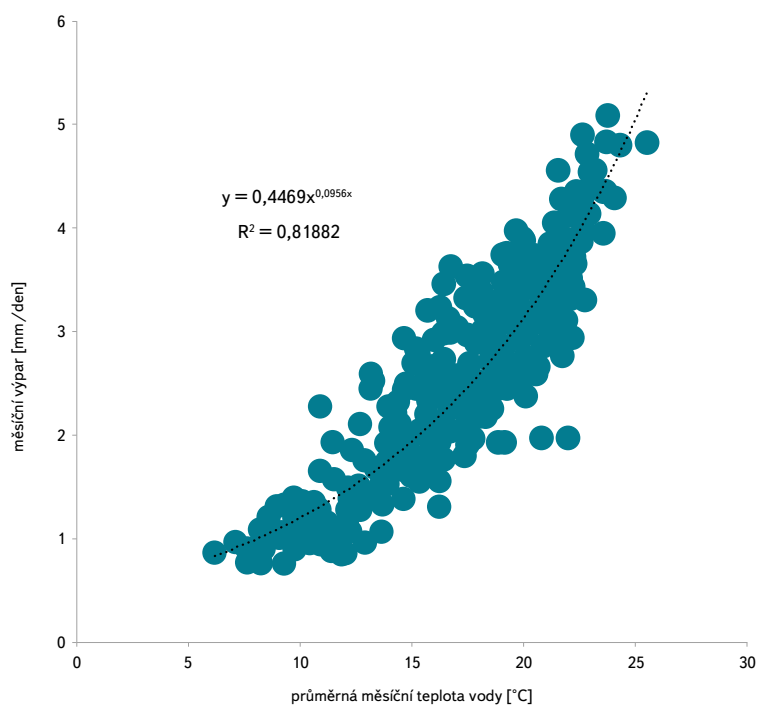
Všechny vzorce byly také aplikovány na datové řadě ze zrušené výparoměrné stanice Tišice u Neratovic, 163 m n. m. (1957–1974). V Tišicích byla rychlost větru ve 2 m měřena od roku 1959 a globální sluneční radiace zde nebyla měřena vůbec. Pro srovnání vypočteného výparu s naměřeným byly použity hodnoty ze srovnávacího výparoměru o stejné ploše jako v Hlasivu. Sezona



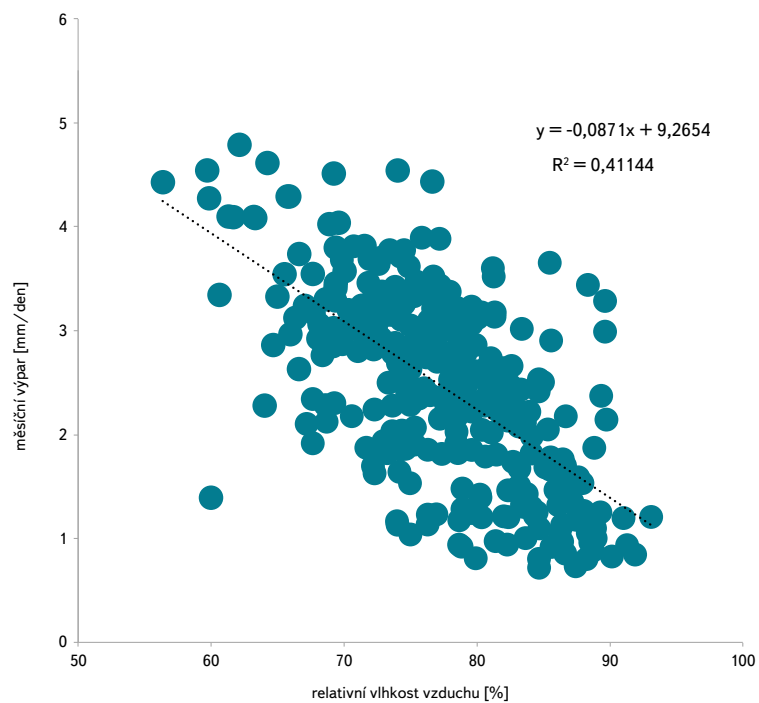
Obr. 3. Vztah mezi průměrnou měsíční teplotou vzduchu a výparem od roku 1957–2018
Fig. 3. Relationship between average monthly air temperature and evaporation from 1957–2018



Obr. 5. Závislost výparu z vodní hladiny na globální sluneční radiaci (1999–2018)
Fig. 5. The dependence of evaporation from water surface on global solar radiation (1999–2018)



Obr. 4. Vztah mezi průměrnou měsíční teplotou vody ve výparoměru a výparem od roku 1957–2018
Fig. 4. Relationship between average monthly water temperature in evaporimeter and evaporation from 1957–2018



Obr. 6. Vztah mezi průměrnou relativní vlhkostí vzduchu a výparem od roku 1965–2018
Fig. 6. Relationship between average relative air humidity and evaporation from 1965–2018

pro měření výparu v Tišicích byla od dubna do října. Výpar byl počítán pouze pro rozsah hodnot platný pro rovnice odvozené z Hlasiva v období 1957–2018. Při ponechání minimálních hodnot se projevilo rozsah platnosti vzorců, proto některé výpočty udávaly nereálné hodnoty.

Výsledky testování jsou uvedeny v *tabulce 1*, sloupec „Tišice“. Průběh výparu je zobrazen na *obr. 9*. Nejlepší shody vypočteného a naměřeného výparu na základě hodnoty MRE je dosaženo při použití vzorce E6, založeného na vztahu s teplotou vody a rychlostí větru (MRE = 18,8 %, KGE = 0,755). Z hodnocení na

Tabulka 1. Výběr vzorců pro výpočet výparu a jejich hodnocení na základě MRE a KGE
Table 1. The formulas for calculating evapotration and their evaluation based on MRE and KGE

| Datová sada | Zn. | Veličiny | Vzorec | 57 (65)–18 | | 2006–2018 | | 1999–2005 | | Tišice | |
|-------------|------------|-----------|--|------------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | MRE | KGE | MRE | KGE | MRE | KGE | MRE | KGE |
| 06–18 | E1 | R | $0,0157 \cdot R^{1,0148}$ | | | 0,12 | 0,89 | 0,10 | 0,89 | | |
| 06–18 | E2 | R Tvzd | $0,0169 \cdot R + 0,0369 \cdot Tvzd - 0,002 \cdot R - 0,1536$ | | | 0,11 | 0,89 | 0,11 | 0,90 | | |
| 06–18 | E3 | R Tv | $0,0157 \cdot R^{1,0148} + 0,0209 \cdot Tv - 0,0017 \cdot R - 0,069$ | | | 0,11 | 0,89 | 0,10 | 0,90 | | |
| 06–18 | E4 | Tv | $0,032 \cdot Tv^{1,5401}$ | 0,16 | 0,88 | 0,14 | 0,88 | 0,15 | 0,89 | 0,33 | 0,60 |
| 06–18 | E5 | Tv H V | $0,032 \cdot (Tv^{1,5401}) - 1,763 \cdot \ln(H) + 0,611 \cdot V - 1,3498$ | | | 0,12 | 0,94 | 0,12 | 0,93 | 0,24 | 0,67 |
| 06–18 | E6 | Tv V | $0,4834 \cdot \exp(0,0936 \cdot Tv) + 0,7129 \cdot V - 1,0594$ | | | 0,14 | 0,89 | 0,14 | 0,82 | 0,19 | 0,76 |
| 06–18 | E7 | Tv V H | $0,4834 \cdot \exp(0,0936 \cdot Tv) + 0,7129 \cdot V - 1,9686 \cdot H + 0,4706$ | | | 0,13 | 0,92 | 0,12 | 0,92 | 0,21 | 0,70 |
| 57–18 | E8 | Tvzd | $0,0824 \cdot Tvzd^{1,289}$ | 0,17 | 0,78 | 0,17 | 0,73 | 0,17 | 0,81 | 0,28 | 0,76 |
| 57–18 | E9 | Tvzd | $0,5267 \cdot \exp(0,1073 \cdot Tvzd)$ | 0,16 | 0,83 | 0,17 | 0,82 | 0,17 | 0,84 | 0,30 | 0,65 |
| 57–18 | E10 | Tv | $0,0407 \cdot Tv^{1,4366}$ | 0,14 | 0,82 | 0,15 | 0,78 | 0,14 | 0,85 | 0,27 | 0,75 |
| 57–18 | E11 | Tv | $0,4469 \cdot \exp(0,0956 \cdot Tv)$ | 0,14 | 0,87 | 0,14 | 0,88 | 0,14 | 0,89 | 0,29 | 0,63 |
| 57–18 | E12 | Tv Tvzd | $0,4469 \cdot \exp(0,0956 \cdot Tv) - 0,0112 \cdot Tvzd + 0,1869$ | 0,15 | 0,85 | 0,15 | 0,86 | 0,13 | 0,88 | 0,30 | 0,66 |
| 57 (65)–18 | E13 | Tv H | $0,0407 \cdot Tv^{1,4366} - 2,4396 \cdot H + 1,9261$ | 0,14 | 0,90 | 0,12 | 0,89 | 0,13 | 0,91 | 0,28 | 0,68 |
| 57 (65)–18 | E14 | Tv H Tvzd | $0,0407 \cdot Tv^{1,4366} - 1,893 \cdot \ln(H) - 0,239 \cdot \ln(Tvzd) + 0,1645$ | 0,13 | 0,86 | 0,12 | 0,85 | 0,12 | 0,93 | 0,29 | 0,73 |
| 57 (65)–18 | E15 | Tv H | $0,4469 \cdot \exp(0,0956 \cdot Tv) - 1,8338 \cdot H + 1,4425$ | 0,13 | 0,91 | 0,13 | 0,89 | 0,13 | 0,86 | 0,29 | 0,58 |
| 57 (65)–18 | E16 | Tvzd H | $0,0824 \cdot Tvzd^{1,289} - 2,3265 \cdot H + 1,8627$ | 0,16 | 0,86 | 0,15 | 0,84 | 0,16 | 0,88 | 0,31 | 0,70 |

Vysvětlivky:

E = výpar [mm/den], R = průměrná denní radiace [W/m^2], Tv = teplota vody [$^{\circ}C$], $Tvzd$ = teplota vzduchu [$^{\circ}C$], H = relativní vlhkost vzduchu [%/100], V = vítr [m/s]

Explanatory notes:

E = evaporation [mm/den], R = average daily radiation [W/m^2], Tv = water temperature [$^{\circ}C$], $Tvzd$ = air temperature [$^{\circ}C$], H = relative air humidity [%/100], V = air velocity [m/s]

Tabulka 2. Maximální a minimální hodnoty veličin naměřené ve stanici Hlasivo (měsíční průměry)
Table 2. Maximum and minimum values, measured in the Hlasivo station (monthly averages)

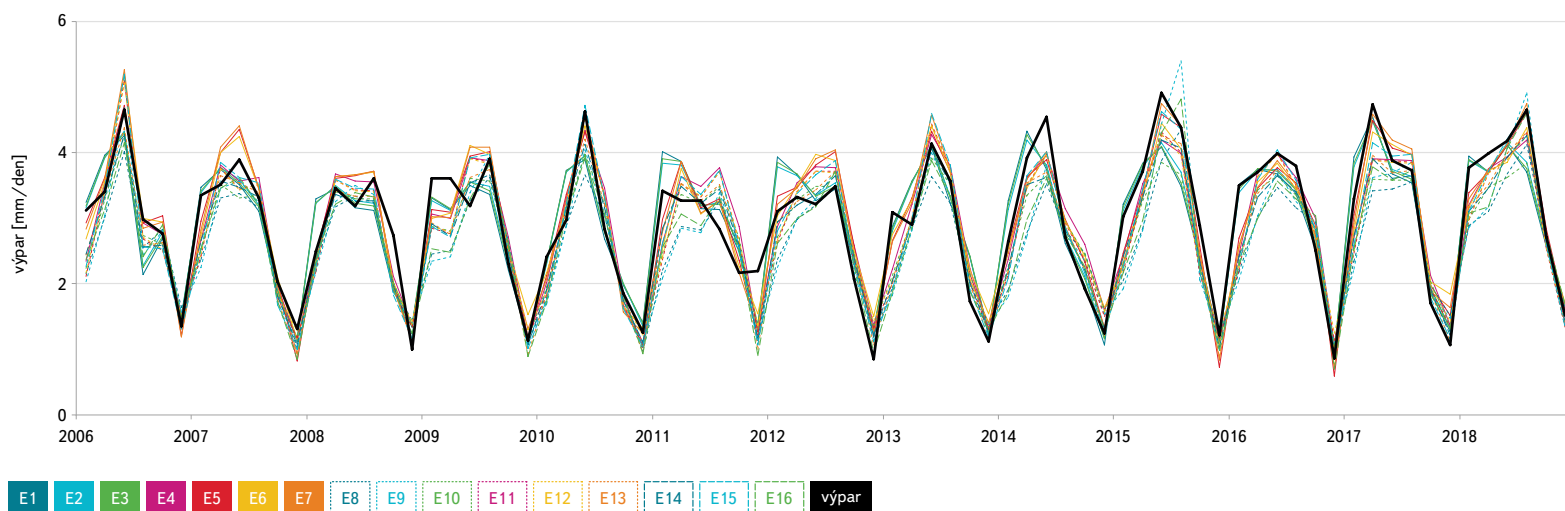
| | E min./max. [mm/den] | | R min./max. [W/m^2] | | Tv min./max. [$^{\circ}C$] | | Tvzd min./max. [$^{\circ}C$] | | H min./max. [%/100] | | V min./max. [m/s] | |
|----------------------|-------------------------|------|----------------------------|-------|---------------------------------|------|-----------------------------------|------|------------------------|------|----------------------|-----|
| Hlasivo 57–18 | 0,73 | 4,91 | - | - | 6,2 | 25,5 | 3,7 | 21,7 | 0,56 | 0,93 | - | - |
| Hlasivo 06–18 | 0,85 | 4,91 | 57,1 | 266,5 | 9,5 | 25,5 | 6,8 | 21,7 | 0,60 | 0,93 | 0,7 | 2,4 |
| Hlasivo 99–05 | 1,03 | 4,54 | 54,0 | 266,5 | 8,6 | 23,7 | 6,2 | 20,5 | 0,56 | 0,89 | 0,8 | 2,0 |

Vysvětlivky:

E = výpar, R = globální radiace, Tv = teplota vody, $Tvzd$ = teplota vzduchu, H = relativní vlhkost vzduchu, V = rychlost větru

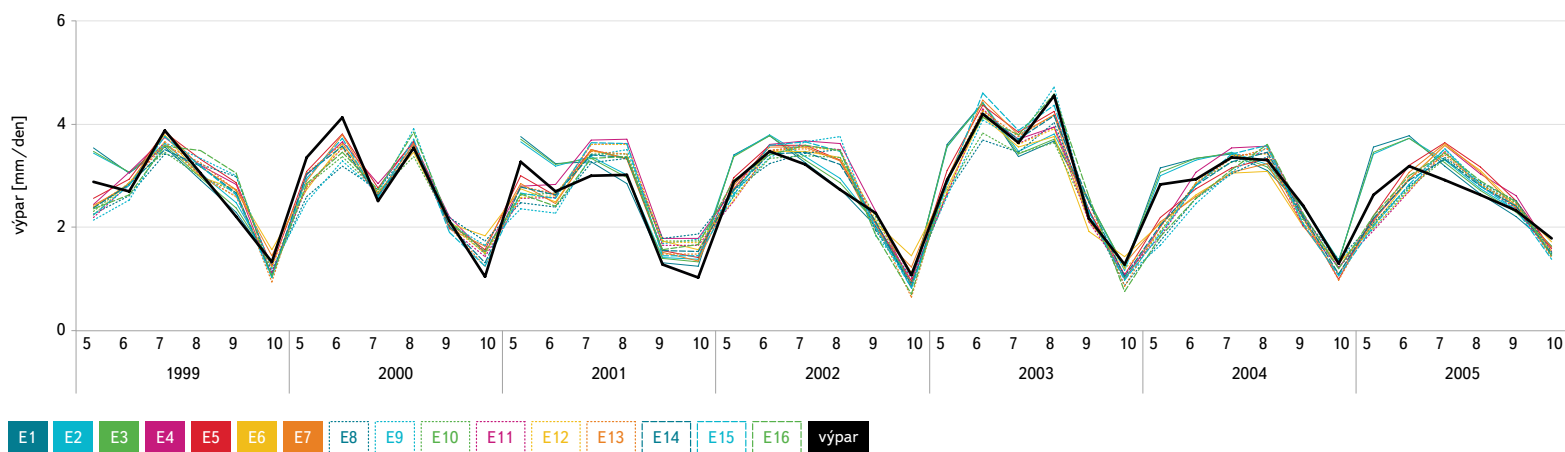
Explanatory notes:

E = evaporation, R = global solar radiation, Tv = water temperature, $Tvzd$ = air temperature, H = relative air humidity, V = air velocity



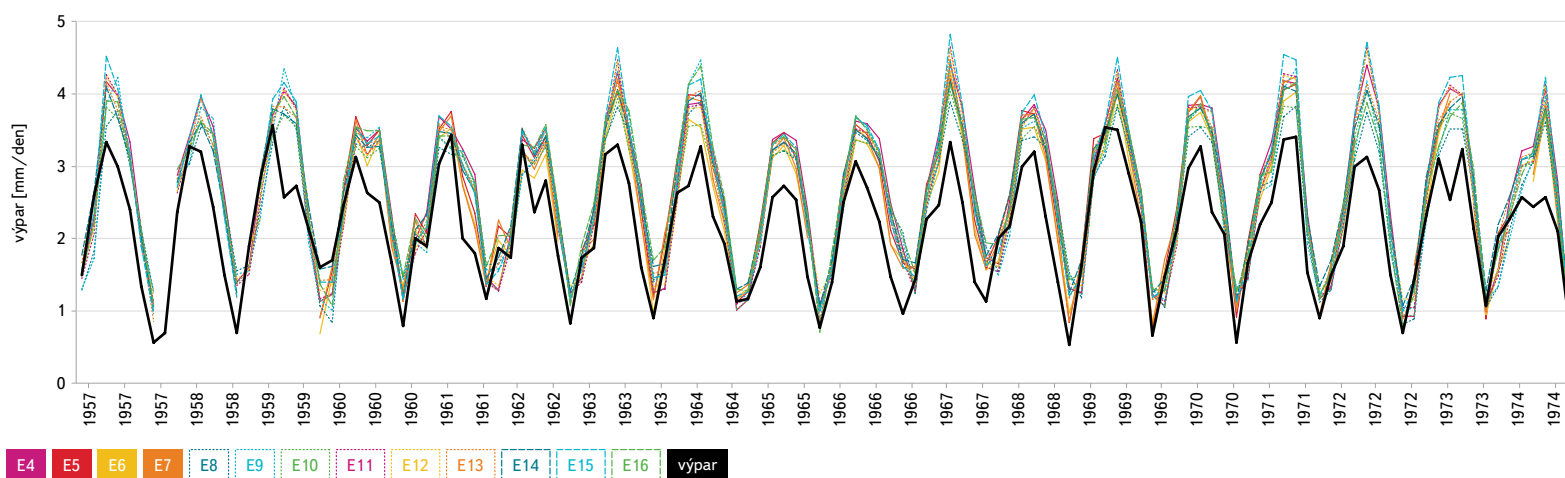
Obr. 7. Průběh naměřeného (černá barva) a vypočteného výparu pro roky 2006–2018

Fig. 7. Measured (black color) and calculated evaporation for years 2006–2018



Obr. 8. Průběh naměřeného výparu (černá barva) a vypočteného výparu pro roky 1999–2005

Fig. 8. Measured evaporation (black color) and calculated evaporation for years 1999–2005



Obr. 9. Průběh naměřeného výparu (černá barva) a vypočteného výparu pro stanici Tišice

Fig. 9. Measured evaporation (black color) and calculated evaporation for Tišice station



základě KGE vyplývá, že nejlepší vzorec k výpočtu výparu je vztah založený na jednoduché párové regresi s teplotou vzduchu (vzorec E8, MRE = 28,2 %, KGE = 0,756).

Obecně lze výsledky interpretovat tak, že rychlost větru je významnou veličinou, která zpřesňuje výpočet výparu. Při absenci měření rychlosti větru je vždy lepší použít vzorce vzniklé z delší datové řady, jelikož vykazují vyšší shodu na základě KGE. Dále bylo prokázáno, že jednoduchá párová regrese s teplotou vzduchu, nebo vody je pro výpočet výparu pro stanici Tišice přesnější, než vícenásobné regrese kombinující relativní vlhkost vzduchu.

ZÁVĚR

Všechny regresní vztahy pro výpočet výparu byly odvozeny na základě dat měřených pouze od května do října. Obor platnosti těchto vztahů je definován rozsahem hodnot uvedených v *tabulce 2*. Vytvořené vzorce byly validovány na datové řadě Hlasivo 1999–2005 a ověřené na datech ze stanice Tišice 1957–1974.

Pro výpočet výparu ve stanici Hlasivo jsou stěžejní vzorce, které obsahují globální sluneční radiaci, jež vykazují nejnižší MRE, konkrétně vzorec E3. Další stěžejní veličinou je teplota hladiny vody ve výparoměru, především v kombinaci s dalšími meteorologickými veličinami, které daný výpočet zpřesňují. Velmi dobře vychází vícenásobná regrese teploty hladiny vody s relativní vlhkostí vzduchu a teplotou vzduchu (vzorec E14), popř. teplota hladiny vody s relativní vlhkostí vzduchu a rychlostí větru (vzorec E5).

Pro výpočet výparu pro stanici Tišice je vhodné využít vzorce z delší datové sady, zakládající se na jednoduché párové regresi s teplotou vody (vzorec E10), anebo vzduchu (vzorec E8), popř. vzorce kombinující teplotu vody a rychlost větru (vzorec E6). Vhodnost využití globální sluneční radiace nebylo možné testovat.

Volba vzorců pro výpočet výparu závisí na dostupnosti jednotlivých meteorologických veličin, přičemž je nutné ověřit i rozsah platnosti jednotlivých vzorců.

Pro zpřesnění výpočtů je nutné vzorce validovat na více datových sadách z různých lokalit. Následně vytvořit sady vzorců, které budou využitelné pro lokality s podobnými geografickými charakteristikami. Dá se předpokládat, že vzorce ověřené na stanici Tišice jsou již nyní použitelné pro jiné lokality, avšak uživatel musí počítat s chybou 20–30 %.

V současné době je řešen projekt TJ01000196 Vytvoření softwaru pro výpočet výparu z vodní hladiny pro podmínky ČR, jež má za cíl vytvořit vztahy pro výpočet výparu z vodní hladiny platné na celé území ČR. Řešení bude vycházet z pozorování výparu ve stanici Hlasivo a vybraných výparoměrných stanic ČHMÚ.

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu *Technologické agentury ČR TJ01000196 Vytvoření softwaru pro výpočet výparu z vodní hladiny pro podmínky ČR v rámci programu Zéta*.

Literatura

- [1] SZEICZ, G. and LONG, I.F. *Surface resistance of crop canopies*. 1969. p. 122.
- [2] ČSN 75 2405. *Vodohospodářská řešení vodních nádrží*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [3] ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., REAS, D., and SMITH M. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998. ISBN 92-5-104219-5.
- [4] BERAN, A. a VIZINA, A. Odvození regresních vztahů pro výpočet výparu z volné hladiny a identifikace trendů ve vývoji měřených veličin ve výparoměrné stanici Hlasivo. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2013, 55, č. 4.
- [5] MOŽNÝ, M. Automatizace měření výparu z volné vodní hladiny. *Meteorologické zprávy*, 2003, 56, 5, s. 150–155.
- [6] BYCZKOWSKI, A. *Hydrologiczne podstawy projektowy wodnomelioracyjnych przepływ charakterystyczne*. Państwowe Wydawnictwo Rolnictwa i Leśnictwa, 1979. 401 s. ISBN 83-09-00035-9.
- [7] GASH, J.H.C. and SHUTTLEWORTH, W.J. *Evaporation*. Wallingford: IAHS Press, 2007. 521 s. ISBN 978-1-901502-98-5.
- [8] PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. A.*, 1948, 193, p. 120–145.
- [9] BUDÍK, L. a kol. *Odvození základních hydrologických údajů za referenční období 1981–2000*. Praha: ČHMÚ, 2015. 35 s.
- [10] MRKVIČKOVÁ, M. Vyhodnocení měření na výparoměrné stanici Hlasivo. *VTEI*, 49/II, příloha Vodního hospodářství, 2007, č. 6, s. 9–11. ISSN 0322-8916.
- [11] GUPTA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K., and MARTINEZ, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 2009, vol. 377, No. 1–2, p. 80–91.

Autoři

Mgr. Petra Šuhájková^{1,2}

✉ petra.suhajkova@vuv.cz

Ing. Roman Kožín^{1,2}

✉ roman.kozin@vuv.cz

Ing. Adam Beran, Ph.D.^{1,2}

✉ adam.beran@vuv.cz

Ing. Eva Melišová²

✉ melisovae@fzp.czu.cz

Ing. Adam Vizina, Ph.D.^{1,2}

✉ adam.vizina@vuv.cz

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.^{1,2}

✉ martin.hanel@vuv.cz

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

²Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze

Príspevek prošel lektorským řízením.

UPDATE OF EMPIRICAL RELATIONSHIPS FOR CALCULATION OF FREE WATER SURFACE EVAPORATION BASED ON OBSERVATION AT HLASIVO STATION

**SUHAJKOVA, P.^{1,2}; KOZIN, R.^{1,2}; BERAN, A.^{1,2};
MELISOVA, E.²; VIZINA, A.^{1,2}; HANEL, M.^{1,2}**

¹TGM Water Research Institute, p.r.i.

²Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague

Keywords: evaporation – evaporation pan – evaporation station Hlasivo – evaporation station Tišice – regression analysis

Evaporation from free water surface is one of the essential components of water circulation in nature and significantly affects the overall water balance of the catchment. Due to the complicated direct measurement, it is often calculated from formulas that require available meteorological variables as input data.

The paper describes the method to obtain empirical relations for the estimation of evaporation as functions of available meteorological data in the Hlasivo station. Multiple linear and non-linear regression technique is used for fitting the best model forms. The best results were obtained using the formula based on global solar radiation and water temperature and the formula based on the combination of water temperature, relative air humidity and air temperature (or wind speed).

The formulas were evaluated by mean relative error (MRE) and Kling-Gupta efficiency (KGE). The formulas were validated on a historical data set from the canceled Tišice evaporation station. The results show that it is preferable to use formulas based on simple paired regression with one meteorological variable (water temperature or air temperature) to calculate the evaporation for another site, as opposed to equations obtained by multiple regression. When using empirical formulas, it is always necessary to verify their validity.