

Výpar z výparoměrných stanic VÚV TGM

PETRA ŠUHÁJKOVÁ

Klíčová slova: výpar z vodní hladiny — výparoměrná stanice — plovoucí výparoměr — srovnávací výparoměr — výpočet výparu

SOUHRN

Výpar z vodní hladiny významně ovlivňuje celkovou hydrologickou bilanci povodí. Přímé měření výparu je komplikované a není tak běžné jako měření jiných veličin (např. srážek nebo teploty vzduchu). Z tohoto důvodu je výpar často zjišťován ze vzorců, které jako vstupní data vyžadují dostupné měřené meteorologické veličiny.

V příspěvku jsou popsána data z plovoucích a bazénových výparoměrů, jejichž provozovatelem je VÚV TGM. Naměřené hodnoty výparu a meteorologických veličin jsou porovnány mezi jednotlivými lokalitami. Dále jsou uvedeny odvozené vzorce pro výpočet výparu z výparoměrné stanice Hlasivo a jejich aplikace na vybrané lokality. Hodnocení vzorců je provedeno na základě nejnižší hodnoty průměrné relativní chyby (MRE).

Z výsledků vyplývá, že vzorce odvozené ze stanice Hlasivo jsou vhodné pro výpočet výparu i na jiných lokalitách. Vypočtený výpar koresponduje s naměřeným denním chodem výparu. Pro výpočet výparu s nižší chybou výpočtu je však vhodné používat průměrná měsíční data a počítat výpar v delším časovém horizontu.

ÚVOD

Výpar z vodní hladiny je důležitým členem hydrologické bilance vodních nádrží, zvláště pak v období sucha. V posledních letech je význam výparu umocňován dopady klimatických změn, zejména zvyšováním průměrné teploty vzduchu, jež má za následek zvyšování územního výparu, včetně výparu z vodních ploch. Zvýšený úbytek vody výparem však není kompenzován srážkami. V dlouhodobém horizontu se navíc výrazné průměrné roční změny ve srážkových úhrnech nepředpokládají [1].

Přímé monitorování výparu z vodní hladiny není běžné a výparoměrné stanice jsou náročné na údržbu a obsluhu. Z tohoto důvodu je výpar často určován z matematických vzorců, do kterých vstupují jiné měřitelné veličiny [2]. Závislost výparu na meteorologických veličinách je popsána mnoha autory [3–5]. Vzorce pro výpočet výparu však často obsahují vstupní veličiny, které se běžně neměří na základních meteorologických stanicích a musí být dále odvozeny, např. tlak nasycené vodní páry nebo latentní tok tepla [6, 7]. Z tohoto důvodu byly ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka odvozeny nové vzorce pro výpočet výparu, do nichž vstupují veličiny, které jsou běžně měřitelné na meteorologických stanicích (např. teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, rychlost větru atp.) [8]. Tyto vzorce byly v rámci výzkumu VÚV TGM dále zpřesňovány [9].

Evaporation from TGM WRI evaporimeter stations

PETRA ŠUHÁJKOVÁ

Keywords: evaporation from water surface — evaporimeter station — floating evaporimeter — comparative evaporimeter — calculation of evaporation

ABSTRACT

Evaporation from water surface significantly affects the overall hydrological balance of a river basin. Direct measurement of evaporation is complicated and not as common as the measurement of other quantities (e.g. precipitation or air temperature). Therefore, evaporation is often determined using formulas requiring available meteorological quantities as input data.

This paper describes data from floating and tank evaporimeters operated by TGM WRI. Measured values of evaporation and meteorological quantities are compared among the individual sites. Additionally, the derived formulas for the calculation of evaporation from the Hlasivo evaporimeter station and their application to selected sites are provided. The evaluation of the formulas is performed based on the lowest value of the mean relative error (MRE).

The results indicate that the formulas derived from the Hlasivo station are suitable for the calculation of evaporation on the other sites as well. The calculated evaporation corresponds to the measured daily course of evaporation. However, to calculate the evaporation with a lower calculation error, it is suitable to use the average monthly data and calculate the evaporation over a longer period.

INTRODUCTION

Evaporation from the water surface is an important member of the hydrological balance of water reservoirs, especially in times of drought. In recent years, the importance of evaporation has been exacerbated by the effects of climate change, in particular by the increasing average air temperature resulting in an increase in regional evaporation, including evaporation from water bodies. However, the increased loss of water by evaporation is not compensated by precipitation. In addition, no significant changes in average annual precipitation totals are expected in the long run [1].

Direct monitoring of evaporation from water surface is not common and evaporimeter stations are difficult to maintain and operate. Therefore, evaporation is often determined from mathematical formulas into which other measurable quantities are entered [2]. The dependence of evaporation on meteorological quantities has been described by many authors [3–5]. However, formulas for the calculation of evaporation often contain input quantities that are not normally measured at basic meteorological stations and must be further derived, such as saturated water vapor pressure or latent heat flow [6, 7]. For this purpose, new formulas for the calculation of evaporation have been derived at the TGM Water Research Institute including quantities that are commonly measurable at meteorological stations (e.g. air temperature, relative humidity, wind speed, etc.) [8]. These formulas were further refined in the research of TGM WRI [9].

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka má ve správě dva plovcoucí výparoměry s meteorostanicemi. Jeden je umístěn na retenční nádrži Zaječice u Jirkova a druhý na Vavříneckém rybníce ve Středočeském kraji. Dále je VÚV TGM provozovatelem dvou výparoměrnych stanic, v Hlasivu u Tábora a v Praze v Podbabě (obr. 1).

Cílem výzkumu je porovnat jednotlivé lokality z hlediska naměřených meteorologických veličin a výparu. Dalším cílem je vypočítat výpar v zájmových lokalitách na základě vzorců, odvozených z dat z výparoměrnych stanic Hlasivo. Předpokládá se, že tyto vzorce jsou díky své robustnosti vhodné pro výpočet výparu i pro jiné lokality.

The TGM Water Research Institute is in administration of two floating evaporimeters with weather stations. One is located on the Zaječice retention reservoir near Jirkov and the other on the Vavřínecký pond in the Central Bohemian Region. Furthermore, TGM WRI is the operator of two evaporimeter stations, in Hlasivo near Tábor and in Prague in Podbaba (Fig. 1).

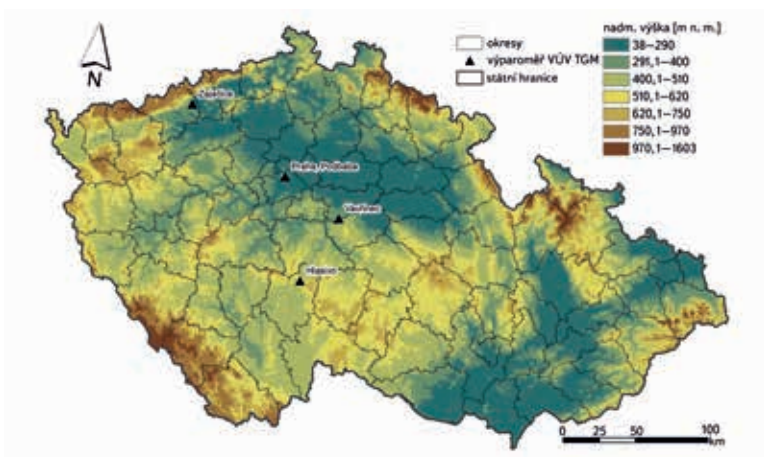
The objective of the research is to compare the individual sites in terms of measured meteorological quantities and evaporation. The other objective is to calculate the evaporation on the sites of interest on the basis of formulas derived from the data from the Hlasivo evaporimeter station. Due to their robustness, these formulas are assumed to be suitable for evaporation calculation for other sites as well.

Seznam zkratk

E	výpar z vodní hladiny [mm/den]
e	základ přirozeného logaritmu
H	relativní vlhkost vzduchu [%/100]
ln	přirozený logaritmus
KGE	Kling-Gupta efficiency
MRE	průměrná relativní chyba
R	globální sluneční radiace [W/m^2]
Ta	teplota vzduchu [$^{\circ}C$]
Tw	teplota hladiny vody [$^{\circ}C$]
V	rychlost větru [m/s]

List of abbreviations

E	evaporation from water surface [mm/day]
e	basis of natural logarithm
H	relative humidity [%/100]
ln	natural logarithm
KGE	Kling-Gupta efficiency
MRE	mean relative error
R	global solar radiation [W/m^2]
Ta	air temperature [$^{\circ}C$]
Tw	water table temperature [$^{\circ}C$]
V	wind speed [m/s]



Obr. 1. Mapa umístění výparoměrnych stanic ve správě VÚV TGM
Fig. 1. Location map of evaporimeter stations administered by TGM WRI

VÝPAROMĚRNÁ STANICE HLASIVO

Výparoměrňá stanice v Hlasivu u Tábora (N 49°29.88738', E 14°45.36117') leží v nadmořské výšce 537 m n. m. a je v provozu již od roku 1957. K letošnímu roku tak máme díky nepřetržitému fungování k dispozici 63letou datovou řadu. Jedná se nejen o hodnoty výparu z volné hladiny, ale i další meteorologické prvky, jež stanice zaznamenává.

Zařízení stanice prošlo mnohými změnami. Od roku 1998 jsou mnohé veličiny zaznamenávány automaticky. Doposud měřené veličiny jsou uvedeny v tabulce 1.

Výparoměrňá sezona trvá obvykle od dubna do října, kdy zpravidla nedochází k zamrznání vodní hladiny ve výparoměru. Díky mnohaletým zkušenostem měření výparu v Hlasivu se tato perioda přizpůsobila meteorologickým podmínkám v této lokalitě a doba měření výparu se omezila na měsíce květen až říjen.



Obr. 2. Výparoměrňá stanice Hlasivo
Fig. 2. Evaporimeter station Hlasivo

EVAPORIMETER STATION HLASIVO

The evaporimeter station in Hlasivo near Tábor (N 49° 29.88738', E 14° 45.36117') lies at an altitude of 537 m above sea level and has been in operation already since the year 1957. Owing to this continuous operation, we have available a 63-year data series. This represents not only the values of evaporation from the free water surface, but also other meteorological elements that the station records.

The equipment of the station has undergone many changes. Since 1998, many quantities have been recorded automatically. The quantities measured so far are provided in Table 1.

The evaporation metering season usually lasts from April to October, when the water table in the evaporimeter is usually not frozen. Thanks to the many years of experience in measuring of evaporation in Hlasivo, the measuring period has been adapted to the meteorological conditions on this site and the evaporation measuring period has been limited to the months of May to October.

Raritou této výparoměrné stanice je nejen délka provozu, ale také srovnávací výparoměrný bazén, který má plochu téměř 20 m² (viz obr. 2). Díky takto velké ploše se naměřená výparnost dá považovat za reálný výpar z vodní hladiny.

Tabulka 1. Seznam přístrojů a měřených veličin ve stanici Hlasivo

Měřené veličiny – přístroje	Počátek měření
Srovnávací výparoměr	1957
Výparoměr – GGI ISOL	1957
Výparoměr – GGI 3000	1957
Výparoměr – Class-A-Pann	1958
Teplota vody ve výparoměrech	1957
Teplota vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem země	1957
Teplota vzduchu – maximální, minimální a přízemní	1957
Teplota vzduchu ve výšce 2 m – automatická meteostanice	1998
Relativní vlhkost vzduchu – vlasový vlhkoměr	1965
Relativní vlhkost vzduchu – automatická meteostanice	1998
Teplota půdy v hloubce 5 cm	1992
Teplota půdy v hloubce 10 cm	1992
Teplota půdy v hloubce 20 cm	1992
Teplota půdy v hloubce 50 cm	1992
Rychlost a směr větru – automatická meteostanice	1999
Rychlost větru – odhad	1957
Úhrn a intenzita srážek	1957
Globální sluneční radiace	1998
Délka slunečního svitu	1957

VÝPAROMĚRNÁ STANICE PODBABA

V areálu pražské pobočky VÚV TGM byla vybudována meteorologická a výparoměrná stanice (N 50°7.08770', E 14°23.55303'), viz obr. 3. Od roku 2018 jsou v provozu tři výparoměrné bazény o průměru 2 m, v nadmořské výšce 191 m n. m. Od 11. 5. 2018 zde probíhá klasické sezonní měření výparu z vodní hladiny. Později začalo také sezonní měření výparu z hladiny vody s odlišným albedem (voda přirozeně zbarvená chlorofylem). Dále je zde celoročně měřen výpar z výparoměru, ve kterém je rozpuštěná sůl, jež tvoří nemrznoucí směs.

Ve stanici je dále měřena teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, globální sluneční radiace, směr a rychlost větru, srážky, teplota vody ve výparoměrech a teplota půdy.

The special feature of this evaporation metering station is not only the length of its operation, but also the comparative evaporation metering tank, which has an area of almost 20 m² (see Fig. 2). Owing to such a large area, the measured evaporation can be considered as real evaporation from the water surface.

Table 1. List of instruments and measured quantities at the Hlasivo station

Measured quantities – instruments	Start of measurement
Comparative evaporimeter	1957
Evaporimeter – GGI ISOL	1957
Evaporimeter – GGI 3000	1957
Evaporimeter – Class-A-Pann	1958
Water temperature in evaporimeters	1957
Air temperature at a height of 2 m above ground level	1957
Air temperature – maximum, minimum and at ground level	1957
Air temperature at 2 m – automatic weather station	1998
Relative humidity – hair hygrometer	1965
Relative humidity – automatic weather station	1998
Soil temperature at a depth of 5 cm	1992
Soil temperature at the depth of 10 cm	1992
Soil temperature at the depth of 20 cm	1992
Soil temperature at the depth of 50 cm	1992
Wind speed and direction – automatic weather station	1999
Wind speed – estimate	1957
Total and intensity of precipitation	1957
Global solar radiation	1998
Sunshine duration	1957

EVAPORIMETER STATION PODBABA

A meteorological and evaporimeter station (N 50° 7.08770', E 14° 23.55303') was built on the site of the TGM WRI Prague branch, see Fig. 3. Since 2018, there have been 3 evaporating tanks in operation with a diameter of 2 m, at an altitude of 191 m above sea level. Since May 11, 2018, a classic seasonal measurement of evaporation from the water surface is implemented here. Later, the seasonal measurement of evaporation from the water surface with a different albedo (water naturally colored by chlorophyll) was also initiated. Furthermore, the evaporation from an evaporimeter, in which salt constitutes an antifreeze admixture, is measured here during the entire year.

The station also measures air temperature, humidity, global solar radiation, wind direction and speed, precipitation, water temperature in evaporimeters and soil temperature.



Obr. 3. Výparoměrná stanice – Praha, Podbaba
Fig. 3. Evaporimeter station - Prague, Podbaba

VÝPAR Z VAVŘINECKÉHO RYBNÍKA

Na začátku července 2019 byl na Vavříneckém rybníce (N 49°54.87885', E 15°2.39373') nainstalován plovoucí výparoměr od firmy Fiedler (viz obr. 4). Vavřínecký rybník leží v nadmořské výšce 375 m n. m. Od 4. 7. 2019 jsou k dispozici desetiminutové záznamy přímého měření výparu z hladiny rybníka. Součástí výparoměru jsou čidla na měření teploty hladiny vody a teploty vody v hloubkách 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m a 2,5 m. Výparoměrná nádoba je stejných rozměrů jako u výparoměrů EWM a GGI (3 000 cm²).

Na plovoucím zařízení je také meteostanice, která zaznamenává teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, rosný bod, úhrn srážek, radiaci, rychlost a směr větru. V případě radiace se jedná o rozdíl mezi globální sluneční radiací a radiací odraženou z vodní hladiny. Výparoměrná sezona skončila na začátku října 2019. K dispozici je tedy datová řada tří měsíců. V roce 2020 probíhá měření od března.

VÝPAR Z RETENČNÍ NÁDRŽE ZAJEČICE

Na Zaječické nádrži byl totožný plovoucí výparoměr s meteostanicí (viz obr. 4) nainstalován v srpnu 2019 a byl v provozu až do listopadu 2019. Retenční nádrž



Obr. 4. Plovoucí výparoměr značky Fiedler
Fig. 4. Floating evaporimeter of the Fiedler brand

EVAPORATION FROM VAVŘINECKÝ POND

At the beginning of July 2019, a floating evaporimeter from the Fiedler company was installed on the Vavřínecký pond (N 49°54.87885', E 15°2.39373') (see Fig. 4). The Vavřínecký pond lies at an altitude of 375 m above sea level. From July 4, 2019, ten-minute records of direct evaporation measurement from the pond surface are available. The evaporimeter includes sensors for measuring the temperature at water table level and water temperature at the depths of 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, and 2.5 m. The evaporimeter vessel is of the same dimensions as the EWM and GGI evaporimeters (3,000 cm²).

The floating instrument assembly also includes a weather station recording air temperature, relative humidity, dew point, total precipitation, radiation, wind speed and direction. Regarding radiation, this is the difference between global solar radiation and radiation reflected from the water surface. The evaporating measurement period ended at the beginning of October 2019. A data series of 3 months is therefore available. In 2020, measurements have been taking place since March.

EVAPORATION FROM THE ZAJEČICE RETENTION RESERVOIR

An identical floating evaporimeter with a weather station (see Fig. 4) was installed on the Zaječice reservoir in August 2019 and was in operation until November 2019. The Zaječice retention reservoir (N 50° 9.53530', E13° 28.82097') is located near the village of Jirkov, in the Ústí nad Labem Region, at an altitude of 290 m above sea level. The measured quantities are the same as for the floating evaporimeter on the Vavřinec pond.

VALUES OF MONITORED QUANTITIES

Due to the fact that each evaporimeter station measures over a different time, the comparison of the measured quantities is very limited. The individual sites were therefore compared with the Hlasivo evaporimeter station, which has the longest observation history. The evaporation values are shown graphically on

Zaječice (N 50°29.53530', E 13°28.82097') se nachází u obce Jirkov, v Ústeckém kraji, v nadmořské výšce 290 m n. m. Měřené veličiny jsou stejné jako u plovoucího výparoměru na Vavřinci.

HODNOTY SLEDOVANÝCH VELIČIN

Vzhledem k tomu, že každá výparoměrná stanice měří jinak dlouhou dobu, je srovnání naměřených veličin velmi omezené. Jednotlivé lokality byly tedy srovnávány s výparoměrnou stanicí Hlasivo, která má nejdelší dobu pozorování. Hodnoty výparu jsou graficky znázorněny na obr. 5. Průměrná měsíční teplota vzduchu je zobrazena na obr. 6. Na obr. 7 je znázorněna průměrná měsíční teplota vody ve výparoměrech. Relativní vlhkost vzduchu je zobrazena na obr. 8 a obr. 9 představuje průměrnou měsíční rychlost větru.

VÝPAR

Výpar ve stanici Podbaba je pro sezony červen–říjen 2018 a květen–říjen 2019 nižší ($E = 2,59$ mm/den) než ve stanici Hlasivo ($E = 3,32$ mm/den), přestože zde byla vyšší teplota vzduchu i teplota vody ve výparoměru ($T_a = 17,6$ °C; $T_w = 20$ °C; $H = 69,8$ %) než ve stanici Hlasivo ($T_a = 15,69$ °C; $T_w = 19,32$ °C; $H = 68,4$ %). Celková suma výparu za pozorované období 2018 byla ve stanici Podbaba 436,8 mm a ve stanici Hlasivo 522,6 mm. Za sezonu 2019 činil výpar ve stanici Podbaba 443,6 mm a ve stanici Hlasivo 593,6 mm. Důvodem rozdílného výparu je výrazně nižší průměrná rychlost větru ($V = 0,63$ m/s) oproti stanici Hlasivo ($V = 1,34$ m/s).

Průměrný denní výpar z Vavříneckého rybníka za celou dobu pozorování (červenec–září 2019) činí 4,06 mm/den, což je v přepočtu 373,4 mm za pozorovanou sezonu. Pro stejné období je výpar ve stanici Hlasivo 3,65 mm/den, tedy 336,4 mm. Teplota vzduchu, teplota vody a relativní vlhkost vzduchu je ve vybraných lokalitách velmi podobná. Pro Vavřínecký rybník jsou průměrné hodnoty za období červenec–září: $T_a = 17,9$ °C; $T_w = 20,9$ °C; $H = 76,5$ %. Pro stejné období jsou hodnoty ve stanici Hlasivo: $T_a = 17,1$ °C; $T_w = 21,7$ °C; $H = 75,7$ %. Důvodem rozdílného výparu je pravděpodobně vyšší průměrná rychlost větru ve stanici Vavřinec ($V = 1,9$ m/s) oproti Hlasivu ($V = 1,3$ m/s). Největší rozdíl v naměřeném výparu a zároveň v rychlosti větru je v měsíci září.

Výpar ze Zaječické nádrže je velmi podobný výparu ve stanici Hlasivo. Za období srpen–říjen 2019 se jedná o průměrný denní výpar 2,49 mm/den, tedy 229 mm za pozorované tři měsíce. Ve stanici Hlasivo je pro stejné období průměrný denní výpar 2,4 mm/den, což odpovídá 221 mm. Tyto dvě lokality mají i podobné ostatní měřené veličiny. Průměrná teplota vzduchu je ve stanici Hlasivo 13,9 °C a v lokalitě Zaječice 14,9 °C. Průměrná teplota hladiny vody ve výparoměru je v Hlasivu 17,2 °C. Pro Zaječickou nádrž činí průměrná teplota hladiny vody 17,5 °C. Průměrná relativní vlhkost vzduchu byla ve stanici Hlasivo 82 % a v Zaječicích 80 %. Rychlost větru je ve stanici Hlasivo vyšší, činí 1,34 m/s, oproti Zaječicím, kde je průměrná rychlost větru pouze 0,77 m/s. Z analýzy denního chodu výparu a rychlosti větru u nádrže Zaječice je však zřejmé, že se v pozorovaném období vyskytovaly větrné dny (až 4,5 m/s), které významně ovlivnily intenzitu vypařování. V měsíčním kroku však nejsou tyto výkyvy v rychlosti větru zřejmé.

SRÁŽKY

Na obr. 10 je možné pozorovat měsíční úhrny srážek a sumy výparu v jednotlivých stanicích. Ve stanici Hlasivo spadlo za pozorované sezony 2018 a 2019 celkem 579,4 mm srážek. Oproti tomu činil výpar 1 116,2 mm, což je téměř dvojnásobek toho, co napršelo. Ve stanici Podbaba spadlo za pozorované sezony celkem 530,6 mm srážek.

Fig. 5. The average monthly air temperature is shown in Fig. 6. Figure 7 shows the average monthly water temperature in the evaporimeters. The relative humidity is shown on Fig. 8 and 9 represents the average monthly wind speed.

EVAPORATION

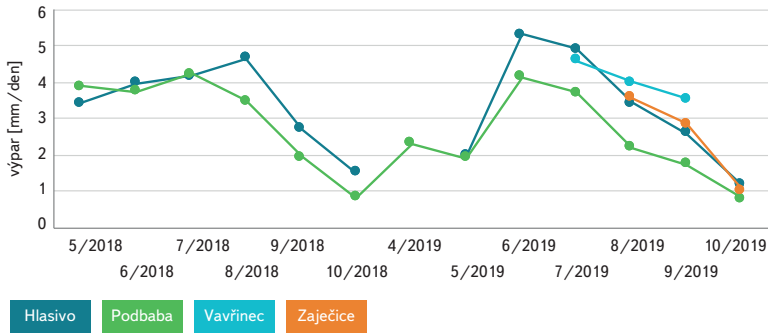
Evaporation at Podbaba station is lower ($E = 2.59$ mm/day) for the periods June–October 2018 and May–October 2019 than at the Hlasivo station ($E = 3.32$ mm/day), although there was higher air temperature and water temperature in the evaporimeter ($T_a = 17.6$ °C; $T_w = 20$ °C; $H = 69.8\%$) than at the Hlasivo station ($T_a = 15.69$ °C; $T_w = 19.32$ °C; $H = 68.4\%$). The total amount of evaporation for the observation period 2018 was 436.8 mm at the Podbaba station and 522.6 mm at the Hlasivo station. During the 2019 season, the evaporation at the Podbaba station was 443.6 mm and at the Hlasivo station 593.6 mm. The reason for the different evaporation is the significantly lower average wind speed ($V = 0.63$ m/s) compared to the Hlasivo station ($V = 1.34$ m/s).

The average daily evaporation from Vavřínecký pond for the entire observation period (July–September 2019) is 4.06 mm/day, which is 373.4 mm per observed season. For the same period, the evaporation at the Hlasivo station is 3.65 mm/day, i.e. 336.4 mm. Air temperature, water temperature and relative humidity are very similar over the selected sites. For Vavřínecký pond, the average values for the period July–September are: $T_a = 17.9$ °C; $T_w = 20.9$ °C; $H = 76.5\%$. For the same period, the values in the Hlasivo station are: $T_a = 17.1$ °C; $T_w = 21.7$ °C; $H = 75.7\%$. The reason for the different evaporation is probably the higher average wind speed at the Vavřinec station ($V = 1.9$ m/s) compared to Hlasivo ($V = 1.3$ m/s). The biggest difference in the measured evaporation and at the same time in the wind speed is in the month of September.

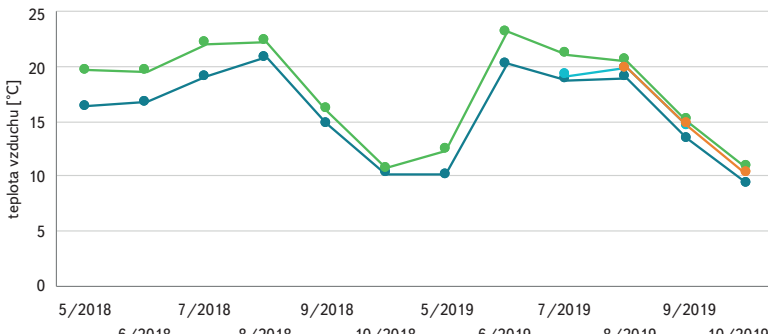
The evaporation from the Zaječice reservoir is very similar to the evaporation at the Hlasivo station. For the period August–October 2019, the average daily evaporation is 2.49 mm/day, i.e. 229 mm for the observed 3 months. In the Hlasivo station, the average daily evaporation for the same period is 2.4 mm/day, which corresponds to 221 mm. The other measured quantities on these two sites are similar. The average air temperature in the Hlasivo station is 13.9°C and at the Zaječice site 14.9°C. The average temperature of the water at water table level in the evaporimeter at Hlasivo is 17.2°C. For the Zaječice reservoir, the average temperature of water at water table level is 17.5°C. The average relative humidity was 82% at Hlasivo station and 80% at Zaječice. The wind speed is higher at the Hlasivo station at 1.34 m/s, compared to Zaječice, where the average wind speed is only 0.77 m/s. However, from the analysis of the daily course of evaporation and wind speed at the Zaječice reservoir, it is clear that in the observed period there were windy days (up to 4.5 m/s), which significantly affected the intensity of evaporation. However, in a monthly step, these fluctuations in wind speed are not obvious.

PRECIPITATION

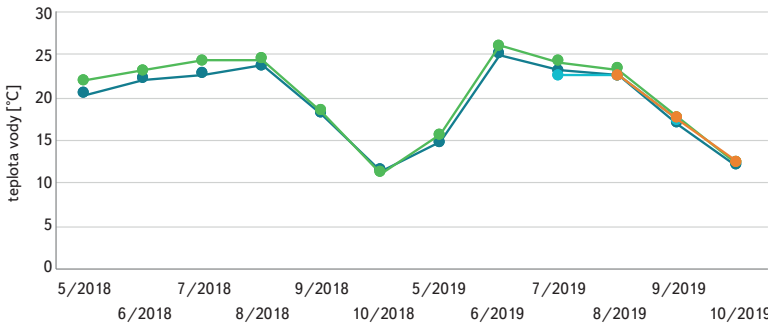
On Fig. 10 it is possible to observe the monthly total precipitation and sum of evaporation at the individual stations. A total of 579.4 mm of precipitation fell at the Hlasivo station during the observed seasons of 2018 and 2019. In contrast, the evaporation was 1,116.2 mm, which is almost double of what it rained. A total of 530.6 mm of precipitation fell at the Podbaba station during the observed seasons. The evaporation again exceeded the precipitation by a total of 880.4 mm. In the period July–September 2019, 171.5 mm rained on Vavřínecký pond, but the evaporation was 373.4 mm, which is more than double the total precipitation. The total precipitation at the Zaječice water reservoir for the months of August–November 2019 was 145.1 mm and the evaporation was 244 mm.



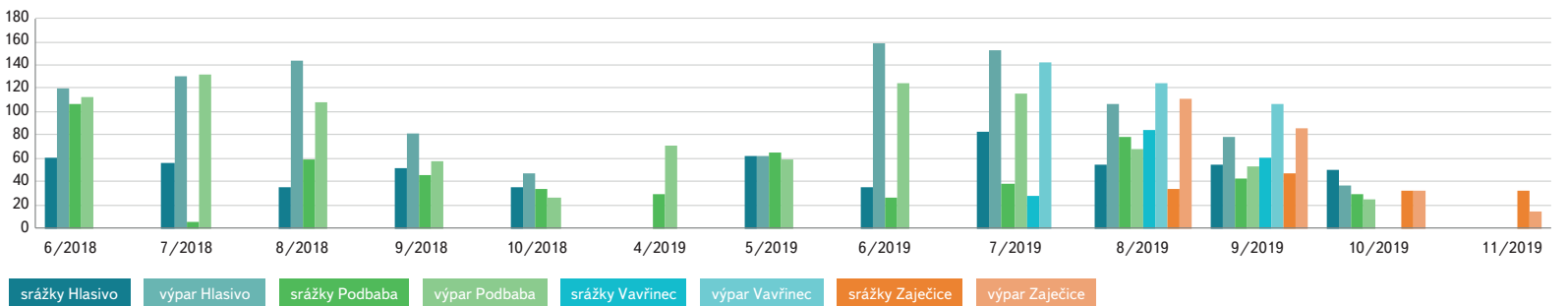
Obr. 5. Výpar ve stanici Hlasivo, Podbaba, Vavřinec a Zaječice
Fig. 5. Evaporation at Hlasivo, Podbaba, Vavřinec and Zaječice stations



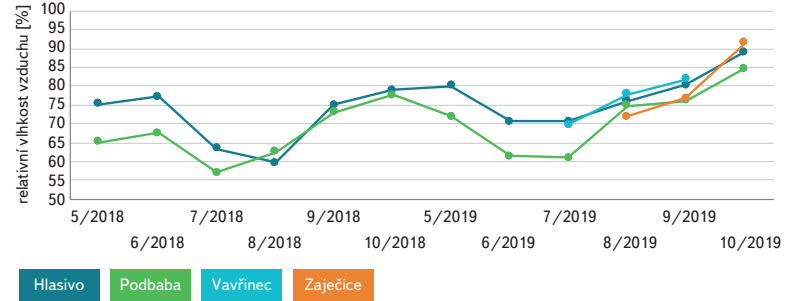
Obr. 6. Teplota vzduchu ve stanici Hlasivo, Podbaba, Vavřinec a Zaječice
Fig. 6. Air temperature at Hlasivo, Podbaba, Vavřinec and Zaječice stations



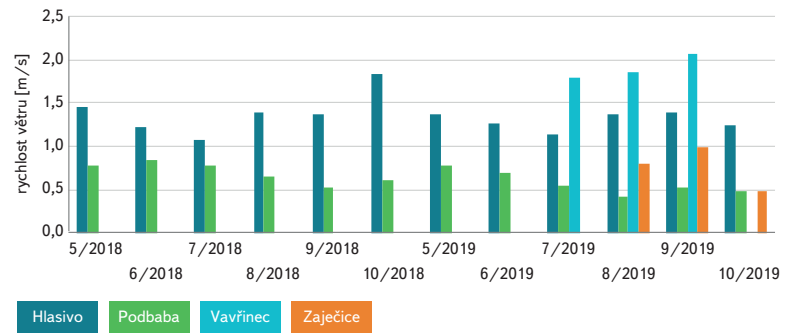
Obr. 7. Teplota hladiny vody ve stanici Hlasivo, Podbaba, Vavřinec a Zaječice
Fig. 7. Water temperature at water table level at Hlasivo, Podbaba, Vavřinec and Zaječice stations



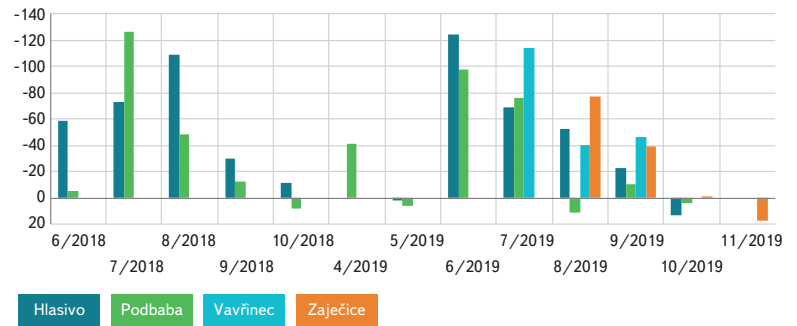
Obr. 10. Srážkové úhrny ve stanici Hlasivo, Podbaba, Vavřinec a Zaječice
Fig. 10. Precipitation totals in Hlasivo, Podbaba, Vavřinec and Zaječice stations



Obr. 8. Relativní vlhkost vzduchu ve stanici Hlasivo, Podbaba, Vavřinec a Zaječice
Fig. 8. Relative humidity at Hlasivo, Podbaba, Vavřinec and Zaječice stations



Obr. 9. Rychlost větru ve stanici Hlasivo, Podbaba, Vavřinec a Zaječice
Fig. 9. Wind speed at Hlasivo, Podbaba, Vavřinec and Zaječice stations



Obr. 11. Měsíční bilance mezi srážkami a výparem ve stanici Hlasivo, Podbaba, Vavřinec a Zaječice
Fig. 11. Monthly balance of precipitation and evaporation at Hlasivo, Podbaba, Vavřinec and Zaječice stations

Výpar zde opět převyšoval srážky s celkovou sumou 880,4 mm. Na Vavříneckém rybníce napršelo v období červenec–září 2019 171,5 mm, výpar však činil 373,4 mm, což je více než dvojnásobek srážkového úhrnu. Na Zaječické vodní nádrži byl srážkový úhrn za měsíce srpen–listopad 2019 145,1 mm a výpar 244 mm.

Na obr. 11 je znázorněn rozdíl mezi srážkovým úhrnem a výparem v jednotlivých měsících. Sloupce směřující vzhůru značí převládající výpar nad srážkami, sloupce mířící dolů mají opačnou vypovídající hodnotu. Z grafu je zřejmé, že v letních měsících zpravidla převládá výpar nad srážkami. V některých měsících přesahoval výpar nad srážkami dokonce o více než 100 mm. Oproti tomu v měsících, kdy srážky převyšovaly výpar, se jedná o rozdíl menší než 20 mm.

VÝPOČET VÝPARU NA ZÁKLADĚ VZORCŮ

Vzhledem k 63leté časové řadě meteorologických veličin a hodnot výparu je výparoměrná stanice Hlasivo vhodná k odvozování vzorců pro výpočet výparu. V rámci projektu TAČR TJ01000196: Vytvoření software pro výpočet výparu z vodní hladiny pro podmínky ČR [9] vznikla univerzální sada vzorců vhodná pro výpočet výparu i pro další lokality v ČR.

Vzorci vznikly na základě lineární a nelineární regrese výparu s meteorologickými veličinami. V prvním kroku byly vyjádřeny párové závislosti průměrného denního výparu z vodní hladiny (v měsíčním kroku) na veličinách: teplota vzduchu, teplota vody ve výparoměru a globální sluneční radiace. Užitím rovnice párové regrese mezi vybranou veličinou a výparem byl vypočítán výpar. Následně byla spočítána rezidua vypočítaného výparu od pozorovaného. V dalším kroku byla vyjádřena závislost vypočítaných reziduí na jiné veličině (Ta, Tw, H, R nebo V). Kombinací dvou regresních vztahů došlo k vytvoření nového vzorce. Tento vzorec byl následně rozšířen o další veličinu, a to stejným způsobem.

Výše popsaným postupem byla vytvořena sada vzorců, zakládající se na lineárním, mocninném, exponenciálním či logaritmickém modelu nebo na jejich kombinacích. Výpočty výparu z odvozených vzorů byly srovnány s naměřeným výparem a hodnoceny na základě nejvyšší hodnoty koeficientu KGE [10] a nejnižší hodnoty MRE. Pomocí těchto dvou parametrů byl vyselektován užší výběr vzorců, viz *tabulka 2*.

Tyto vzorce byly použity pro výpočet výparu v lokalitách Praha-Podbaba, Vavřínecký rybník a vodní nádrž Zaječice. Výsledky vypočteného výparu byly následně porovnány s naměřeným výparem z výparoměrů ve vybraných lokalitách.

Při aplikaci vzorců je nutné brát zřetel na omezení rozsahu vstupních veličin, podmiňující platnost jednotlivých vzorců. Rozsah platnosti veličin (proměnných), vstupujících do vzorců, je dána $Q_{0,05} - Q_{0,95}$ naměřených hodnot ve stanici Hlasivo, viz *tabulka 3*.

APLIKACE VZORCŮ NA DENNÍ DATA

Na obr. 12–14 je znázorněn denní průběh pozorovaného výparu spolu s výparem modelovaným na základě empirických vzorců z *tabulky 2*. Z výsledků je patrné, že vzorce reflektují hodnoty pozorovaného výparu.

Nejvýraznější rozdíly mezi vypočteným a naměřeným výparem ve stanici Podbaba se vyskytly na přelomu července a srpna 2018, v červnu a v září 2019. Vzorce, zakládající se na teplotě vzduchu (HLA_3 a HLA_8) výrazně nadhodnocují skutečný výpar. Například 30. 6. 2019 se jedná o rozdíl až 12 mm (HLA_8), což je více než čtyřnásobek naměřeného výparu. Chyby ve výpočtu jsou způsobené tím, že se v těchto obdobích vyskytovala teplota vzduchu výrazně vyšší (až 31,8 °C), než je rozsah platnosti vzorců pro tuto veličinu.

Figure 11 shows the difference between total precipitation and evaporation in the individual months. The positive columns indicate the predominance of evaporation over precipitation, the negative columns indicate the opposite. It is clear from the chart that in the summer months, evaporation usually predominates over precipitation. In some months, the evaporation even exceeded the precipitation by more than 100 mm. In contrast, in the months when precipitation exceeded evaporation, the difference is less than 20 mm.

EVAPORATION CALCULATION BASED ON FORMULAS

Due to the 63-year time series of meteorological quantities and evaporation values, the Hlasivo evaporimeter station is suitable for deriving formulas for evaporation calculation. Within the project TAČR TJ01000196: Development of software for the calculation of evaporation from water surface in the conditions of the Czech Republic [9] a universal set of formulas suitable for calculation of evaporation for other sites in the Czech Republic was developed.

The formulas were established on the basis of linear and nonlinear regression of evaporation with meteorological quantities. In the first step, the dependences of the average daily evaporation from the water surface (in a monthly step) were determined in pairs with the quantities: air temperature, water temperature in the evaporimeter and global solar radiation. Using the regression equation between the pair of selected quantity and evaporation, the evaporation was calculated. Subsequently, the residues of the calculated evaporation from the observed one were calculated. In the next step, the dependence of the calculated residues on another quantity (Ta, Tw, H, R or V) was expressed. A new formula was derived by combining the two regression relations. This formula was then extended by another quantity, in the same way.

Using the procedure described above, a set of formulas was created, based on a linear, power, exponential or logarithmic model or on their combinations. Evaporation calculations from derived formulas were compared with the measured evaporation and evaluated on the basis of the highest value of the KGE coefficient [10] and the lowest value of MRE. Using these two parameters, a narrower selection of formulas was selected, see *Table 2*.

These formulas were used to calculate evaporation at the of Prague-Podbaba, Vavřínecký pond and Zaječice reservoir sites. The results of the calculated evaporation were then compared with the measured evaporation from evaporimeters at the selected sites.

When applying the formulas, it is necessary to take into account the limitation on the range of input quantities, which determines the validity of the individual formulas. The range of validity of quantities (variables) entering the formulas is given by $Q_{0,05} - Q_{0,95}$ of measured values in the Hlasivo station, see *Table 3*.

APPLICATION OF FORMULAS TO DAILY DATA

Figure 12, 13, and 14 show the daily course of the observed evaporation together with evaporation modeled on the basis of empirical formulas from *Table 2*. It is clear from the results that the formulas reflect the values of the observed evaporation.

The most significant differences between the calculated and measured evaporation at the Podbaba station occurred at the turn of July and August 2018, in June and September 2019. Formulas based on air temperature (HLA_3 and HLA_8) significantly overestimate the actual evaporation. For example, on June 30, 2019, this represents a difference of up to 12 mm (HLA_8), which is more than four times the measured evaporation. The errors in the calculation are caused by the fact that in these periods the air temperature was significantly higher (up to 31.8°C) than the range of validity of the formulas for this quantity.

Tabulka 2. Vzorce pro výpočet výparu pro stanici Hlasivo

ID	Veličiny	MRE	Rovnice
HLA_1	R	11,7 %	$E = 0,0169R^{0,9975}$
HLA_2	T_w	13,7 %	$E = 0,449e^{(0,0954T_w)}$
HLA_3	T_a	16,5 %	$E = 0,5355e^{(0,1063T_a)}$
HLA_4	R,H	11,6 %	$E = 0,0169R^{0,9975} - 1,029435H + 0,8251$
HLA_5	R,H	11,6 %	$E = 0,0169R^{0,9975} - 0,855645 \ln(H) - 0,1949$
HLA_6	T_w, H	13,2 %	$E = 0,449e^{(0,0954T_w)} - 1,879042H + 1,4769$
HLA_7	T_w, H	13,2 %	$E = 0,449e^{(0,0954T_w)} - 1,448396 \ln(H) - 0,3544$
HLA_8	T_a, H	15,8 %	$E = 0,5355e^{(0,1063T_a)} - 1,509806H + 1,2163$
HLA_9	R, T_a, T_w	11,4 %	$E = 0,0169R^{0,9975} + 0,039107T_a - 0,163673 \ln(T_w) - 0,0664$
HLA_10	T_w, V, H	11,9 %	$E = 0,04T_w^{1,4433} + 0,10918V - 3,18944H + 2,4801$
HLA_11	T_a, V, H	14,8 %	$E = 0,0853T_a^{1,2766} - 0,022681 \ln(V) - 3,151185H + 2,7079$

Table 2. Formulas for calculation of evaporation at Hlasivo station

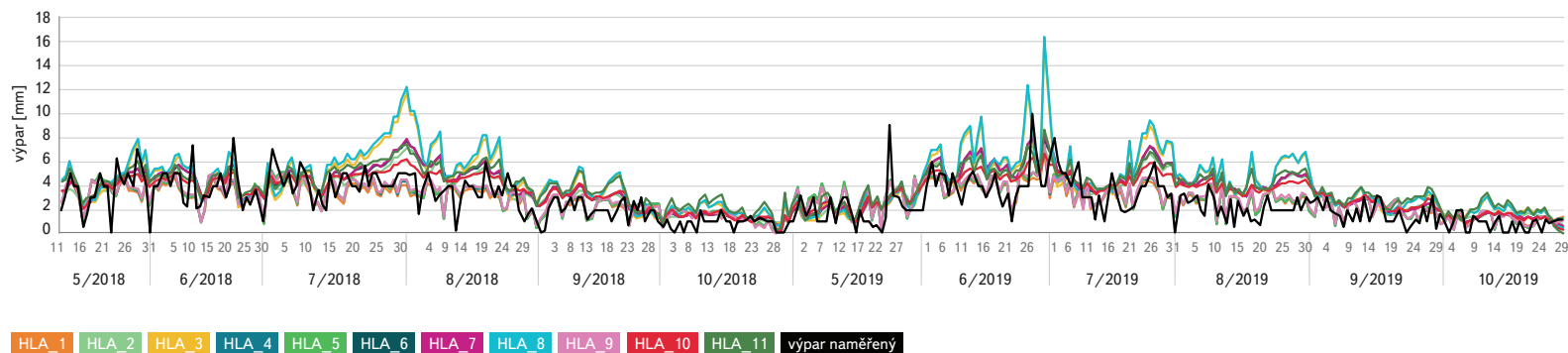
ID	Quantity	MRE	Equation
HLA_1	R	11.7%	$E = 0.0169R^{0.9975}$
HLA_2	T_w	13.7%	$E = 0.449e^{(0.0954T_w)}$
HLA_3	T_a	16.5%	$E = 0.5355e^{(0.1063T_a)}$
HLA_4	R, H	11.6%	$E = 0.0169R^{0.9975} - 1.029435H + 0.8251$
HLA_5	R, H	11.6%	$E = 0.0169R^{0.9975} - 0.855645 \ln(H) - 0.1949$
HLA_6	T_w, H	13.2%	$E = 0.449e^{(0.0954T_w)} - 1.879042H + 1.4769$
HLA_7	T_w, H	13.2%	$E = 0.449e^{(0.0954T_w)} - 1.448396 \ln(H) - 0.3544$
HLA_8	T_a, H	15.8%	$E = 0.5355e^{(0.1063T_a)} - 1.509806H + 1.2163$
HLA_9	R, T_a, T_w	11.4%	$E = 0.0169R^{0.9975} + 0.039107T_a - 0.163673 \ln(T_w) - 0.0664$
HLA_10	T_w, V, H	11.9%	$E = 0.04T_w^{1.4433} + 0.10918V - 3.18944H + 2.4801$
HLA_11	T_a, V, H	14.8%	$E = 0.0853T_a^{1.2766} - 0.022681 \ln(V) - 3.151185H + 2.7079$

Tabulka 3. Intervaly veličin, podmiňující platnost jednotlivých vzorců

	Ta min./max. [°C]		V min./max. [m/s]		H min./max. [%/100]		R min./max. [W/m ²]		Tw min./max. [°C]	
Rozsah veličin	3,7	21,7	0,5	2,4	0,56	0,93	54	283,7	6,2	25,5
Q_{0,05}–Q_{0,95}	3,9	20,6	0,53	2,28	0,59	0,88	56,7	269,5	6,5	24,2

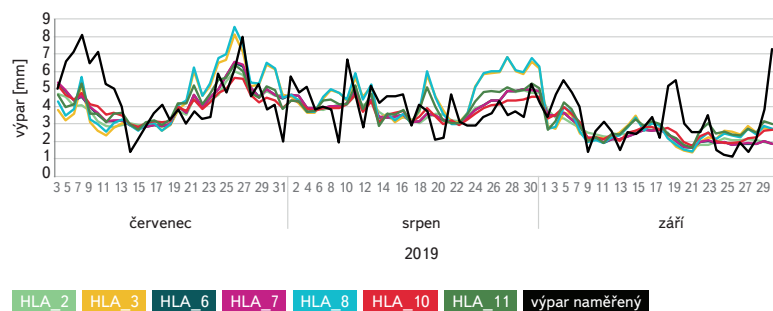
Table 3. Intervals of quantities determining the validity of individual formulas

	Ta min./max. [°C]		V min./max. [m/s]		H min./max. [%/100]		R min./max. [W/m ²]		Tw min./max. [°C]	
Range of quantities	3.7	21.7	0.5	2.4	0.56	0.93	54	283.7	6.2	25.5
Q_{0.05}–Q_{0.95}	3.9	20.6	0.53	2.28	0.59	0.88	56.7	269.5	6.5	24.2



Obr. 12. Výpar naměřený a vypočítaný – Praha-Podbaba, denní chod

Fig. 12. Measured and calculated evaporation – Prague-Podbaba, daily course



Obr. 13. Výpar naměřený a vypočítaný – Vavřínecký rybník, denní chod

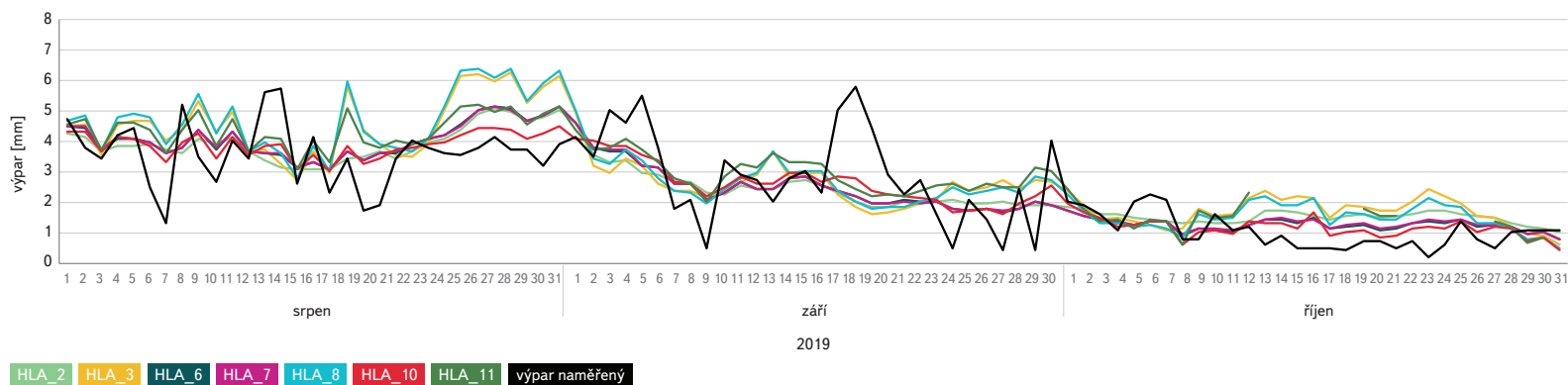
Fig. 13. Measured and calculated evaporation – Vavřínecký pond, daily course

Výrazné vícedenní rozdíly mezi naměřeným a vypočteným výparem na Vavříneckém rybníce můžeme pozorovat na začátku července 2019. V tomto období mají vzorce tendenci výpar podhodnocovat. Například 8. 7. 2019 jsou všechny výpočty nižší o 3–4,5 mm, což je přibližně dvakrát méně než naměřený výpar. Při podrobné analýze desetiminutového kroku výparu s průběhem dalších meteorologických veličin bylo zjištěno, že na začátku července foukal velmi suchý teplý vítr. V odpoledních hodinách, kdy byl výpar nejvyšší, se teplota vzduchu vyšplhala i přes 26 °C (6. 7. 2019 přes 29 °C) a současně relativní vlhkost vzduchu klesala pod 30 %. Ve večerních a ranních hodinách se ovšem hodnoty teploty vzduchu pohybovaly okolo 10 °C a relativní vlhkost se vyšplhala až na více než 80 %. Z tohoto důvodu jsou denní průměry jednotlivých veličin velmi zkršené a vzorce pro výpočet výparu nereflktují skutečný výpar.

Další výrazné odchylky naměřeného výparu od vypočteného můžeme pozorovat 17.–18. 9. 2019. V tomto období přesahuje naměřený výpar 5 mm/den,

Significant differences over several days between measured and calculated evaporation at the Vavřínecký pond can be observed at the beginning of July 2019. In this period, the formulas tend to underestimate the evaporation. For example, on July 8, 2019, all calculations are 3–4.5 mm lower, which is approximately twice less than the measured evaporation. A detailed analysis of the ten-minute evaporation step in relation to the course of the other meteorological quantities revealed that a very dry warm wind was blowing at the beginning of July. In the afternoon, when the evaporation was highest, the air temperature climbed over 26 °C (on July 6, 2019 over 29 °C) and at the same time the relative humidity of the air dropped below 30%. In the evening and morning, however, the air temperature values were around 10 °C and the relative humidity climbed to more than 80%. For this reason, the daily averages of the individual quantities are very distorted and the formulas for calculating the evaporation do not reflect the actual evaporation.

Other significant deviations of the measured evaporation from the calculated one can be observed on September 17–18, 2019. In this period, the measured evaporation exceeded 5 mm/day, in contrast, the calculated evaporation was in the range of 1.7–2.8 mm/day. In these days, the average wind speed was over 3 m/s, which is outside the validity range of HLA_10 and HLA_11 formulas. The same reason applies to the day of September 30, 2019, when the average wind speed was even higher than 6 m/s. On this day, evaporation of 7.3 mm was measured, while the calculated evaporation ranges from 1.8 to 3 mm. Such significant differences between the measured and calculated evaporation are due to the fact that all formulas are based primarily on air temperature or water temperature (or global solar radiation). These quantities have the greatest weight on the result of the calculated evaporation. The wind speed enters the formulas only secondarily or the formulas do not reflect it at all. In the fall,



Obr. 14. Výpar naměřený a vypočítaný – Zaječice, denní chod

Fig. 14. Measured and calculated evaporation – Zaječice, daily course

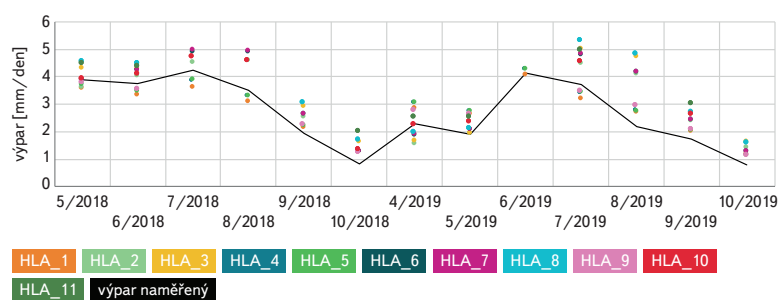
oproti tomu se vypočtený výpar pohybuje v rozmezí 1,7–2,8 mm/den. V těchto dnech byla průměrná rychlost větru přes 3 m/s, což je mimo rozsah platnosti vzorců HLA_10 a HLA_11. Stejný důvod platí i pro den 30. 9. 2019, kdy průměrná rychlost větru byla dokonce vyšší než 6 m/s. V tento den byl naměřen výpar o hodnotě 7,3 mm, zatímco vypočtený výpar se pohybuje v rozmezí 1,8–3 mm. Takto výrazné rozdíly mezi naměřeným a vypočítaným výparem jsou způsobené tím, že všechny vzorce jsou založené především na teplotě vzduchu, anebo teplotě vody (popřípadě na globální sluneční radiaci). Tyto veličiny mají největší váhu na výsledek vypočteného výparu. Rychlost větru vstupuje do vzorců až sekundárně, nebo ji vzorce nereflktují vůbec. Na podzim se ovšem průměrná teplota vzduchu i teplota vody pohybuje velmi nízko, a proto je vypočtený výpar významně podhodnocený.

Největší odchylky naměřeného a vypočteného výparu u vodní nádrže Zaječice můžeme pozorovat v období 3.–5. 9. 2019, kdy podobně jako u Vavříneckého rybníka foukal v odpoledních hodinách velmi suchý teplý vítr. Naproti tomu jsou ranní a večerní hodnoty teploty vzduchu poměrně nízké, relativní vlhkost vzduchu naopak vysoká a rychlost větru klesá na nulu. Z tohoto důvodu jsou ovlivněny denní průměry hodnot a výpočty ze vzorců neodpovídají reálnému výparu, skutečný výpar tak podhodnocují téměř o polovinu.

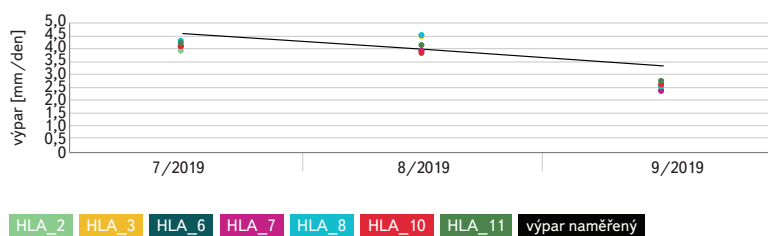
Další významný rozdíl je patrný ve dnech 17.–19. 9. 2019, kdy se opět vyskytovala poměrně nízká teplota vzduchu (jež primárně reflektují vzorce), avšak velmi vysoká rychlost větru. Rozdíl mezi naměřeným (5,8 mm) a vypočítaným výparem (1,8 mm) ve dne 18. 9. 2019 je pro vzorec HLA_3 až trojnásobný.

APLIKACE VZORCŮ NA MĚSÍČNÍ DATA

Výpočet výparu v denním kroku je zatížen vysokou relativní i absolutní chybou. Přesnějšího výsledku je dosaženo při výpočtu měsíčního výparu, kde odchylky výpočtu od naměřeného výparu nejsou tak významné. V první řadě je potlačena náhodná chyba měření, jež je výraznější u denních hodnot výparu [11]. V druhé řadě se hodnoty meteorologických veličin vstupujících do vzorců pohybují obvykle v rozsahu platnosti jednotlivých vzorců.



Obr. 15. Vypočtený výpar pro stanici Podbaba na základě vzorců ze stanice Hlasivo
Fig. 15. Calculated evaporation for the Podbaba station based on formulas from the Hlasivo station



Obr. 16. Vypočtený výpar pro stanici Vavříneck na základě vzorců ze stanice Hlasivo
Fig. 16. Calculated evaporation for the Vavříneck station based on formulas from the Hlasivo station

however, the average air temperature and water temperature are very low, and therefore the calculated evaporation is significantly underestimated.

The largest deviations of the measured and calculated evaporation at the Zaječice reservoir can be observed in the period of September 3–5, 2019, when, similarly to Vavřínecký pond, a very dry warm wind blew in the afternoon. On the contrary, morning and evening air temperatures are relatively low, relative humidity is high and wind speed drops to zero. For this reason, the daily averages of the values are affected and the calculations from the formulas do not correspond to the real evaporation, thus underestimating the actual evaporation by almost half.

Another significant difference is evident in the days of September 17–19, 2019, when there was again a relatively low air temperature (which is primarily reflected in the formulas), but a very high wind speed. The difference between the measured (5.8 mm) and calculated evaporation (1.8 mm) on September 18, 2019 is up to three times for the formula HLA_3.

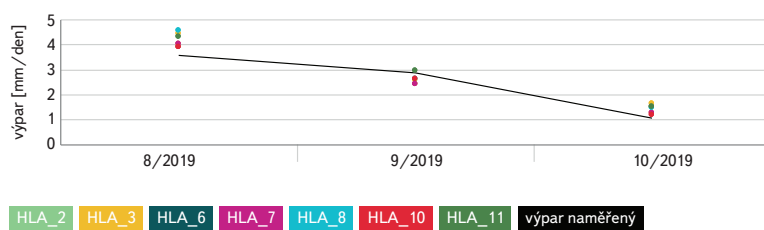
APPLICATION OF FORMULAS TO MONTHLY DATA

The calculation of evaporation in a daily step is burdened with a high relative and absolute error. A more accurate result is achieved when calculating the monthly evaporation, where the deviations of the calculation from the measured evaporation are not so significant. Firstly, the random measurement error is suppressed, which is more pronounced for daily evaporation values [11]. Secondly, the values of meteorological quantities entering the formulas are usually within the range of validity of the individual formulas.

To calculate the evaporation based on the average monthly values of the measured quantities, the formulas from Table 2 were again used. The average relative calculation error for the Podbaba station ranges between 22–55%, see Fig. 15. The black line indicates the measured evaporation. Points above this curve indicate calculations that overestimate the result. The points below this line indicate underestimated result values. The high relative error is caused mainly by the fall values when the measured evaporation is so low that an absolute error of 0.4 mm can represent a relative error higher than 50%.

The best performance is achieved for formulas where global solar radiation is entered - yellow dots (MRE = 21.6–24.4%). The formulas based on air temperature are the lower performing - blue dots (MRE = 46.9–55.1%). Values that are outside the range of measured values in the Hlasivo station were omitted from the calculation.

Formulas for calculating the evaporation from the Hlasivo station were further applied to the data from the floating evaporimeter at Vavřínecký pond (see Fig. 16) and at the Zaječice retention reservoir (see Fig. 17). The formulas global solar radiation is entered could not be used because the floating weather stations record radiation as the difference between global solar radiation and radiation reflected from the water surface.



Obr. 17. Vypočtený výpar pro stanici Zaječice na základě vzorců ze stanice Hlasivo
Fig. 17. Calculated evaporation for the Zaječice station based on formulas from the Hlasivo station

Pro výpočet výparu na základě průměrných měsíčních hodnot naměřených veličin byly opět použity vzorce z tabulky 2. Průměrná relativní chyba výpočtu pro stanici Podbaba se pohybuje mezi 22–55 %, viz obr. 15. Černá linie značí naměřený výpar. Body nad touto křivkou označují výpočty, které výsledek nadhodnocují. Body pod touto linií mají opačnou vypovídající hodnotu. Vysoká relativní chyba je způsobena především podzimními hodnotami, kdy je naměřený výpar tak nízký, že absolutní chyba o hodnotě 0,4 mm může znamenat relativní chybu vyšší než 50 %.

Nejlépe vycházejí vzorce, do kterých vstupuje globální sluneční radiace – žluté body (MRE = 21,6–24,4 %). Nejméně vycházejí vzorce, které se zakládají na teplotě vzduchu – modré body (MRE = 46,9–55,1 %). Hodnoty, které se pohybují mimo rozsah naměřených hodnot ve stanici Hlasivo, byly z výpočtu vynechány.

Vzorce pro výpočet výparu ze stanice Hlasivo byly dále aplikovány na data z plovoucího výparoměru na Vavříneckém rybníce (viz obr. 16) a na Zaječické retenční nádrži (viz obr. 17). Vzorce, do kterých vstupuje globální sluneční radiace, nebylo možné použít, jelikož plovoucí meteostanice zaznamenávají radiaci jako rozdíl mezi globální sluneční radiací a radiací odraženou z vodní hladiny.

Pro Vavřínecký rybník se průměrná relativní chyba výpočtu pohybuje mezi 11 % (vzorec HLA_11) až 14 % (vzorec HLA_3).

Na Zaječické nádrži byl výpar měřen od srpna do listopadu 2019. V listopadu se ovšem veličiny pohybují mimo rozsah platnosti vzorců ze stanice Hlasivo. Výpar je tedy modelován pouze pro měsíce srpen–říjen. Průměrná relativní chyba výpočtů se pohybuje mezi 8,8 % (vzorec HLA_10) až 29,3 % (vzorec HLA_3).

ZÁVĚR

Článek popisuje čtyři výparoměrné stanice ve správě VÚV TGM a porovnává naměřená data jednotlivých meteorologických veličin a výparu. Z výsledků vyplývá, že všechny lokality během výparoměrné sezony trpí srážkovým deficitem. Výpar významně převyšuje srážky především v letních měsících. Bilanci mezi výparem a srážkami bohužel není možné vyčíslit mimo výparoměrnou sezónu, která je obvykle od dubna do října. Řešením by mohl být celoroční výparoměr, který je testován ve stanici Podbaba. Do tohoto výparoměrného bazénu je přidána sůl, která brání zamrznání hladiny.

Vzorce pro výpočet výparu, vzniklé na základě dat ze stanice Hlasivo, byly aplikovány na další výparoměrné stanice. Z výsledků vyplývá, že vzorce se dají aplikovat jak na denní data, kde je ovšem nutné počítat s vyšší relativní i absolutní chybou, tak na data měsíční, která jsou pro výpočet výparu vhodnější. Tímto se potvrdila hypotéza, že vzorce, odvozené z dat ze stanice Hlasivo, jsou vhodné pro výpočet výparu i pro jiné lokality. Při aplikaci vzorců je ovšem nutné brát zřetel na omezený rozsah platnosti jednotlivých veličin, vstupujících jako proměnné do jednotlivých vzorců.

Z výsledků porovnání mezi jednotlivými lokalitami dále vyplývá, že rychlost větru hraje patrně významnější roli pro přesnější určení výparu, než zohledňují současné vzorce ze stanice Hlasivo. Budoucí inovace vzorců by mohla spočívat nejen v prodlužování časové řady, ale také v přípravě nových vzorců, které by více zohlednily rychlost větru a také vzorce, které by byly cíleny na konkrétní roční období.

Poděkování

Článek vznikl v rámci projektů Vytvoření software pro výpočet výparu z vodní hladiny pro podmínky ČR (TJ01000196) financovaný Technologickou agenturou ČR a Analýza adaptačních opatření ke zmírnění dopadů změny klimatu a urbanizace na vodní režim v oblasti vnější Prahy (CZ.071.02/0.0/0.0/16_040/0000380) financovaný z operačního programu Praha – Pól růstu ČR.

For the Vavřínecký pond, the average relative calculation error ranges between 11% (formula HLA_11) to 14% (formula HLA_3).

On the Zaječice reservoir, evaporation was measured from August to November 2019. In November, however, the quantities are outside the scope of the formulas from the Hlasivo station. The evaporation is therefore modeled only for the months August–October. The average relative error of the calculations ranges between 8.8% (formula HLA_10) to 29.3% (formula HLA_3).

CONCLUSION

This paper describes four evaporation stations managed by TGM WRI and compares the measured data of individual meteorological quantities and evaporation. The results show that all sites suffer from a precipitation deficit during the evaporation measurements season. The evaporation significantly exceeds precipitation, especially in the summer months. Unfortunately, the balance between evaporation and precipitation cannot be quantified beyond the evaporation season, which is usually from April to October. The solution could be a year-round evaporimeter, which is being tested at the Podbaba station. Salt is added to this evaporation tank to prevent the surface from freezing.

The formulas for calculating evaporation, based on data from the Hlasivo station, were applied to the other evaporimeter stations. The results show that the formulas can be applied both to daily data, where it is necessary to take into account the higher relative and absolute error, and to monthly data, which are more suitable for the calculation of evaporation. This confirmed the hypothesis that the formulas derived from the data from the Hlasivo station are suitable for the calculation of evaporation for the other sites as well. When applying the formulas, however, it is necessary to take into account the limited range of validity of individual quantities entering as variables into the individual formulas.

The results of the comparison between the individual sites also show that the wind speed probably plays a more important role in more accurate determination of evaporation than the current formulas from the Hlasivo station reflect. Future innovation of formulas could involve not only extending the time series, but also the development of new formulas that reflect more the wind speed and also formulas focusing on specific seasons of the year.

Acknowledgments

The paper was written as part of the projects Creation of software for calculation of water surface evaporation for the conditions of the Czech Republic (TJ01000196) financed by the Technology Agency of the Czech Republic and Analysis of adaptation measures to mitigate the impacts of climate change and urbanization on the water regime in the outer Prague area (CZ.071.02/0.0/0.0/16_040/0000380) financed from the Operational Programme Prague – Growth Pole of the Czech Republic.

Literatura

- [1] BERAN, A. a HANEL, M. Definování zranitelných oblastí z hlediska nedostatku vody na území České republiky. *VTEI*, 2015, roč. 57, č. 4–5, s. 21–24. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2015/08/definovani-zranitelnych-oblasti-z-hlediska-nedostatku-vody-na-uzemi-ceske-republiky/>
- [2] ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., and SMITH, M. *Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, 1998.
- [3] PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, *Mathematical and Physical Sciences*, 1948, Vol. 193. No. 1032, p. 120–145. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- [4] BYCZKOWSKI, A. and ŽBIKOWSKI, A. *Hydrologiczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych: przepływy charakterystyczne*. Warszawa: Państwowe Wydaw. Rolnicze i Leśne, 1979.
- [5] GASH, J.H.C. and SHUTTLEWORTH, W.J. *Evaporation*. IAHS Press, 2007.
- [6] MONTEITH, J.L. Evaporation and the environment. In: FOGG, G.E. (ed.) *The state and movement of water in living organisms*. Cambridge: Cambridge University Press, 1965, p. 205–234.
- [7] ALLEN, R.G. Penman–Monteith equation. In: HILLEL, D. (ed.) *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Oxford: Elsevier, 2005, p. 180–188. ISBN 978-0-12-348530-4.
- [8] 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. *VTEI*, 2013, roč. 55, č. 4.
- [9] BERAN, A., ŠUHÁJKOVÁ, P., KOŽÍN, R. a MELIŠOVÁ, E. *Vzorce pro výpočet výparu z vodní hladiny pro vybrané vodní plochy ČR*. Praha, 2020.
- [10] 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.
- [11] MRKVIČKOVÁ, M. Vyhodnocení měření na výparoměrné stanici Hlasivo. *VTEI*, 2007, č. 6, s. 9–11.

Autor

Mgr. Petra Šuhájková^{1,2}

✉ petra.suhajkova@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-7379-3246

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

²Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2020.07.002