



**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta životního prostředí**

**Analýza výparu z vodní hladiny a porovnání různých přístupů k jeho stanovení**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vedoucí práce: RNDr. Václav Šípek, Ph.D.**

**Autor: Bc. Martin Špráchal**

2023

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Špráchal

Krajinné inženýrství

Regionální environmentální správa

Název práce

**Analýza výparu z vodní hladiny a porovnání různých přístupů k jeho stanovení**

Název anglicky

**Analyses of evaporation from the free water surface and its determination by various approaches**

---

### Cíle práce

Diplomová práce bude zaměřena na vyhodnocení měřeného výparu z vodní hladiny na experimentální lokalitě povodí Liz na Šumavě. Hlavním cílem práce je vybrat metodu, která bude v porovnání s měřeným výparem vykazovat nejlepší shodu a zároveň bude založená na dostupných meteorologických vstupech. Dílčím cílem bude vyhodnocení desetiletého měření výparoměru na experimentální lokalitě a získání denních a sezónních úhrnů výparu.

### Metodika

Práce bude založena na vyhodnocení měření dat z terénního výparoměru na dlouhodobě provozované experimentální lokalitě povodí Liz na Šumavě. V první řadě dojde ke zpracování a vyhodnocení meteorologických řad v hodinovém a denním kroku. Zároveň dojde k vyhodnocení dat z výparoměru. Zpracovaná meteorologická data budou využita k výpočtu výparu na základě tří metodických přístupů. Porovnány budou metody, které jsou založené na: (1) teplotě vzduchu (např. Hargreaves, 1985; Oudin, 2005), (2) stanovení radiační bilance (např. Priestley-Taylor, 1972; Turc, 1961) nebo (3) na kombinaci obou přístupů (Penman, 1948; Penman-Monteith, 1965). Takto vypočtený výpar z vodní hladiny bude porovnán s měřenými úhrny a bude vybrána nejspolehlivější metoda pro experimentální lokalitu.

**Doporučený rozsah práce**

60 str.

**Klíčová slova**

výpar, hydrologická bilance, radiační bilance, povodí Liz

---

**Doporučené zdroje informací**

ANDERSON M. G. et MCDONNELL J. J., 2005: Encyclopedia of Hydrological Sciences, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 3243 s.

DAVIE T., 2008: Fundamentals of hydrology second edition, Routledge 200 s.

NOVÁK V., 2012: Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere System. Springer, 245 s.

SHAW E. M. BEVEN K. J., CHAPPELL N. A., LAMB R., 2011: Hydrology in Practice, Fourth Edition, Spon Press, 546 s.

**Předběžný termín obhajoby**

2022/23 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

RNDr. Václav Šípek, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra geoenvironmentálních věd

**Konzultant**

doc. Mgr. Lukáš Trakal, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 28. 3. 2023

**prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2023

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2023

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „*Analýza výparu z vodní hladiny a porovnání různých přístupů k jeho stanovení*“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

**V Praze dne .....**

**Podpis autora práce .....**

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval RNDr. Václavu Šípkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřená na vyhodnocení naměřeného výparu z vodní hladiny na experimentální ploše na Šumavě. Hlavním cílem této práce je porovnat několik výpočetních metod s výsledky naměřenými výparoměrem. V diplomové práci jsou vyhodnoceny výsledky naměřeného výparu za období od roku 2009 do roku 2018. Zpracované výsledky byly použity k výpočtu výparu na základě tří metodických přístupů. Porovnány jsou metody, které jsou založené na teplotě vzduchu, stanovení radiační bilance a na kombinaci obou přístupů. K výpočtu výparu bylo použito celkem deset metod. Naměřený celkový sezónní výpar (od dubna do října) se pohyboval mezi 209,3 mm do 323,9 mm. Průměrná denní hodnota výparu od dubna do října byla 2 mm. Z porovnaných deseti metod byla nejpřesnější Makkinkova rovnice, kde byl zjištěn průměrný denní rozdíl od měřeného výparu za všechny sledované sezónní období pouze 0,1 mm. Rozdíl celkové sumy výparu za všechny sledované období činil pouze 4,46 %. Průměrná denní RMSE měla hodnotu 1,13 mm. V případě vyhodnocení korelací mezi vypočtenými a pozorovanými daty denního výparu byly nejpřesnější metody: Penman-Monteith a Trajkovic se stejnou hodnotou korelačního koeficientu rovnou 0,253.

**Klíčová slova:** Výpar, hydrologická bilance, radiační bilance, povodí Liz

## **Abstract**

The diploma thesis is focused on the evaluation of the measured evaporation from the free water surface on the experimental area in Šumava. The main goal of this work is to compare several calculation methods with the results measured by a evaporation pan. The diploma thesis evaluates the results of measured evaporation for the period from 2009 to 2018. The processed results were used to calculate evaporation based on three methodological approaches. Methods based on air temperature, radiation balance and a combination of both approaches are compared. A total of ten methods were used to calculate the evaporation. The measured total seasonal pan evaporation (from April to October) ranged between 209.3 mm and 323.9 mm. The average daily value of evaporation from April to October was 2 mm. Out of the ten compared methods, Makkink's equation was the most accurate, where the average daily difference from the measured evaporation for all monitored seasonal periods was only 0.1 mm. The difference in the total amount of evaporation for all monitored periods was only 4.46%. The average daily RMSE was 1.13 mm. In the case of evaluating correlations between calculated and observed daily evaporation data, the most accurate methods were: Penman-Monteith and Trajkovic with the same value of the correlation coefficient equal to 0.253.

**Key words:** Evaporation, the Liz Basin, hydrological balance, radiation balance

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce .....	2
3. Literární rešerše .....	3
3.1. Výpar z volné vodní hladiny.....	4
3.2. Transpirace.....	11
3.3. Výpar z intercepce .....	14
3.4. Výpar z půdy.....	15
3.5. Metody výpočtu výparu .....	18
4. Metodika .....	21
4.1. Charakteristika území .....	21
4.2. Data z výparoměru.....	22
4.3. Metody použité k výpočtu výparu .....	24
4.3.1. Abtew (1966).....	24
4.3.2. Blaney-Cridle (1950).....	25
4.3.3. Hargreaves (1985) .....	26
4.3.4. Hargreaves-Samani (1958).....	28
4.3.5. Makkink (1957).....	28
4.3.6. Oudin (2005) .....	29
4.3.7. Penman (1948) .....	29
4.3.8. Penman-Monteith (1965) .....	31
4.3.9. Trajkovic (2007).....	32
4.3.10. WMO (1966).....	32
5. Výsledky .....	34
5.1. Vyhodnocení dat z výparoměru.....	34
5.2. Porovnání výpočetních metod s výparoměrem.....	37
6. Diskuse.....	44
7. Závěr a přínos práce.....	47
8. Přehled literatury a použitých zdrojů.....	49
9. Přílohy.....	54



## 1. Úvod

Výpar je kombinace fyzikálních procesů, které vedou ke změně skupenství vody ze skupenství kapalného na skupenství plynné. K vypařování dochází z různých povrchů, například z vodních ploch (jezera, řeky, moře, oceány), půdy, vegetace ale i z urbanizovaných oblastí (silnice, města). Výpar je důležitý pro sestavení hydrologické bilanční rovnice. Ta se sestavuje jak pro celá povodí, tak i např. pro jednotlivá jezera. Dá se využít pro další hydrologické, hydrochemické, limnologické, nebo vodohospodářské účely.

Výpar lze rozdělit na čtyři procesy: (1) výpar z volné vodní hladiny, (2) transpiraci – při které dochází k vypařování vody průduchy rostlin, (3) výpar z intercepce – výpar vody zadržené na rostlinách (např. při srážkách) a (4) výpar z půdního povrchu. Souhrn těchto čtyř procesů se dohromady často označuje jednotným názvem evapotranspirace, což je tedy termín označující celkový úhrn výparu ze zemského povrchu do atmosféry. Maximální míra evapotranspirace, která je podmíněna primárně atmosférickými podmínkami, ale také vlastnostmi povrchu se nazývá potenciální nebo také referenční evapotranspirací a její stanovení je předmětem řady odborných studií.

Zjištění velikosti úhrnu výparu je velice komplikované, jelikož přímé měření je velmi finančně a časově nákladné, a proto je často zjišťován ze vzorců, které používají jako vstupní informace běžně dostupná meteorologická data. Historie výzkumu procesu vypařování sahá až do 19. století. Od této doby byla vyvinuta celá řada různých výpočetních metod, kdy každá z nich je založená na různých vstupních datech a odráží lokální podmínky, pro které byla odvozena.

## 2. Cíle práce

Cílem diplomové práce je vyhodnotit data získaná měřením výparu z volné vodní hladiny pomocí výparoměru (tzv. výparnosti) a jejich následné porovnání s deseti výpočetními metodami, které reprezentují tři základní metodické přístupy. Výsledkem práce je určení nejvhodnější výpočetní metody potenciální evapotranspirace pro zájmovou oblast.

Cíle této diplomové práce lze vyjádřit v následujících bodech:

- Zpracování literární rešerše na téma výparu a metod sloužících pro jeho stanovení.
- Vyhodnocení dat získaných měřením úhrnu výparu z výparoměru na malém povodí na Šumavě za období 2009 – 2018
- Určit nejpresnější metodu výpočtu výparu z volné vodní hladiny.

### 3. Literární rešerše

Výpar vody je proces, při kterém dochází k přeměně kapalné vody na vodní páru. K vypařování vody může docházet takřka z jakéhokoli povrchu. Technicky lze výpar rozdělit na 4 procesy: výpar z volné vodní hladiny, transpiraci vegetace, výpar z intercepce a výpar z půdy. Celkový výpar z povrchu se označuje pojmem evapotranspirace. Jako evapotranspiraci (ET) lze označit souhrnný výpar z povrchu půdy, vody a rostlin (transpirace) za určité bilancované období a uvádí se obvykle výškou vrstvy vypařené vody v milimetrech (Dufková, 2003).

Význam výparu lze demonstrovat na příkladu malého koloběhu vody nad pevninou, kde výpar výrazně přispívá k tvorbě oblačnosti a následně i k tvorbě srážek (círka 60 % srážkové vody pochází z výparu nad pevninou) (Oki a Kanae, 2006). Na území ČR se dlouhodobě vypařuje círka 2/3 spadlých atmosférických srážek. Informace o úhrnu výparu v ČR jsou pravidelně vyhodnocovány a zveřejňovány ve vodohospodářské ročence - Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky (dále jen „Modrá zpráva“), kterou každoročně vydává Ministerstvo zemědělství ve spolupráci s Ministerstvem životního prostředí (Modré zprávy lze nalézt na webových stránkách Ministerstva zemědělství: <https://eagri.cz/public/web/mze/voda/osveta-a-publikace/publikace-a-dokumenty/modre-zpravy/>).

K vypařování vody dochází tak, že molekuly vody absorbují energii (nejvíce ze slunce, ale i v menší míře z okolního teplého vzduchu/prostředí), a čím více energie molekulám vody dodáme, tím větší je jejich rychlost. Pokud molekuly vody získají dostatečné množství energie a mají dostatečnou rychlost, tak může dojít k překonání kohezních sil v povrchové vrstvě tekutiny a jejich uvolnění z povrchu do okolní atmosféry (dochází k vypařování). Hnací síla k vypaření vody z povrchu je ale i rozdíl mezi tlakem vodní páry (nasycením) na odpařované ploše a okolním tlakem atmosféry. Pokud dochází k výparu, tak okolní vzduch se postupně sytí a proces přeměňování se pomalu zpomaluje a může dojít až k jeho zastavení, pokud nedojde k obměnění nasyceného vzduchu. Nahrazení nasyceného vzduchu suchým vzduchem do značné míry závisí na rychlosti větru (Shaw a kol., 2011).

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tak získané informace o velikosti úhrnu výparu jsou velmi důležité například pro stanovení hydrologické a vláhové bilance. Důležitost získaných dat a informací dále stoupá společně s probíhající změnou klimatu a

zvyšující se průměrnou denní teplotou vzduchu. Zvýšená průměrná teplota vzduchu totiž výrazně zvyšuje velikost výparu a tím má přímý vliv na šíření sucha v krajině.

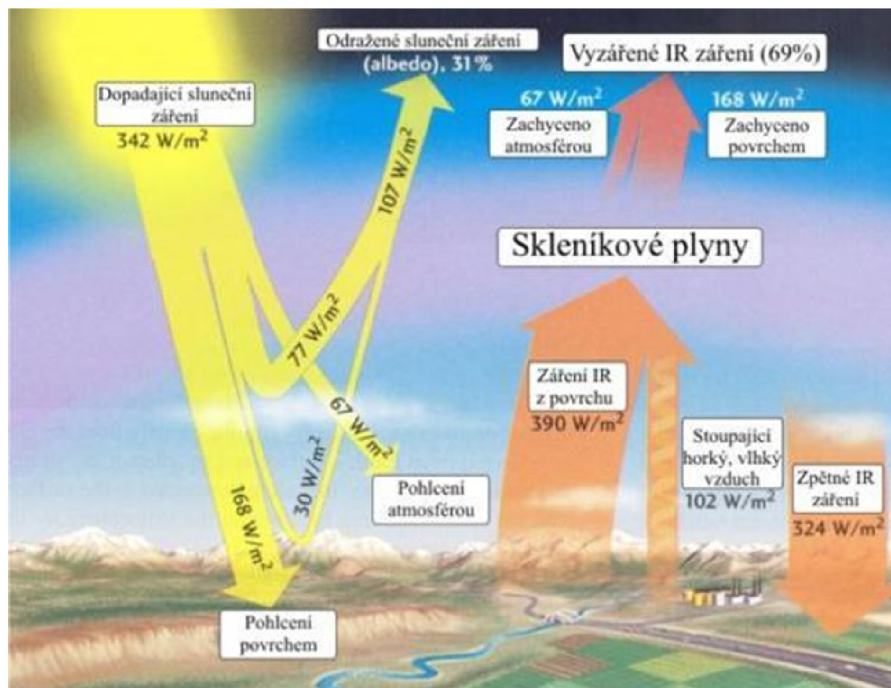
Evapotranspiraci dále lze rozdělit na aktuální a potencionální. Jako aktuální evapotranspirace se označuje skutečný výpar. Pod pojmem potencionální evapotranspirace si lze představit maximální možný výpar z povrchu, který by probíhal ve chvíli, kdy by byla krajina plně nasycena vodou. Pokud se jedná o výpar z volné vodní hladiny (z výparoměru), tak ten se nazývá výparnost. Výparnosti se nejvíce přibližuje definice Penmana (1948), který používá pojem potencionální výpar.

### **3.1. Výpar z volné vodní hladiny**

Výpar z vodní hladiny není limitován množstvím vody a je tedy ovlivňován zejména dostupnou energií a jinými atmosférickými veličinami (Nash, 1989). Výpar z vodní hladiny může být ovlivněn i velikostí vodní plochy.

Velikost úhrnu výparu z volné vodní hladiny je tedy závislá zejména na množství přijaté energie. Aby došlo k ohřátí jednoho gramu vody o jediný stupeň Celsia při 20 °C je zapotřebí dodat cirká 4,18 J. Při ohřátí jednoho gramu vody z 0 °C na bod varu je zapotřebí 418 J. Na vypaření jednoho gramu vody potřebujeme 5, 86 - krát více energie (2450 J na jeden gram vody při 20 °C). (Acevodo, 1975)

Dále lze uvést, že voda má v porovnání s jinými povrchy nízký součinitel odrazu pro krátkovlnné záření (Nash, 1989). Albedo pro vodu má hodnotu 10 %. Oproti tomu albedo například suchého písku je 20 %, kukuřice 20 %, led 30 % a oblaka 40 -70 % dle mocnosti (Lee, 1980). Níže je pro představu uveden obrázek 1, který znázorňuje globální tok sluneční energie. Je na něm například znázorněno, že albedo je až 31 % z celkového dopadajícího slunečního záření. K tomuto odrazu může docházet již v atmosféře, dále díky oblačnosti, a nakonec dochází i k odrazu ze zemského povrchu (i vodních ploch).

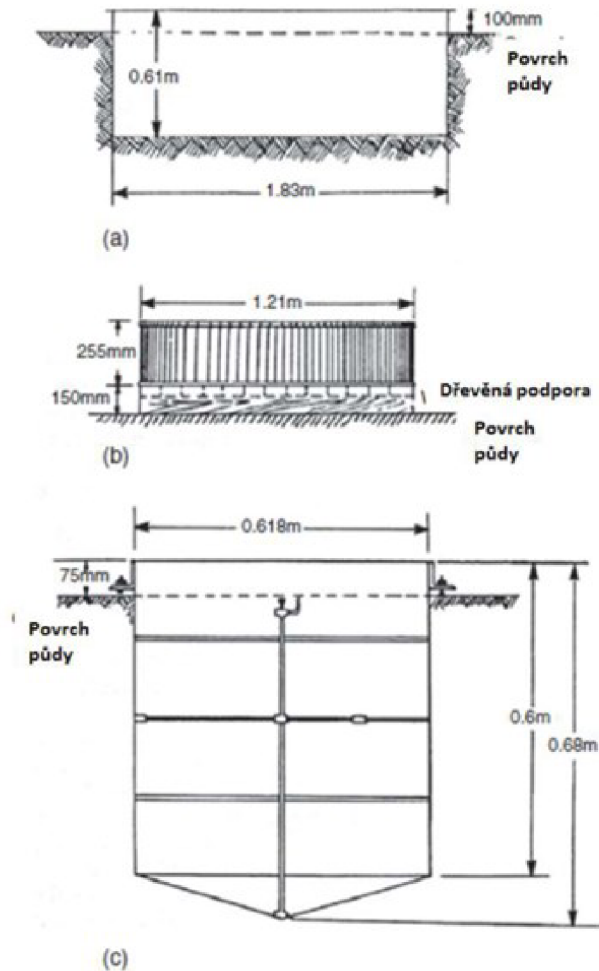


Obrázek 1 - Schéma toku sluneční energie (zdroj: geologie.svb.cz, online 2019)

Způsobů stanovení výparu z volné vodní hladiny je mnoho. Metody zjišťování velikosti úhrnu výparu z volné vodní hladiny lze rozdělit na přímé a nepřímé. Mezi přímé metody náleží hlavně výparoměry, které dále lze rozlišovat například podle způsobu zjišťování velikosti úhrnu výparu (váhový, nebo výškový úbytek vody) (Možný, 2003). Dále je lze rozlišit i dle způsobu jejich zabudování do okolního prostředí (zabudované výparoměry do země, nadzemní výparoměry a výparoměry na plovoucích plošinách) (Shaw a kol, 2011). Na obrázku 2 jsou pro představu vyobrazeny 2 výparoměry zabudované do země a 1 nadzemní výparoměr.

Nejpoužívanější metodou je měření výparu pomocí výparoměrů. Pokud je zvolený správný typ výparoměru, tak výsledky takového měření jsou velmi přesné, jelikož výparoměry dokážou věrně simulovat podmínky výparu z volné vodní hladiny. Dále lze ke zjišťování velikosti úhrnu výparu použít tzv. scintilometr, který bude umístěn nad vodní plochou. Scintilometr měří scintilaci, což jsou jevy, které způsobují změny průchodu světla (obrazu) skrze masy vzduchu o různé teplotě, a tedy i různé hustotě. Jsou pozorovatelné pouhým okem, nicméně toto chvění probíhá všude mezi pozorovatelem a daným objektem, jen jej okem vždy nevidíme. Pro měření výparu lze využít také metodu eddy kovariance, která je založená na kovarianci vertikální rychlosti větru a oscilací vlhkosti vzduchu. Dále lze výpar vypočítat dle

rovnice vodní bilance jezera, na jejímž zjednodušeném principu fungují i výparoměry, viz níže.



Obrázek 2 - Výparoměry: a-Simonsův výparoměr, b-US třídy A, c-ruský GGI-3000 (Shaw a kol. 2011)

## Výparoměry

Výparoměry se používají k přímému měření výparu z volné vodní hladiny. Jedná se o nádrže s vodou, které dokáží věrohodně simulovat výpar z volné vodní hladiny. Výparoměry mohou mít různé tvary a velikosti, ale nejčastěji se jedná o kruhové nádrže (Shaw a kol, 2011).

Výparoměry fungují na principu výpočtu vodní bilance nádrže, jehož výpočet je založen na rozdílu 3 hlavních faktorů: vlastního výparu z nádrže ( $E_{výp}$ ), spadlých

atmosférických srážek (P) a ztráty vody z nádrže (Z) a lze ho tedy při znalosti změn výšky hladiny vyjádřit vztahem:

$$E_{výp} = H_{t-1} - H_t + P_t - Z_t \pm e, \quad (1)$$

Kde:  $H_t$  = výška hladiny vody ve výparoměru v čase  $t$  (mm)

$P_t$  = úhrn srážek nebo napuštění výparoměru v čase  $t$  (mm)

$Z_t$  = ztráta vody z výparoměru v den  $t$  (mm)

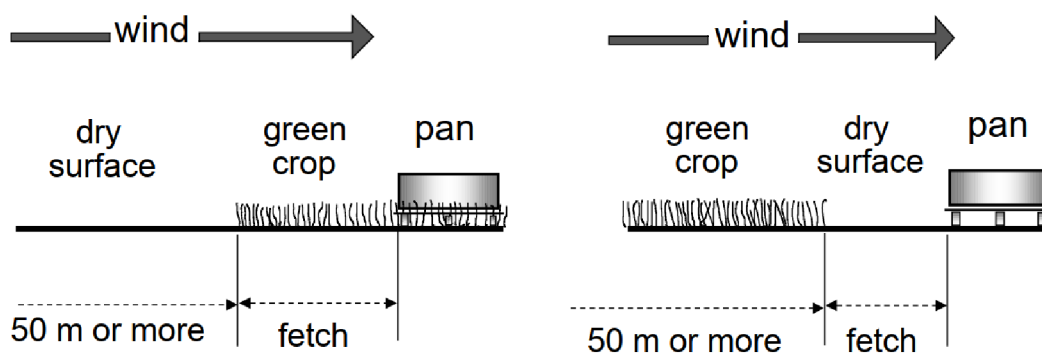
$e$  = reprezentuje chybu (mm)

Přesnost výparoměrů je určena zejména jejich konstrukčními vlastnostmi, hlavně objemem vody a rozlohou vodní plochy. Čím větší rozlohu má hladina vodní plochy, tím přesnějších výsledků měření s výparoměry lze dosáhnout. Čím menší je rozloha plochy hladiny výparoměru, tím více jsou hodnoty naměřeného výparu nadhodnocovány. Dále jsou hodnoty naměřené výparoměrem ovlivňovány i způsobem zabudování, kdy například u nadzemních výparoměrů dochází k ohřívání vody i ze stran výparoměru oproti zabudovaným výparoměrům. Dále ovlivňují přesnost měření i specifické meteorologické vlivy (např. vítr), které jsou určeny zejména místem, kde se výparoměr nachází (Allen a kol., 1988).

Tyto skutečnosti jsou konstruktérům výparoměrů známé, a proto se používá tzv. přepočítání z výparnosti na výpar. Pojmem výparnost se označuje naměřený výpar z výparoměru a aby mohlo dojít k jeho přepočítání na výpar, je nutné, tyto výsledky přepočítat za pomoci přepočítacích koeficientů – tzv. pan koeficientů. Pan koeficienty jsou specifické pro každý typ výparoměru. Pro představu na obrázku 3 můžeme vidět různé umístění shodných výparoměrů, a to v travnaté ploše (Case A) a výparoměr umístěný na volné ploše (Case B). I když se jedná o shodné výparoměry, tak každý je ovlivněn svým umístěním, a každý bude mít jiný přepočítací pan koeficient (Allen a kol., 1988).

## Case A

## Case B



Obrázek 3 – Výparoměr Class a pan (zdroj: Allen a kol., 1988)

Pro představu koeficient používaný pro přepočítání výparnosti na výpar výparoměrem, který se nachází na experimentální ploše na Šumavě, a je použitý jako zdroj dat pro tuto práci, konstrukčně vychází z výparoměru GGI 3000, u kterého se k přepočtu používá pan koeficient o velikosti 1,0.

Typů výparoměrů existuje celá řada, jako například:

- výparoměr **Class a pan**, který je tvořen nádrží kruhového tvaru o průměru 2,42 m a výšce 25,5 cm, která je umístěná na dřevěném rámu (viz výše obrázek 3 a obrázek 2 - výparoměr b)). Jedná se o jeden z nejpoužívanějších typů. Tento výparoměr zpravidla vykazuje větší výpar než výparoměr GGI 3000, jelikož je celý umístěný nad zemí a voda je ohřívána ze všech stran. Výpar je zjišťován na základě změny výšky hladiny v mm.
- Výparoměr **GGI 3000**, který se řadí taky mezi jeden z nejvíce využívaných výparoměrů pro měření výparu z volné vodní hladiny, a to i v ČR. Výparoměr GGI je tvořen nádrží kruhového tvaru o průměru 3 000 cm<sup>2</sup>, která je vytvořena většinou z kovu. Tento výparoměr je oproti výparoměru Class a pan zabudovaný téměř celý do země (7,5 cm přesah nad úroveň terénu). Vodou je následně naplněný do výše okolního terénu. Výpar je zjišťován na základě změny výšky hladiny v mm. Průřez tímto výparoměrem je vyobrazen na obrázku 2 - výparoměr c).



- **Picheův** výparoměr. Jedná se pravděpodobně o nejlevnější výparoměr, který je zde jmenovaný. Picheův výparoměr je tvořen kalibrovaným skleněným válcem o průměru 1 cm a výškou 30 cm, který má nepropustné dno. Měření probíhá tak, že se do válce nalije voda až po vyznačenou značku. Na hrdlo válce se upevní na drátek filtrační papír. Nádoba se poté otočí a po nějaké době (po navlhčení filtračního papírku se odečte počáteční hladina. Po delší době se odečet zopakuje a rozdíl naměřených hodnot bude hodnota naměřeného výparu (Fišák, 1994).
- **Plovoucí** výparoměry, jsou takové výparoměry, které jsou připevněny na plovoucích plošinách a téměř celé těleso nádrže výparoměru se nachází ve vodě. Tato konstrukce má zaručovat co největší přesnost měření výparu z volné vodní hladiny. Často se jako plovoucí výparoměr používá právě výše zmíněný typ GGI 3000, který je namísto zapuštění do země zabudován na nějakou plovoucí plošinu (viz obrázek 4). I tento způsob měření má ale řadu nedostatků, jako například vylívání a nalívání vody do výparoměru, smáčení stěn výparoměru, čím dochází ke zvětšení výparu z výparoměru.



Obrázek 4 – výparoměr společnosti FIEDLER, zdroj: <https://www.fiedler.company> (online 2022)

Kromě plovoucí modifikace výparoměru GGI 3000 lze zmínit i jeho další významnou modifikaci – Šemerův výparoměr nebo výparoměr EWM, který je hojně využíván (cirka 20 stanic) ČHMÚ. Dále lze uvést pro představu další typy výparoměrů jako jsou: Rónův rozdílový výparoměr, výparoměr Rakačeva, výparoměr GGI – 500 a spousta dalších. Výparoměrů je opravdu velké množství a každý z nich má řadu výhod, ale i nedostatků.

Jako nepřímé metody stanovení výparu se označují veškeré empirické výpočetní metody od různých autorů, které jsou vždy přizpůsobeny podmínkám, ve kterých vznikaly. Nepřímé metody se používají zejména tam, kde není možné využití přímého měření pomocí výparoměrů, anebo pro větší oblasti (řeky, celá povodí...).

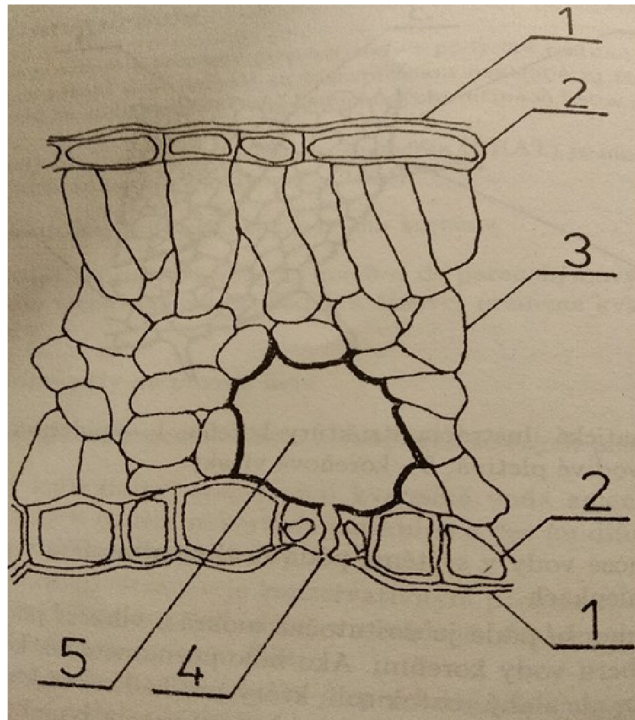
Například McMahon a kol. (2016) uvádějí, že bylo publikováno anebo upraveno přes 160 různých výpočetních metod. Většina publikovaných studií rozděluje použité výpočetní metody do skupin dle požadovaných vstupních meteorologických dat (radiační metody, metody založené na teplotě vzduchu, kombinované metody...). Velká řada studií hodnotila použití výpočetních metod na více různých zájmových lokalitách s různými klimatickými podmínkami. Jako příklad lze uvést Li a kol. (2018), kteří ve své práci prezentují výsledky získané na 137 lokalitách v Číně, Rao a kol. (2013) na 52 lokalitách v Indii, Tabari a kol. (2013) v Íránu, Djaman a kol. (2019) na 5 lokalitách v Novém Mexiku, a nebo Arrellano a kol. (2016), kteří provedli výzkum zahrnující veškeré klimatické regiony v USA. I na starém kontinentu bylo provedeno a publikováno velké množství studií, jako například studie Bormanna (2011), který prezentoval studii provedenou na 6 lokalitách v Německu. V Polsku lze uvést studii Bogawski a Bednorz (2014). Každá z těchto studií vycházela z jiného metodického postupu a každá poskytla jiné výsledky a jinou nejlepší metodu pro danou zájmovou oblast. Li a kol. (2018) zmiňují dobré výsledky kombinovaných metod oproti ostatním skupinám. Ve studii Djaman a kol. (2015) byly nejvhodnější metody Makkink a Valiantzas. I když existuje velké množství publikovaných studií, které se zabývají výpočetními metodami pro odhad výparu, tak získané výsledky z jednotlivých studií mezi sebou lze jen těžko porovnávat, jelikož nejsou zpracovány dle jednotné metodiky a poskytují různé výsledky. Někdy se tyto studie odlišují i použitou terminologií (Xiang a kol., 2020).

## 3.2. Transpirace

Transpirace je proces, při kterém dochází k odpařování vody z rostlin. Voda, spolu s některými živinami je přijímána kořeny a transportována přes rostlinu do atmosféry. K odpařování dochází uvnitř listu, konkrétně v mezibuněčných prostorech a výměna molekul vody v rostlině s atmosférou je řízena průduchy (Novák, 1995).

Důležité je uvést, že transpirace není pasivní proces, ale je regulovaná otvíráním a zavíráním průduchů. To, jestli jsou průduchy otevřené nebo zavřené je ovlivněno několika různými faktory, jako jsou například teplota a vlhkost vzduchu anebo přítomnost fotosynteticky aktivního záření. Jelikož primárním určením rostlin je produkce biomasy prostřednictvím fotosyntézy, tak absorpce oxidu uhličitého průduchy značně ovlivňuje proces regulace průduchů. Rostliny z půdy nepřenášejí čistou vodu, ale roztok solí. Rozpuštěné látky, které jsou obsahem roztoku absorbovaným kořeny rostlin se stává součástí rostlin a nepřenáší se do atmosféry. Proto je možné z hydrologického hlediska proces přenosu roztoku považovat za přenos vody (Novák, 1995).

Voda se může z rostliny vypařovat i přes tzv. kutikulu. Většina povrchu rostlin je pokrytá vrstvou epidermických buněk, které jsou na povrchu pokryté kutikulou, slabě propustnou vrstvou pro vodu a vodní páru. Po fázové změně na povrchu epidermy vodní pára difunduje přes kutikulu. Tento jev se nazývá kutikulární transpirace. Ve většině případů se na transpiraci podílí jen do výše maximálně 10 %. Kutikulární transpirace mladých listů, které vyrostli ve vlhké atmosféře může být podstatně větší (Novák, 1995). Na obrázku 5 lze vidět vyobrazení řezu listem, kde můžeme nalézt tyto části: (1) kutikula, (2) epiderma, (3) mezofyl, (4) průduch s uzavíratelnými buňkami, (5) podprůduchový prostor.



Obrázek 5- Řez částí typického hypostomatárního listu (Novák, 1995)

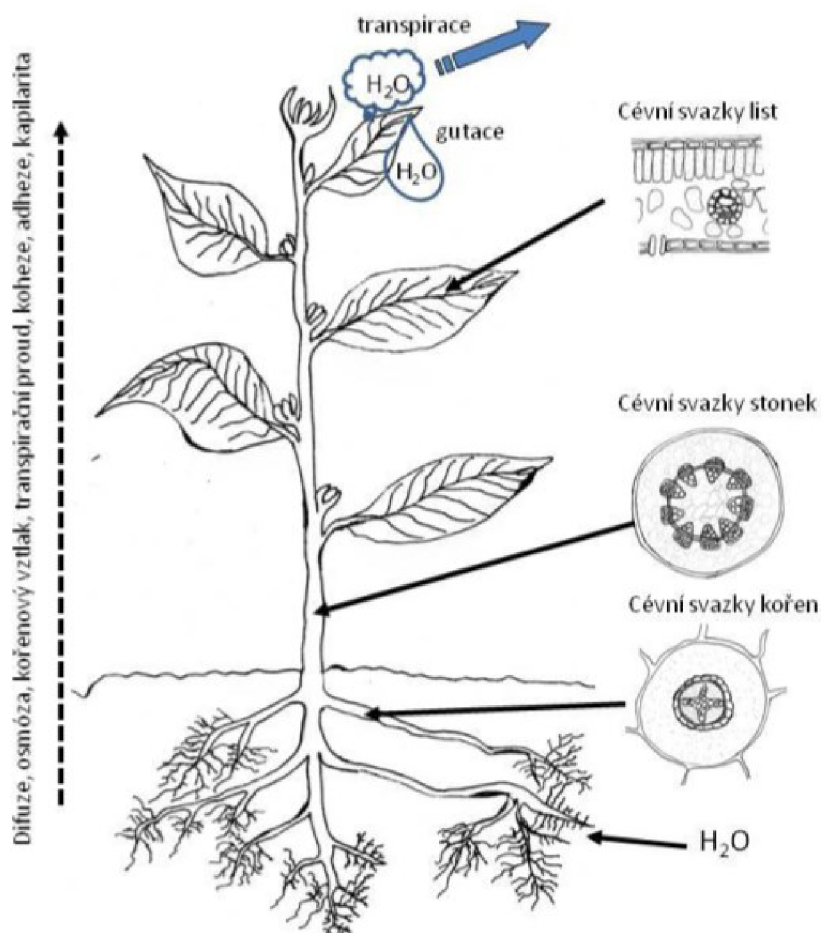
To, jak velký bude výpar pomocí transpirace ovlivňuje i hustota vegetačního pokryvu. Pokud půda nebude pokrytá vegetací, tak nebude docházet k transpiraci, pokud ale bude pokrytá vegetací, tak více než 90 % celkového výparu je pomocí transpirace rostlin (Allen a kol., 1998).

Jedním z velice často používaných způsobů měření transpirace rostlin je metoda **Gazometrická**. Tuto metodu lze použít jak u malých rostlin, tak i u větších stromů. Ke Gazometrickému měření se používají přístroje pro měření fotosyntézy a transpirace (např. LI 6400 XT). Gazometrické přístroje fungují pomocí infračervených plynových analyzátorů. Tato metoda využívá schopnosti  $\text{CO}_2$  a vodní páry absorbovat infračervené záření. Díky této vlastnosti ostatně přispívají také  $\text{CO}_2$  i vodní pára k zvětšování skleníkového efektu na Zemi). Infračervené plynové analyzátory určují koncentraci plynů v závislosti na množství plynem pohlceného infračerveného záření (Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích ©2022).

Dále lze pro stanovení velikosti úhrnu výparu transpirací použít metodu **gravimetrickou**. Tato metoda je založena na velmi jednoduchém principu, kdy rostlina při ztrátě vody transpirací, ztrácí i část své hmotnosti, kterou ovšem v podobě vody získává zpět z půdy. Z tohoto důvodu se většinou váží rostlina i s květináčem.

Transpiraci lze měřit vážením úbytku hmotnosti u jednotlivých listů, nebo u celých rostlin (Ivanov a kol., 1950).

Transpirační tok lze s určitými problémy měřit pomocí měření mízního toku (tedy proudu vody) ve vodivém pletivu, tzv. xylému. Měření je založeno na principu zahřívání xylému a stanovení deformace tepelného pole, které je způsobené právě proudem mízy v rostlině, a které je uměle v xylému udržováno pomocí zahřívací jehly (Steppe o kol., 2010). V případě nulového mízního toku by totiž teplotní pole okolo zahřívajícího bodu mělo být pravidelně rozložené, což v případě nenulových hodnot není pravda a teplotní pole se deformuje ve směru převažujícího proudu mízy. Níže je pro představu transportu vody rostlinou obrázek 6.

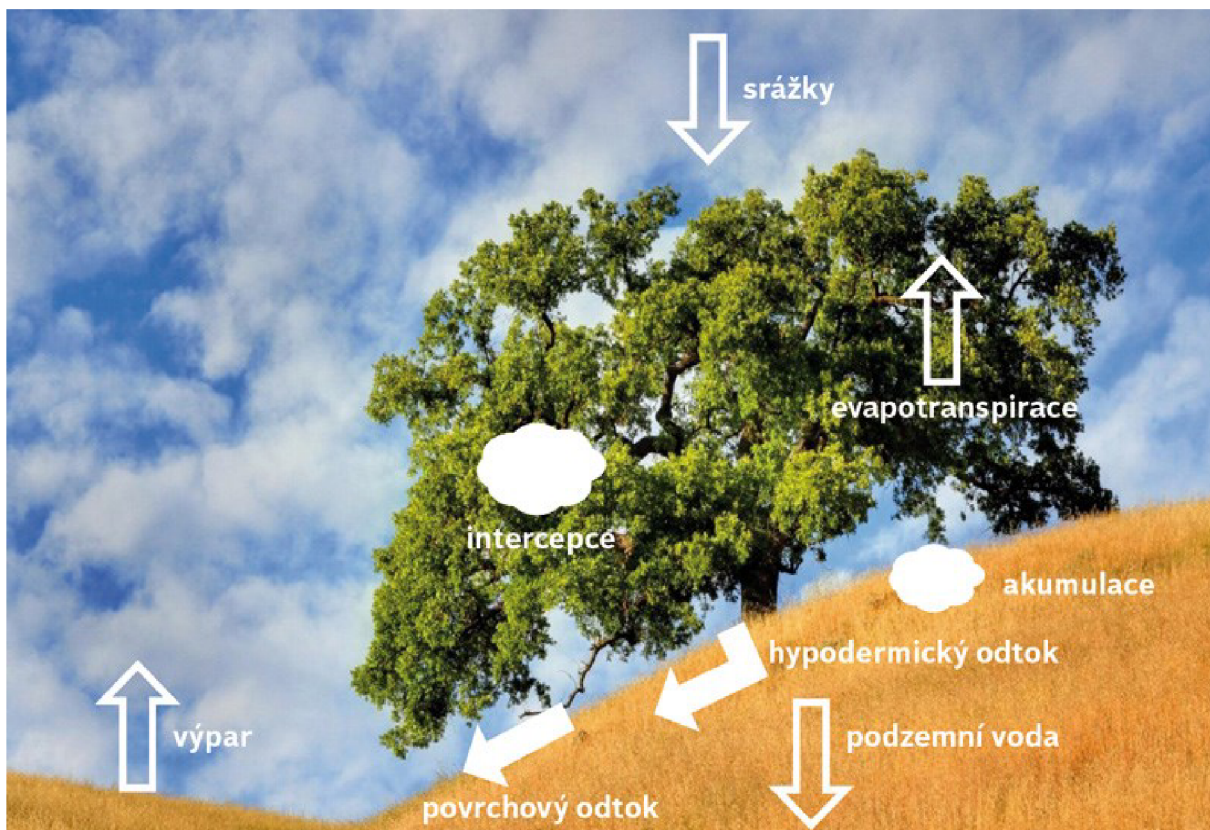


Obrázek 6 – transport vody rostlinou (zdroj: <https://old.pf.jcu.cz/>, online 2022)

### 3.3. Výpar z intercepce

Jako výpar z intercepce je obecně označován proces, který spočívá v dočasném zadržování srážkové vody na povrchu vegetace, odkud se voda vzápětí vypaří. Množství vody, kterou je schopna rostlina dočasně zadržet se nazývá intercepční kapacita rostliny. Tato kapacita je dána druhem rostliny a hustotou porostu. Hustotou porostu je myšleno počet rostlin na jednotku plochy. Podle struktury listu se rozlišují dva druhy. První z nich je hydrofilní. To znamená, že voda na listu rostliny vytváří tenkou souvislou vrstvu vody. Druhá a početnější skupina je hydrofobní. Na těchto rostlinách dochází ke vzniku vodních kapek, které posléze stékají z rostliny na zem. (Novák, 1995)

Aby bylo možné určit velikost výparu z intercepce, je potřeba mít k dispozici detailní údaje o srážkách. K zjišťování výparu z intercepce, neboli intercepční ztráty, je zapotřebí měřit srážku na tzv. otevřené ploše. Tímto pojmem je označován celkový dostupný objem vody pro intercepci, ale i infiltraci a odtok. Když dojde ke srážkám, tak určitý podíl těchto srážek projde přes stromové patro. Srážky, které propadnou přímo stromovým patrem nebo postupně okapou se nazývají podkorunovými srážkami. Dále během srážky dochází ke stékání vody po větvích a kmenech dolů k zemi – tzv. stok po kmeni. Intercepční ztráta se pak určí jako bilance srážek na otevřené ploše od kterých se odečte stok po kmeni a podkorunové srážky. Voda, která zůstane zadržena na povrchu vegetace se pak následně vypaří. Pro představu níže na obrázku 7 je vyobrazeno rozčlenění úhrnu srážky na jednotlivé možné složky.



Obrázek 7 - Rozčlenění srážkového úhrnu na jednotlivé složky (zdroj: <https://www.vtei.cz/2016/08/analyza-zmen-odtokovych-pomeru-pro-ceskou-republiku/>, online 2022).

Celkový výpar z intercepce je tedy ovlivňován různými faktory, kterými jsou celková výše a intenzita deště, vlhkost vzduchu, rychlost větru, nadmořská výška, typ listu atp. Pro zajímavost lze uvést, že větší výpar z intercepce je většinou zjištěn u jehličnatých porostů oproti listnatým porostům. To je způsobeno zejména díky menšímu stékání vody po kmeni na zem.

### 3.4. Výpar z půdy

Výparem z půdy označujeme výpar přímo ze zemského povrchu. Pokud není zemský povrch pokryt vegetací, tak dochází k výparu převážně z půdy. Pokud je ale povrch hustě porostlý vegetací, tak dochází k výparu vody hlavně transpirací rostlin a dále při atmosférických srážkách i výparem z intercepce.

Výpar z půdy je ovlivněn několika specifickými faktory, které výrazně ovlivňují velikost úhrnu výparu. Tato práce se zabývá výparem z volné vodní hladiny, a tedy lze uvést, že jedním z hlavních rozdílů, které ovlivňují vypařování vody z půdy, je

dostupné množství vody v půdě. Zatímco výpar z volné vodní hladiny je ovlivňován hlavně radiací, teplotou, rychlostí větru a rozlohou vodní plochy (není limitován množstvím vody), tak výpar z půdy je hlavně ovlivněn různou velikostí saturace půdy. Jedná se oproti výparu z volné vodní hladiny o velmi limitující faktor (Neriah a kol., 2014).

Mezi další specifické faktory ovlivňující výpar z půdy patří i albedo půdy, které je ovlivněno vlastnostmi půdy, jako je například její zbarvení, kdy mají větší albedo světlejší půdy. Albedo půdy mohou ovlivnit i různé vrstvy, které se mohou vytvořit na povrchu, jako například sněhová pokrývka nebo zbytky vegetace po sklizni na polích (Davin a kol., 2014). Dalšími specifickými faktory jsou propustnost a pórovitost půdy a vliv solí. Během výparu vody z půdy může docházet k vytažení solných částic na povrch, kde následně mohou vytvořit vrstvu solné krusty. Dále se tyto částice mohou usazovat v kapilárách a tím znemožnit další transport vody, tedy i další výpar, který by bez tohoto omezení mohl pokračovat (Mees a Singer, 2006).

Zjišťování výparu z půdy lze provádět tradičně dvěma způsoby. Prvním z nich je výpočet za pomoci empirických rovnic. Druhým způsobem je přímé měření velikosti úhrnu výparu, ke kterému může být použit například lyzimetr.

Lyzimetr je nádoba, která je naplněna zeminou a může být pokrytá porostem. Nádoba se ukládá do terénu, tak aby co nejvěrohodněji napodobovala vlastnosti okolního prostředí (Shaw a kol., 2011). Základní rozdělení lyzimetrů je dle způsobu měření na váhové a kompenzační. Váhové lyzimetry fungují na způsobu měření ztráty hmotnosti. Kompenzační lyzimetry se dají velmi dobře použít v územích s vysokou hladinou podzemní vody. Pokles hladiny podzemní vody způsobený výparem se kompenzuje z kalibrované nádoby s vodou. Množství dodané vody reprezentuje velikost úhrnu výparu z lyzimetru.

V rámci EU existuje více než cirká 180 lyzimetrických stanic s více než 3 000 lyzimetry. Jednou z předností lyzimetrů je, že se dají použít jak na měření výparu z holé půdy, tak na měření výparu z půdy pokrytou vybranou referenční plodinou. V české republice ČHMÚ využívá jediný lyzimetr na observatoři v Doksanech, viz obrázek 8 (schéma na obrázku 9).

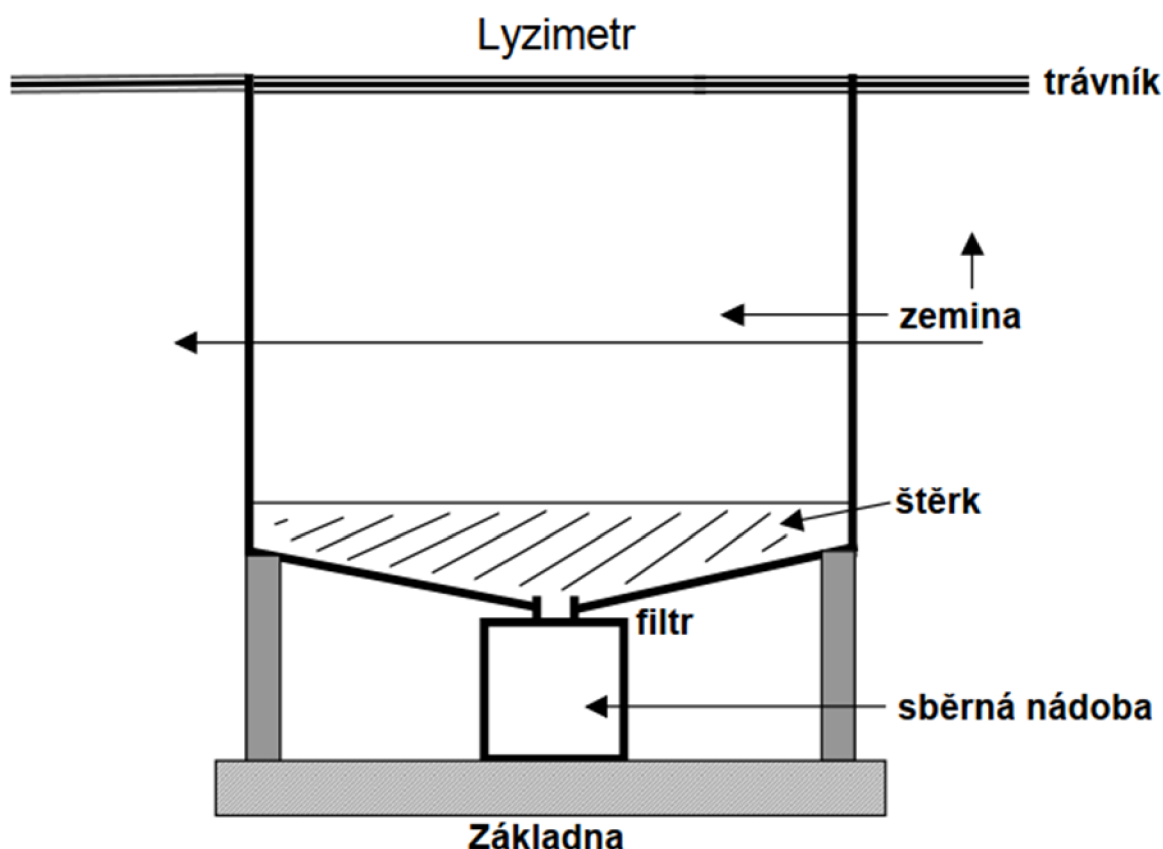




Obrázek 8 – Lyzimetr ČHMÚ (Rožnovský a kol. 2005)

Instalace lyzimetru, tak aby se z něj voda vypařovala stejnou intenzitou jako se vypařuje v okolní krajině, není jednoduchá. Aby se dosáhlo důvěryhodného měření je zapotřebí, aby půda obsažená v lyzimetru měla stejnou strukturu jako půda v okolí (Kemel, 1996).

Výpočet výparu pomocí vážitelného lyzimetru je jednoduchý. Změna hmotnosti za určený časový úsek (kg) se vydělí plochou povrchu lyzimetru ( $m^2$ ). Pokud při tomto výpočtu přijdeme na to, že ubyla hmotnost, tak úbytek lze označit za úhrn výparu. Pokud bude přírůstek tak můžeme zjistit velikost srážek (mm). Kompenzační lyzimetry využijeme na měření výparu v územích s vysokou úrovní podzemní vody. V těchto lyzimetrech se snížení podzemní vody způsobené výparem kompenzuje pomocí vody z kalibrované nádoby. Udává se, že množství takto dodané vody se rovná množství vypařené vody v určeném časovém intervalu (Kemel, 1996). Níže je pro představu zobrazeno na obrázku 9 schéma lyzimetru, který se nachází v observatoři Doksany.



Obrázek 9 - Schéma lyzimetru v observatoři Doksany (Rožnovský a kol., 2005)

Dále lze k výparu z půdy používat i další metody, jako například scintilometry umístěné nad půdou, výparné komory, úbytek půdní vlhkosti (zero-flux plane) a nebo eddy kovariance.

### 3.5. Metody výpočtu výparu

V této kapitole budou popsány metody používané pro výpočet výparu, tedy metody nepřímé. Existuje celá řada výpočetních metod, které se od sebe výrazně odlišují podle toho, pro jaký vypařující povrch jsou navrženy a jakou složku výparu odhadují. Nepřímé metody používají pro výpočet výparu různá meteorologická data, která jsou často běžně měřena na meteorologických stanicích. Hlavním kritériem pro výběr metody odhadu velikosti úhrnu výparu bude dostupnost potřebných dat.

Výpočetní metody lze rozdělit dle různých autorů do několika skupin. Pro příklad lze uvést rozdělení dle Dingmana (2015), který rozděluje metody do skupin dle dat, které jsou pro výpočet zapotřebí:

- **Aerodynamický přístup**

Tyto metody jsou jedny z nejdéle používaných, kdy většina těchto metod je založena, resp. odvozena z Daltonovy rovnice (Dalton, 1802):

$$Ea = C(es - ea) \tag{2}$$

*Kde:  $Ea$  = vypočítaný výpar z vodní hladiny (mm/den)*

*$C$  = aerodynamická vodivost*

*$e_s$  = tlak nasycené vodní páry (kPa)*

*$e_a$  = průměrný aktuální tlak vodní páry (kPa)*

- **Metody založené na teplotě vzduchu**

Jedná se o výpočetní metody, kdy je k výpočtu nutné mít k dispozici pouze data o teplotě vzduchu. Jedná se o jeden z nejstarších způsobů výpočtu velikosti výparu, který byl poprvé použitý již ve 20 letech minulého století.

- **Radiační metody založené na měření slunečního záření**

Metody pro výpočet výparu založené na získaných naměřených datech krátkovlnného záření jsou velice rozšířené a svojí verzí výpočetního modelu vytvořilo velké množství různých autorů. Tyto metody vycházejí ze stejného základu – energetické bilance. (Xu a Singh, 2000).

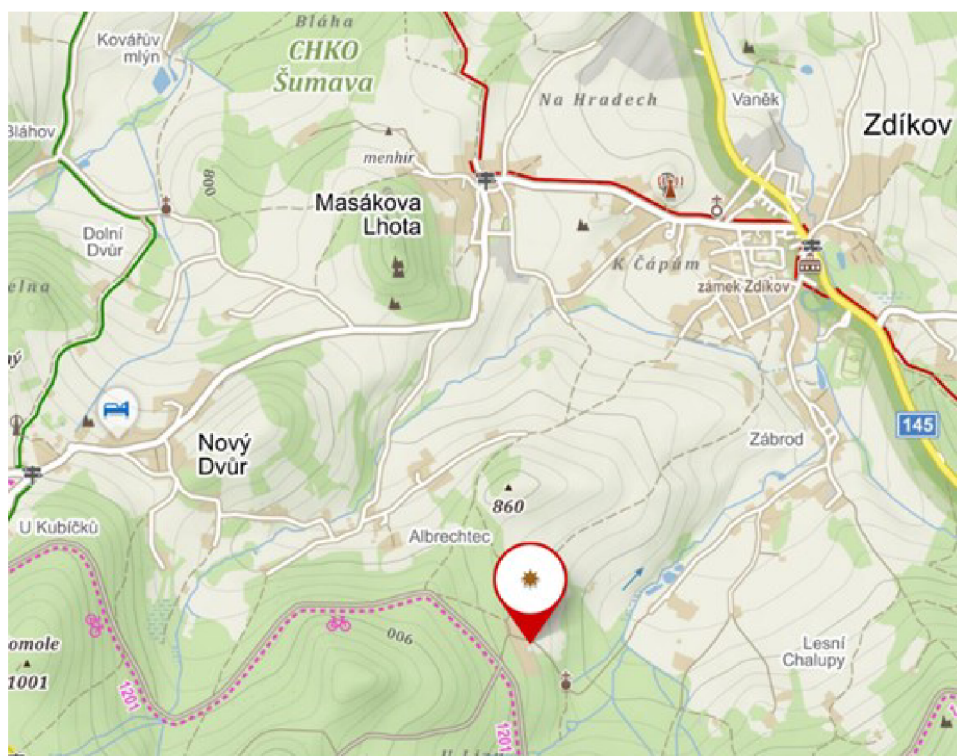
### - **Kombinované metody**

Jedná se o metody, které v sobě kombinují výše uvedené přístupy. Jsou nejčastěji tvořeny ze dvou částí. První část je tvořena radiačním přístupem a z druhé části využívají přístup aerodynamický. Vztah mezi jednotlivými přístupy, resp. jak ovlivňují konečný výsledek měření je z velké části ovlivněn okolní teplotou. Při nízkých teplotách převažuje aerodynamický přístup (cirka do 6 °C) a naopak při vyšších teplotách radiační přístup (Novák, 1995).

## 4. Metodika

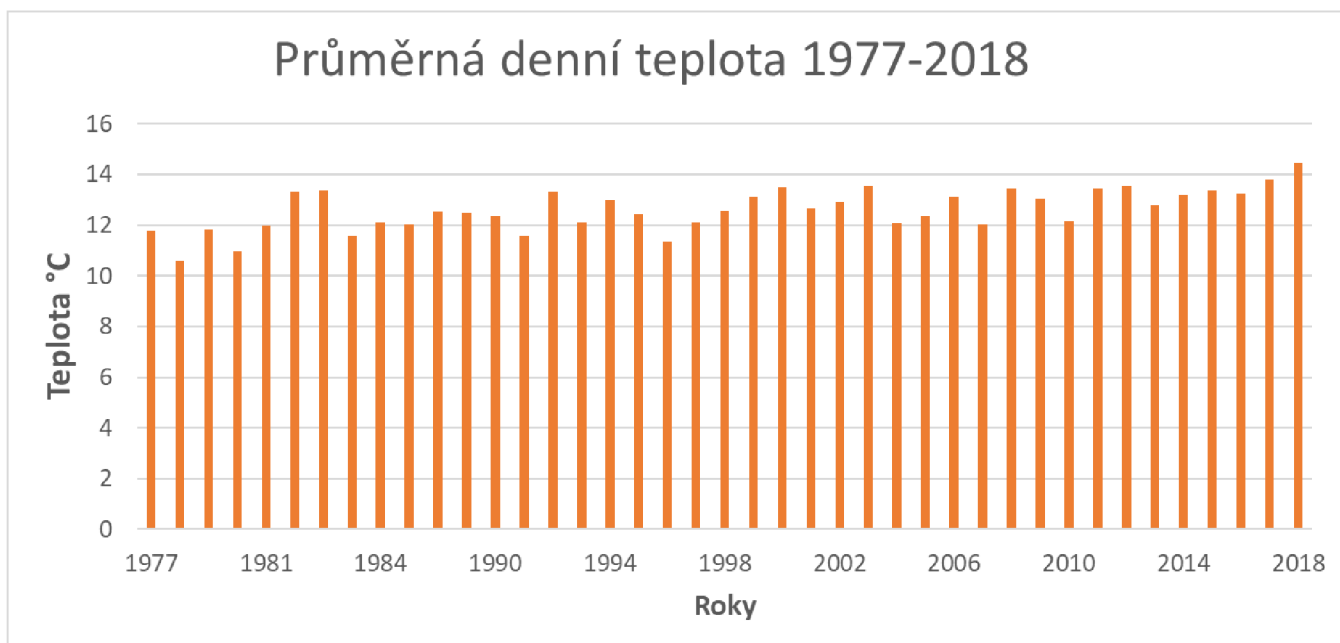
### 4.1. Charakteristika území

Vstupní data pro tuto práci byla získána měřením na experimentální ploše, která se nachází v Šumavském podhůří cirka 2 km od centra obce Zdíkov nedaleko Vimperku. Jedná se o experimentální plochu s meteorologickou stanicí, kterou provozuje Ústav pro hydrodynamiku Akademie věd České republiky. Experimentální plocha se nachází v 830 m n.m. na těchto GPS souřadnicích: 49°04'11"N, 13°40'55.4"E. Experimentální plocha je umístěna na pravidelně sečené louce cirka 60 metrů od lesního porostu.



Obrázek 10 – Experimentální plocha s meteorologickou stanicí, kterou provozuje Ústav pro hydrodynamiku Akademie věd České republiky

Průměrná denní teplota naměřená na experimentální ploše ve sledovaném sezónním období (květen-říjen) od roku 1977 do roku 2018 byla 12,6 °C. Z grafu (obrázek 11) průměrných denních teplot je patrné, že nejchladnějším rokem byl rok 1978, kdy byla na experimentální ploše naměřena průměrná denní sezónní teplota 10,6 °C. Naopak v roce 2018 byla naměřena nejvyšší průměrná denní teplota 14,5 °C. Dále je z obrázku 11 patrné, že zatímco do roku 2013 (tedy 1977, 1978 ... 2013) docházelo k chladnějším a teplejším rokům, tak od roku 2014 nedošlo ve sledovaném období v žádném roce již k poklesu průměrné denní teploty pod 13,2 °C.



Obrázek 11 – Vývoj průměrné denní teploty v jednotlivých sezónách zkoumaného období na povodí Liz (zdroj dat: ÚH AV ČR)

Na experimentální ploše se nachází několik přístrojů pro měření různých meteorologických veličin potřebných pro tuto práci. Jedním z nich je váhový srážkoměr **MRW 500** se zachytnou plochou 500 cm<sup>2</sup>. Jedná se o srážkoměr založený na tenzometrické váze, která je připojena k řídicí jednotce a ta provádí kontinuální měření. Tento srážkoměr měří jak úhm kapalných, tak tuhých srážek (sníh). Další měřenou veličinou je relativní vlhkost vzduchu, která je na experimentální ploše měřena čidlem **Vaisala HMP45**, jehož součástí je senzor relativní vlhkosti **HUMICAP** a odporový teploměr. Okolní teplotu snímají i teploměry značky Fiedler model **RV12/RK5**. Radiace je měřena přístrojem **Kipp & Zonen CNR 1**. Krátkovlnné záření je měřeno pyranometrem s čidlem **CM3** a dlouhovlnné záření je měřeno pyrgeometrem s čidlem **CG3**. Rychlost větru je měřena Anemometrem **WS103-H** značky Fiedler. Výpar je měřen výparoměrem **GGI 3000**.

#### 4.2. Data z výparoměru

Pro diplomovou práci byly použity výsledky úhrnu výparu naměřené výparoměrem na experimentální ploše v období od roku 2009 až do roku 2018. Výparoměr zaznamenává výšku hladiny vody v mm v 10-minutovém kroku. Pro tuto práci bylo určeno, že data budou upravena do denního kroku v rozmezí od 7 do 7 hodin a dále agregovány do měsíčního a sezonního kroku (květen – říjen). Hodnota denního

výparu se získá jako rozdíl naměřených výšek hladiny vody ve výparoměru na začátku a na konci sledovaného časového intervalu:

$$SVd = VZ - VK \quad (3)$$

*Kde: SVd = skutečný úhrn výpar (mm)*

*VK = výška hladiny na konci denního kroku (mm)*

*VZ = výška hladiny na začátku denního kroku (mm)*

Takto získané výsledky ale nelze prezentovat jako naměřený skutečný úhrn výparu, jelikož výparoměr zaznamenává pouze výšku otevřené hladiny a například atmosférické srážky mohou vést ke zvýšení hladiny výparoměru a zkreslení získaných dat. Dále pak dochází k automatickému doplňování vody do výparoměru. Výsledky z výparoměru tedy musely být nejdříve analyzovány a upraveny.

V každém denním kroku byla nejdříve provedena analýza získaných dat, aby bylo zjištěno, jestli nedošlo k automatickému napuštění výparoměru. Pokud bylo zjištěno, že v denním kroku došlo k automatickému napuštění vody, tak množství napuštěné vody muselo být přičteno k VZ. Ta stejná situace nastává v případě, kdy dochází k dopadání atmosférických srážek na hladinu výparoměru. Srážky na experimentální ploše jsou měřeny srážkoměrem v 10-minutovém kroku. Pro potřeby výpočtu bylo nutné získat data o množství spadlých srážek v denním kroku. Denního kroku se docílilo součtem srážek naměřených v 10-minutovém kroku. I srážky byly ve výpočtu přičteny k VZ a výpočet v uvedených případech vypadal takto:

$$SVd = (VZ + N) - VK \text{ nebo } SV = (VZ + S) - VK \quad (4)$$

*Kde: N = automatické napuštění výparoměru (mm)*

*S = atmosférické srážky (mm)*

Měsíční výpar se vyjádří jako:

$$SV_m = SV_{d1} + SV_{d2} \dots + SV_{dn} \quad (5)$$

*Kde:  $SV_m$  = skutečný úhrn výparu za měsíc (mm)*

Sezónní výpar lze vyjádřit:

$$SV_r = SV_{m1} + SV_{m2} \dots + SV_{m_n} \quad (6)$$

*Kde:  $SV_r$  = skutečný úhrn výparu za rok (mm)*

I když byla provedena důkladná analýza a úprava dat, tak docházelo k ojedinělým chybovým výsledkům. Mezi příčiny těchto výsledků lze uvést nadměrné množství spadlých atmosférických srážek a naplnění kapacity výparoměru a výpadky v měření výparoměru. Chybové výsledky byly pro další krok (porovnání s výsledky z empirických výpočetních metod) z této práce odstraněny.

### **4.3. Metody použité k výpočtu výparu**

Metody použité pro výpočet výparu a porovnání s výparem naměřeným na výparoměru byly vybrány tak, aby reprezentovaly všechny metodické přístupy dle rozdělení podle meteorologických dat nezbytných pro výpočet.

#### **4.3.1. Abtew (1966)**

Jedná se o výpočetní metodu, kterou Abtew publikoval v roce 1966. Je to radiační metoda, která byla odvozena na jižní Floridě při výzkumu potencionální ET z bažinné vegetace a řas. Tuto metodu lze označit za nenáročnou na vstupní data, jelikož k výpočtu je zapotřebí mít k dispozici pouze data o radiačním záření. Využití tedy najde hlavně na místech, kde není možné měřit ostatní meteorologické veličiny. Výpočetní metoda je vyjádřena takto:



$$PET = 0,53 \frac{R_s}{\lambda} \quad (7)$$

*Kde: PET = potencionální evapotranspirace (mm)*

*RS = Sluneční záření (MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>)*

*λ = latentní teplo vypařování (MJ.Kg)*

latentní teplo vypařování lze vypočítat takto:

$$\lambda = 2.501 - (2.361 * 10^{-3}) T \quad (8)$$

*kde: T = teplota vzduchu (°C)*

### **4.3.2. Blaney-Cridle (1950)**

Jedná se o metodu, kterou vyvinul H. F. Blaney a W. D. Criddle v USA. Metoda byla vytvořena pro výpočet výparu z referenční plodiny. Byla odvozena v souvislosti výzkumu spotřeby vody potřebné pro zavlažování na farmách (západních zemí). K výpočtu je důležité mít k dispozici data o okolní teplotě. Jedná se tedy o jednoduchou metodu, kterou lze vyjádřit takto:

$$PET = p \cdot (0,46T_a + 8,13) \quad (9)$$

*Kde: p = procento denních hodin (%)*

*T<sub>a</sub> = průměrná denní teplota (°C)*

*p* bylo získáno z následující tabulky:

Tabulka 1 – denní procento „p“ denních hodin pro různé zeměpisné šířky (římské číslice označují měsíce) (zdroj: FAO, Irrigation and Drainage Paper No. 56)

Zeměpisná šířka	Sever	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
	Jih	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
60°		15	20	26	32	38	41	40	34	28	22	17	13
55°		17	21	26	32	36	39	38	33	28	23	18	16
50°		19	23	27	31	34	36	35	32	28	24	20	18
45°		20	23	27	30	34	35	34	32	28	24	21	20
40°		22	24	27	30	32	34	33	31	28	25	22	21
35°		23	25	27	29	31	32	32	30	28	25	23	22
30°		24	25	27	29	31	32	31	30	28	26	24	23
25°		24	26	27	29	30	31	31	29	28	26	25	24
20°		25	26	27	28	29	30	30	29	28	26	25	25
15°		26	26	27	28	29	29	29	28	28	27	26	25
10°		26	27	27	28	28	29	29	28	28	27	26	26
5°		27	27	27	28	28	28	28	28	28	27	27	27
0°		27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27

### 4.3.3. Hargreaves (1985)

Jedná se o metodu, která byla vyvinuta v roce 1985 v rámci projektu návrhu zavlažovacího systému pro oblast v západní Africe v okolí řeky Senegal. K odvození této metody bylo použito přímé měření lyzimetrem. Jedná se o metodu zabývající se potenční evapotranspirací. Rovnice pro výpočet má následující tvar:

$$PET = 0,0023 \cdot 0,408R_a(T_{\max} - T_{\min})^{0,5}(T + 17,8)$$

(10)

*Kde: Ra = mimozemské záření na horní hranici atmosféry (MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>)*

*Tmax = maximální denní teplota (°C)*

*Tmin = minimální denní teplota (°C)*

Hodnota mimozemského záření se získá výpočtem:

$$Ra = 24(60)\pi GSCdr(\omega \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\sin(\omega S))$$

(11)

*Kde: GSC = solární konstanta (0,082 MJ.m<sup>-2</sup>.den<sup>-1</sup>)*

*dr = relativní vzdálenost země od slunce*

*$\omega S$  = hodinový úhel západu Slunce (rad)*

*$\phi$  = zeměpisná šířka (rad)*

*$\delta$  = solární deklinace (rad)*

Relativní vzdálenost Slunce od Země lze vypočítat takto:

$$dr = 1 + 0,033 \cos((2\pi/365)J)$$

(12)

*Kde: J = den v roce (pořadové číslo)*

Solární deklinaci získáme výpočtem:

$$\delta = 0,409 \sin((2\pi/365)J - 1,39)$$

(13)

Úhel západu slunce zjistíme následujícím výpočtem:

$$\omega S = \arccos(-\tan(\phi) * \tan(\delta))$$

(14)

#### 4.3.4. Hargreaves-Samani (1958)

Jedná se o metodu, která byla odvozena z původní Hargreavesovi metody z roku 1975 (Hargreaves a Allen, 2003). Tato metoda byla vyvinuta pro velmi suché oblasti v okolí Kalifornie a následně v roce 1985 upravena do následující podoby:

$$PET = 0,00102R_a(T_{max} - T_{min})^{0,5}(T + 16,8)$$

(15)

#### 4.3.5. Makkink (1957)

Makkinkova metoda byla odvozena během 8 měsíčního testování Penmanovi metody pro výpočet potencionální evapotranspice. Testování bylo prováděno v Nizozemsku v roce 1957 za pomoci lyzimetru.

$$PET = 0,61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0,12$$

(16)

Kde:  $\Delta$  = sklon křivky napětí vodních par při dané teplotě vzduchu (kPa.°C)

$\gamma$  = psychrometrická konstanta

Sklon křivky napětí získáme výpočtem:

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp\left(\frac{17,25T}{T + 237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2}$$

(17)

Psychrometrickou konstantu získáme výpočtem:

$$\gamma = \frac{C_p P_a}{\epsilon \lambda}$$

(18)

Kde:  $C_p = \text{specifické teplo při konstantním tlaku } (= 1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}),$

$P_a = \text{atmosférický tlak (kPa)}$

$\varepsilon = \text{poměr molekulárních hmotností vodní páry a suchého vzduchu } (= 0,622)$

#### 4.3.6. Oudin (2005)

Jedná se o výpočetní metodu, která byla vyvinuta k výpočtu potenciální evapotranspirace (PE) pro použití v denním modelu odtoku srážek. Při tomto pokusu bylo použito velké množství naměřených dat, které jsou získané ze 308 povodí nacházejících se ve Francii, Austrálii a Spojených státech. Výpočetní metodu lze vyjádřit jako:

$$PET = \frac{0,408 R_a (T + 5)}{100} \quad (19)$$

Kde:  $R_a = \text{mimozemské záření na horní hranici atmosféry } (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1})$

#### 4.3.7. Penman (1948)

Jedná se o první definovanou kombinovanou metodu pro stanovení potenciální evapotranspirace. Tato rovnice v sobě kombinuje několik rovnic (energetická bilance, aerodynamická rovnice a turbulentní difúze). Při sestavování rovnice byla použita data získaná v Evropě, Americe a Asii. Rovnici lze vyjádřit následovně:

$$PET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - G)}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (20)$$

Kde:  $\Delta = \text{sklon křivky napětí vodních par při dané teplotě vzduchu } (\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C})$

$\gamma = \text{psychrometrická konstanta}$

$R_n = \text{radiační bilance povrchu } (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1})$

$G$  = je tok tepla do půdy ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

$E_a$  = empirická funkce ( $mm.den^{-1}$ )

Radiační bilanci ( $R_n$ ) získáme takto:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (21)$$

Kde:  $R_{ns}$  = radiační bilance krátkovlnného záření ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

$R_{nl}$  = radiační bilance dlouhovlnného záření ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

Radiační bilanci krátkovlnného záření ( $R_{ns}$ ) získáme takto:

$$R_{ns} = R_{sd} - R_{sn} \quad (22)$$

Kde:  $R_{sd}$  = globální sluneční radiace dopadající ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

$R_{sn}$  = globální sluneční radiace odražená ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

Rovnice pro výpočet radiační bilance dlouhovlnného záření ( $R_{nl}$ ) má tvar:

$$R_{nl} = \sigma \frac{(T_{max})^4 + (T_{min})^4}{2} (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) (1,35 \frac{R_{sd}}{R_{so}} - 0,35) \quad (23)$$

Kde:  $\sigma$  = Stefan-Boltzmannova konstanta ( $= 4,903.10^{-9}MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

$R_{so}$  = globální záření ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

$T$  = teplota vzduchu (K)

$e_a$  = Průměrný aktuální tlak vodních par (kPa)

Průměrný aktuální tlak vodních par ( $e_a$ ) získáme takto:

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min}) \frac{RH}{100} + e^\circ(T_{max}) \frac{RH}{100}}{2} \quad (24)$$

Kde:  $RH$  = vlhkost vzduchu (%)

$e^\circ$  = tlak nasycené vodní páry (kPa)

Tlak nasycené vodní páry ( $e^\circ$ ) pro maximální a minimální denní teploty vzduchu získáme:

$$e^\circ(T) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,25T}{T + 237,3}\right) \quad (25)$$

Kde:  $T$  = minimální nebo maximální teplota vzduchu (°C)

#### 4.3.8. Penman-Monteith (1965)

Jedná se o upravenou Penmanovu metodu, která byla jako jediná metoda standardizována a uznána jako výchozí, vědci z FAO, pro výpočet referenční evapotranspirace. Penman-monteithova metoda je kombinovaná metoda, která byla v České republice využita i Tolaszem a kol. (2007) pro zpracování mapových výstupů úhrnu referenční evapotranspirace pro území České republiky – Atlas podnebí Česka. Rovnici pro výpočet lze vyjádřit takto:

$$PET = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)} \quad (26)$$

Kde:  $R_n$  = radiační bilance povrchu ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

$G$  = je tok tepla do půdy ( $MJ.m^{-2}.den^{-1}$ )

$\gamma$  = psychrometrická konstanta

$T$  = průměrná denní teplota (°C)

$u = \text{rychlost větru (m.s}^{-1}\text{)}$

$e_s = \text{tlak nasycené vodní páry (kPa)}$

$e_a = \text{průměrný aktuální tlak vodní páry (kPa)}$

$\Delta = \text{sklon křivky napětí vodních par při dané teplotě vzduchu (kPa.}^\circ\text{C)}$

Tlak nasycené vodní páry ( $e_s$ ) získáme:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{min}) + e^\circ(T_{max})}{2} \quad (27)$$

#### 4.3.9. Trajkovic (2007)

Jedná se o upravenou metodu – Hargreaves-Samani (1985). Udává se, že níže uvedená metoda je vhodná pro použití na velmi vlhkých místech západního Balkánu, a to v případě, že jsou k dispozici pouze údaje o teplotě. Výpočetní metoda má následující tvar:

$$PET = 0,0009384R_a(T_{max} - T_{min})^{0,424}(T + 17,8) \quad (28)$$

Kde:  $R_a = \text{mimozemské záření na horní hranici atmosféry (MJ.m}^{-2}\text{.den}^{-1}\text{)}$

$T = \text{průměrná, minimální a maximální teplota vzduchu (}^\circ\text{C)}$

#### 4.3.10. WMO (1966)

Metoda byla vyvinuta a publikována v roce 1966 pracovní skupinou Světové meteorologické organizace. Snažili se vyvinout metodu, která by byla dobře použitelná pro potřeby plánování v oblasti různých vodohospodářských staveb (např. projektování vodních dopravních kanálů).

$$PET = (1,298 + 0,934u)(e_s - e_a)$$



(29)

*Kde:  $u$  = rychlost větru ( $m.s^{-1}$ )*

*$e_s$  = tlak nasycené vodní páry (kPa)*

*$e_a$  = průměrný aktuální tlak vodní páry (kPa)*

## 5. Výsledky

Jedním z cílů této práce bylo provést analýzu a následnou úpravu dat naměřeného výparu výparoměrem na experimentální ploše na Šumavě. Níže je v kapitole 3.1. v jednotlivých tabulkách prezentovaný průměrný měsíční a celkový měsíční výpar za jednotlivé roky 2009-2018. Dále pak i celková suma za jednotlivé roky. Dále jsou v této kapitole uvedeny minimální a maximální naměřené hodnoty výparu a dále i rozsah naměřených hodnot. Je zde i stručně vypsán počet odstraněných chybných výsledků měření.

Dalším cílem bylo provést porovnání výsledků měření výparoměru s výsledky získanými deseti výpočetními metodami a určení nejvhodnější metody pro výpočet výparu v této lokalitě. V kapitole 3.2. je provedeno grafické porovnání výparu naměřeného na výparoměru vždy s jednou výpočetní metodou za jednotlivé roky v zájmovém období. Dále bylo provedeno porovnání celkového výparu, z kterého byl určený rozdíl mezi výparoměrem a jednotlivými metodami. Následně provedeno porovnání průměrných hodnot naměřeného a vypočítaného výparu. Na závěr bylo provedeno porovnání jednotlivých metod Personovým korelačním koeficientem a analýzou střední čtvercové chyby odhadu (RMSE).

### 5.1. Vyhodnocení dat z výparoměru

V následujících tabulkách jsou prezentovány výsledky, které byly získány měřením výparoměru na experimentální ploše na Šumavě. Tabulky níže prezentují průměrný měsíční výpar, celkový měsíční výpar a celkový sezónní výpar za sledované období, které bylo standardně 6 měsíců (květen-říjen). V letech 2009 a 2012 je z důvodu nedostatku dat sledované období pouze 5 měsíců (červen-říjen) viz tabulka 2.

Tabulka 2 – Průměrný výpar v jednotlivých měsících v jednotlivých sezónách (Červená barva indikuje nekompletní měsíční data. Modrá a žlutá barva značí minimální (modrá) a maximální (žlutá) průměrné hodnoty)

Roky	Průměrný denní výpar v jednotlivých měsících (mm)					
	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen
2009	-	0,57	2,61	2,13	1,29	0,96
2010	3,18	1,60	2,61	1,73	1,12	1,09
2011	2,76	2,61	1,83	2,23	1,10	2,27
2012	-	2,98	2,16	2,50	1,38	1,09
2013	3,19	3,37	2,32	2,01	1,34	1,08
2014	3,11	2,44	2,95	1,98	0,91	1,18
2015	2,71	1,66	2,51	2,02	1,53	1,40
2016	1,33	1,78	2,15	1,94	1,36	1,61
2017	2,40	2,49	2,39	2,26	1,26	0,83
2018	1,93	1,42	2,6	2,88	1,85	1,34

Ve sledovaném období v letech 2009–2018 se průměrný denní výpar v jednotlivých měsících naměřený na výparoměru pohyboval v rozmezí od 0,83 mm (říjen 2017) do 3,37 mm (červen 2013). Z naměřených výsledků bylo odstraněno každý rok několik chybných výsledků, které byly způsobovány například nadměrnými srážkami, vypuštěním a napuštěním výparoměru, anebo nefunkčností měření. Celkem bylo v jednotlivých letech odstraněno následující množství chybných výsledků: 2009 – 22, 2010 – 34, 2011 – 69, 2012 – 4, 2013 – 29, 2014 – 46, 2015 – 22, 2016 – 16, 2017 – 11, 2018 – 38. Nutno ještě uvést, že v červnu v roce 2009 bylo použito pouze 6 výsledků měření na konci měsíce.

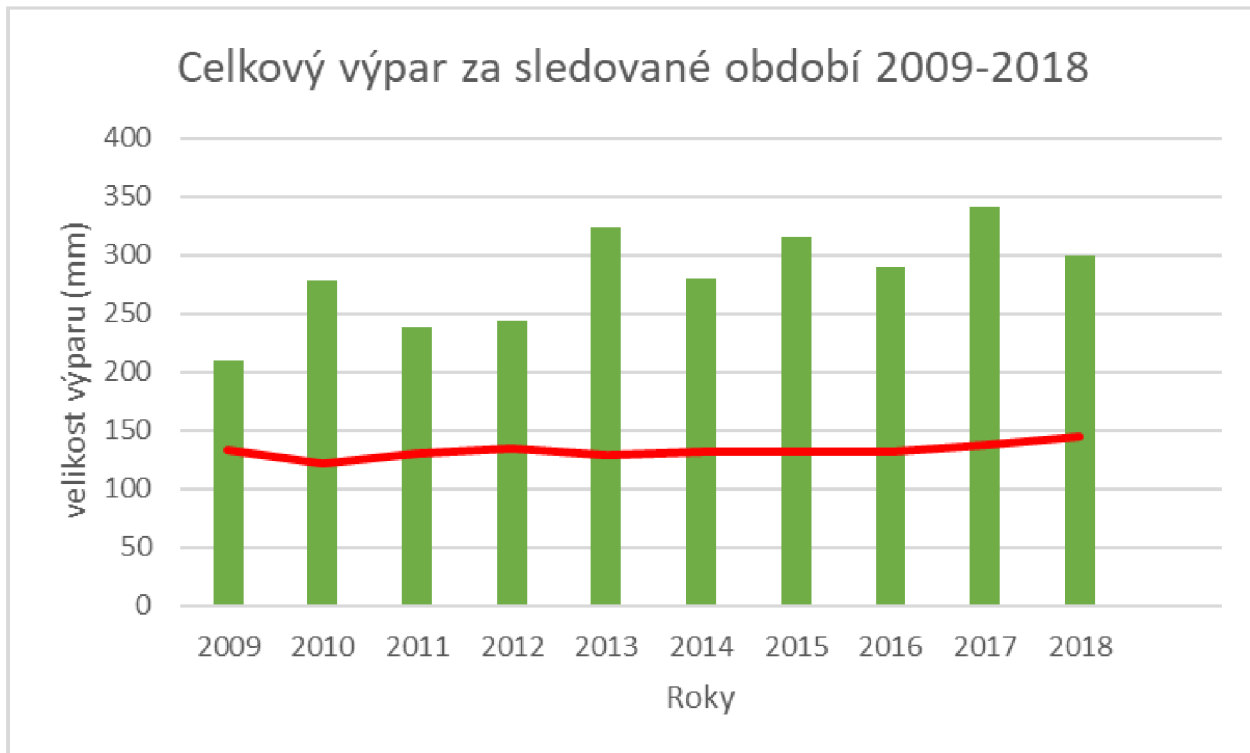
Tabulka 3 – Celkový měsíční výpar a sezónní sumy v letech 2009-2018 (Červená barva indikuje nekompletní měsíční data. Modrá a žlutá barva značí minimální (modrá) a maximální (žlutá) sezónní hodnoty).

Roky	Celkový měsíční výpar (mm)						Celkem (sledované období)
	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	
2009	-	1,7	80,9	65,9	38,7	24,9	209,7
2010	60,5	25,6	78,2	53,6	32,6	27,3	277,8
2011	38,6	44,3	33	47,6	25,3	47,7	238
2012	-	32,8	65	72,4	41,5	32,7	244
2013	57,5	64,1	72	62,4	40,1	28	324
2014	59,1	51,2	62	57,5	21,9	28,2	280

<b>2015</b>	65,1	49,8	58	62,7	41,8	37,7	315
<b>2016</b>	37,3	54,1	67	58,2	38,2	33,9	289
<b>2017</b>	67,2	72,2	74	70,2	37,7	20	341
<b>2018</b>	46,3	25,5	73	80,7	40,7	33,6	300

Z výsledků prezentovaných v tabulce 3 vyplývá, že největší sezónní výpar z výparoměru byl naměřený v roce 2017 (341 mm). Naopak nejmenší výpar byl naměřený v roce 2009 (209,7 mm), ve kterém je ovšem k dispozici nejméně výsledků měření. Dále byl nejmenší úhrn výparu naměřen v roce 2011 (238 mm). Z této tabulky vyplývá, že největší výpar z výparoměru byl zjištěný v červenci roku 2009 (80,9 mm). Dále pak v srpnu 2018 (80,7 mm). Naopak nejnižší hodnoty výparu byly naměřeny v říjnu 2017 (20 mm) a v září 2014 (21,9 mm). K největšímu úhrnu výparu na experimentální ploše docházelo v červenci, a naopak k nejmenšímu úhrnu docházelo v srpnu.

Dále je na obrázku 12 pro představu ještě grafické znázornění celkového výparu v letních sezónách let 2009-2018.



Obrázek 12 – Celkový výpar za jednotlivé období (červená linie v grafu představuje naměřenou průměrnou teplotu v °C, která byla pro možnost prezentace v tomto grafu vynásobena 10).

## 5.2. Porovnání výpočetních metod s výparoměrem

K porovnání výsledků z výpočetních metod s výsledky získanými výparoměrem na experimentální ploše na Šumavě byly použity metody, které byly popsány v kapitole 2.3. Porovnání jednotlivých metod s výparoměrem bylo provedeno s hodnotami v denním, měsíčním a sezónním kroku.

Nejdříve bylo pro celkovou představu průběhu výparu v jednotlivých letech provedeno grafické porovnání výparu naměřeného výparoměrem s výsledky výpočetních metod (viz obrázek 13 - rok 2009 a přílohy 1 až 9 – roky 2010-2018).

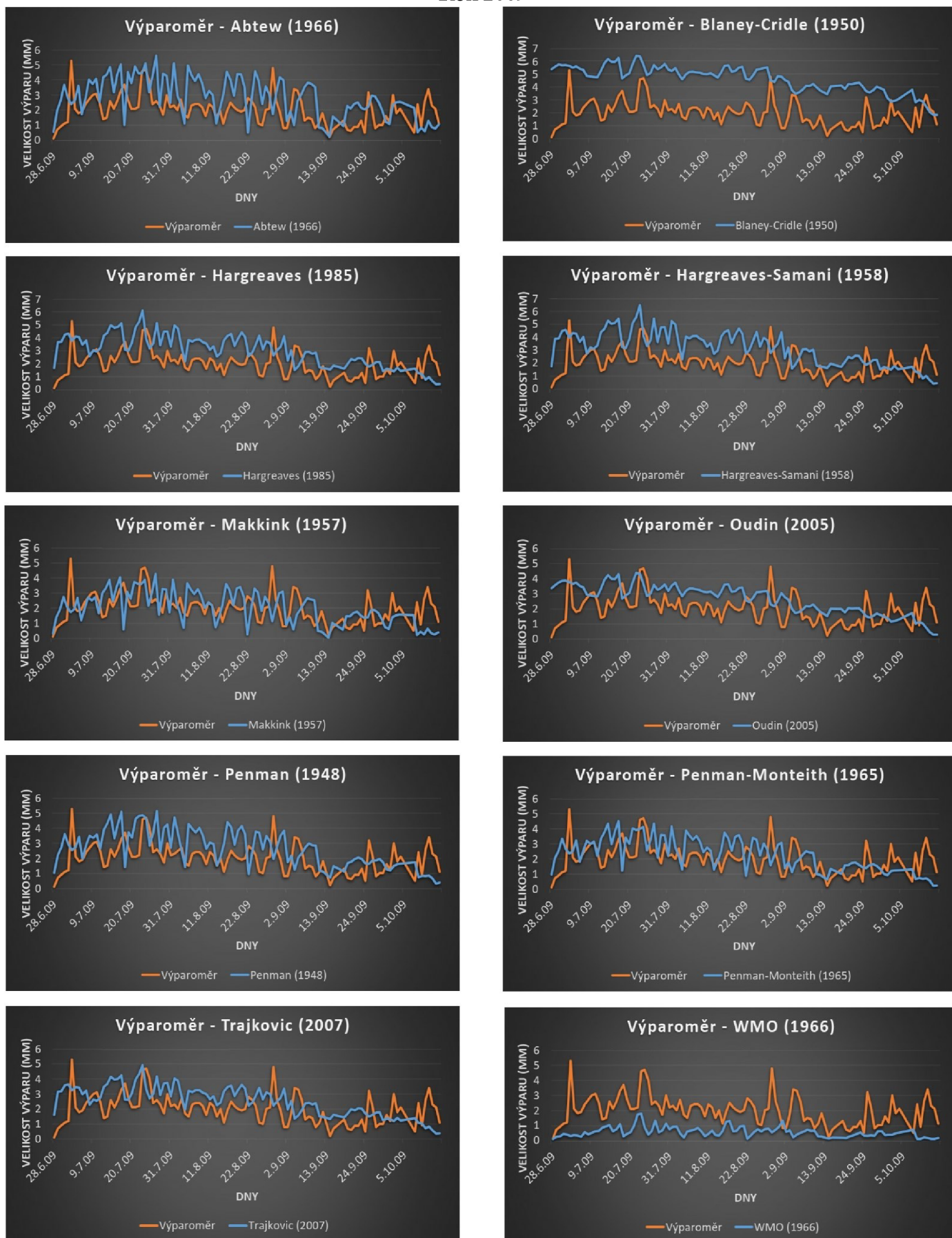
Už z tohoto grafického porovnání je patrné nadhodnocování výparu jednotlivými metodami, kromě metody WMO, kde je patrné naopak výrazné podhodnocování výsledků úhrnu výparu. Dále je z grafického znázornění patrné velmi malé nadhodnocování výsledků Makkinkovou metodou.

V jednotlivých letech 2009-2018 se denní úhrn výparu z výparoměru pohyboval v rozmezí od 0 do 8,9 mm. Níže je v tabulce 4 uvedeno rozmezí zjištěného výparu za celé sledované období.

Tabulka 4 – Rozmezí pozorovaných a vypočtených hodnot denního výparu z vodní hladiny v letech 2009-2018

Metoda	Rozmezí výparu (mm)
Výparoměr	0 – 8,9
Abtew (1966)	0 – 6,6
Blaney-Cridle (1950)	0 – 7,1
Hargreaves (1985)	0 – 8,5
Hargreaves-Samani (1958)	0 – 9
Makkink (1957)	0 – 5,1
Oudin (2005)	0,2 - 5
Penman (1948)	0,3 – 7,7
Penman-Monteith (1965)	0,2 - 6,6
Trajkovic (2007)	0 – 6,6
WMO (1966)	0 – 4,1

## Rok 2009



Obrázek 13 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2009

Bylo provedeno i porovnání celkové sumy výparu za všechny sledované období, u kterých následně došlo k přepočítání těchto hodnot na sezonní výpar, z důvodu možnosti porovnávat výsledky i s jinými lokalitami. Výsledky jsou prezentovány v následující tabulce 5.

*Tabulka 5 – Celkový výpar za sledové období a % rozdíl*

<b>Metoda</b>	<b>Celkový výpar (mm)</b>	<b>Rozdíl (%)</b>
<b>Výparoměr</b>	254,3	0
<b>Abtew (1966)</b>	378,8	49
<b>Blaney-Cridle (1950)</b>	590,3	132,1
<b>Hargreaves (1985)</b>	400,8	57,6
<b>Hargreaves-Samani (1958)</b>	422,3	66,1
<b>Makkink (1957)</b>	<b>265,6</b>	<b>4,5</b>
<b>Oudin (2005)</b>	335,1	31,8
<b>Penman (1948)</b>	375,9	47,8
<b>Penman-Monteith (1965)</b>	321,6	26,5
<b>Trajkovic (2007)</b>	336	32,2
<b>WMO (1966)</b>	102,4	- 59,7

Z výsledků prezentovaných v tabulce 5 vyplývá, že nejlepšího výsledku, při výpočtu celkového výparu za všechny sledované období, dosáhla Makkinkova metoda. Tato metoda výpar nadhodnotila o pouhé 4,5 %. Druhá nejpřesnější metoda výpočtu celkového výparu byla Penman-Monteithova metoda, která dosáhla rozdílu 26,5 %. Skoro všechny metody, kromě metody WMO, celkový výpar za sledové období nadhodnocovaly. Nejvíce celkový výpar nadhodnotila metoda Blaneyho-Cridla, kde byl rozdíl 132,1 %. Jediná metoda WMO výpar podhodnotila o -59,7 %.

Dále bylo provedeno porovnání průměrného denního výparu v sezóně. Nejmenší průměrný výpar z výparoměru byl zjištěn v roce 2016 – 1,7 mm. Největší průměrný výpar z výparoměru byl zjištěn v roce 2014 - 2,5 mm. Průměrný výpar z výparoměru ve sledovaném období 2009-2018 byl 2 mm. Výpočetní metody dosahovaly průměrných hodnot od 0,5 mm (WMO v roce 2010) do 4,7 mm (Blaney-Cridle v letech 2009, 2016, 2017 a 2018). V tabulce 6 je uvedený průměrný výpar za sledované období u jednotlivých metod.

Tabulka 6 – průměrný denní výpar 2009-2018

<b>Metoda</b>	<b>Průměrný denní výpar (mm)</b>
<b>Výparoměr</b>	2
<b>Abtew (1966)</b>	2,9
<b>Blaney-Cridle (1950)</b>	4,6
<b>Hargreaves (1985)</b>	3,1
<b>Hargreaves-Samani (1958)</b>	3,3
<b>Makkink (1957)</b>	<b>2,1</b>
<b>Oudin (2005)</b>	2,6
<b>Penman (1948)</b>	2,9
<b>Penman-Monteith (1965)</b>	2,5
<b>Trajkovic (2007)</b>	2,6
<b>WMO (1966)</b>	0,8

Nejlepšího průměrného výsledku bylo dosaženo metodou dle Makkinka, kde byl průměrný výpar 2,1 mm. Druhá nejpřesnější byla metoda Penman-Monteitha s průměrným výparem 2,5 mm.

Dále bylo provedeno srovnání pomocí korelačního koeficientu za sezónní období každý rok (2009-2018) a celková korelace, kde nejlepšího výsledku v celkovém počtu dosáhla Penmanova metoda, a to celkem ve třech letech – 2009 (0,267), 2014 (0,170), 2015 (0,318). Druhá byla Makkinkova metoda, která dosáhla nejlepšího výsledku ve dvou sezónách – 2012 (0,367), 2013 (0,289). Nejlepšího výsledku ovšem dosáhla metoda Penman-Monteith, kdy v roce 2017 byl výsledek 0,600. Nejlepšího korelačního koeficientu za celé období dosáhla metoda Penman – Monteith a Trajkovicova metoda (viz tabulka 7).



Tabulka 7 – Korelační koeficienty za jednotlivé sezóny a celkem za celé období (žlutá barva značí nejlepší korelaci v jednotlivých sezónách)

Metody	Korelace výparu										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Celková korelace
<b>Abteu (1966)</b>	0,233	0,373	0,105	0,153	0,220	0,151	0,291	0,071	0,563	0,168	0,228
<b>Blaney-Cridle (1950)</b>	0,173	0,418	0,073	0,355	0,264	0,077	0,248	0,120	0,534	0,246	0,235
<b>Hargreaves (1985)</b>	0,235	0,411	0,142	0,315	0,231	0,108	0,282	0,112	0,536	0,259	0,249
<b>Hargreaves-Samani (1958)</b>	0,234	0,411	0,142	0,315	0,229	0,108	0,282	0,112	0,534	0,260	0,248
<b>Makkink (1957)</b>	0,220	0,376	0,102	0,171	0,219	0,137	0,298	0,084	0,562	0,198	0,230
<b>Oudin (2005)</b>	0,199	0,415	0,095	0,367	0,289	0,090	0,256	0,116	0,556	0,246	0,247
<b>Penman (1948)</b>	0,265	0,412	0,119	0,236	0,240	0,170	0,318	0,086	0,592	0,243	0,251
<b>Penman-Monteith (1965)</b>	0,264	0,417	0,118	0,256	0,254	0,153	0,315	0,094	0,600	0,244	0,253
<b>Trajkovic (2007)</b>	0,238	0,418	0,137	0,329	0,247	0,108	0,281	0,112	0,545	0,257	0,253
<b>WMO (1966)</b>	0,210	0,341	0,137	0,097	0,101	0,149	0,303	0,062	0,457	0,248	0,191

Jak již bylo patrné z tabulky 4, obrázku 13 a příloh 1-9, tak denní hodnoty naměřeného výparu vykazují větší proměnlivost než hodnoty získané pomocí výpočtů. Průběh řady výsledků naměřených výparoměrem je tedy velmi rozdílný od průběhů řad vypočítaných jednotlivými metodami. Z tohoto důvodu nemůžou být vysoké ani korelační koeficienty.

Na závěr bylo provedeno porovnání metodou RMSE, ve které bylo provedeno porovnání v denním a sezónním kroku, a dále i za všechny sledované období. Celkově nejlepšího výsledku dosáhla Makkinkova metoda, kde bylo průměrné denní RMSE za

všechny měření 1,13. Makkinkova metoda poskytla nejlepší výsledek i v jednotlivých sezónách roku 2009 (1,29), 2010 (1,32), 2015 (1,47), 2017 (1,12). Makkinkova metoda dosáhla nejlepšího celkového výsledku při výpočtu RMSE za celé sledované období – 1,59 (viz tabulka 8). Nejhorší výsledky byly u většiny metod získány v roce 2014.

Tabulka 8 – RMSE pro jednotlivé metody za sezónu a celé období 2009-2018 (žlutá barva značí nejlepší hodnotu RMSE v jednotlivých sezónách)

Metody	RMSE										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Celkové RMSE
Abtew (1966)	1,69	1,74	2,22	1,89	2,01	2,64	1,89	2,05	1,72	2,26	2,00
Blaney-Cridle (1950)	2,96	2,87	3,04	2,94	2,90	3,20	3,16	3,29	2,94	3,04	3,02
Hargreaves (1985)	1,72	1,72	2,11	1,92	2,14	2,65	2,07	2,11	1,83	2,00	2,01
Hargreaves-Samani (1958)	1,86	1,86	2,23	2,07	2,27	2,73	2,22	2,27	2,01	2,15	2,16
Makkink (1957)	1,29	1,32	1,85	1,49	1,78	2,54	1,47	1,50	1,12	1,58	1,59
Oudin (2005)	1,41	1,39	1,86	1,43	1,69	2,50	1,65	1,66	1,27	1,59	1,63
Penman (1948)	1,50	1,60	2,13	1,71	1,93	2,60	1,95	1,95	1,76	2,78	2,02
Penman-Monteith (1965)	1,29	1,36	1,92	1,47	1,75	2,51	1,58	1,63	1,35	2,28	1,73
Trajkovic (2007)	1,33	1,34	1,83	1,48	1,78	2,49	1,64	1,64	1,32	1,58	1,64
WMO (1966)	1,75	1,64	2,03	1,83	2,20	2,91	1,52	1,47	1,30	1,53	1,81

Celkově lze shrnout, že nejlepšího výsledku, co se týká nejpřesnějšího odhadu výparu ve sledovaných obdobích, dosahovala Makkinkova metoda, která poskytla výsledek celkové sumy výparu oproti reálně naměřenému pouze o 4,5 % vyšší, což se rovná nadhodnocení naměřeného výparu o pouhých 113,3 mm za 10 sezón. Druhého nejlepšího výsledku dosáhla metoda Penman-Monteith, která poskytla celkový rozdíl odhadnutého výparu oproti naměřenému 26,5 %, tedy nadhodnocení o 673,5 mm za 10 sezón.

Makkinkova metoda poskytovala i nejlepší odhad průměrného denního výparu, kde byl rozdíl oproti naměřenému výparu pouhý 0,1 mm. Dále pak i při využití analýza

RMSE poskytla nejlepší výsledky s Makkinkovou metodou. Pouze v případě porovnání korelačním koeficientem, kde nejlepšího výsledku v jednotlivých sezónách dosáhla Penmanova metoda. Makkinkova metoda byla až druhá nejlepší. Ovšem úplně nejlepšího výsledku korelačním koeficientem dosáhla metoda Penman-Monteith v roce 2017 s výsledkem 0,600.

Z prezentovaných výsledků lze zhodnotit, že nejlepší metoda pro odhad výparu na experimentální ploše na Šumavě je radiační metoda - Makkink. Dále pak dosahovaly dobrého výsledku i metody Penman (dle korelačního koeficientu) a Penman-Monteith.

## 6. Diskuse

Průměrný denní výpar naměřený výparoměrem umístěným na experimentální ploše v Šumavském podhůří cirka 2 km od centra obce Zdíkov činil za všechny sledované období (květen-říjen v letech 2009-2018) 2 mm/den. Celkový výpar za jednotlivé sezóny byl naměřen v rozmezí od 209,7 mm do 341 mm. Šuhájková (2020) ve svém článku prezentuje výsledky naměřeného výparu na výparoměrech Výzkumného ústavu vodohospodářského (VÚV), které se nacházejí na lokalitách Podbaba a Hlasivo. Na stanici v Podbabě byl naměřen úhrn denního výparu (v sezónách červen-říjen 2018 a květen-říjen 2019) 2,59 mm a celková suma výparu byla v roce 2018 - 436,8 mm a 443,6 mm v roce 2019. Na stanici Hlasivo činil denní výpar 3,32 mm. Celková suma byla v roce 2018 - 522,6 mm a v roce 2019 - 593,6 mm. Tento velký rozdíl mezi naměřenými denními úhrny výparu a celkovou sumou výparu na stanicích VÚV a na experimentální ploše může být způsobený rozdílnými meteorologickými podmínkami na jednotlivých lokalitách. Průměrná denní teplota na lokalitě v Podbabě byla 17,6 °C a na lokalitě Hlasivo 15,69 °C. Oproti tomu na lokalitě na Šumavě byla průměrná denní teplota ve sledovaných obdobích jen 13,3 °C. Dále byla na jednotlivých lokalitách rozdílná i průměrná rychlost větru: Podbaba – 0,63 m/s, Hlasivo – 1,34 m/s a Šumava 0,3 m/s. Je tedy zcela evidentní, že nižší úhrn výparu je způsobený specifickými podmínkami v lokalitě na Šumavě.

Knozová a kol. (2005) porovnávala výsledky měření výparu na výparoměru GGI – 3000, s výparem vypočítaným dle metodiky FAO. Data z výparoměru pocházely z 8 stanic ČHMÚ za období květen-září 1971–2000. Knozová a kol. (2005) v článku uvádějí, že nejmenšího průměrného výparu bylo ve sledovaném období dosahováno na nejvýše položené stanici ve Svratouchu, který se nachází 737 m.n.m. Průměrný úhrn výparu na této lokalitě z výparoměru GGI – 3000 činil 2,1 mm. Tuto skutečnost odůvodňuje nižší teplotou vzduchu a větší rychlostí proudění větru. Toto tvrzení je ovšem v rozporu s porovnáním výše, kde byla na Šumavě naměřena nižší průměrná rychlost větru než na stanicích Podbaba a Hlasivo, jak uvádí Šuhájková (2020). Dále je ovšem v souladu s průměrným denním naměřeným výparem, který byl na Šumavě (830 m.n.m.) 2 mm, tedy experimentální plocha je ještě výše položená a naměřený výpar je o 0,1 mm menší než na stanici Svratouchy.

Tolasz (2007) v atlasu podnebí Česka pro tuto oblast uvádí výsledný celkový roční úhrn v rozmezí 550–600 mm. Dále uvádí, že úhrn výparu se s rostoucí nadmořskou výškou zmenšuje a že průměrné měsíční úhrny v nadmořské výšce nad 800 m.n.m se v rozmezí měsíců květen–říjen pohybují v rozpětí cirká 30–90 mm s nejvyšší hodnotou v červenci. Toto tvrzení je v souladu s výsledky získanými v této práci, jelikož bylo zjištěno, že úhrn výparu v jednotlivých měsících květen–říjen se pohybuje v rozmezí 20 - 80, 9 mm a že k největšímu úhrnu výparu opravdu dochází v červenci. Celkem byl největší úhrn v červenci naměřen v roce 2009, 2010, 2013, 2014, 2016, 2017, tedy 6krát z 10 sledovaných období.

V této práci bylo porovnáno deset výpočetních metod, které zastupovaly všechny metody výpočtu dle použitých vstupních meteorologických dat. Skoro všechny metody výsledný výpar nadhodnocovaly (kromě metody WMO). Nejvíce z testovaných metod výpar nadhodnotila metoda Blaneyho-Criddla, která celkový výpar nadhodnotila o 132,1 %. Podobného výsledku dosáhnul Bednář a kol. (2022), který mezi sebou porovnával 4 metody pro výpočet potencionální evapotranspirace. Jednalo se o metody: Blaney-Criddle, Hargreaves, Turc a Thornthwaite. Celkový vypočítaný úhrn výparu porovnával s referenční hodnotou výparu pro danou oblast uvedenou v atlasu podnebí Česka. Z jeho výsledků vyplývá, že metoda Blaneyho-Criddla celkový úhrn výparu nadhodnotila ze všech 4 metod nejvíce, a to o 76,83 %. Tyto výsledky mohou být způsobeny tím, že se jedná o velmi jednoduchou metodu, která k výpočtu používá pouze průměrnou denní teplotu a dobu slunečního svitu, a pravděpodobně proto poskytuje nejhorší výsledky ze všech testovaných metod. Tuto metodu tedy nelze doporučit pro využívání pro jiné lokality, než pro kterou byla vynalezena.

Knozová a kol. (2005) ve svém srovnání modifikované výpočetní metody dle FAO s výparoměry GGI – 3000 uvádí, že průběhy naměřeného a vypočítaného výparu jsou rozdílné, že výpočetní metoda výpar nadhodnocuje, a že korelační koeficienty jsou mezi nimi tedy nízké – od 0,65 do 0,74. To korelačními koeficienty v této práci bylo dosaženo mnohem horšího výsledku, kdy v roce nejnižšího korelačního koeficientu bylo dosaženo výsledku 0,17 (v roce 2014). Nejlepšího výsledku bylo dosaženo metodou Penman-Montheith v roce 2017 – 0,60. Lze ale souhlasit s tvrzením, kdy Knozová a kol. (2005) uvádějí, že nízký korelační koeficient je

způsobený průběhem naměřeného výparu, který vykazuje větší proměnlivost oproti výsledkům získaných výpočtem.

Nejlépších výsledků v této práci bylo dosahováno Makkinkovou metodou, která nejméně nadhodnocovala celkový naměřený výpar a dále poskytla nejlepší výsledky i při použití RMSE. Bogawski a Bednorz (2014) prezentovali obecně lepší úspěšnost radiačně založených metod při porovnání sedmnácti metod na třech stanicích v Polsku. Makkinkovu metodu hodnotí jako nejvhodnější ve své studii i Lang a kol. (2017), kteří porovnávali mezi sebou rovnici Penman-Monteith s osmi dalšími metodami (Makkink, Abtew, Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Thornthwaite, Hamon, Linacre a Blaney-Criddle). Porovnání proběhlo pro oblast v jihozápadní Číně. Makkinkova metoda poskytla málo chyb a poskytovala vysokou korelaci s metodou Penman-Monteith. Na vysokou korelaci s metodou Penman-Monteith upozorňuje ve své studii i Tukimat a kol. (2012), kteří prováděli srovnání na lokalitě v Malajsii. V této práci byla korelace všech použitých metod s výsledky naměřenými výparoměrem velmi nízká a Makkinkova metoda poskytovala jednu z nejhorších korelací. Dále lze uvést, že Lang a kol. (2017) ve své studii vyhodnotili jako nejhorší metodu Blaney-Criddle. Na velký rozptyl výsledků jednotlivých metod upozornila v podmínkách střední Evropy Bormann (2011) při porovnání osmnácti metod na šesti německých stanicích.

Ovšem i Makkinkova metoda se v některých lokalitách může jevit jako zcela nevhodná. Například Lu a kol. (2007) porovnávali mezi sebou několik metod (Thornthwaite, Hamon a Hargreaves-Samani, Turc, Makkink a Priestley-Taylor) na jihovýchodě Spojených států. Z výsledků prezentovaných v této studii vyplynulo, že nejhoršího výsledku odhadu výparu dosahovali metody Makkink, Turc a Priestley-Taylor. Opět se tedy potvrzuje, že výběr vhodné metody záleží vždy na dané lokalitě, a že neexistuje univerzální metoda, která by se dala (bez úprav) použít kdekoliv, resp., která by kdekoliv poskytla dobré výsledky odhadu výparu.

Porovnávání různých metod výpočtu výparu mezi sebou je velmi časté, a je tedy i velké množství studií na toto téma. Kdy každá jednotlivá studie je zaměřena na specifickou zájmovou oblast. Tato práce ale mezi sebou porovnává naměřené hodnoty na výparoměru s deseti různými výpočetními metodami, což již tak časté není.

## 7. Závěr a přínos práce

Měřením pomocí výparoměru bylo zjištěno, že celková velikost úhrnu výparu za jednotlivé sezóny byla od 209,7 mm (2009) do 341 mm (2017). Ve sledovaných sezónách se naměřený denní úhrn výparu pohyboval v rozmezí od 0 do 8,9 mm/den. Průměrný denní úhrn výparu za všechny sledované sezóny byl 2 mm. Nejmenší průměrný měsíční úhrn výparu byl naměřený v říjnu 2017 (0,83 mm) a největší průměrný měsíční úhrn výparu v červnu 2013 (3,37 mm).

Z výsledků prezentovaných v této práci vyplývá, že nejpřesnější odhad velikosti úhrnu výparu poskytla Makkinkova metoda, která výpar oproti výsledkům naměřených výparoměrem nadhodnotila o pouhé 4,5 %. Makkinkova metoda poskytla i nejlepší výsledek zjištěného průměrného denního výparu, který činil 2,1 mm (výparoměr 2 mm). I dle hodnocení metodou RMSE dosahovala Makkinkova metoda nejlepších výsledků. Např. RMSE za celé sledované období bylo 1,59. Nejhoršího výsledku dosáhla metoda Blaney-Cridle, která celkový výpar nadhodnotila o 132,1 % a průměrný denní výpar byl odhadnut na 4,6 mm. Metodu Blaney-Cridle lze tedy zhodnotit jako zcela nevhodnou pro odhadování úhrnu výparu z podobných lokalit. Korelační analýza poukázala na obecně velmi malé korelace mezi pozorovaným a vypočteným výparem. Pearsonův korelační koeficient se obvykle pohyboval v rozmezí 0,2 až 0,3 a pouze ve vybraných letech překročil 0,5. Všechny metody dosahovaly obdobných hodnot korelačního koeficientu. Z této práce dále vyplývá, že všechny metody, tedy kromě metody WMO, výpar na zájmové ploše na Šumavě nadhodnocují.

Velkým přínosem této práce je to, že poskytuje detailní přehled o výsledcích 10 použitých metod za sledované období 10 let a může tak být využita i k výběru nejvhodnější metody pro odhad výparu z volné vodní hladiny na podobných místech v České republice i ve světě. Tato práce poukázala i na skutečnost, že i když má vypočítaný denní úhrn výparu rozlišný průběh oproti naměřenému výparu, tak můžeme i s těmito metodami dosáhnout velmi přesného odhadu výparu. Dalším výrazným přínosem této práce je analýza a úprava velkého množství dat získaných výparoměrem na experimentální ploše na Šumavě, které lze prezentovat jako skutečný úhrn výparu v této lokalitě za období od roku 2009 až 2018.

Jako další krok v této práci by mohlo následovat porovnání výsledků s dalšími výpočetními metodami a dále by se mohla provést úprava jednotlivých parametrů u vzorců z použitých metod, aby bylo docíleno lepších výsledků odhadu výparu z experimentální plochy na Šumavě.



## 8. Přehled literatury a použitých zdrojů

1. Abtew, W., (1996): Evapotranspiration measurements and methoding for three wetland systems in South Florida. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 32 (3), s. 465–473.
2. Acevodo, E., (1975): The growth of maize under field conditions as affected by its water relations. PhD Thesis, Univ. of Calif., Davis., s. 114-122.
3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith M., (1998): *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, s. 300.
4. Arellano, M.G., Irmak, S., (2016): Reference (potential) evapotranspiration. I: Comparison of temperature, radiation, and combination-based energy balance equations in humid, subhumid, arid, semiarid, and mediterranean-type climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, s. 142.
5. Blaney, H. F., Criddle, W. D., (1950): *Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data*. Soil Conservation Service Technical Paper 96, Soil Conservation Service, Washington, USA, s. 48.
6. Bogawski, P., Bednorz, E., (2014): Comparison and Validation of Selected Evapotranspiration Models for Conditions in Poland (Central Europe). *Water Resources Management*, 28, s. 5021-5038.
7. Bormann, H. (2011): Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. *Climatic Change*, 104, s. 729-753.
8. Dalton, J., (1802): *Experimental Essays on the Constitution of Mixed Gases: On the Force of Steam or Vapour from Water or Other Liquids in Different Temperatures, Both in a Torricelli Vacuum and in Air; on Evaporation; and on Expansion of Gases by Heat*. *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester*, s. 536-602.

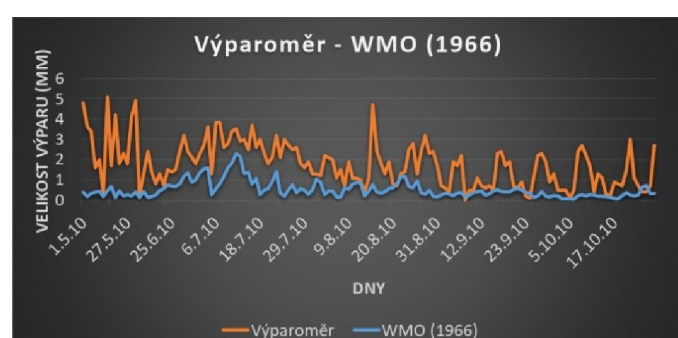
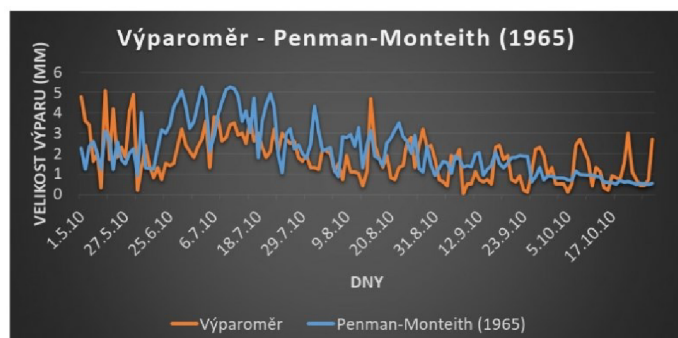
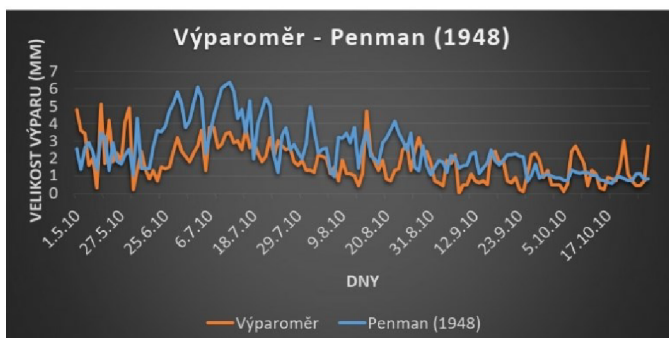
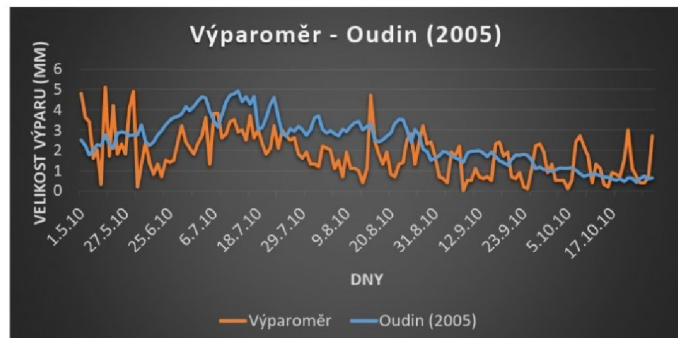
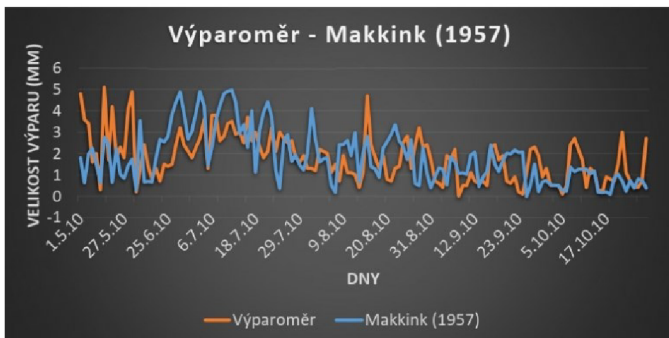
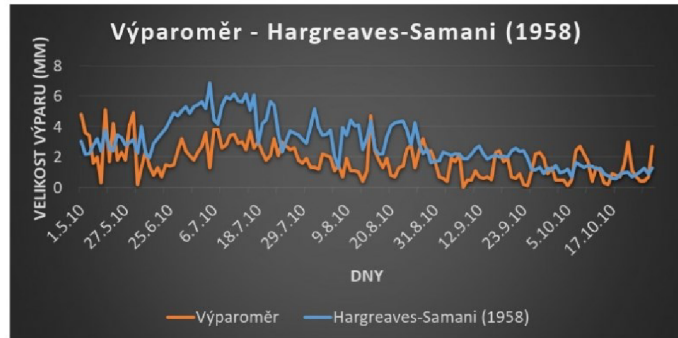
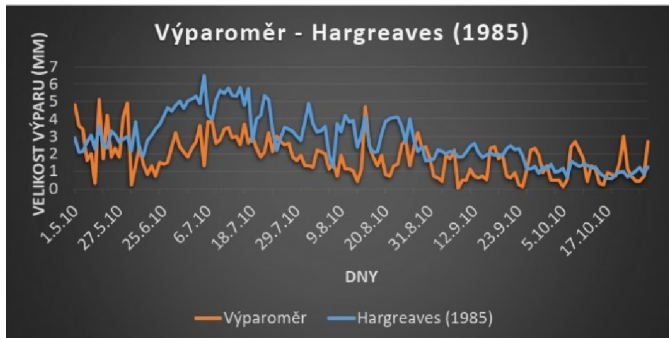
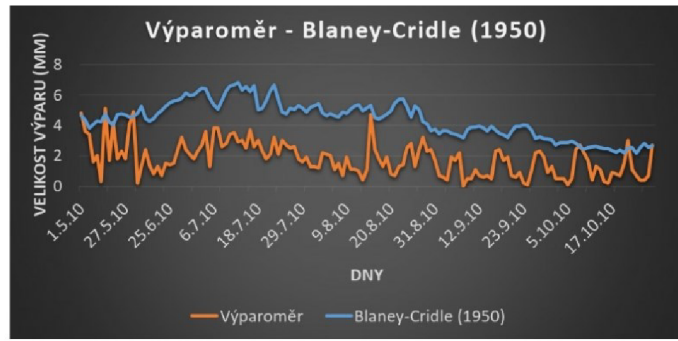
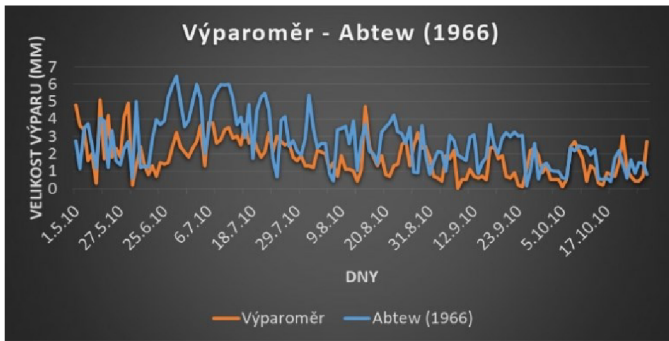
9. Davin, E. L., Seneviratne, S. I., Wang, T., (2014): Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (27), s. 9757-9761.
10. Dingman S. L., (2015): *Physical Hydrology: Third Edition*, Waveland Press, Illinois, s. 657.
11. Djaman, K., Balde, A. B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M. K., Manneh, B., Moukoumbi, Y. D., Futakuchi, K., Saito, K., (2015): Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, s. 139-159.
12. Djaman, K., O'Neill, M., Diop, L., Bodian, A., Allen, S., Koudahe, K., Lombard, K., (2019): Evaluation of the Penman-Monteith and other 34 reference evapotranspiration equations under limited data in a semiarid dry climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, s. 729-743.
13. Dufková, R., (2003): Porovnání hodnot aktuální evapotranspirace travního porostu získaných třemi různými metodami. *Acta Hydrologica Slovaca*, 4 (2), s. 323–330.
14. Fišák, J., (1994): Metodický předpis č. 11a: Návod pro pozorovatele srážkoměrných stanic ČHMÚ. 3. přepracované vyd. Praha: ČHMÚ, s. 62.
15. Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., Riley, J. P., (1985): Irrigation Water Requirements for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111 (3), s. 265-275.
16. Hargreaves, G. L., Samani, Z. A., (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1 (2), s. 96–99.
17. Hargreaves, G. H., Allen, R. G., (2003): History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drain Engineering*, 129, s. 53-63.
18. Ivanov L.A., Silina A.A., Tsel'niker Y.L. (1950): Rapid weighing method for determining transpiration under natural conditions. *Botanicheskii Zhurnal* 35, s. 171-85.

19. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, (2022): Stanovení rychlosti fotosyntézy a transpirace v terénu. Pedagogická fakulta, České Budějovice, s. 4.
20. Kemel, M., (1996): Klimatologie, meteorologie, hydrologie. Vydavatelství ČVUT, Praha, s. 82-89.
21. Knozová, G., Rožnovský, R., Kohut, M., (2005): Srovnání časových řad výparu naměřeného výparoměrem GGI – 3000 a vypočítaného podle metodiky FAO. In.: Rožnovský, J., Litschmann, T. (2005): „Bioklimatologie současnosti a budoucnosti“, Křtiny, ISBN 80-86 690–31-08.
22. Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., Zhang, M., (2017): A comparative study of potential evapotranspiration by eight methods with FAO Penman-Monteith method in Southwestern China. *Water*, 9 (18), s. 734.
23. Lee, R., (1980): *Forest Hydrology*. New York: Columbia University Press, s. 350.
24. Li, M., Chu, R., Islam, A. R. Md. T., Shen, S., (2018): Reference evapotranspiration variation analysis and its approaches evaluation of 13 empirical models in sub-humid and humid regions: A case study of the Huai River Basin, Eastern China. *Water*, 10 (493), s. 22.
25. Lu, J.; Sun, G.; McNulty, S.G., (2005): Amatya, D.M. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 41, s 621–633.
26. Makkink, G. F., (1957): Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Eng.* 11, s. 277–288.
27. McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Peel, M. C., (2016): Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. *WIREs Water*, 3, s. 788-818.
28. Mees, F., Singer, A., (2006): Surface crusts on soils/sediments of the southern Aral Sea basin, Uzbekistan. *Geoderma*, 136 (1-2), s. 152-159.

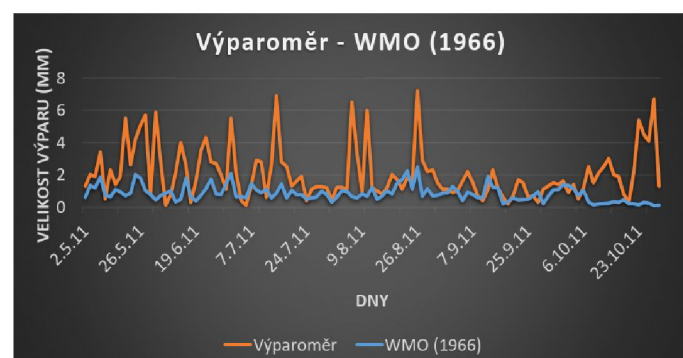
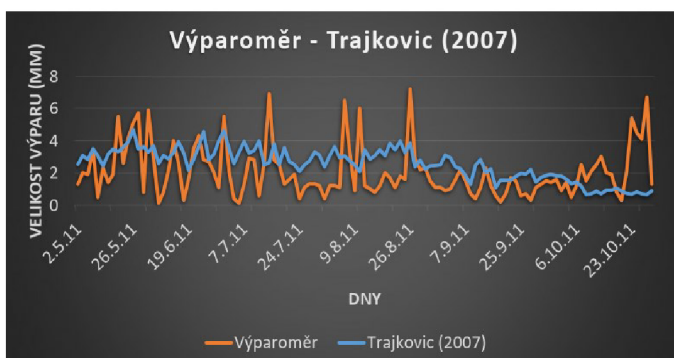
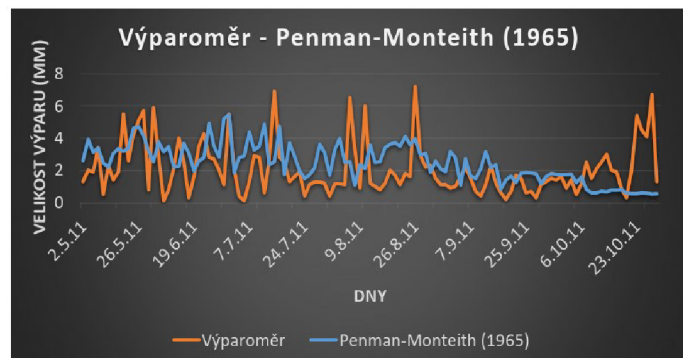
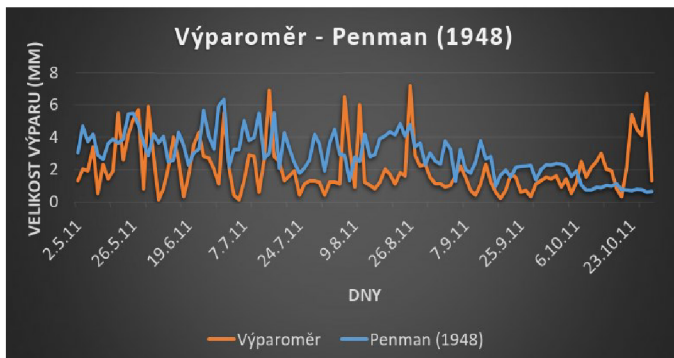
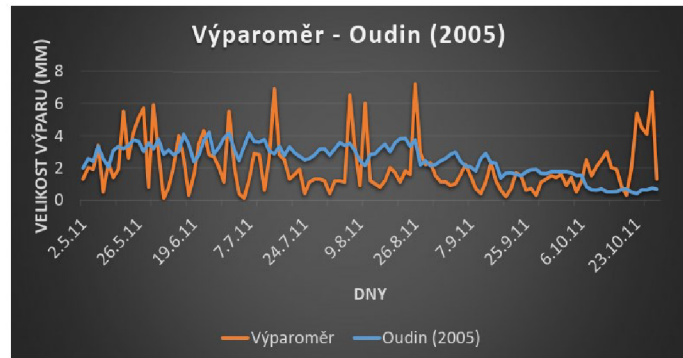
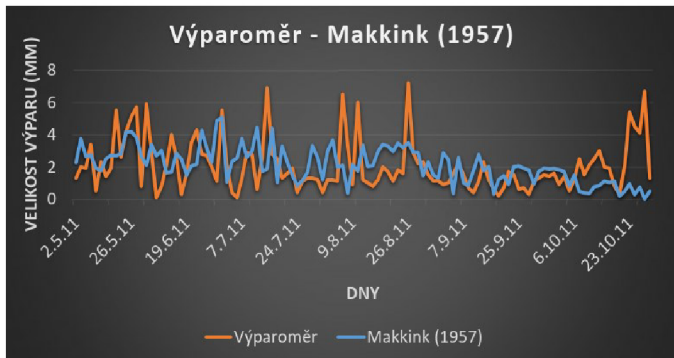
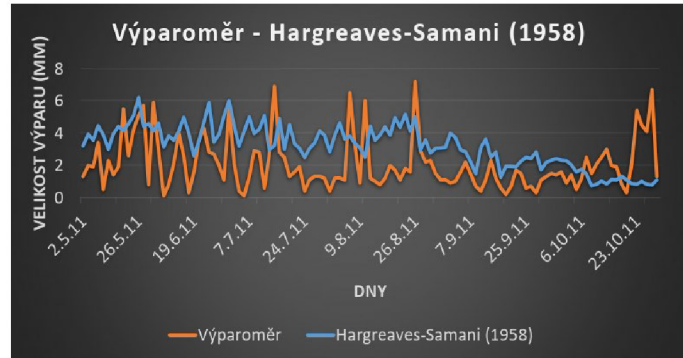
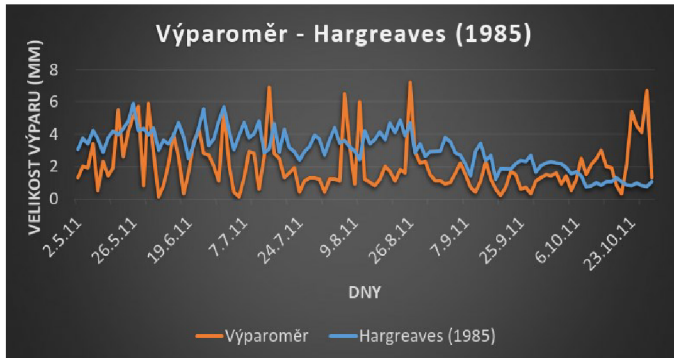
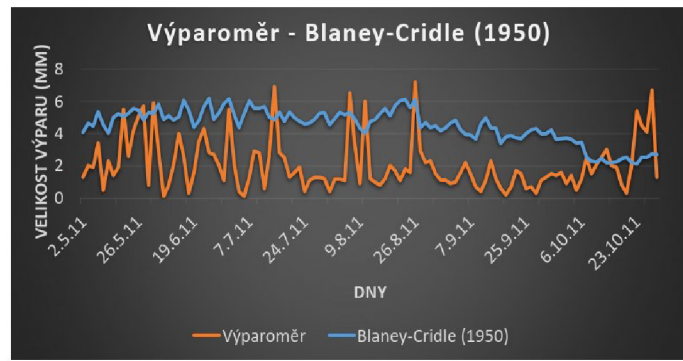
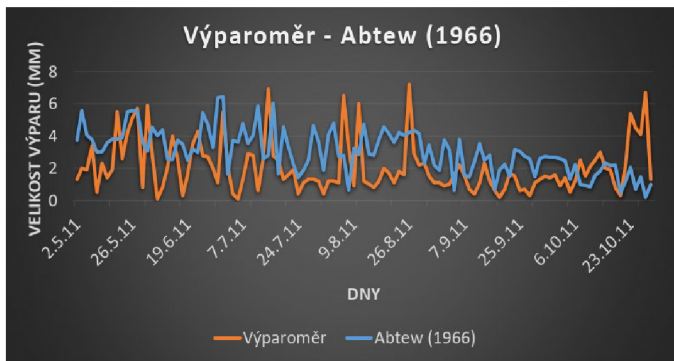
29. Monteith, J.L., (1965): Evaporation and environment. Symp. Soc. Exp. Biol. 19, s. 205-224.
30. Možný, M., (2003): Automatizace měření výparu z volné vodní hladiny. Meteorol.Zpr., 56 (5), s. 150-155.
31. Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3), s. 282-290.
32. Neriah, B. A., Assouline, S., Shavit, U., Weisbrod, N., (2014): Impact of ambient conditions on evaporation from porous media. Water Resources Research, 50 (8), s. 6696-6712.
33. Novák, V., (1995): Vyparovanie vody v prírode a metody jeho určovania, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, s. 253.
34. Oki, T., Kanae, Š., (2006): Global Hydrological Cycles and World Water Resources, Science, 313, s. 1068–1072
35. Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C., (2005): Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model. Part 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. J. Hydrol. 303 (1-4), s. 290–306.
36. Penman, H. C., (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London Ser. A 193, s. 120–145.
37. Rao, B. B., Sandeep, V. M., Chowdary, P. S., Pramod, V. P., Rao, V. U. M., (2013): Reference crop evapotranspiration over India: A comparison of estimates from open pan with Penman-Monteith method. Journal of Agrometeorology, 15(2), s. 108-114.
38. Rožnovský, J., Litchmann, T., (2005): Srovnání Výpočetních Metod Potenciální Evapotranspirace, Seminář Evaporace a evapotranspirace, Brno, s. 47-58.
39. Shaw, E. M. Beven, K. J., Chappell, N. A., Lamb, R., (2011): Hydrology in Practice, Fourth Edition, Spon Press, s. 546.

40. Steppe, K., De Pauw, D.J.W., Doody, T.M., Teskey, R.O., (2010): A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods *Agric. For. Meteorol.*, 150, s. 1046-1056.
41. Tabari, H., Grismer, M. E., Trajkovic, S., (2013): Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31, s. 107-117.
42. Tolasz, R., (2007): Atlas podnebí Česka, Český hydrometeorologický ústav, Praha, s. 256.
43. Trajkovic, S., (2007): Hargreaves versus Penman—Monteith under humid condition. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, s. 38–42.
44. Tukimat, N.N.A., Harun, S., Shahid, S., (2012): Comparison of different methods in estimating potential evapotranspiration at Muda Irrigation Scheme of Malaysia. *J. Agric. Rural Dev. Trop. Subtrop.*, 113, s. 77–85.
45. WMO, (1966): Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Tech. Pap. (CIMO–Rep) 83, s. 121.
46. Xiang, K., Li, Y., Horton, R., Feng, H., 2020. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. *Agricultural Water Management*, 232, s. 16.
47. Xu C.-Z., Singh, V. P., (2000): Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation, *Hydrological Processes* 14, s. 339-349.

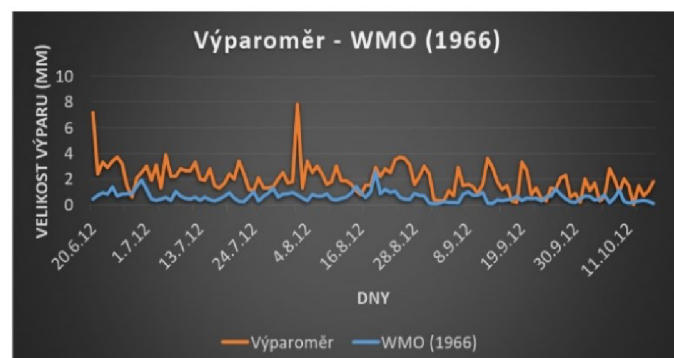
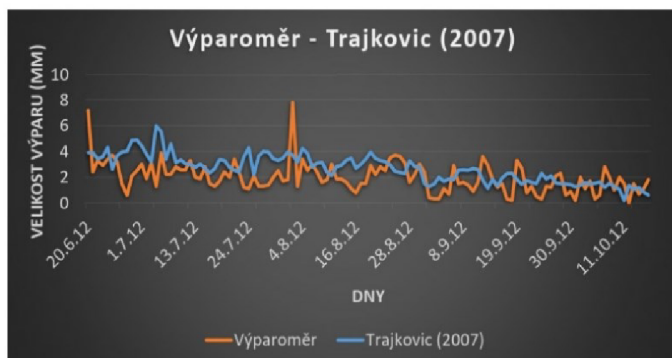
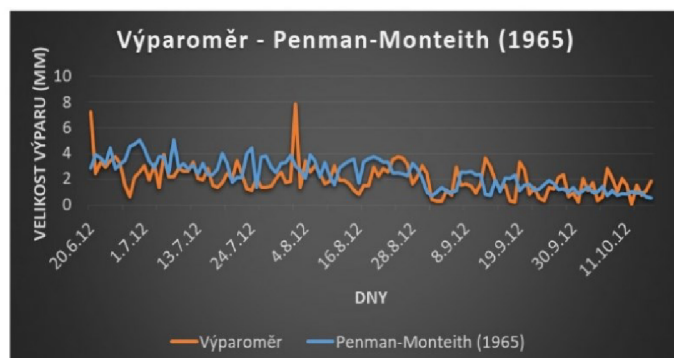
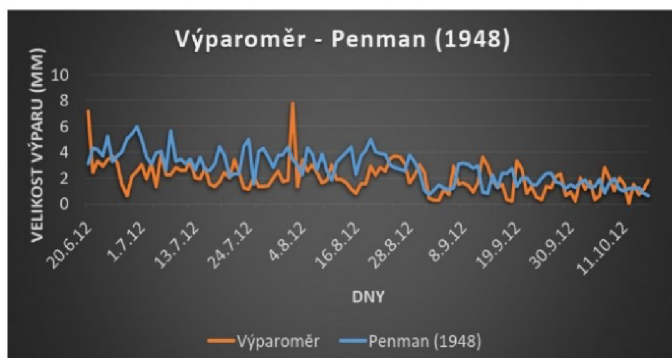
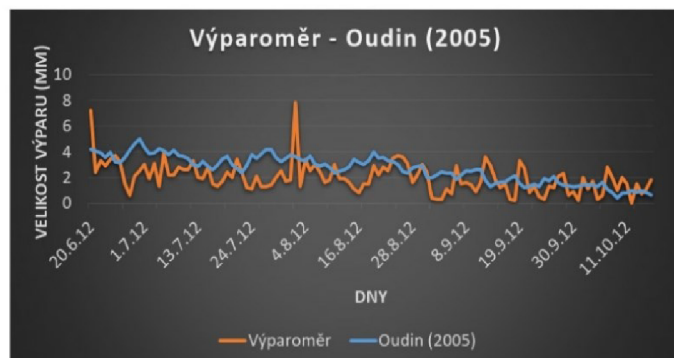
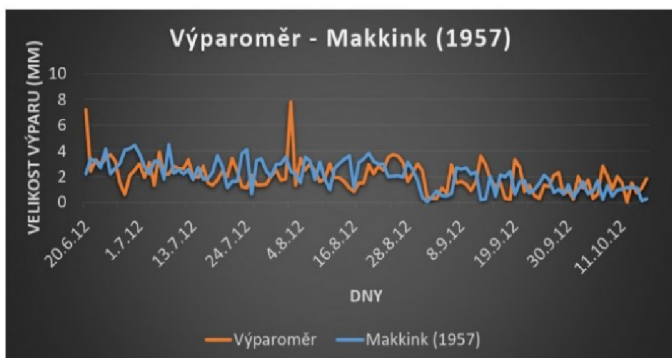
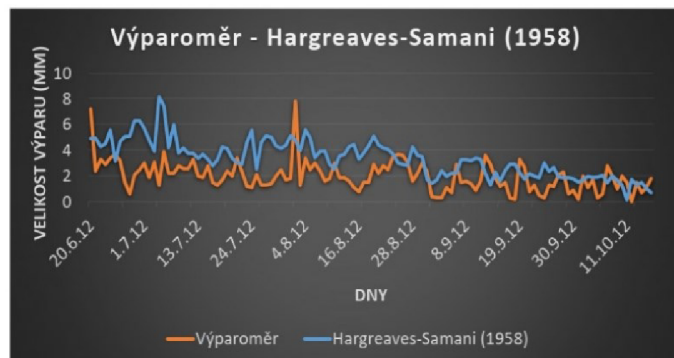
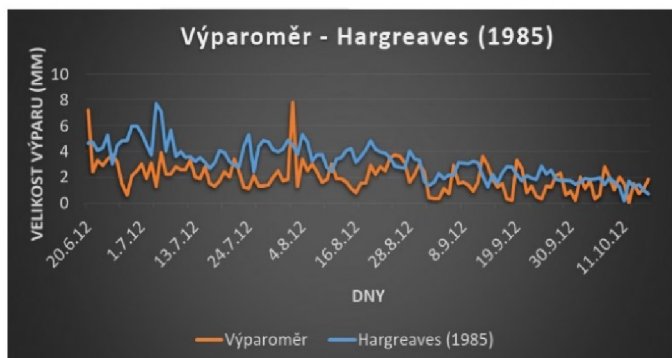
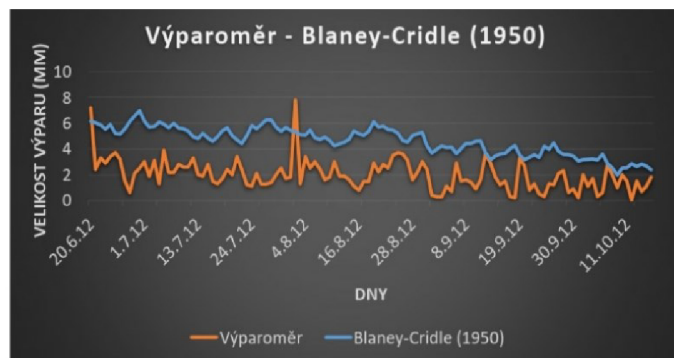
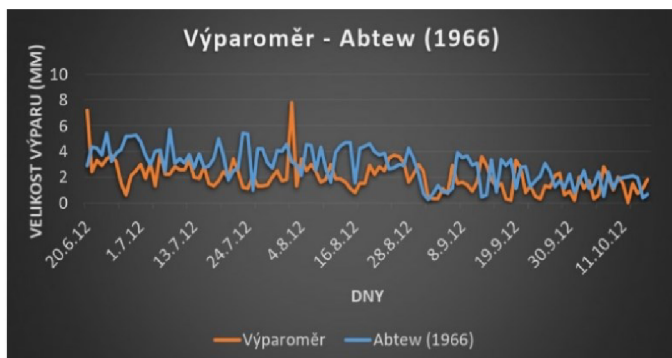
## 9. Přílohy



*Příloha 1 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2010*

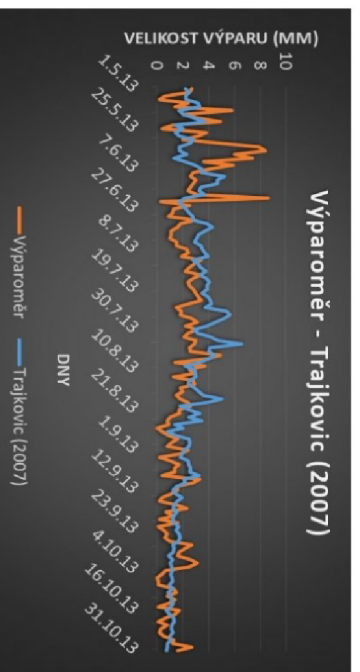
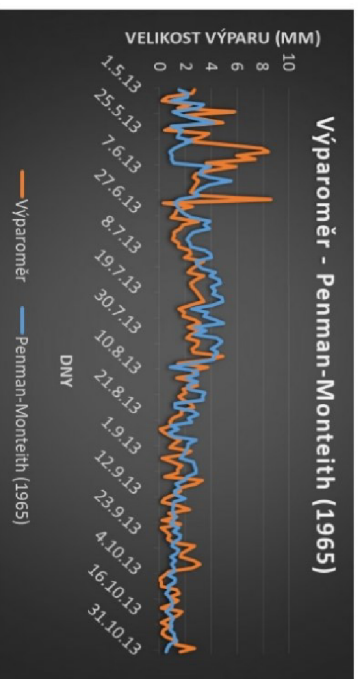
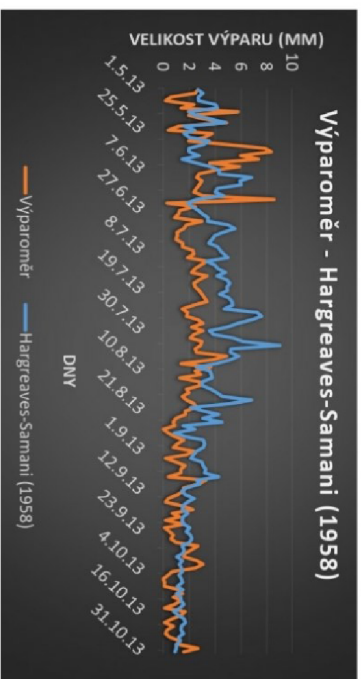


**Příloha 2 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2011**

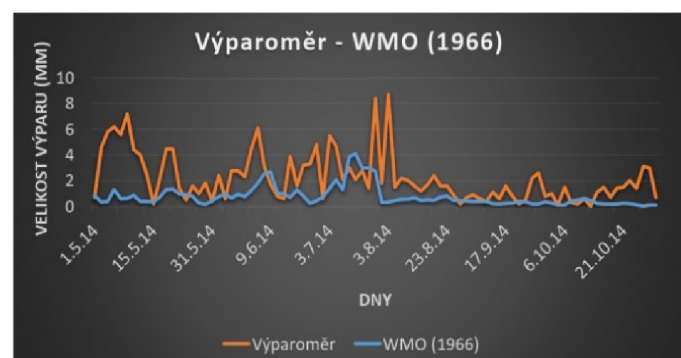
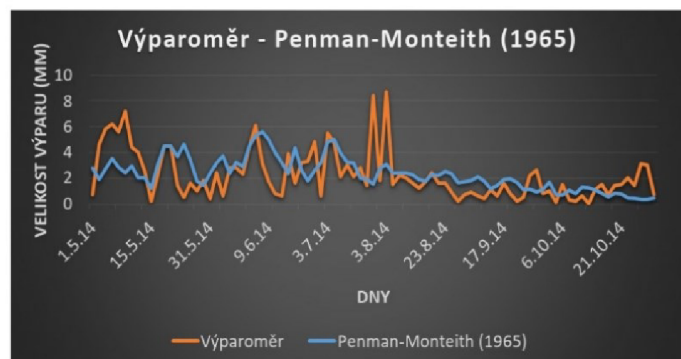
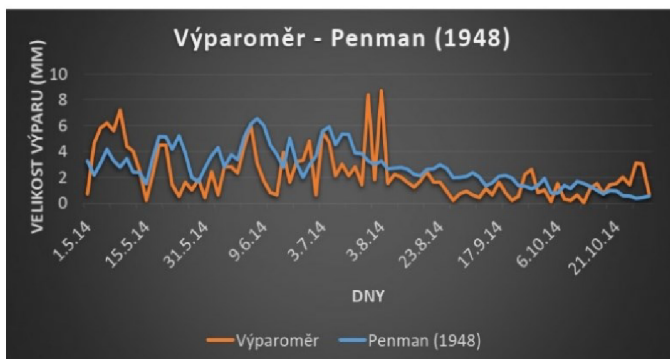
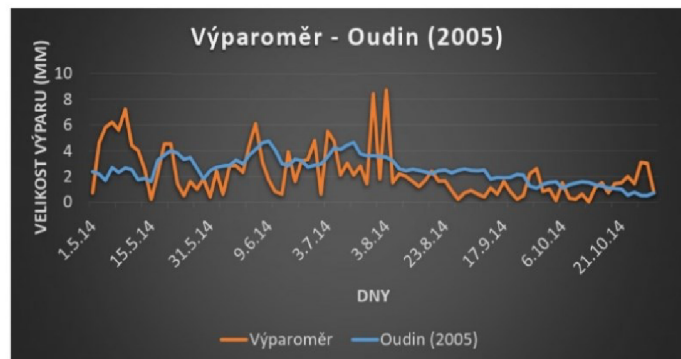
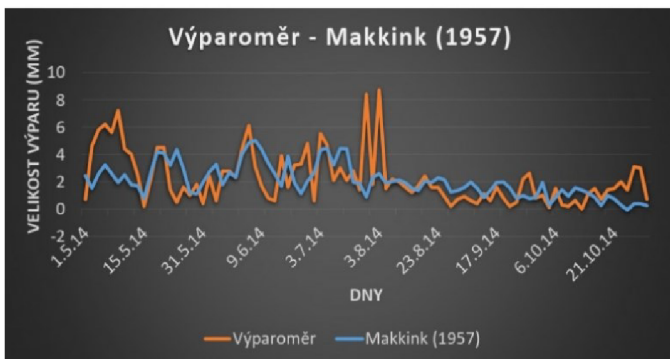
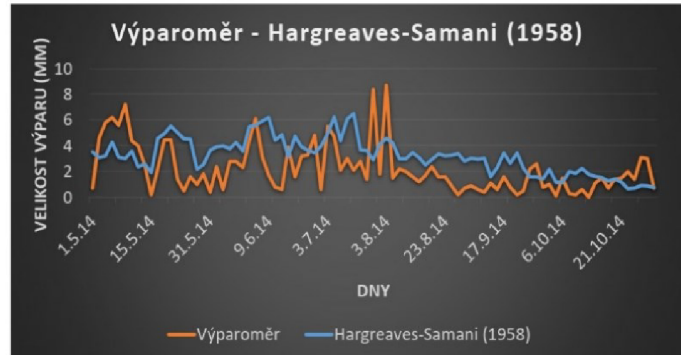
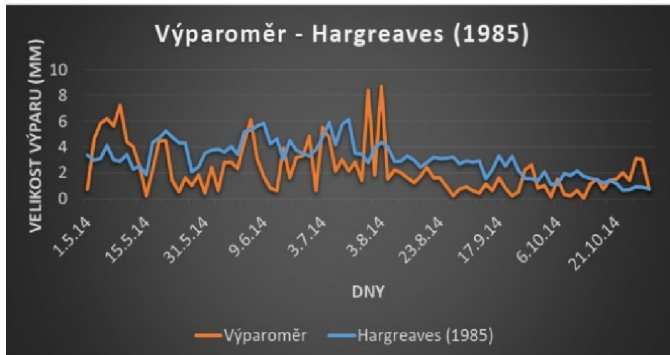
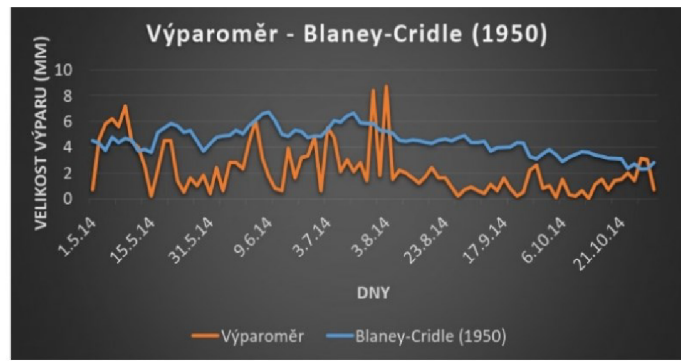
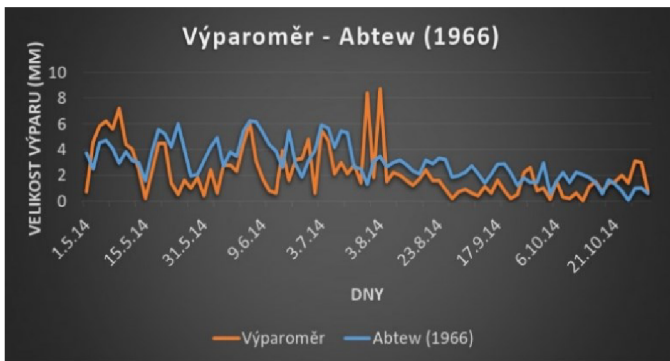


*Příloha 3 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2012*

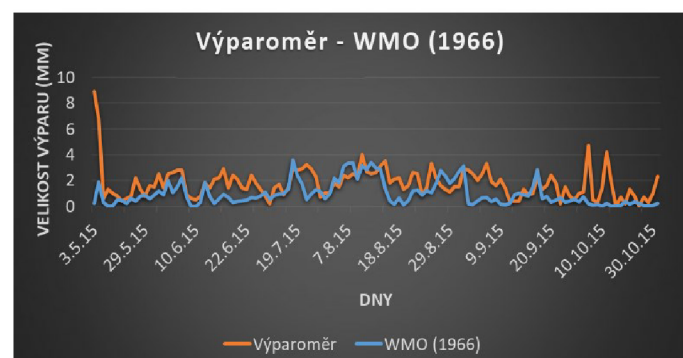
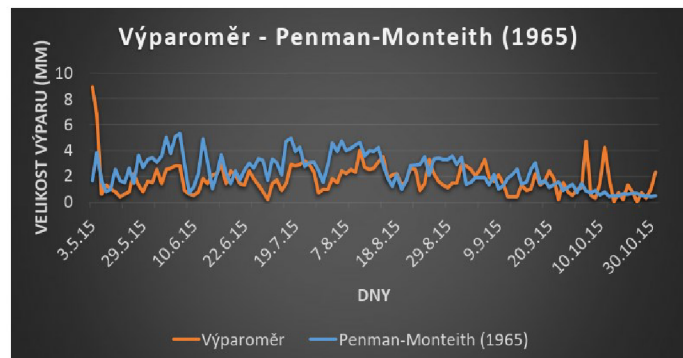
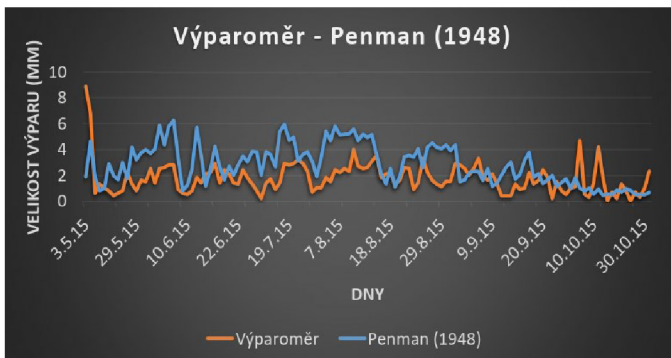
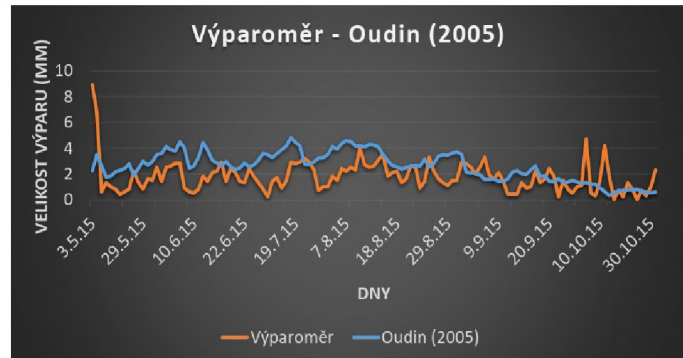
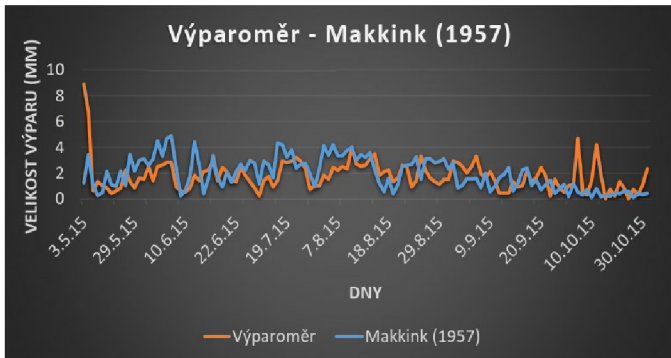
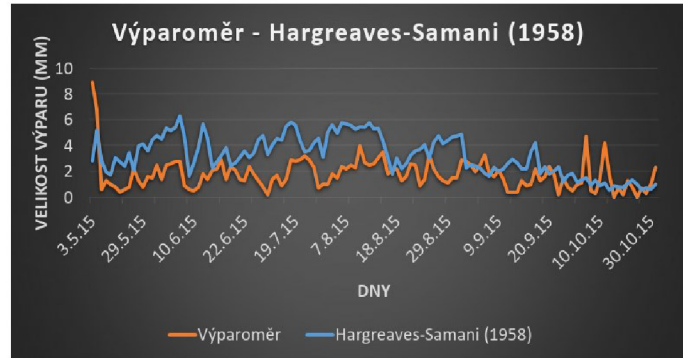
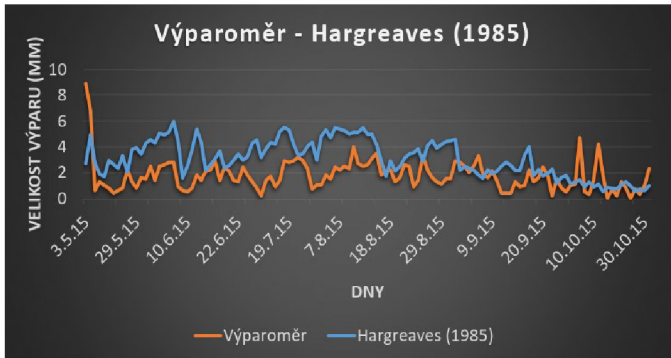
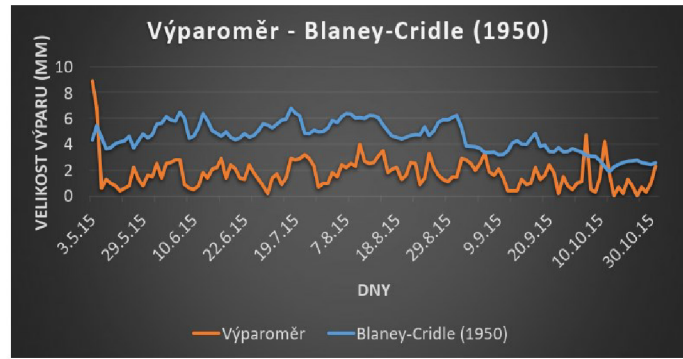
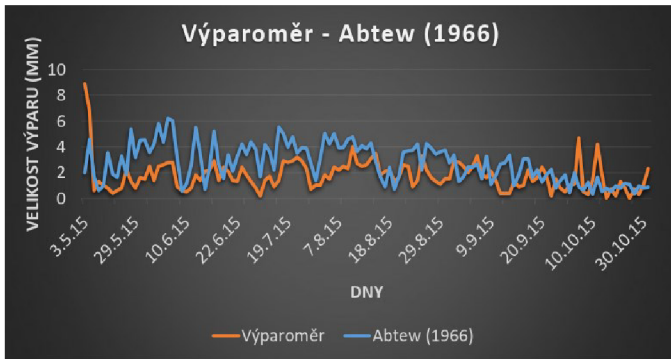




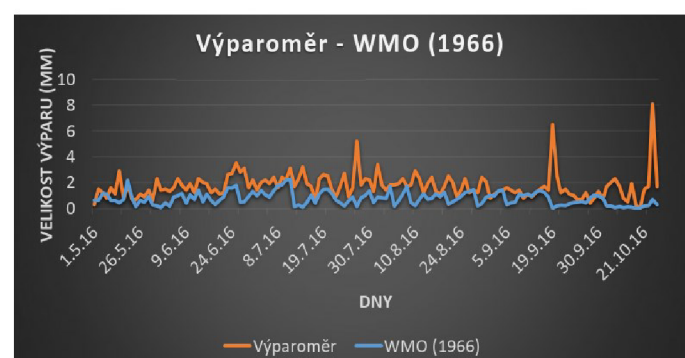
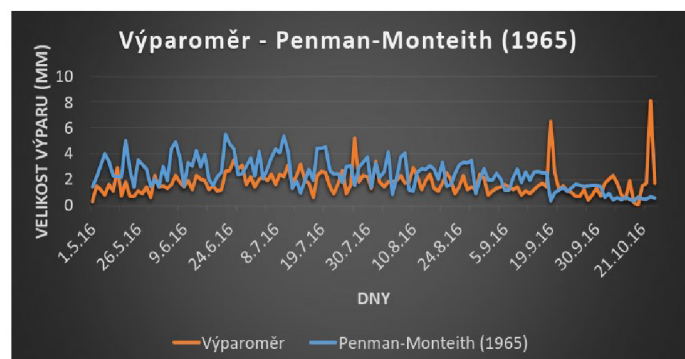
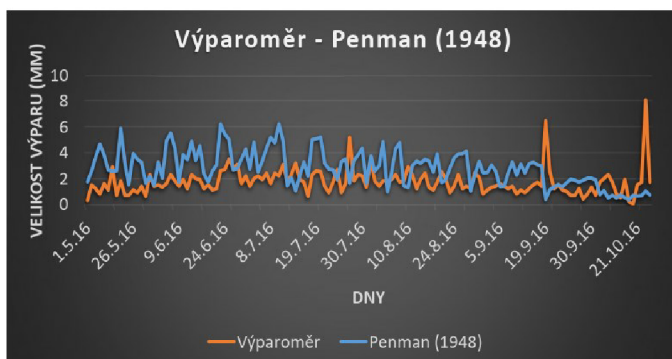
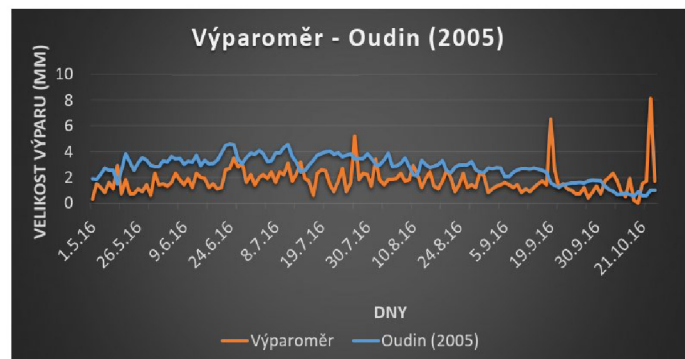
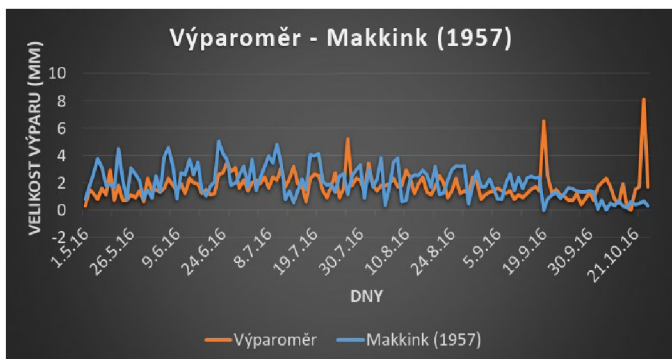
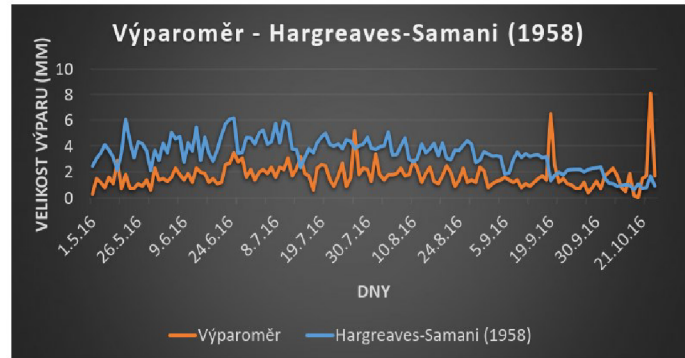
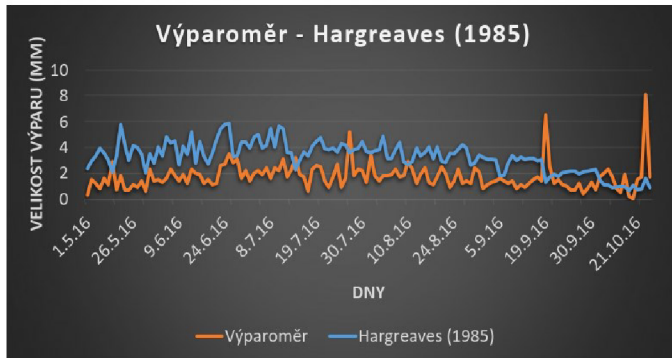
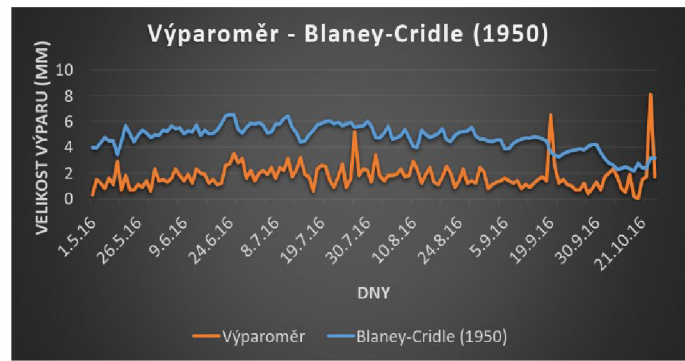
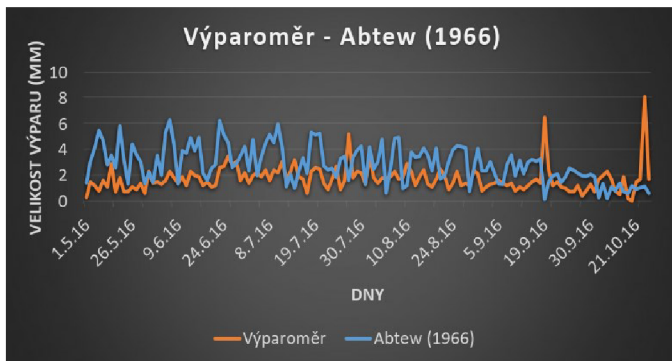
*Příloha 4 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2013*



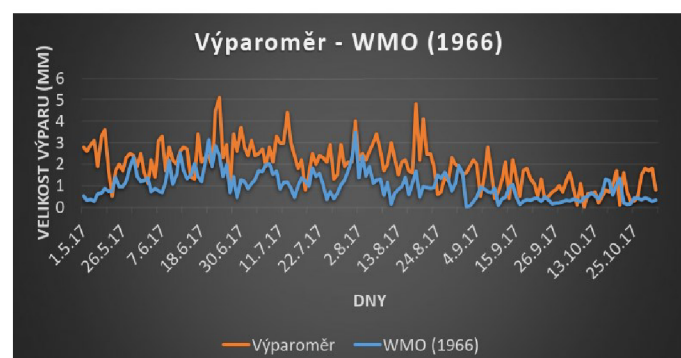
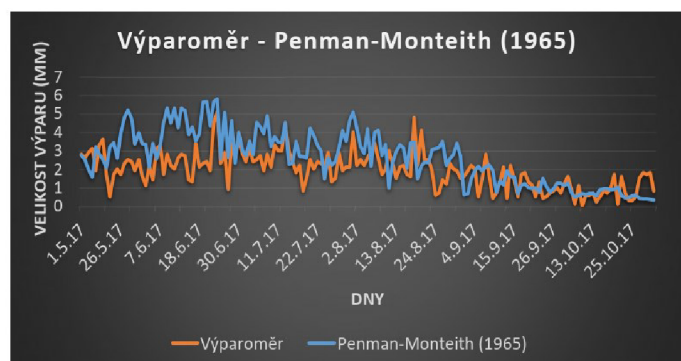
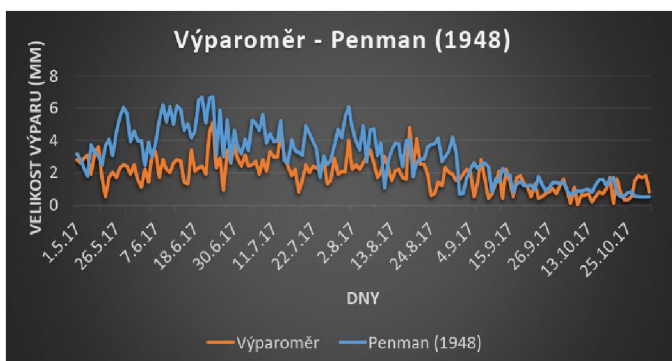
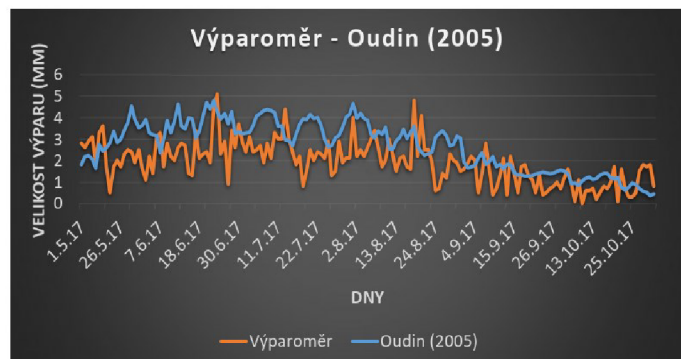
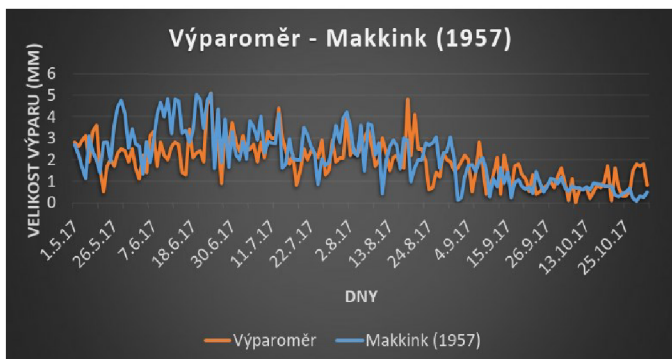
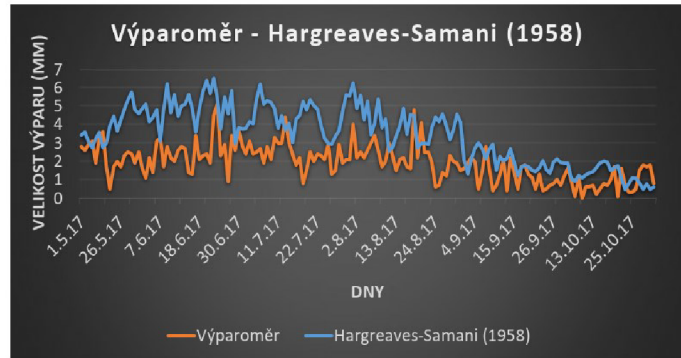
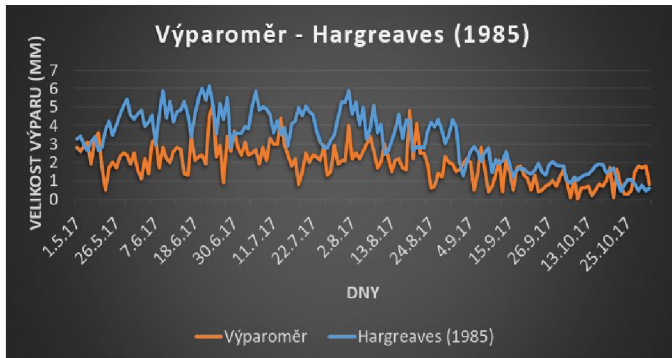
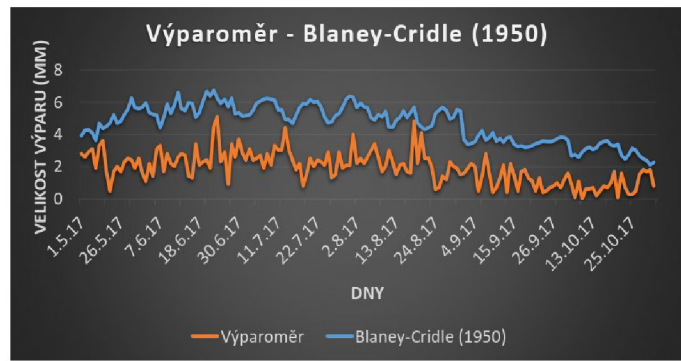
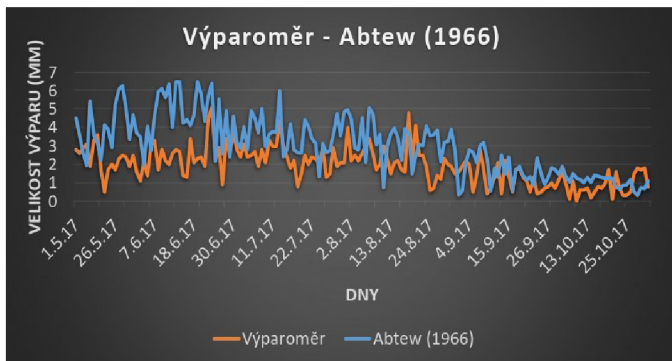
**Příloha 5 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2014**



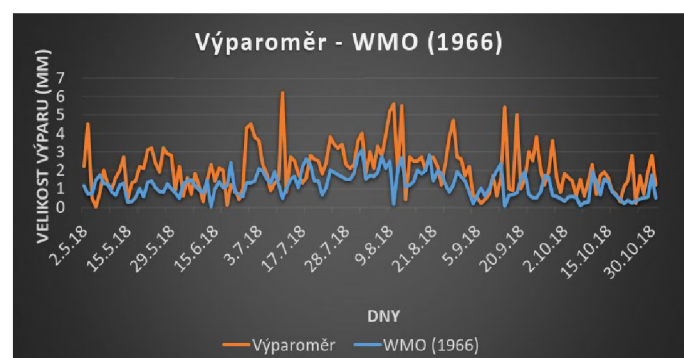
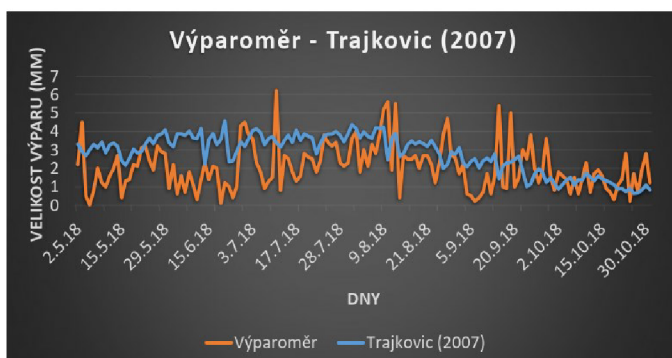
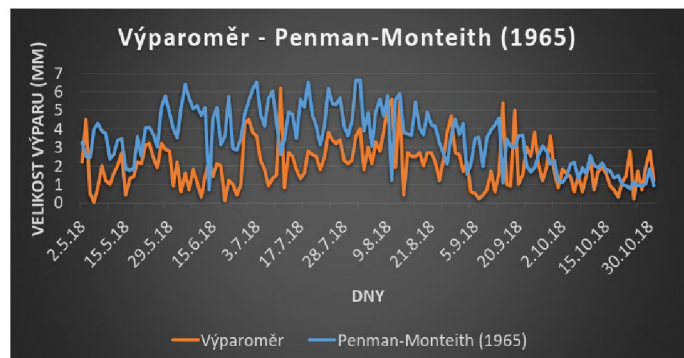
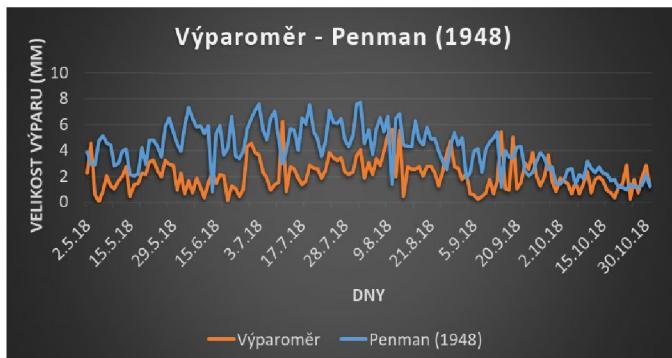
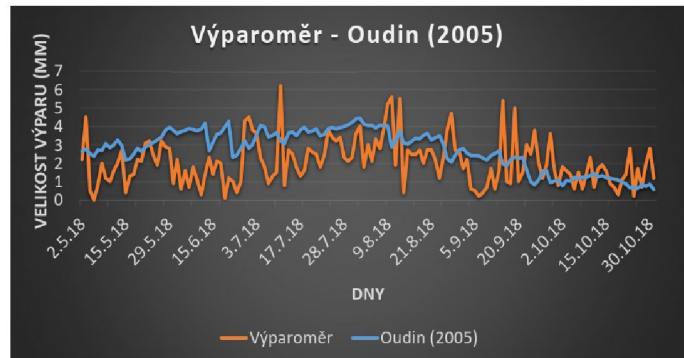
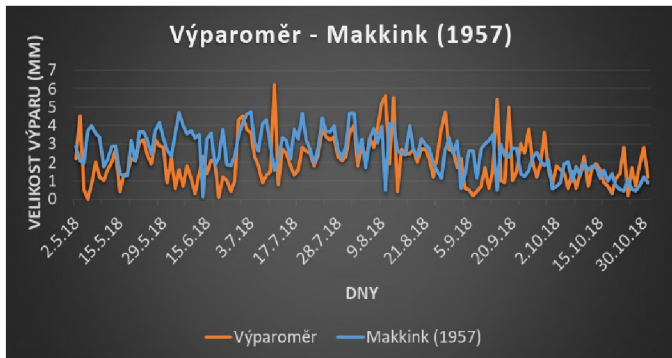
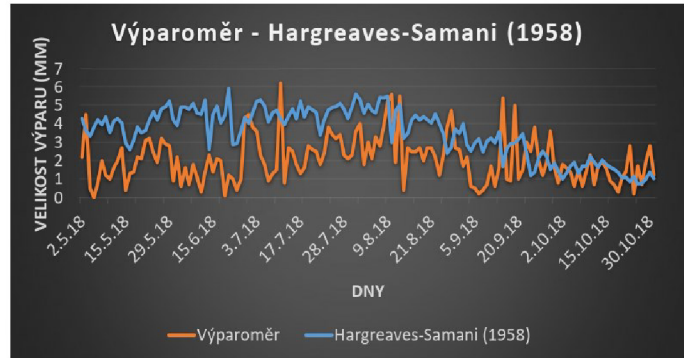
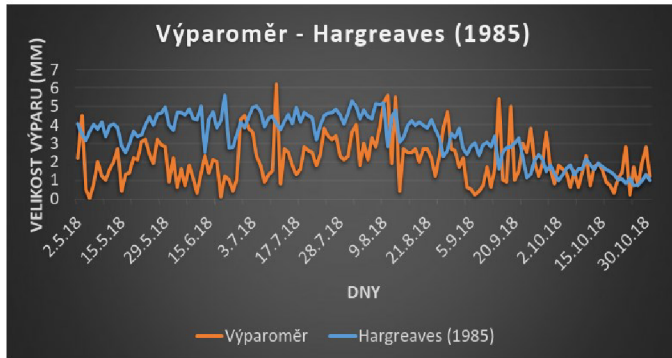
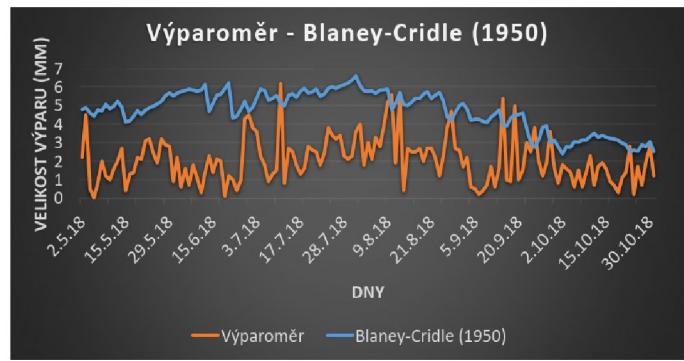
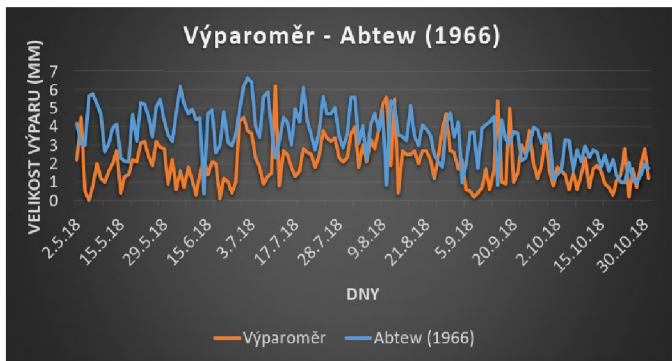
**Příloha 6 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2015**



**Příloha 7 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2016**



**Příloha 8 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2017**



**Příloha 9 – Porovnání průběhu výparu z výparoměru s jednotlivými metodami v roce 2018**