



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

# PŘÍRODĚ BLÍZKÝ SYSTÉM LIKVIDACE ODPADNÍCH VOD PROSTŘEDNICTVÍM VÝPARU DO ATMOSFÉRY

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY WASTEWATER DISPOSAL SYSTEM THROUGH EVAPORATION INTO THE  
ATMOSPHERE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Škarpa

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Michal Kriška-Dunajský, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav vodního hospodářství krajiny  
Student: **Bc. Pavel Škarpa**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Michal Kriška-Dunajský, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24  
Studijní program: N0732A260025 Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Přírodě blízký systém likvidace odpadních vod prostřednictvím výparu do atmosféry**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

1. Seznámení s problematikou - odpadní vody, evapotranspirace, přírodní čistírna odpadních vod
2. Metodika měření - popis výzkumných objektů i poloprovozního objektu
3. Návrh systému pro rekreační objekt - projektová dokumentace v detailu pro provedení stavby
4. Výsledky a jejich vyhodnocení
5. Závěr a diskuse, doporučení

### **Cíle a výstupy diplomové práce:**

Diplomová práce se zaměření měření výparu (evapotranspirace) na dvou testovacích objektech - na výzkumném zařízení umístěném na meteostanici VHK, testovacím objektu na venkovním pozemku VHK. Součástí práce bude návrh poloprovozního zařízení pro rekreačně obývaný objekt, přičemž součástí práce bude i měření intenzity výparu v rámci startovací sezony (první vegetační období od výstavby). Práce bude obsahovat metodiku měření jak na výzkumných (laboratorních) modelech, tak na poloprovozním zařízení u rekreačního objektu. Součástí práce budou zpracované a vyhodnocené záznamy měření. Diskuse výsledků se zaměří na doporučení postupu pro návrh bezodtokových zařízení.

### **Seznam doporučené literatury a podklady:**

ČSN 75 6402: Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel, 2017. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

- DWA, 2017: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Filtern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers: Arbeitsblatt DWA-A 262. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. DWA-Regelwerk, A 262. ISBN 38-872-1547-8.

- ÖNORM B 2505- Kläranlagen – Intermittierend beschickte Bodenfilter („Pflanzenkläranlagen“)

- Dotro, Gabriela & Langergraber, Günter & Molle, Pascal & Nivala, Jaime & Puigagut, Jaume & Stein, Otto. (2017). Biological Wastewater Treatment Series, Volume 7: Treatment Wetlands.

- sciencedirect.com - databáze vědeckých článků, vyhledání klíčových slov "treatment wetland" v ostrovních státech, v tropickém a subtropickém klimatu, apod.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2023

L. S.

---

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.  
vedoucí ústavu

---

doc. Ing. Michal Kriška-Dunajský, Ph.D.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## ABSTRAKT

Práce se zabývá vývojem inovativní metody likvidace odpadních vod evapotranspirací do atmosféry. Teoretická část začíná pohledem legislativy České republiky na likvidaci odpadních vod. V teoretické části se dále představuje bezodtokový systém pro likvidaci odpadních vod evapotranspirací do atmosféry. Důležitým prvkem teoretické části je rešerše samotné evapotranspirace z hlediska vědeckých poznatků z celého světa. Důraz je kladen na transpiraci rostlin včetně meteorologických jevů na ni působících. Teoretická část je ukončena představením trojice metod výpočtu potenciální evapotranspirace. Cílem teoretické části je seznámení čtenáře s problematikou bezodtokové likvidace odpadních vod založené na evapotranspiraci z hlediska zákonů přírodních, i legislativních. Dalším cílem je stanovení evapotranspirace odpadních vod vypařovacím záhonem a srovnání teoretického výparu s reálným měřením na vytvořených modelech. Za tímto účelem byl tedy sestaven laboratorní model, na kterém byla měřena skutečná evapotranspirace. Průměrná denní evapotranspirace se pohybovala od 1 mm/den v podzimních měsících, po 7 mm/den v letním období. Naměřená data byla použita k posouzení závislosti evapotranspirace na meteorologických vlivech zaznamenaných na meteorologické stanici UVHK Fakulty stavební VUT v Brně. Například u relativní vlhkosti vzduchu byla regresními modely odhalena exponenciální závislost s koeficientem determinace  $R^2 = 0,8$ . Pro stanovení potenciální evapotranspirace byla použita trojice empirických metod uvedených v teoretické části. Po kalibraci rovnic všech metod byly stanovené potenciální evapotranspirace porovnány s naměřenými hodnotami pomocí regresních modelů. Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace bylo dosaženo při lineární regresi metody Thornthwaite, a to  $R^2 = 0,75$ . Praktická část práce obsahuje trojici projektových dokumentací ve stupni pro stavební povolení, které představují reálný systém likvidace odpadních vod pro odlišné objekty v České republice, resp. aplikaci výsledků měření v praxi.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Odpadní voda, cirkulace odpadních vod, jímka s vypařovacím záhonem, evapotranspirace, transpirace

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the development of an innovative method of wastewater disposal by evapotranspiration into the atmosphere. The theoretical part begins with a look at the Czech legislation on wastewater disposal. It then presents new effluent free system for the disposal of wastewater evapotranspiration into the atmosphere. An important element of the theoretical part is a research of evapotranspiration itself in terms of scientific knowledge from all over the world. The emphasis is on plant transpiration including meteorological phenomena affecting it. The theoretical part ends with an introduction to three methods used to estimate the potential evapotranspiration. The aim of the theoretical part is to familiarize the reader with the issue of evapotranspiration-based wastewater disposal from the point of view of natural and human-made laws. Another objective is to calculate the evapotranspiration of wastewater by an evapotranspiration-bed. For this purpose, the actual evapotranspiration was measured on a built laboratory model. The average daily evapotranspiration varied starting over 1 mm/day in autumn months to over 7 mm/day in summer season. The measured data were used to assess the dependence of evapotranspiration on meteorological phenomena recorded on nearby meteorological station. For example, regression models of relative humidity showed an exponential dependence with coefficient of determination  $R^2 = 0,8$ . To determine the potential evapotranspiration, three empirical methods presented in theoretical part of this theses were used. After calibrating the equations of all methods, the determined potential evapotranspiration was compared with to the measured values using regression models. The highest value of the coefficient of determination was achieved with the linear regression of the Thornthwaite method, namely  $R^2 = 0,75$ . The practical part of the thesis contains three design projects proposing the presented technology of wastewater disposal for different facilities in the Czech republic.

## **KEYWORDS**

Wastewater, wastewater circulation, sump with evaporation bed, evaporation bed, evapotranspiration, transpiration

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠKARPA, Pavel. *Přírodě blízký systém likvidace odpadních vod prostřednictvím výparu do atmosféry*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí doc. Ing. Michal Kriška-Dunajský, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Přírodě blízký systém likvidace odpadních vod prostřednictvím výparu do atmosféry* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2024

---

Bc. Pavel Škarpa

autor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Michalovi Kriškovi Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, čas věnovaný konzultacím, a ochotu. Dále patří poděkování mé rodině a blízkým za podporu při celé době studia vysoké školy.

# OBSAH

1	Úvod a cíle .....	12
1.1	Úvod.....	12
1.2	Cíl práce.....	13
2	Legislativní rámec .....	14
2.1	Definice odpadních vod .....	15
2.2	Zneškodňování odpadních vod .....	15
2.3	Obecné nakládání s vodami .....	16
2.4	Povolení k nakládání s vodami .....	17
2.5	Vodní dílo .....	19
2.6	Shrnutí.....	20
3	Bezodtoková likvidace odpadních vod.....	22
3.1	Vakuové odpařování.....	25
4	Evapotranspirace .....	26
4.1	Výpar z vodní hladiny .....	27
4.2	Výpar z půdy .....	27
4.3	Výpar z rostlin .....	27
4.4	Účinek přírodních jevů .....	29
	Sluneční záření .....	29
	Vítr .....	30
	Teplota .....	30
	Atmosférická vlhkost .....	30
	Nasycení půdního profilu a srážky .....	30
	Rostliny .....	30
	Složení vody.....	31
	Zvuk.....	33
4.5	Potenciální evapotranspirace .....	33
	Metoda Hargreaves .....	33
	Metoda Turc .....	34
	Metoda Thornthwaite.....	35
5	Metodika měření.....	37

5.1	Laboratorní model 1.....	38
	Výstavba modelu.....	39
	Provoz modelu .....	42
5.2	Laboratorní model 2.....	43
5.3	Poloprovozní modely .....	45
	Popis řešení první dokumentace.....	46
	Popis řešení druhé dokumentace .....	46
	Popis řešení třetí dokumentace.....	47
5.4	Naměřená data.....	49
6	Výsledky měření.....	51
6.1	Vliv přírodních jevů na evapotranspiraci .....	52
6.2	Vyhodnocení vlivu teploty na evapotranspiraci .....	52
	Regrese v denních krocích .....	52
	Regrese v týdenních průměrech.....	56
6.3	Vyhodnocení vlivu slunečního svitu na evapotranspiraci .....	59
	Regrese v denních krocích .....	60
	Regrese v týdenních průměrech.....	63
6.4	Vyhodnocení vlivu vlhkosti vzduchu na evapotranspiraci .....	66
	Regrese v denních krocích .....	67
	Regrese v týdenních průměrech.....	70
6.5	Stanovení a posouzení potenciální evapotranspirace.....	74
	Regrese metody Hargreaves – Samani .....	75
	Regrese metody Turc.....	78
	Regrese metody Thornthwaite .....	80
7	Závěr .....	83
8	Seznam příloh .....	86
	8.1 Příloha č.1.....	86
	8.2 Příloha č.2.....	87
	8.3 Příloha č.3.....	88
9	Bibliografie .....	89
10	Seznam obrázků.....	103

11	Seznam tabulek .....	107
12	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	108

# 1 ÚVOD A CÍLE

## 1.1 ÚVOD

Odpadní vody vznikající v domech, chatách, hotelech, či jiných objektech, je nutné likvidovat nejen s ohledem na udržitelnost přírodních zdrojů, ale mj. je povinnost jejich likvidace je zakotvena v legislativě České republiky. Dle platných předpisů je potřeba plánovat likvidaci odpadních vod již při navrhování staveb, které mohou odpadní vody produkovat. Plánování se provádí prostřednictvím příslušných stupňů projektových dokumentací. Před započítáním výstavby je tak nutné mít vyřešený návrh likvidace odpadních vod vznikajících v navrhované stavbě.

Návrh konkrétních technologií k likvidaci odpadních vod závisí na spoustě faktorů, přičemž nejspíše jedním z nejdůležitějších je topologie okolí, resp. možnost připojení stavby na stávající nebo budoucí kanalizační síť. Totiž, jakmile je v blízkosti uvažované stavby obecní kanalizace, odvádí se odpadní vody do ní prostřednictvím kanalizační přípojky. Pokud navrhujeme stavbu, v jejíž blízkosti se kanalizace nenachází, nabízí vodní zákon (Zákon č. 254/2001 Sb.) několik možností, kterými lze odpadní vody likvidovat. Preferovaným řešením je likvidace odpadních vod co možná nejbliže u zdroje ve vlastní čistírně odpadních vod. Odpadní vody se po vyčištění mohou vypouštět do recipientu. Pokud není vypouštění do recipientu možné, lze vyčištěné odpadní vody vsakovat do podzemních vrstev. Obě varianty mají stanovené podmínky, za kterých je lze realizovat.

Můžeme se však setkat s případy, kdy vypouštění vyčištěných odpadních vod podle předchozích příkladů nelze z různých důvodů realizovat. Důvodem může být umístění stavby v chráněných územích, poblíž zdrojů pitné vody, či u vodních nádrží. Vyčištěné odpadní vody z čistíren odpadních vod totiž obsahují zbytkové koncentrace znečišťujících látek, které mohou negativně ovlivnit jakost vody v citlivých lokalitách. V takových případech je možné nahradit vlastní čistírnu odpadních vod vodotěsnou akumulací jímky. Akumulovaný objem se po naplnění jímky musí vyvážet na nejbližší čistírnu odpadních vod. Akumulace odpadních vod je však pro trvale obydlené objekty z finančního hlediska problematická. Majitel nemovitosti totiž musí zajišťovat pravidelné vyvážení odpadních vod a musí hradit z toho vyplývající náklady spojené s likvidací (vyvážením). Navíc se v praxi ukazuje, že majitelé nemovitostí jímky často vyváží jen sporadicky a kontroly četnosti probíhají většinou pouze na základě podnětu sousedů. Nevyčištěná odpadní voda je místo toho vypouštěna do recipientů, či přímo na zemský povrch bez patřičných povolení, čímž se přímo může ohrozit hydroekologický potenciál vodního toku, případně kvalita vod povrchových nebo podzemních. Porušením povinnosti vyvážení prostým vypouštěním se pak majitel dopouští přestupku vůči zákonem povoleným možnostem.

Ukazuje se však, že česká legislativa nestanovuje požadavky na jakost vody akumulované v jímce. Je tudíž možné před ní zařadit zařízení pro úpravu jakosti odpadních vod. Takové

zařízení může umožnit jejich zpětné využití např. jako užitkovou vodu, přičemž při její likvidaci nesmí dojít k vypouštění do podzemních vrstev nebo do povrchových vod. Řešení může být založeno jak na intenzivní technologii, tak na otevřených filtračních systémech, které jsou součástí přírodních čistíren odpadních vod. Při využití extenzivní technologie přírodních filtrů lze využít na povrchu osázené rostliny k eliminaci množství přítomné vody. Rostliny totiž přirozeně převádí odpadní vodu do atmosféry takzvanou transpirací, což vede ke snížení četnosti vyvážení jímky výparem odpadních vod do ovzduší. Může tak vzniknout zařízení, které umožní úsporu nákladů, spojených s častým vyvážením odpadních vod z jímky.

Přidanou hodnotou řešení oproti klasické jímce na vyvážení je menší negativní vliv na okolní prostředí.

## 1.2 CÍL PRÁCE

Práce je strukturovaná tak, aby obeznámila s inovativním řešením bezodtokové likvidace odpadních vod, které není jako takové popsáno v žádné veřejně dostupné literatuře, ani v odborné technické publikaci. Nabízí náhled do legislativy České republiky zabývající se likvidací odpadních vod. Dále přibližuje pohled Vodního zákona na bezodtokový systém, který jako takový je dnes popsán pouze ve smyslu akumulace v jímce a následném vyvážení na čistírnu odpadních vod. Cílem části, zabývající se legislativou, je klasifikace bezodtokových řešení ve smyslu Vodního zákona a popsání veškerých souvislostí, které se v praxi ukazují jako problematické.

Významným cílem práce je získání teoretických poznatků potenciální transpiraci, stejně jako měření a vyhodnocení výparu (evapotranspirace) na testovacích objektech. Před vlastním měřením byla zpracována literární rešerše, věnující se vědeckým poznatkům v této oblasti z celého světa. Cílem samotné rešerše je nasměrování dalšího výzkumu v oblasti navrhování vypařovacích záhonů k evapotranspiraci odpadních vod. Kromě výše uvedeného je v práci podrobně popsáno měření skutečné evapotranspirace na Fakultě stavební VUT v Brně. Cílem měření je posouzení vlivu meteorologických jevů na evapotranspiraci, resp. ověření, zda je i při nestandardním uspořádání povrchu možné zjednodušit predikci potenciální evapotranspirace. V rámci metodiky měření je cíleno k výběru vhodných nebo zjednodušených postupů pro stanovení potenciální evapotranspirace vypařovacích záhonů. Výsledkem práce by mělo být získání poznatků k co možná nejpřesnějšímu a současně snadnému navrhování bezodtokových systémů pro likvidaci odpadních vod.

## 2 LEGISLATIVNÍ RÁMEC

Legislativa České republiky v oblasti odpadních vod se řídí zejména Zákonem č. 254/2001 Sb. – Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). Dále se pro zpřesnění konkrétnějších situací aplikují nařízení vlády, například Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. (při vypouštění odpadních vod do vod povrchových) a Nařízení vlády č. 57/2016 Sb. (vypouštění odpadních vod do vod podzemních).

Vodní zákon je základním legislativním dokumentem České republiky v oblasti ochrany povrchových a podzemních vod. Legislativní rámec je orientován zejména na definici odpadních vod, jejich zneškodňování a vypouštění. Dále se zaměřím na definice obecného nakládání s vodami, nakládání s vodami, a vodního díla. Samotný vodní zákon ale kromě těchto pojmů popisuje mnoho dalších definicí a situací, které mohou v praxi vodního hospodářství nastat. Sám sebe pak vodní zákon uvádí v první části, hlavě první, paragrafu číslo jedna následující dvojicí odstavců.

(1) Účelem tohoto zákona je chránit povrchové a podzemní vody, jako ohrožené a nenahraditelné složky životního prostředí a přírodní zdroje, stanovit podmínky pro hospodárné využívání vodních zdrojů, pro zachování vodních zdrojů a předejití stavu nedostatku vody a pro zachování i zlepšení jakosti povrchových a podzemních vod, vytvořit podmínky pro snižování nepříznivých účinků povodní a sucha a zajistit bezpečnost vodních děl v souladu s právem Evropských společenství<sup>1)</sup>. Účelem tohoto zákona je též přispívat k zajištění zásobování obyvatelstva pitnou vodou a k ochraně vodních ekosystémů a na nich přímo záviselých suchozemských ekosystémů (Česká republika, 2001).

<sup>1)</sup> *Například Směrnice Rady 75/440/EHS ze dne 16. června 1975 o požadované jakosti povrchových vod určených k odběru pitné vody v členských státech, Směrnice Rady 76/160/EHS ze dne 8. prosince 1975 o jakosti vody pro koupání, Směrnice Rady 76/464/EHS ze dne 4. května 1976 o znečištění způsobeném určitými nebezpečnými látkami vypouštěnými do vodního prostředí Společenství a návazné směrnice Rady, Směrnice Rady 78/659/EHS ze dne 18. července 1978 o jakosti povrchových vod vyžadujících ochranu nebo zlepšení pro podporu života ryb, Směrnice Rady 80/68/EHS ze dne 17. prosince 1979 o ochraně podzemních vod před znečištěním určitými nebezpečnými látkami doplněná směrnicemi Rady 90/656/EHS a 91/692/EHS, Směrnice Rady 91/271/EHS ze dne 21. května 1991 o čištění městských odpadních vod, Směrnice Rady 91/676/EHS ze dne 12. prosince 1991 o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů, Směrnice Rady 96/61/ES ze dne 24. září 1996 o integrované prevenci a řízení znečištění, Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000 ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky (Česká republika, 2001).*

(2) Zákon upravuje právní vztahy k povrchovým a podzemním vodám, vztahy fyzických a právnických osob k využívání povrchových a podzemních vod, jakož i vztahy k pozemkům

a stavbám, s nimiž výskyt těchto vod přímo souvisí, a to v zájmu zajištění trvale udržitelného užívání těchto vod, bezpečnosti vodních děl a ochrany před účinky povodní a sucha. V rámci vztahů upravených tímto zákonem se bere v úvahu zásada návratnosti nákladů na vodohospodářské služby, včetně nákladů na související ochranu životního prostředí a nákladů na využívané zdroje, v souladu se zásadou, že znečišťovatel platí (Česká republika, 2001).

## 2.1 DEFINICE ODPADNÍCH VOD

Pojem odpadní vody je definován v četném počtu odborné literatury věnující se likvidaci odpadních vod. Nejspíše nejpřesnější definice je obsažena ve vodním zákoně, konkrétně v hlavě V – Ochrana vodních poměrů a vodních zdrojů, díl 5 – Ochrana jakosti vod, § 38, odstavec 1 vodního zákona definuje odpadní vody následovně:

(1) Odpadní vody jsou vody použité v obytných, průmyslových, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředcích, pokud mají po použití změněnou jakost (složení nebo teplotu) a jejich směsi se srážkovými vodami, jakož i jiné vody z těchto staveb, zařízení nebo dopravních prostředků odtékající, pokud mohou ohrozit jakost povrchových nebo podzemních vod. Odpadní vody jsou i průsakové vody vznikající při provozování skládek a odkališť nebo během následné péče o ně, s výjimkou vod, které jsou zpětně využívány pro vlastní potřebu organizace, a vod, které odtékají do vod důlních.

## 2.2 ZNEŠKODŇOVÁNÍ ODPADNÍCH VOD

Charakter a účel užívání staveb udává, zda při jejich užívání dochází ke vzniku odpadních vod. Pokud ke vzniku odpadních vod užíváním stavby dochází, je dle mého názoru rozumné tyto odpadní vody patřičně likvidovat. Podmínkám zneškodňování odpadních vod se věnuje vodní zákon v hlavě II – Nakládání s vodami, díl 1 – Základní povinnosti, § 5, odstavec 3 vodního zákona. Konkrétní formulace je uvedena následovně:

(3) Při provádění staveb<sup>4)</sup> nebo jejich změn nebo změn jejich užívání je stavebník povinen podle charakteru a účelu užívání těchto staveb je zabezpečit zásobováním vodou a odváděním odpadních vod kanalizací k tomu určenou. Nemá-li kanalizace v místě k dispozici, odpadní vody se zneškodňují přímým čištěním s následným vypouštěním do vod povrchových nebo podzemních. V případě technické neproveditelnosti způsobů podle vět první a druhé lze odpadní vody akumulovat v nepropustné jímce (žumpě)<sup>4)</sup> s následným vyvážením akumulovaných vod na zařízení schválené pro jejich zneškodnění.

<sup>4)</sup> *Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů.*

Výše zmíněná povinnost z mého pohledu stanovuje, že každá nová stavba, u které vznikají odpadní vody, musí mít zajištěnou likvidaci odpadních vod vznikajících provozem stavby. Dále je stanovena hierarchie opatření pro likvidaci odpadních vod s ohledem na jejich

proveditelnost. Nejvíce preferovaným opatřením je dle mého názoru odvádění odpadních vod do kanalizačního řadu kanalizační přípojkou a jejich následné čištění na centrální čistírně odpadních vod. Pokud není v blízkosti stavby vybudován kanalizační řad, pak je stavebník dle nucen vybudovat samostatnou čistírnu odpadních vod a vyčištěné odpadní vody vypouštět do recipientu či vsakovat do podzemí v souladu s příslušným nařízením vlády.

Mohou však nastat případy, kdy ani takové řešení není proveditelné. Dle mých zkušeností může být příkladem podobné situace umístění stavby v chráněném území, nebo v blízkosti vodních děl. V takovém případě je stavebník, z mého pohledu na vodní zákon, odpadní vody povinen akumulovat v jímce k tomu určené (známé pod lidovým označením žumpa). Pro akumulované vody pak musí stavebník zajistit vyvážení na blízkou čistírnu odpadních vod, či jiné zařízení, které zajistí zneškodnění odpadních vod.

Samotným účelem práce je vytvořit alternativní možnost k akumulaci odpadních vod v klasické žumpě. Z výše uvedeného úryvku z vodního zákona se zaměříme na větu „V případě technické neproveditelnosti způsobů podle vět první a druhé lze odpadní vody akumulovat v nepropustné jímce (žumpě)<sup>4</sup> s následným vyvážením akumulovaných vod na zařízení schválené pro jejich zneškodnění.“ Tato definice dle mého pohledu nedefinuje žádné požadavky na jakost odpadních vod akumulovaných v jímce.

Tato myšlenka nabízí možnost před jímku osadit zařízení, které zajistí hygienickou nezávadnost odpadních vod akumulovaných v jímce na vyvážení. Odpadní vody z jímky by se pak mohly využívat jako užitkové, čímž se snižuje potřeba jejich vyvážení. Samotná jímka je pak jakožto konečný prvek v systému naplněna vodou s menší hygienickou závadností (v porovnání se splaškovou odpadní vodou). Pro případ pochybení stavitele ve věci vyvážení odpadních vod se tedy do okolního prostředí dostane menší množství znečištění.

Pakliže bude zařízení pro úpravu jakosti odpadních vod založeno na principu přírodně blízkých způsobů zneškodňování odpadních vod, může dojít k dalšímu snížení objemu vody v systému vypařováním vod prostřednictvím rostlin. Dalšího snížení objemu akumulovaných vod může být docíleno recyklací odpadních vod, například ke splachování toalet. Oproti klasické žumpě tedy lze uvažovat i o finanční návratnosti, jelikož každé vyvezení je spojeno s uhrazením poplatků za likvidaci odpadních vod v cílovém zařízení a za odvoz odpadních vod na toto zařízení.

## **2.3 OBECNÉ NAKLÁDÁNÍ S VODAMI**

Jeden ze základních pojmů definovaných vodním zákonem je obecné nakládání s vodami. Pojem vymezuje situace, za kterých může osoba (fyzická i právnická) nakládat s vodami, aniž by k tomu potřebovala povolení příslušného úřadu. Obecné nakládání s vodami vodní zákon definuje v hlavě II – Nakládání s vodami, díl 2 – nakládání s povrchovými vodami, § 6 Obecné nakládání s povrchovými vodami následovně:

(1) Každý může na vlastní nebezpečí bez povolení nebo souhlasu vodoprávního úřadu odebírat povrchové vody nebo s nimi jinak nakládat pro vlastní potřebu, není-li k tomu třeba zvláštního technického zařízení.

(2) Povolení nebo souhlasu vodoprávního úřadu rovněž není třeba k zachycování povrchových vod jednoduchými zařízeními na jednotlivých pozemcích a stavbách nebo ke změně přirozeného odtoku vod za účelem jejich ochrany před škodlivými účinky těchto vod.

(3) Při obecném nakládání s povrchovými vodami se nesmí ohrožovat jakost nebo zdravotní nezávadnost vod, narušovat přírodní prostředí, zhoršovat odtokové poměry, poškozovat břehy, vodní díla a zařízení, zařízení pro chov ryb a porušovat práva a právem chráněné zájmy jiných.

(4) Vodoprávní úřad může obecné nakládání s povrchovými vodami rozhodnutím nebo opatřením obecné povahy bez náhrady upravit, omezit, popřípadě zakázat, vyžaduje-li to veřejný zájem, zejména dochází-li při něm k porušování povinností podle odstavce 3 nebo z důvodu bezpečnosti osob. Působnost jiných správních úřadů ke stanovení podmínek k užívání těchto vod ke koupání<sup>5)</sup> není tímto zákonem dotčena.

<sup>5)</sup> Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění zákona č. 254/2001 Sb.

Obecné nakládání s vodami se dle mého názoru v žádném bodě netýká odpadních vod. Z toho důvodu usuzuji, že se při bezodtokové likvidaci odpadních vod nejedná o obecné nakládání s vodami.

## **2.4 POVOLENÍ K NAKLÁDÁNÍ S VODAMI**

Pakliže osoba (fyzická i právnická) potřebuje nakládat s vodami takovým způsobem, který nelze charakterizovat jako obecné nakládání s vodami, musí k takovému nakládání mít povolení místně příslušného úřadu. Povolení k nakládání s vodami je další pojem, který definuje vodní zákon. Definice se nachází v hlavě II – Nakládání s vodami, díl 3 – Povolení, souhlas a vyjádření, Oddíl 1 – Povolení, § 8 – Povolení k nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami. Následující odstavce jsou přepisem této definice.

(1) Povolení k nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami (dále jen "povolení k nakládání s vodami") je třeba

a) jde-li o povrchové vody a nejde-li při tom o obecné nakládání s nimi

1. k jejich odběru,
2. k jejich vzdouvání, popřípadě akumulaci,
3. k využívání jejich energetického potenciálu,

4. k užívání těchto vod pro chov ryb nebo vodní drůbeže, popřípadě jiných vodních živočichů, za účelem podnikání,

5. k jinému nakládání s nimi,

b) jde-li o podzemní vody

1. k jejich odběru,

2. k jejich akumulaci,

3. k jejich čerpání za účelem snižování jejich hladiny,

4. k umělému obohacování podzemních zdrojů vod povrchovou vodou,

5. k jinému nakládání s nimi,

c) k vypouštění odpadních vod do vod povrchových nebo podzemních,

d) k čerpání povrchových nebo podzemních vod a jejich následnému vypouštění do těchto vod za účelem získání tepelné energie,

e) k čerpání znečištěných podzemních vod za účelem snížení jejich znečištění a k jejich následnému vypouštění, pokud nejde o činnost prováděnou na základě povolení podle zákona o hornické činnosti, výbušninách a o státní báňské správě<sup>7b)</sup>,

f) k užívání důlní vody jako náhradního zdroje podle zvláštního zákona<sup>1a)</sup>.

<sup>7b)</sup> *Zákon č. 61/1988 Sb., o hornické činnosti, výbušninách a o státní báňské správě, ve znění pozdějších předpisů.*

<sup>1a)</sup> *Například zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství, ve znění pozdějších předpisů.*

(2) Povolení k nakládání s vodami se vydává fyzickým nebo právnickým osobám k jejich žádosti. Fyzická nebo právnická osoba, která má platné povolení k nakládání s vodami podle odstavce 1 nebo podle předchozích předpisů (dále jen "oprávněný") je oprávněna nakládat s vodami v rozsahu a k účelu po dobu uvedenou v platném povolení (Česká republika, 2001).

(3) Povolení k nakládání s vodami není třeba (Česká republika, 2001)

a) k čerpacím pokusům při provádění hydrogeologického průzkumu nebo při průzkumu vydatnosti zdrojů podzemních vod, pokud mají trvat méně než 14 dnů a odběr vody v této době nepřekročí 1 l/s,

b) k odběrům povrchových a podzemních vod pro zjišťování a hodnocení stavu těchto vod (§ 21),

c) k jednorázovému odběru povrchových nebo podzemních vod v případech záchranných prací při mimořádných událostech, požárech a jiných živelních pohromách,

d) k nakládání s povrchovými vodami při cvičení a zásahu Hasičského záchranného sboru České republiky a jednotek požární ochrany, Policie České republiky, obecní policie nebo ozbrojených sil České republiky; toto nakládání musí být při cvičení předem projednáno s vodoprávním úřadem,

e) k využívání energetického potenciálu podzemních vod v případě, že nedochází k odběru nebo čerpání podzemní vody,

f) k užívání důlních vod organizací při hornické činnosti pro její vlastní potřebu nebo k vypouštění důlních vod organizací<sup>1a)</sup>,

g) k vypuštění odpadních vod z odlehčovacích komor do vod povrchových.

<sup>1a)</sup> *Například zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství, ve znění pozdějších předpisů.*

(4) V pochybnostech o tom, zda se jedná o nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami a o jaký druh nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami se jedná, rozhoduje vodoprávní úřad (Česká republika, 2001).

Výše uvedený úryvek z vodního zákona týkající se povolení k nakládání s vodami popisuje i případy týkající se odpadních vod. Z mého pohledu se jedná o případy, kdy se vyčištěná odpadní voda vypouští buďto do vodního toku, anebo do podzemí. Při bezodtokové likvidaci odpadních vod se odpadní vody nevypouštějí ani do povrchových, ani do podzemních vod. Dle mého pohledu to znamená, že k výstavbě bezodtokových likvidací odpadních vod není potřebné povolení k nakládání s vodami.

## 2.5 VODNÍ DÍLO

Další velice důležitý pojem vymezený vodním zákonem je vodní dílo. Definice vodního díla je uvedena v hlavě VIII – Vodní díla, § 55 – Vodní díla v odstavci prvním. Přesná definice zní následovně:

(1) Vodní díla jsou stavby, které slouží ke vzdouvání a zadržování vod, umělému usměrňování odtokového režimu povrchových vod, k ochraně a užívání vod, k nakládání s vodami, ochraně před škodlivými účinky vod, k úpravě vodních poměrů nebo k jiným účelům sledovaným tímto zákonem, a to zejména (Česká republika, 2001):

a) přehrady, hráze, vodní nádrže, jezy a zdrže,

b) stavby, jimiž se upravují, mění nebo zřizují koryta vodních toků,

c) stavby vodovodních řadů a vodárenských objektů včetně úpraven vody, kanalizačních stok, kanalizačních objektů, čistíren odpadních vod, jakož i stavby k čištění odpadních vod před jejich vypouštěním do kanalizací,

d) stavby na ochranu před povodněmi,

e) stavby k vodohospodářským melioracím, zavlažování a odvodňování pozemků,

- f) stavby, které se k plavebním účelům zřizují v korytech vodních toků nebo na jejich březích,
- g) stavby k využití vodní energie a energetického potenciálu,
- h) stavby odkališť,
- i) stavby sloužící k pozorování stavu povrchových nebo podzemních vod,
- j) studny,
- k) stavby k hrazení bystřin a strží, pokud zvláštní zákon<sup>25)</sup> nestanoví jinak,
- l) jiné stavby potřebné k nakládání s vodami povolovanému podle § 8.

<sup>25)</sup> § 35 zákona č. 289/1995 Sb., ve znění pozdějších předpisů.

(3) Za vodní díla se podle vodního zákona nepovažují zejména jednoduchá zařízení mimo koryta vodních toků na pozemcích nebo stavbách k zachycení vody a k jejich ochraně před škodlivými účinky povrchových nebo podzemních vod, vodohospodářské úpravy, terénní úpravy, bezodtokové jímky včetně přítokového potrubí, vnitřní vodovody a vnitřní kanalizace, vodovodní a kanalizační přípojky, průzkumné hydrogeologické vrty, další zařízení vybudovaná v rámci geologických prací<sup>8)</sup> a vrty k využívání energetického potenciálu podzemních vod, pokud nedochází k čerpání nebo odběru podzemních vod (Česká republika, 2001).

<sup>8)</sup> Zákon č. 62/1988 Sb., o geologických pracích a o Českém geologickém úřadu, ve znění pozdějších předpisů (Česká republika, 2001).

(4) V pochybnostech o tom, zda jde o vodní dílo, rozhodne místně příslušný vodoprávní úřad (Česká republika, 2001).

## 2.6 SHRNU TÍ

Výše popsané pojmy jsou velice obecné a týkají se velkého spektra staveb a situací. V případě obecného nakládání s vodami (Hlava II, díl 2, § 6 vodního zákona) není dle mého názoru ani v jednom bodě zmínka o odpadní vodě. Naopak, ve stejné části je řečeno, že se nakládání týká pouze povrchových vod. Tím pádem bych si dovolil konstatovat, že u bezodtokových likvidací odpadních vod se nejedná o obecné nakládání s vodami.

Dalším důležitým pojmem vodního zákona je vodní dílo (Hlava VIII, § 55). První odstavce paragrafu 55 obsahuje výčet staveb, které se považují za vodní dílo. Jedná se například o přehrady, jezy, stavby na ochranu před povodněmi či vodovodní řady včetně vodárenských objektů a úpraven vody. V prvním odstavci však žádnou zmínku bezodtokových jímek nebo jímek na vyvážení nevidíme.

Třetí odstavce paragrafu 55 vymezuje stavby, které se za vodní díla nepovažují. Jedná se například o terénní úpravy, vodohospodářské úpravy, či bezodtokové jímky včetně přítokového potrubí. Takový bezodtokový systém však neprovádí žádnou úpravu jakosti

odpadních vod. Tím pádem nelze s jednoznačností říct, že se v souvislosti s technologickým řešením, které popisuje tato práce, o vodní dílo nejedná – v podstatě se jedná o zařízení, které není napojeno na odtokové potrubí, neovlivní povrchové ani podzemní vody, odpadní voda není vypouštěna. Na druhou stranu, součástí uzavřeného systému je postupná změna jakosti vody – postupně se voda upravuje na takovou úroveň a kvalitu, aby nečistoty nezpůsobily zanesení filtračního stupně

Vraťme se tedy do prvního odstavce paragrafu 55. Nalezneme zde pod výčtem staveb, které jsou vodními díly písmeno l, které říká, že vodní díla jsou jiné stavby potřebné k nakládání s vodami povolovanému podle § 8. Stavba by tedy dle mého názoru měla být vodním dílem v případě, kdy je k jejímu povolení potřebné povolení k nakládání s vodami.

Povolení k nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami popisuje paragraf osmý vodního zákona (Hlava II, díl 3, oddíl 1, § 8). Paragraf 8, odstavec 1 říká, za jakých okolností je ke stavbě potřebné povolení k nakládání s vodami. Písmeno c tohoto odstavce definuje, že povolení k nakládání s vodami je potřebné pro vypouštění odpadních vod do vod povrchových nebo podzemních. V části vodního zákona, zaměřující se na povolení k nakládání s vodami, není žádná další zmínka o odpadních vodách.

Bezodtokové systémy likvidace odpadních vod, které jsou předmětem této práce, neslouží k vypouštění odpadních vod do povrchových ani podzemních vod. Z tohoto pohledu je tedy správná úvaha, že pro bezodtokové likvidace odpadních vod není potřebné nakládání s vodami. Tím pádem by se nemělo jednat ani o vodní dílo.

### 3 BEZODTOKOVÁ LIKVIDACE ODPADNÍCH VOD

Bezodtoková likvidace odpadních vod představuje inovativní způsob likvidace odpadních vod z jednotlivých nemovitostí, administrativních budov, či dalších objektů. Jak bylo nastíněno již v kapitole Legislativní rámec, jedná se o vícestupňovou úpravu vlastností vody takovou, aby bylo možné bezproblémově odpadní vodu vypařovat do atmosféry bez provozních problémů. Součástí systému je usazovací nádrž, filtrační stupeň a samotná akumulární a recirkulační jímka. Výsledné zařízení může mít zajisté mnoho variantních uspořádání (Škarpa, 2022), práce se však zaměřuje na jednu konkrétní. Představované uspořádání je založeno na principu přírodních čistíren odpadních vod, tedy systému, fungujícímu bez vnosu elektrické energie.

Jak bylo uvedeno, systém je založen nejprve na odsazení nečistot z odpadní vody. Jak praxe ukazuje, nejlépe pro daný účel slouží anaerobní separátor, nahrazující starší septiky. Anaerobní separátor je zařízení, určené k odstranění nerozpuštěných látek prostřednictvím sedimentace. Navíc je doplněno o systém potrubí a norných stěn, které zajišťují i zachycení plovoucích nečistot (například olejových emulzí, vyflotovaného kalu, resp. veškerých látek s nižší objemovou hmotností, než voda). Systém vnitřních potrubí a norných stěn zabraňuje vniku zkratových proudů (Kriška, 2014), zajišťuje prodloužení trajektorie vodního paprsku, zpomaluje tak rychlost průtoku a tedy způsobuje efektivnější sedimentaci látek s vyšší objemovou hmotností, než je objemová hmotnost vody. V oblasti přírodních čistíren odpadních vod jsou anaerobní separátory využívány jako mechanické předčištění (ÚNMZ, 2017).

Navazujícím stupněm je vertikální filtr, který byl v podmínkách České republiky poprvé testován v letech 2011 až 2015, přičemž byl vyhodnocen jako výrazně účinnější řešení než původní užívané filtry s horizontálním průtokem (Kriška). Dnes již běžně slouží biologickému čištění odpadních vod zejména prostřednictvím aerobních bakterií žijících na povrchu filtračního materiálu (Kriška, 2014). Výhodou vertikálního filtru je aerobní prostředí zajištěné povrchovým systémem distribučního potrubí (ÚNMZ, 2017). Dostupnost kyslíku umožňuje odstranění nejen organických látek, ale také snížení koncentrace amoniakálního dusíku ve vodě nitrifikací (Maciejewski, 2022).

Právě vertikální filtr, jakožto objekt umístěný nad úroveň terénu, osázený mokřadní vegetací v rámci veškerého nadzemního povrchu, umožňuje snižovat odtok vody prostřednictvím evapotranspirace. Různými úpravami návrhu vertikálního filtru lze teoreticky dosáhnout situace, kdy z něj nebude odtékat žádná voda. Mezi takové úpravy lze zařadit zvětšení půdorysné plochy, či zvýšené nasycení filtračního prostředí vodou. Jelikož je výsledný objekt primárně určen pro vypařování odpadních vod, bude v dalším textu nazýván, vzhledem k fyzické podobnosti s vyvýšenými záhony, jako vyvýšený vypařovací záhon, neboli zkráceně vypařovací záhon.

Velikost plochy vypařovacího záhonu vychází ze znalosti přítékajícího množství odpadních vod, klimatických podmínek oblasti, a případného dalšího využití vody za záhonem. Je potřeba brát na zřetel sezónní charakteristiku funkce záhonu. Lze totiž předpokládat, že k výparu ze záhonu bude docházet primárně v letním období, jaro a podzim jsou z pohledu úhrnu evapotranspirace mírnější. Evapotranspirační úhrny v zimních měsících by měly být v porovnání s létem prakticky zanedbatelné. Jelikož je vypařovací záhon založen na technologii vertikálních filtrů, je jeho přidanou hodnotou paralelně a přirozeně probíhající úprava jakosti odpadních vod. Nabízí se tedy teoretická možnost využití přebytečné vody k recyklaci, např. coby užitkovou vodu za účelem splachování toalet.

Dalším důležitým vstupním parametrem pro navrhování vypařovacích záhonů je lidský faktor, resp. provozní přístup uživatele. Provozovatel bezodtokového systému má zásadní vliv na výslednou účinnost (z pohledu intenzity evapotranspirace). Pravidelnou údržbou vypařovacího záhonu lze docílit vyššího výparu, než u záhonu zanedbaného. Provozovatel je také povinen zajišťovat odkalování anaerobního separátoru.

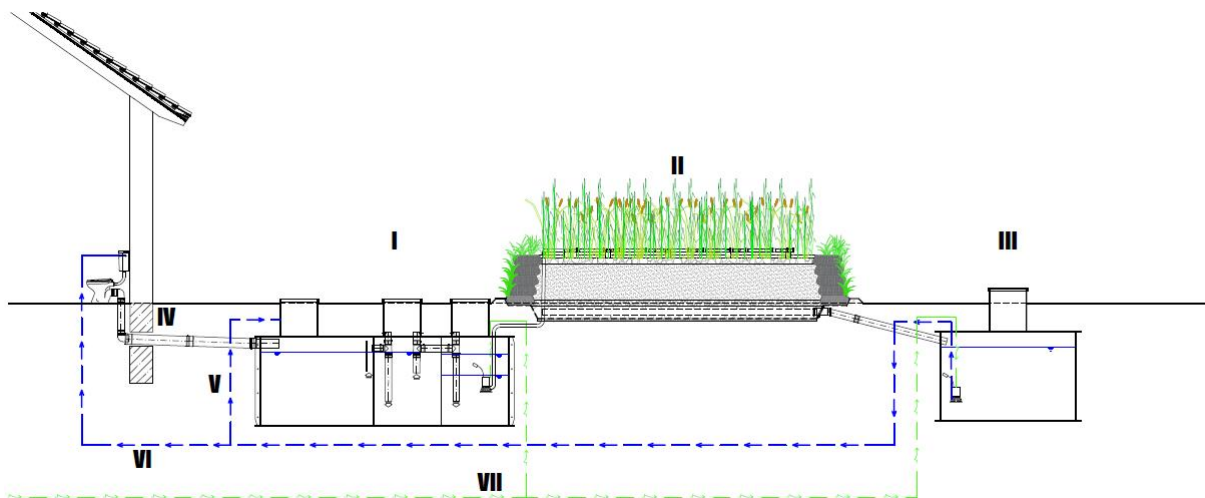
Vypařovací záhon na základě faktorů, které ovlivňují jeho funkci, všechnu odpadní vodu převede do atmosféry pouze teoreticky. Pokud by měl být vypařovací záhon 100% účinný a měl by vypařit veškerou přivedenou vodu, musel by být dimenzován na stranu bezpečnou, resp. musel by být předdimenzovaný, tedy drahý. Je proto doporučeno ve všech případech za záhonem zajistit akumulaci vody, která pokryje zvýšené odtoky v případě srážek, i cyklický charakter evapotranspirace (přítok odpadních vod ze zdroje v zimních měsících, kdy nedochází k evapotranspiraci). K akumulaci je vždy vhodné doplnit recyklaci vody.

Navrhování vypařovacích záhonů je kromě poznatků uvedených výše založeno na znalosti evapotranspiračních úhrnů. Evapotranspirace je však velmi komplexní pojem. Přesné určení evapotranspirace vypařovacího záhonu lze založit pouze na skutečném měření. Proto je výpočet přesného úhrnu evapotranspirace u záhonu, který ještě není postaven, téměř nemožný úkol, lze se jí však s určitou přesností přiblížit.

Skutečná evapotranspirace je nejčastěji stanovována na základě potenciální evapotranspirace, protože ji lze stanovit na základě běžně dostupných meteorologických dat (Liu, 2022). Při běžných postupech se skutečná evapotranspirace odhaduje na základě lineárního vztahu s potenciální evapotranspirací (Peng, 2019; Senay, 2020). Lineární vztahy mezi potenciální a referenční (skutečnou) evapotranspirací prokázalo mnoho výzkumů (Glenn, 2011; Gervais, 2011; Filgueiras, 2020; Senay, 2020). Výzkumy odhalily, že poměr mezi potenciální evapotranspirací a evapotranspirací referenčních plodin je funkcí nasycení půdního profilu (Liu, 2022). Příkladem stanovení skutečné evapotranspirace na základě lineárního vztahu s potenciální evapotranspirací je široce používaný odhad skutečné evapotranspirace v hydrologických, či jiných modelech (Miralles, 2011; Peng, 2019; Van Beek, 2011).

Nasycení půdního profilu je tedy stěžejním faktorem pro definování poměru skutečné a potenciální evapotranspirace (Akuraju, 2017; Filgueiras, 2020; Senay, 2020). Změny evapotranspirace jsou totiž zřetelně závislé na přítomnosti vláh v půdě (Condon, 2020). Pakliže nedojde ke změnám ostatních meteorologických faktorů, je pokles evapotranspirace způsoben nedostatkem vláh pro rostliny (Jung, 2010). Tuto teorii podporuje studie (Condon, 2019), která ukázala, že k poklesu evapotranspirace nejčastěji dochází při suchých meteorologických periodách.

Vypařovací záhony jsou ale součástí systému, který je kromě srážek zásobován i odpadní vodou. Lze tedy předpokládat, že k jejich vysušení by mohlo dojít až v případě dlouhých bezdeštných period, při kterých by se vypařila veškerá voda akumulovaná za vypařovacím záhonem, a navíc by byl přerušen přítok odpadní vody ze zdroje. I když k takové situaci teoreticky dojít může, je její výskyt u stále využívaných staveb spíše nepravděpodobný. Evapotranspirace bude z hlediska dostupnosti vláh limitována spíše množstvím vody dodávaným distribučním potrubním systémem. Kromě evapotranspirace je totiž potřeba mít na paměti i úpravu jakosti odpadních vod, která umožňuje její další využití. Pro úpravu jakosti je totiž nezbytné dodržet maximální plošné hydraulické zatížení, při kterém dochází k odstranění organických látek a amoniakálního dusíku. Hodnota hydraulického zatížení může pak být menší, než ideální nasycení půdy k maximalizaci evapotranspirace.

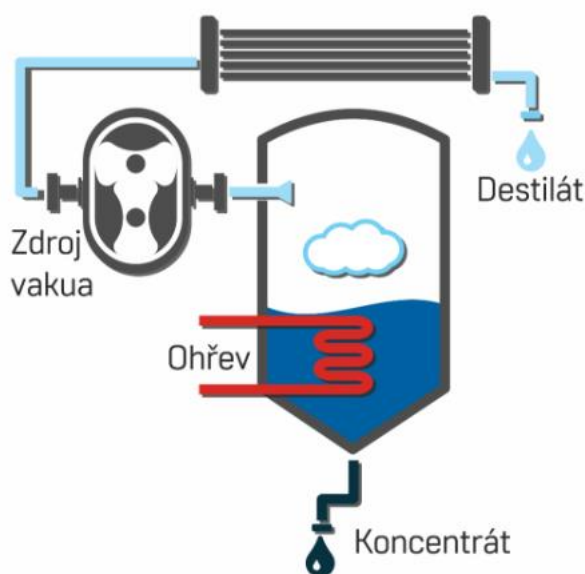


Obrázek 1 Schéma bezodtokové likvidace odpadních vod s akumulací upravených odpadních vod, kde: I - Anaerobní separátor, II - Vertikální filtr s vegetací, III - Akumulační jímka, IV - Přítok odpadních vod ze zdroje, V - Cirkulace upravených odpadních vod, VI - Recyklace odpadních vod ke splachování toalet, VII - podzemní vedení NN

### 3.1 VAKUOVÉ ODPAŘOVÁNÍ

Kromě bezodtokové likvidace odpadních vod je výpar využíván také technologií vakuového odpařování. Jedná se o proces, který se využívá ke zvyšování koncentrace látek rozpuštěných ve vodě. Technologie využívá závislosti teploty varu na tlaku okolního prostředí. Varem dochází k evaporaci vody bez znečišťujících látek, které se tak ve vodě zahušťují. Pro úsporu energií při ohřevu vody proces probíhá za sníženého tlaku vzduchu, aby k varu vody docházelo při nižších teplotách. (KOVOFINIŠ a.s.)

Výstupem z vakuového odpařování je destilát, představující čistou vodu. Destilát lze následně zpětně využít, anebo recyklovat. Druhým výstupem je koncentrovaný roztok, který lze dále využívat (pokud je to možné). Pokud není možné koncentrovaný roztok použít, musí se likvidovat patřičným způsobem. Vakuové odpařování umožňuje snížit objem odpadních vod o více než 90 %. (KOVOFINIŠ a.s.)



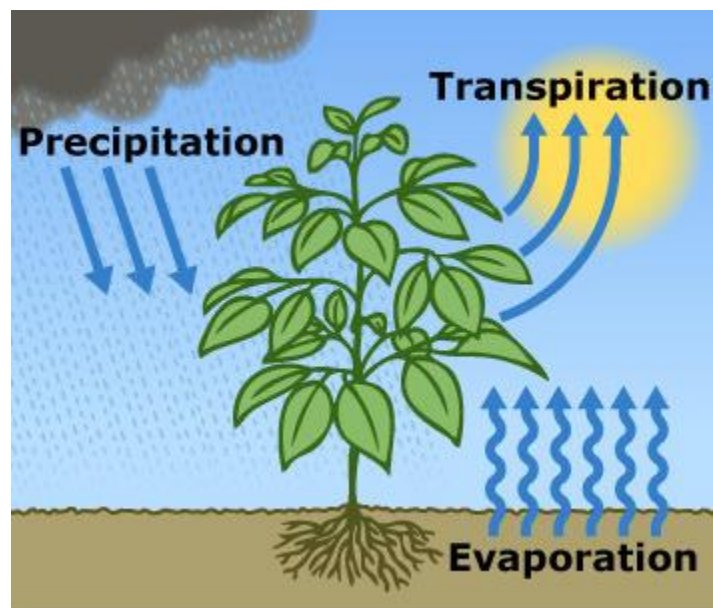
Obrázek 2 Schéma vakuového odpařování (KOVOFINIŠ a.s.)

Technologie vakuového odpařování se využívá pro odpadní vody z průmyslu, například chemického, strojírenského, hutního, farmaceutického, atd. (KOVOFINIŠ a.s.)

Ačkoliv vakuové odpařování vede k výraznému snížení objemu odpadních vod na odtoku (objem koncentrátu), nejedná se o bezodtokové řešení. Koncentrát je totiž třeba dále likvidovat, a poté vyčištěnou vodu vypouštět do recipientu. Navíc se technologie vakuového odpařování aplikuje na průmyslové odpadní vody, nikoliv na splaškové.

## 4 EVAPOTRANSPIRACE

Evapotranspirace je proces spojující hydrologický cyklus, povrchovou energetickou bilanci a koloběh uhlíku (Liu, 2022). Hraje důležitou roli v hydrologickém cyklu, kde vrací přibližně 60 % srážek ze zemského povrchu zpět do atmosféry (Oki; Jiang, 2022). Jedná se o souhrn procesů (evaporace a transpirace), kterými se voda transportuje ze zemského povrchu do atmosféry (Evapotranspiration and the Water Cycle, 2018). Zahrnuje výpar vody do atmosféry z volné hladiny, z půdy, a transpiraci rostlin (Jandora, 2020; Jiang, 2022). Transpirace představuje proces, kdy je voda z půdy převáděna do ovzduší prostřednictvím rostlin (Petruzzello, 2023). Evapotranspirace se rozlišuje na potenciální, stanovenou výpočty, a skutečnou (Amatya).



Obrázek 3 Evapotranspirace (Evapotranspiration and the Water Cycle, 2018)

Většina vlhkosti v atmosféře planety (přibližně 90 %) je výsledkem výparu z vodní hladiny (A Multi-Phased Journey). Nejvýznamnější část výparu z vodní hladiny má původ v evaporaci z oceánů, moří, jezer a řek (Reichler, 2009; Jiang, 2022). Zbýlých 10 % vodních par má původ v transpiraci.

Odhaduje se, že 36 % úhrnu srážek nad pevninou má původ v evapotranspiraci z pevniny (Tuinenburg, 2020). Analogicky lze tedy odvodit, že většina srážek nad pevninou je způsobena výparem vody z oceánů. Orografie konkrétního regionu však může tento poměr znatelně ovlivnit (Tuinenburg, 2012). Proudění vlhkosti v atmosféře je dále ovlivněno také antropogenním vlivem na půdu (například zemědělstvím) (Keys, 2016; Wang-Erlandsson). Většina vypařené vody putuje několik stovek až tisíců kilometrů, než spadne na povrch ve formě srážky (Dirmeyer, 2007).

Množství srážek je v celosvětovém pohledu rovno součtu evapotranspirace s infiltrací vody do hlubokých vrstev zeminy (Lifeng, 2021). Rovnost lze vyjádřit následující bilanční rovnicí.

$$H_s = E_p + H_{inf} \text{ [mm/m}^2\text{]}$$

Kde:

- $H_s$  – úhrn srážek na jednotku plochy [mm/m<sup>2</sup>]
- $E_p$  – úhrn evapotranspirace na jednotku plochy [mm/m<sup>2</sup>]
- $H_{inf}$  – úhrn infiltrace na jednotku plochy [mm/m<sup>2</sup>]

#### 4.1 VÝPAR Z VODNÍ HLADINY

Výpar z vodní hladiny, neboli evaporace, je zásadní součástí hydrologického cyklu (Liu, 2023). Jedná se o jev za kterého voda mění skupenství z kapalného na vodní páry uvolňované do atmosféry (Bolton, 2018). Evaporace nastává jakmile energie dodaná teplem způsobí destrukci vazeb mezi jednotlivými molekulami vody (Evaporation and the Water Cycle, 2019).

Evaporace je funkcí teploty a atmosférického tlaku (nadmořské výšky) (Roth, 2023). Platí tak, že při změně teploty či tlaku dojde ke změně intenzity výparu (Blaney). Balanc mezi efektem tlaku a teploty je závislý na dalších vlivech, jako je například sluneční záření či větrné podmínky (Blanken, 2000; Rosenberry, 2007; Wang, 2017).

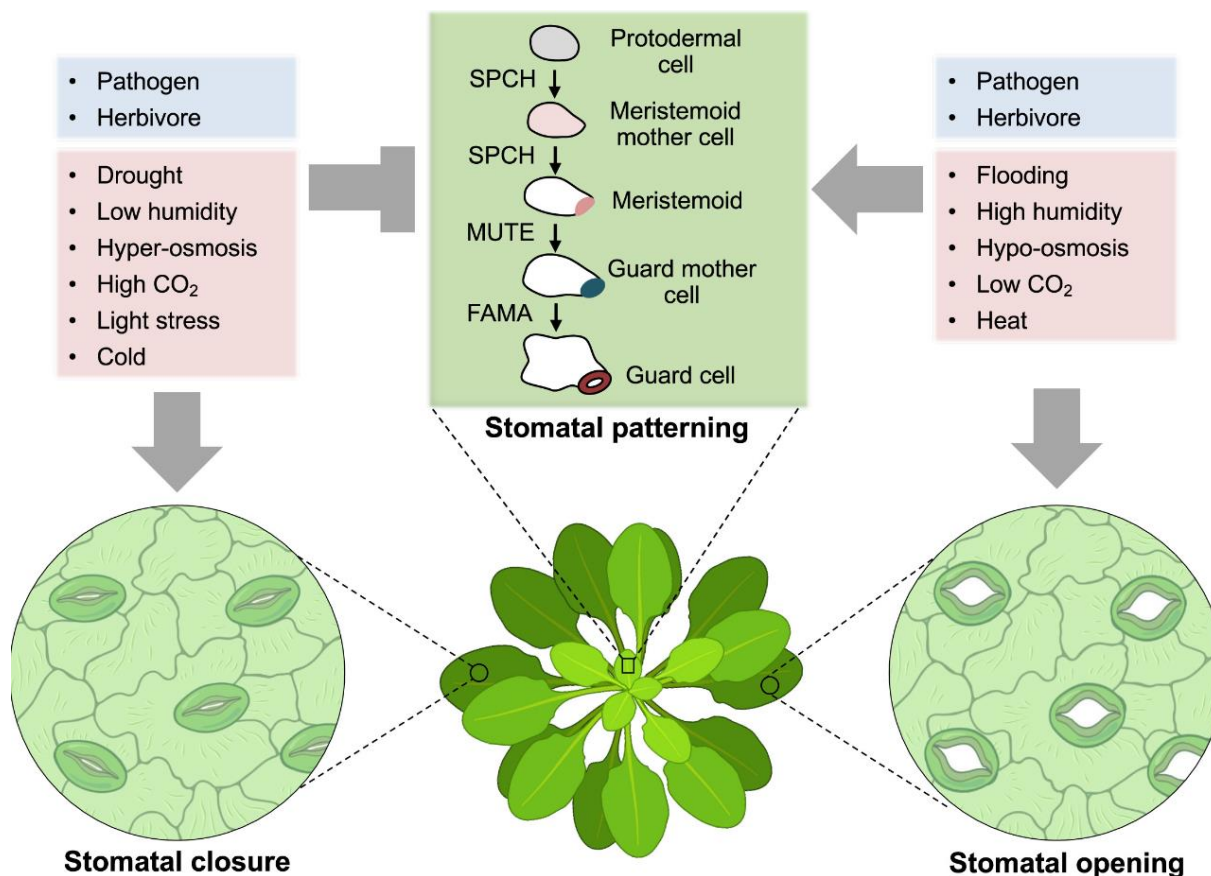
#### 4.2 VÝPAR Z PŮDY

Výpar z půdy se v přírodě nejvíce uplatňuje ve formě transpirace (Glanville, 2023). Kromě transpirace se však vlhkost půdy může snižovat i evaporací, ke které dochází na fázovém rozhraní mezi půdou a atmosférou (Li, 2022). Takovou evaporaci lze zjednodušeně nazvat výparem z půdy (pro rozlišení od výparu z vodní hladiny). Výpar z půdy je ovlivněn nejen sytostním doplňkem (množství vodní páry, které je třeba do vzduchu doplnit, aby se stal nasyceným), ale také vlastnostmi půdy, jako je například půdní vlhkost, hydraulická vodivost, pórovitost, atd (Li, 2022; Gong, 2020).

Zdrojem podzemní vody mohou být jak přirozené procesy, tak i umělé systémy pro udržování půdní vlhkosti (Liu, 2017).

#### 4.3 VÝPAR Z ROSTLIN

Výpar z rostlin, známý také jako transpirace má největší podíl na ztrátě vody rostlinami (Driever, 2023; Kukul, 2022). Transpirace hraje důležitou roli v termoregulaci listů, získávání a transportu živin z půdy do rostlinných orgánů a je důsledkem otevírání rostlinných průduchů pro absorpci uhlíku z atmosféry (Maysonave, 2022; Stoy, 2019). Voda je následně z průduchů vypařena do atmosféry, čímž se zvyšuje vlhkost vzduchu (Zhenzhen, 2021). Transpirací je voda nejen vedena do ovzduší, ale také přispívá ke tvorbě biomasy (Liebhard, 2022).



Obrázek 4 Rostlinné průduchy (Hou, 2023)

Průduchy rostlin jsou tvořeny mikroskopickými póry (svěrací štěrbin), v jejichž bezprostřední blízkosti je vždy dvojice svěracích buněk (Nilson, 2007). Svěrací buňky otevírají a uzavírají průduchy, čímž jsou regulovány jejich funkce (Bailey, 2023). Průduchy rostlin mají mnoho funkcí, mezi které patří kontrola výměny plynů, optimalizace fixace oxidu uhličitého a minimalizace ztráty vody transpirací (Patel, 2021). Transpirace je tedy vedlejší efekt metabolismu rostlin a fotosyntézy. Jelikož je jednou z funkcí průduchů minimalizace ztráty vody, je zřejmé, že transpirace je pro rostliny nežádoucí.

Transpirace předvídatelně reaguje na změny jednotlivých faktorů, jako jsou intenzita světla, koncentrace oxidu uhličitého, a relativní vlhkost vzduchu (Merilo, 2014).

Transpirované množství je vázáno na obsah vody v půdě (Maysonave, 2022). Tento poznatek indikuje zvýšení transpirovaného objemu vody v případě oddělení kořenové půdní vrstvy od hlubších půdních horizontů. Oddělení by mohlo být dosaženo například s pomocí hydroizolační vrstvy.

Míra transpirace se značně liší v závislosti na podmínkách, jako jsou: (Wieland, 2019; Kelly, 2023; Wang, 2021; Gu, 2021)

- Typ rostliny a její vývojová fáze
- Vlastnosti zeminy a nasycení
- Intenzita a dopad slunečního záření
- Vlhkost vzduchu

- Teplota vzduchu
- Vítr a pohyb vzduchu
- Srážky
- Složení vody

Kromě toho je evapotranspirace ovlivněna hustotou vegetačního pokryvu, který klade odpor vodě při cestě do okolní atmosféry (Seyed, 2019).

Odběr vlhkosti z půdního prostředí přímo souvisí s přístupem k podzemní vodě (nasycení zeminy) (Doss, 1993; Dzitiki, 2013), hloubkou zakořenění (Satchithanatham, 2017), polohou v krajině (Lamontagne, 2005), meteorologickými proměnnými (Gokool, 2018), aerodynamickým odporem (Satchithanatham, 2017), ročním obdobím (Butler, 2007) a vlastnostmi vegetace (například hustota, velikost, typ) (Glanville, 2023).

Transpirace vody rostlinami se celosvětově vyjadřuje jako násobek specifické transpirace vody rostlinou na biomasu za časovou jednotku, nebo jako biomasa na jednotku plochy v systému, výslednou jednotkou je pak litr na metr čtverečný za hodinu [ $l/m^2 \cdot h$ ] (Bois, 2021). Celosvětové úhrny transpirace vyjádřené v litrech za hodinu se aplikují jako násobek plochy systému, jehož transpiraci chceme určit (Weller, 2016).

#### 4.4 ÚČINEK PŘÍRODNÍCH JEVŮ

Výrazný vliv na evapotranspiraci mají meteorologické podmínky (Chen, 2022; Jiang, 2022). Z dlouhodobého hlediska se vyskytují znatelné výkyvy v poměru mezi evaporací a transpirací (Herbst, 1999). Větší citlivost na meteorologické podmínky se vyskytuje u evaporace (Zhu, 2023). Pokud ale uvažujeme evapotranspiraci mimo jakékoliv vodní plochy, pak je v celoročním pohledu zřejmé, že transpirace převažuje nad evaporací (poměr transpirace/evapotranspirace = 0,71) bez ohledu na meteorologické podmínky (Herbst, 1999; Jiang, 2022).

Výzkumy v oblasti evapotranspirace v zemědělství taktéž indikují převahu transpirace nad evaporací (Sun, 2019). V závislosti na způsobu měření tvoří transpirace 55 % až 74 % evapotranspiračního úhrnu (Bachand, 2014). Proto budou následující odstavce zaměřeny spíše na transpiraci.

#### Sluneční záření

Transpirace rostlin je regulována endogenními i environmentálními signály, přičemž dominantní roli hraje světlo (McAusland, 2016; Yang, 2020; Wang, 2010). Při dopadu světla na list rostliny jsou otevřeny rostlinné průduchy, které umožňují difuzi molekul vody a oxidu uhličitého (fotosyntézu) (Kelly, 2023; O'Carrigan, 2014). Jak bylo zmíněno již výše, vedlejším projevem fotosyntézy je transpirace jakožto ztráta vody z rostlinných průduchů.

## Vítr

Zvýšený pohyb vzduchu by měl vést ke většímu objemu vody převedenému do atmosféry (Schymanski, 2015). Občas ale mohou nastat podmínky, za kterých zvýšení rychlosti větru může naopak vést k nižší transpiraci (Dixon, 1984; Monteith, 1965; Mellor, 1964). Při stanovení potenciální evapotranspirace se proto doporučuje nevyužívat metody využívající rychlost větru (Schymanski, 2015).

## Teplota

Míra transpirace roste společně s teplotou vzduchu (Vanstone, 2022). Teplota ovlivňuje rostlinné buňky, které ovládají průduchy (Wang, 2022). Vyšší teploty pak nutí buňky k otevření průduchů, kdežto nižší teploty je nutí k uzavření (Hsiao, 2023). Vliv teploty na transpiraci je tím pádem předvídatelný.

## Atmosférická vlhkost

Míra transpirace rostlin je ovlivněna vlhkostí vzduchu v bezprostřední blízkosti rostlin. Jakmile se zvyšuje relativní vlhkost vzduchu, dochází k lineárnímu poklesu transpirace (Ottosen, 2002). Pro vodu je totiž jednodušší přejít do atmosféry v případě, kdy je okolní vzduch vysušený.

## Nasycení půdního profilu a srážky

Významný vliv na nasycení půdního profilu vodou má složení samotného půdního profilu. Například písčité hlína zadržuje vodu méně než jílovitá hlína (Wu, 2011). V závislosti na obsahu vody v půdním profilu se úměrně mění nejen úhrn transpirace (Ray, 1998), ale i růst listů rostlin (Lecoeur, 1998). Rostliny zakořeněné v písčítých půdách jsou tedy více vystavené suchu, protože jejich transpirace dosahuje menších hodnot (Thompson, 2007; Sinclair, 1998; Robertson, 1994). Jelikož je transpirace spojená s fotosyntézou, lze říct, že rostliny v důsledku sucha rostou pomaleji, a jejich listy dosahují menší plochy.

Rostliny přirozeně odebírají vodu z půdy komplexním procesem, podmíněným fyzikálními a fyziologickými procesy (Li, 2013). Těmi dochází k úbytku podzemní vody ve svrchní (kořenové) vrstvě zeminy. Přirozenou cestu k doplnění vody zpět do svrchní půdní vrstvy představují srážky (Nigatu, 2022). V případě nedostatku srážek se pro doplnění vláhy nabízí využití závlahy.

## Rostliny

Transpirace je pro rostliny nežádoucí jev, kvůli kterému si rostliny vyvinuly řadu mechanismů pro minimalizaci ztráty vody transpirací. Příkladem takového mechanismu je uzavírání průduchů (Martin-StPaul, 2017), nebo index listové plochy (Eagleson, 1982). Obecněji se jedná o velkou škálu fyziologických procesů (Hsiao, 1976), kterými jsou rostliny adaptovány na nedostatek vody. V případě významného nedostatku vody dochází k vysychání a úhynu rostlin (Anderegg, 2016). Obecně je tento extrém závislý jednak na

schopnosti rostliny zajišťující integritu hydraulického systému při deficitu vody (Choat, 2012), a dále pak na funkci pórů řídících výměnu plynů na povrchu listů (Klein, 2014).

Výše napsané poznatky popisují reakce rostlin na stupeň nasycení půdy vodou. Například vystavíme-li mokřadní rostlinu suchu, je vystavena takzvanému stresu. Případné vyschnutí rostliny je pak dáno otevřenými průduchy, kterými je voda z ní převáděna do ovzduší, zatímco samotná rostlina uhynie. Za vyschnutím rostliny je tedy její fyziologie, která neumožňuje úplné uzavření rostlinných průduchů, jelikož jsou mokřadní rostliny adaptovány na stálý přísun vody.

Kromě nasycení půdního profilu vodou má na transpiraci vliv vývojové stádium, ve kterém se rostlina nachází. Rostliny se totiž v průběhu vegetačního období vyvíjí, a to nejen ve smyslu běžných růstových fází, ale i působením biotického a abiotického stresu (Cándido-Mireles, 2023). Biotický stres je způsoben škodlivými organismy, zatímco abiotický stres je důsledkem nepříznivých vlivů prostředí (Mosa, 2017; Duque, 2013).

Vybrané abiotické stresy: (Verma, 2013)

- Sucho
- Vysoká vlhkost
- Nízká teplota
- Vysoká teplota
- Vysoká slanost vody
- Těžké kovy

Vybrané biotické stresy: (Verma, 2013)

- Houby
- Bakterie
- Řasovky
- Hlístice
- Býložravci

Každý druh rostlin má odlišnou ekologickou valenci (schopnost snášet různé rozpětí faktorů životního prostředí) ve smyslu výše uvedených faktorů. Všeobecně však lze předpokládat, že pro dosažení vysoké transpirace je potřeba udržovat všechny faktory na hodnotách, při kterých není rostlina vystavena stresu.

Množství transpirované vody na jednotku uhlíku získaného fotosyntézou se u suchozemské vegetace pohybuje v rozmezí od 190 do 330 g(H<sub>2</sub>O) / g(C) (Cramer, 2009; Baldocchi, 2018).

## **Složení vody**

Složení vody musí odpovídat fyziologickým, chemickým a biologickým potřebám rostlin, aby byly schopny zdravě růst (Nagase, 2011). Liebigův zákon minima říká, že pro růst

rostliny je limitující ten faktor (prvek, sloučenina, chemická látka), kterého je nedostatek (Vybíralová). Jak je výše popsáno, kondice rostlin přímo ovlivňuje transpiraci. Lze tedy předpokládat vliv složení vody na transpiraci.

Celosvětově se za prvek limitující růst rostlin považuje dusík (Sinclair, 2012). Efektivita využití vody a dusíku se vzájemně ovlivňují, přičemž při nedostatku dusíku je způsobeno snížení účinnosti využití vody (Gonzalez-dugo, 2010).

Deficit dusíku způsobuje u mnoha rostlin zvýšení poměru evaporace k transpiraci (Ritchie, 1972) snížením indexu listové plochy (Cooper, 1987). Snížený index listové plochy znamená, že listy rostlin dosahují menší plochy. V důsledku menší plochy listů dochází ke snížení účinnosti transpirace omezenou účinností využití slunečního záření (Gastal, 1993; Sinclair, 1999).

Deficit vody může snížit tok dusíku z půdy do rhizosféry (vrstva zeminy u povrchu v okolí kořenů, kořeny prorostlá nebo ovlivněná) v suchých vrstvách půdy (Hungria, 2000). Pokud se omezení toku dusíku stane významné, může se snížit příjem dusíku rostlinami pod hodnotu potřebnou pro rostliny. Deficit následně vede ke snížení efektivity využití vody (Kunrath, 2020).

Účinnost, se kterou rostliny využívají vodu ke tvorbě biomasy lze popsat následujícím vzorcem (Tanner, 1983):

$$WUE = W/ET$$

Kde: WUE – účinnost využití vody rostlinami

ET – evapotranspirace

Při oddělení evaporace a transpirace u výše zmíněného vzorce dostaneme následující rovnici (Cooper, 1987):

$$WUE = (W/T)/(1+E/T)$$

Rovnice ukazuje, že účinnost využití vody závisí na účinnosti transpirace, a klesá s rostoucím podílem evaporace (Kunrath, 2020).

Zjednodušeně lze z výše popsaného vlivu dusíku na rostliny vyvodit, že když je rostlina vystavena nedostatku tohoto prvku, roste pomaleji a její listy dosahují v součtu menší plochy. V důsledku toho pak sluneční záření dopadá na menší počet rostlinných průduchů a úměrně tomu se snižuje i transpirace.

Po dusíku nejdůležitější makronutrient pro růst a vývoj rostlin je fosfor, který reprezentuje přibližně 0,2 % sušiny rostlin (Boat Bedine, 2022). Je součástí klíčových komponentů jako ATP (Feng, 2020), fosfolipidy (Wang, 2023) nebo nukleonové kyseliny (Malá). Mnoho studií prokázalo, že nedostatek fosforu v půdě vede ke snížení výsledné úrody v zemědělství (Giller; NDAKIDEMI).

Pro růst rostlin mohou být za určitých podmínek limitující i jiné prvky. Jelikož však práce pojednává se systémem zavlažovaným odpadní vodou, nepředpokládá se výraznější limitování růstu rostlin nedostatkem živin ve vodě.

## Zvuk

Rychlost růstu rostlin je ovlivněna i určitými frekvencemi zvuku. V zemědělství se používá technologie takzvaného zvukového rozkvětu, kdy se kombinuje vystavení rostliny vysokofrekvenčnímu zvuku a organickým živinám (Pujiwati, 2018). Právě vystavení vysokofrekvenčnímu zvuku, vede k většímu otevření rostlinných průduchů (Pujiwati, 2014). Výše popsaná role rostlinných průduchů ve fotosyntéze indikuje vliv zvuku na transpiraci. Téma vlivu zvuku na rostliny však není příliš prozkoumané. Proto se mu v práci nebude věnovat více pozornosti.

## 4.5 POTENCIÁLNÍ EVAPOTRANSPIRACE

Pojem potenciální evapotranspirace byl poprvé popsán v roce 1948 jako „*množství vody, které by se převedlo do atmosféry, kdyby byla k dispozici voda v neomezeném množství*“ (Thornthwaite, 1948). Pokud se zvyšuje množství dostupné vody v půdě, evapotranspirace stoupá k maximu (viz Nasycení půdního profilu a srážky). Samotná maximální hodnota evapotranspirace závisí na aktuálních klimatických podmínkách (viz 4.4 Účinek přírodních jevů ). Maximální hodnota se pak nazývá potenciální evapotranspirace (Thornthwaite, 1948).

Stanovení potenciální evapotranspirace lze provést několika způsoby. Pokud chceme stanovit potenciální evapotranspiraci na základě běžně dostupných dat, jako jsou například průměrné teploty, je vhodné použít empirické rovnice. Na základě zpracované metodiky měření bakalářské práce budou použity rovnice Hargreaves – Samani, Turc a Thornthwaite, které splňují podmínky jednoduchosti, dostupnosti a spolehlivosti výpočtu (Škarpa, 2022).

### Metoda Hargreaves

Empirická rovnice sestavená v metodě Hargreaves - Samani udává odlišné výsledky v závislosti na klimatických charakteristikách regionu. Rovnice vykazuje spolehlivé výsledky potenciální evapotranspirace, je ji však třeba kalibrovat. Kalibrace rovnice je založena na lineární regresi, úpravě koeficientů a exponentů, případně kombinací těchto metod (Cunha, 2018).

$$E_{p1,i} = A * (T_{prům} + B) * (T_{max} - T_{min})^C * R_{a,i}$$

kde: (Cunha, 2018; Bednář, 2022)

- $E_{p1,i}$  – průměrná denní potenciální evapotranspirace stanovená metodou Hargreaves - Samani [mm/den]
- A – empirický koeficient 1

- B – empirický koeficient 2
- C – empirický koeficient 3
- $T_{\text{prům}}$  – průměrná denní teplota [°C]
- $T_{\text{min}}$  – minimální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- $T_{\text{max}}$  – maximální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- $R_{a,i}$  – extraterestické záření [MJ/m<sup>2</sup>/den]

Extraterestické záření se odvozuje ze solární konstanty, zeměpisné šířky a dalších faktorů závislých na pořadí dne v roce.

$$R_{a,i} = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * d_{r,i} * [\omega_{s,i} * \sin(\varphi_i) * \sin(\delta_i) + \cos(\varphi_i) * \cos(\delta_i) * \sin(\omega_{s,i})]$$

kde: (Bednář, 2022)

- $R_{a,i}$  – extraterestické záření [MJ/m<sup>2</sup>/den]
- $G_{sc}$  – solární konstanta [0,08165 MJ/m<sup>2</sup>/den]
- $d_{r,i}$  – inverzní relativní vzdálenost od Země ke Slunci [rad]
- $\omega_{s,i}$  – hodinový úhel západu Slunce [rad]
- $\varphi_i$  – průměrná zeměpisná šířka určující polohu plochy [rad]
- $\delta_i$  – solární deklinace [rad]

Inverzní relativní vzdálenost od slunce se stanovuje z následující rovnice v závislosti na pořadí kalendářního dne v roce.

$$d_{r,i} = 1 + 0,33 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * J\right)$$

kde: (Bednář, 2022)

- $d_{r,i}$  – inverzní relativní vzdálenost od Země ke Slunci [rad]
- J – pořadí kalendářního dne v roce

Hodinový úhel západu Slunce je počítán v závislosti na průměrné zeměpisné šířce určující polohu plochy, pro kterou chceme evapotranspiraci stanovit, a solární deklinaci.

$$\omega_{s,i} = \arccos(-\tan(\varphi_i) * \tan(\delta_i))$$

kde: (Bednář, 2022)

- $\omega_{s,i}$  – hodinový úhel západu slunce [rad]
- $\varphi_i$  – průměrná zeměpisná šířka určující polohu plochy [rad]
- $\delta_i$  – solární deklinace [rad]

## Metoda Turc

Evapotranspirace hustých porostů je velmi často stanovována metodou Turc. Rovnice sestavená v této metodě je limitována kladnou průměrnou teplotou vzduchu. Výpočet je založen na průměrné denní teplotě vzduchu, průměrné denní hodnotě solárního záření, a délce slunečního svitu pro jednotlivé dny v roce. Jedná se opět o metodu, u které je

potřeba provést kalibraci empirických koeficientů. Kalibrace se provádí na základě referenčních hodnot evapotranspirace (Bednář, 2022).

$$E_{p2,i} = A * \left( \frac{T_{prům}}{T_{prům} + 15} \right) * (R_{s,i} + B)$$

kde: (Bednář, 2022)

- $E_{p2,i}$  – průměrná denní potenciální evapotranspirace stanovená metodou Turc [mm/den]
- A – empirický koeficient 1
- B – empirický koeficient 2
- $T_{prům}$  – průměrná denní teplota [°C]
- $R_{s,i}$  – denní solární záření [MJ/m<sup>2</sup>/den]

Denní solární záření je stanoveno na základě maximální a minimální teploty naměřené v průběhu dne. Rovnice kromě teplot vychází také z extraterestrického záření.

$$R_{s,i} = 0,16 * (T_{max} - T_{min})^{0,5} * R_{a,i}$$

kde: (Bednář, 2022)

- $R_{s,i}$  – denní solární záření [MJ/m<sup>2</sup>/den]
- $T_{min}$  – minimální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- $T_{max}$  – maximální teplota naměřená v průběhu dne [°C]
- $R_{a,i}$  – extraterestické záření [MJ/m<sup>2</sup>/den]

## Metoda Thornthwaite

Celosvětově využívaná metoda Thornthwaite byla původně sestavena pro klimatické podmínky střední oblasti Spojených Států Amerických. Principem metody je odhad potenciální evapotranspirace pro 30ti denní měsíc (standardní měsíc). Pro každý den se počítá s délkou slunečního svitu 12 hodin. Výsledek je definován jako funkce průměrné měsíční teploty vzduchu. Stejně jako u metody Turc se výpočet provádí pouze pro dny s kladnou průměrnou denní teplotou. Rovnice obsahuje empirický koeficient, který je potřeba kalibrovat dle referenčních hodnot evapotranspirace (Bednář, 2022).

$$E_{p3,i} = 16 * \left( 10 * \frac{T_{prům}}{I_u} \right)^{a_u} * C$$

kde: (Bednář, 2022)

- $E_{p3,i}$  – průměrná denní potenciální evapotranspirace stanovená metodou Thornthwaite [mm/den]
- $T_{prům}$  – průměrná denní teplota [°C]
- $I_u$  – teplotní index u-tého roku pro  $u = 1, 2, \dots, n$ , kdy  $n$  představuje počet let časové řady [-]
- $a_u$  – empirický koeficient představující funkci teplotního indexu [-]
- C – parametr pro přepočet metody na denní krok

Parametr pro přepočítání metody na denní krok se vypočte v závislosti na délce slunečního svitu v  $i$ -tém dni.

$$N_i = \frac{24}{\pi} * \omega_{s,i}$$

kde: (Bednář, 2022)

- $N_i$  – délka slunečního svitu v  $i$ -tém dni [hod]
- $\omega_{s,i}$  – hodinový úhel západu slunce [rad]

## 5 METODIKA MĚŘENÍ

Měření prováděné v rámci práce bylo prováděno na dvou laboratorních modelech. Cílem prvního modelu bylo posouzení významnosti meteorologických vlivů na evapotranspiraci. Druhý model byl sestaven za účelem posouzení závislosti mezi potenciální a skutečnou evapotranspirací.

Dalším cílem modelů bylo sledování chování vypařovacích záhonů za různých podmínek, a to nejen vnějších okrajových podmínek (meteorologické vlivy), ale také podmínek provozních. Provozními podmínkami se rozumí konfigurace vypařovacího záhonu a jeho provozní režim. Vypařovací záhon může být zavlažován nejen odpadní vodou z anaerobního separátoru, ale i cirkulovanou vodou z akumulární jímky. Vodu z akumulární jímky je vhodné přivádět na stěny vypařovacího záhonu. V případě potřeby komplexního odstranění sloučenin dusíku z vody je pak voda z akumulární jímky vedena do anaerobního separátoru.

Stanovení evapotranspirace, která je závislá na více zdrojích vody, je složitým bio-fyzikálním procesem. Různé konfigurace vypařovacích záhonů budou zkoumány na poloprovozních modelech, sestavených ve spolupráci s projekční kanceláří ConWe s.r.o. Podrobnější popis poloprovozních modelů je uveden v části Poloprovozní modely

Úhel dopadu slunečního záření na vypařovací záhon je potřeba rozdělit na dvě části. První část dopadá na vodorovný povrch vypařovacího záhonu. Druhá část dopadá na stěny záhonu. Proto lze očekávat odlišný úhrn evapotranspirace na ploše stěn v porovnání s vodorovnou plochou záhonu (při ploše stejné velikosti). Vliv stěn na celkový úhrn evapotranspirace odpadních vod je však pro přesný popis probíhajících jevů potřeba sledovat samostatně.

Samostatná analýza evapotranspirace ze stěn vypařovacích záhonů je sledována na jednom z laboratorních modelů, který byl sestaven v rámci práce. Aby bylo možné přesně posoudit vlivy jednotlivých meteorologických faktorů, je model umístěn na meteorologické stanici UVHK. Výsledky měření modelu by měly odhalit, do jaké míry je evapotranspirace ovlivňována jednotlivými vlivy.

Model sestává z trojice paralelních geotextilních pytlů, zavlažovaných prostřednictvím dávkovacích čerpadel. Pytle jsou umístěny v otevřených nádobách, ze kterých je sací trubicí voda čerpána do dávkovacího čerpadla. Voda z čerpadla je pak vedena na povrch pytle, který je do určité míry zatravněn. Pulzní čerpadla umožňují regulaci nasycení náplně geotextilních pytlů.

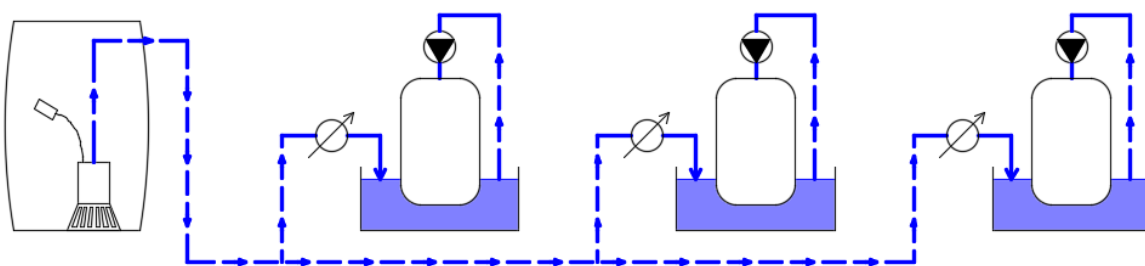
Druhý laboratorní model je umístěn na výzkumném polygonu UVHK. Jeho koncepce je založena na Bezodtoková likvidace odpadních vod popsané výše. Výstavba celého laboratorního modelu proběhla v létě roku 2021. První měření začaly v září téhož roku. V roce 2022 byla publikována bakalářská práce, která popsala první výsledky druhého

modelu. Výsledky byly navíc porovnány s potenciální evapotranspirací stanovenou několika způsoby (Škarpa, 2022).

## 5.1 LABORATORNÍ MODEL 1

Konstrukce systému sestává z trojice na sobě nezávislých, paralelně zapojených okruhů. Doplnění vody do celého systému je zajištěno tlakovým čerpadlem, které je napojeno na trojici záchodových splachovačů, tzn., jeden splachovač pro každý maltovník. Čerpadlo je ovládáno manuálně. Jeho zapínání je prováděno při každé kontrole systému. Po naplnění maltovníků je vždy na konci kontroly odečten stav vodoměrů, které jsou umístěny před splachovači u maltovníků. Odečty vodoměrů umožňují vyhodnotit bilanci evapotranspirace skutečně realizované mezi jednotlivými kontrolami systému. Samotné čerpadlo je umístěno v zásobní nádrži, do níž je voda dopravována hadicí z umyvadla učebny meteorologické stanice.

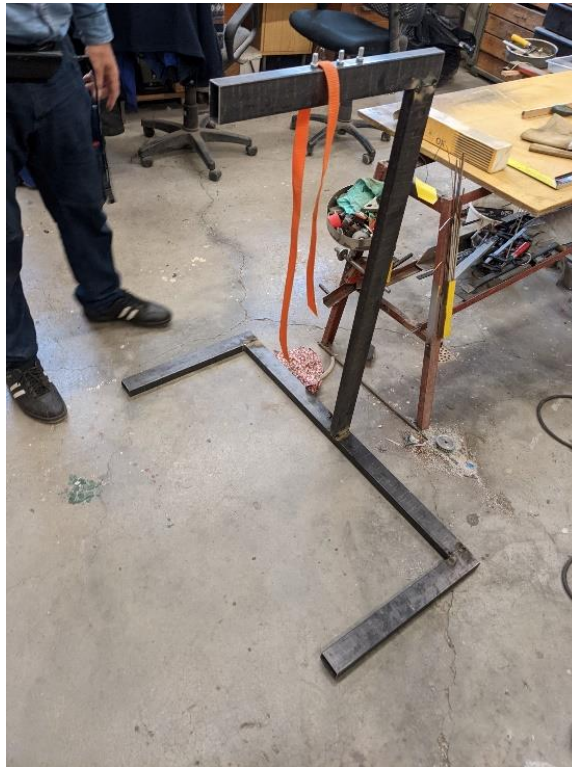
Všechny tři okruhy mají totožnou konstrukci. Vstupní voda k syčení pytle je čerpána z otevřené nádoby (maltovník o celkovém objemu 90 l, s rozměry 500 x 810 x 297 mm). V maltovníku je umístěn speciálně připravený pytel z nasákové geotextilie, naplněný stavebním recyklátem. K zajištění stability byla připravena ocelová nosná konstrukce, na níž je pytel zavěšen nad maltovníkem. Maximální hladina vody v maltovníku je zajišťována nainstalovaným toaletním splachovačem. Zapojením splachovače na přívod tlakové vody je zajištěno dopouštění vody na požadovanou úroveň, při dosažení definované hladiny se ventil na splachovači uzavře. Popsané řešení a zapojení zajistí naplnění maltovníku vždy do přibližně stejné úrovně. Minimální hladina vody není stanovena a je závislá na intenzitě výparu. U dna maltovníku je umístěna sací hadice, napojená na cirkulační (dávkovací, pulzní) čerpadlo. Voda je nasávána čerpadlem tak, aby byla navazující výtlačnou hadicí dopravena na horní povrch zavěšeného pytle. Část přivedené vody přechází vlivem meteorologických veličin výparem do atmosféry, část volně stéká zpět do maltovníku, čímž je vytvořen cirkulační okruh, resp. je zajištěn vlhký povrch na zavěšeném pytli.



Obrázek 5 Schéma experimentálního modelu 1

## Výstavba modelu

Provádění modelu začalo svařením trojice konstrukcí určených k zavěšení naplněných pytlů. Konstrukce je svařena z obdélníkových profilů, a opatřena ochrannou modrou povrchovou úpravou. Všechny tři svařené konstrukce byly po zhotovení vyneseny na meteorologickou stanici. Následně byl ke každé z nich položen maltovník.



*Obrázek 6 Nosná konstrukce laboratorního modelu (6. května 2022)*

Společná nádrž na vodu s tlakovým čerpadlem se umístila do rohu stanice, a byla hadičkou propojena s umyvadlem učebny meteorologické stanice. Pod umyvadlem je na přívodu vody namontován T-kus, se kterým je hadička propojena skrze uzavírací ventil. Voda do nádrže dotéká na základě přetlaku ve vodovodním řádu. Po zhotovení propojení nádrže s vodovodním řádem bylo do nádrže umístěno čerpadlo.



*Obrázek 7 Nádrž s čerpadlem (vlevo 11., vpravo 12. července 2022)*

Propojení čerpadla s výtoky do maltovníků je řešeno soustavou flexibilních tlakových hadic. Součástí systému z hadic jsou výše popsané vodoměry a splachovače.

Dalším krokem v realizaci laboratorního modelu bylo připevnění trojice dávkovacích čerpadel k zábradlí. K dávkovacím čerpadlům byly poté připevněny sací a výtlačné hadice. Konce výtlačných hadic byly upevněny k nosným konstrukcím. Upevnění bylo provedeno, aby byla stabilizována pozice konců výtlačných hadic. Po dokončení prací souvisejících s čerpadly začalo napouštění hlavní nádrže vodou.



*Obrázek 8 Trojice paralelních systémů k měření evapotranspirace (29. června 2022)*

Voda z napuštěné nádrže byla čerpadlem dopravena do maltovníků. Po naplnění maltovníků byly na konstrukci uvázané pytle.

Samotné pytle byly vyhotoveny z nasávkavé geotextilie, a to tak, aby z nich materiál nevypadával (pomocí speciální kapsy, která po naplnění uzavře otvor). Pytle byly naplněny stavebním recyklátem od dodavatele Pokros Čebín. Poté byly uloženy do vodou naplněných maltovníků, a posypány travní směsí. Cílem horizontálního uložení pytlů bylo vyklíčení maximálního množství rostlin travní směsí. Jakmile byly pytle ozeleněné, zavěsily se do vertikální polohy.



Obrázek 9 Pytel zavěšený ve finální poloze (14. září 2022)

## Provoz modelu

Provozování modelu spočívalo v pravidelných kontrolách správné funkce celého systému, doplňování vody do nádrže s čerpadlem (zapínáním a vypínáním přítoku vody z vodovodního řadu), a zapisováním stavu vodoměrů. Při provozu se však ukázalo mnoho nedostatků spočívajících v konstrukci modelu. Největším problémem byla jakost vody v nádržích s pytli. Voda byla naplněná semínky travní směsi, které nevyklíčily, nebo vyklíčily až ve vodě. Sání čerpadel semínka často vtahovalo a docházelo tak k ucpání čerpadel či hadic. V hadicích také narůstal biofilm, což vedlo k jejich dalšímu ucpávání.

Dalším nedostatkem bylo špatné utěsnění spoje mezi sacími hadicemi a dávkovacími čerpadly. Spojem se do čerpadel často dostával vzduch, kvůli čemuž se celý systém automaticky odstavil z provozu. Dalším problémem, který byl způsoben chybou obsluhy bylo zamrznutí systému na podzim roku 2022, kdy došlo k zamrznutí vody ve splachovačích i vodoměrech. Kvůli této chybě došlo k popraskání mnoha částí systému, které musely být před novým měřením probíhajícím v roce 2023 opraveny. Měření roku 2023 mělo uspokojivější průběh, avšak i zde docházelo k častému ucpávání čerpadel, hadic a nasávání vzduchu.

Jedním z nedostatků systému byla i otevřená hladina vody ve všech maltovnicích. Vzhledem k cílům měření bylo potřeba stanovit skutečnou evapotranspiraci pouze z pytlů. Měření však zaznamenávalo evapotranspiraci jak z pytlů, tak i z volných hladin. Z toho

důvodu byl jeden ze tří okruhů vyčleněn k pokrytí hladiny vrstvou rostlinným olejem. Aby nedošlo k ovlivnění funkce samotného pytle nasáváním oleje, byla vytvořena přepážka z nerezové oceli, která zabraňuje styku pytle s olejem. Bohužel však po několika týdnech došlo k vysrážení oleje do tukové vrstvy, volně plovoucí na hladině. Pokus o separaci evaporace z volné hladiny z celkové evapotranspirace okruhu byl tudíž neúspěšný.

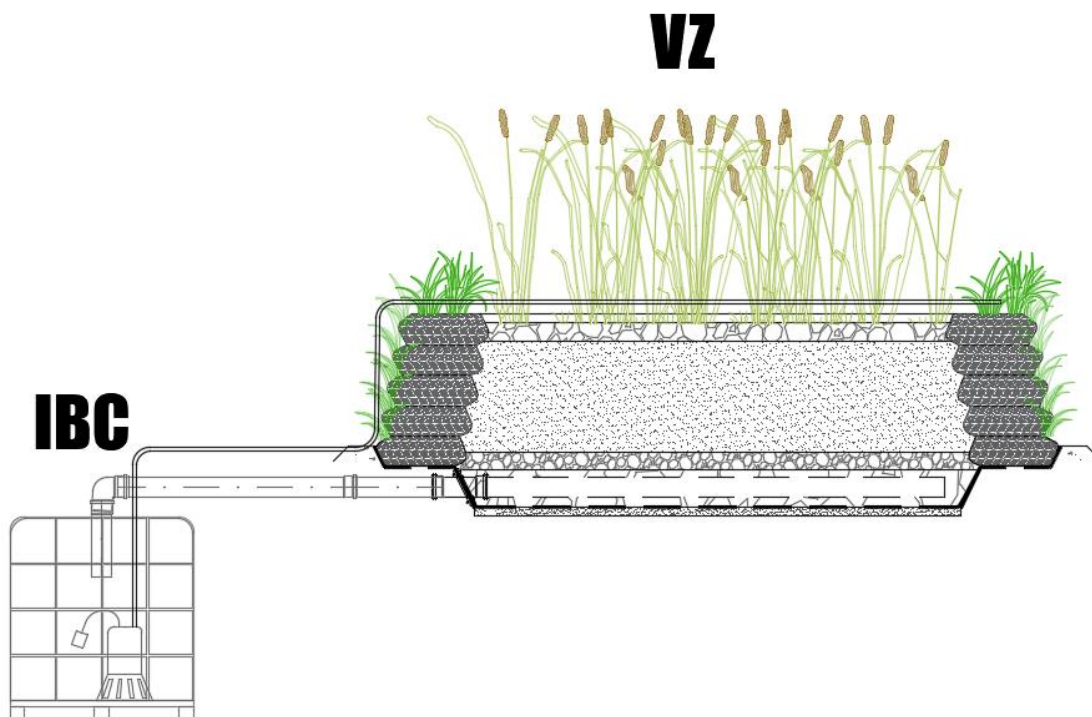


Obrázek 10 Přepážka z pozinkovaného plechu pro oddělení oleje od pytle (14. srpna 2023)

Výsledky zaznamenané z měření laboratorního modelu 1 jsou kvůli častým chybám systému velmi strohé. Proto bude systém pro další měření upraven tak, aby se nevyskytovaly výše zmíněné chyby. K posouzení vlivů meteorologických jevů na evapotranspiraci byla tím pádem v práci použita datová sada naměřená na laboratorním modelu 2.

## 5.2 LABORATORNÍ MODEL 2

Druhý laboratorní model sestává z IBC kontejneru, který simuluje funkci anaerobního separátoru a zároveň i akumulární jímky v součinnosti se zmenšeninou vypařovacího záhonu.



Obrázek 11 Schéma laboratorního modelu 2, IBC – IBC kontejner zastupující anaerobní separátor a akumulaci jímku, VZ – model vypařovacího záhonu

Vypařovací záhon má čtvercový půdorys o délce strany 2,25 m. Výška záhonu je 0,8 m. Tělo vypařovacího záhonu je záměrně tvořeno z části geotextilními a z části UV stabilními polypropylenovými pytlí. Filtrační náplň je tvořena stavebním recyklátem o frakci 0/4 mm o mocnosti 600 mm. Drenážní a povrchová vrstva je tvořena materiálem frakce 4/8 mm. Mocnost drenážní vrstvy je 150 mm, a její součástí je i drenážní potrubí PVC DREN DN 40. Drenážní potrubí je s odtokem skrz hydroizolační vrstvu propojeno prostupem, který je konstruován přírubovým spojem. Povrchová vrstva má tloušťku 50 mm.

Voda z drenážní vrstvy vypařovacího záhonu odtéká potrubím PP-HT DN 50 do IBC kontejneru. Drenážní vrstva je od okolí oddělena hydroizolační vrstvou, která společně s obvodovou hrázkou z kamenů tvoří nádobu. Je tedy vyloučen únik vody do podloží.



Obrázek 12 Model vypařovacího záhonu na výzkumném polygonu UVHK - vlevo před pokosením traviny (2. srpna 2023), vpravo po pokosení traviny (16. června 2023)

Povrch záhonu i jeho stěn je zavlažován vodou z IBC kontejneru prostřednictvím čerpadla, které vodu dopravuje do trubních rozvodů umístěných na povrchu záhonu. Trubní rozvody jsou tvořeny tzv. kapkovou závlahou.



Obrázek 13 Kapková závlaha vypařovacího záhonu

Hlavní funkcí modelu je naměření co možná největšího objemu dat prostřednictvím dvou sond. První sonda je umístěná u dna IBC kontejneru, a snímá hydrostatický tlak vody v nádrži. Aby výsledky měření nebyly ovlivněny kolísáním atmosférického tlaku, je v blízkosti záhonu umístěna druhá sonda, snímající atmosférický tlak. Sondy jsou naprogramované tak, aby bylo v počítači možno provést barologickou kompenzaci dat, kdy výsledkem je pouze tlak vyvolaný vodním sloupcem, „očistěný“ o tlak atmosférický.

Vzhledem ke známému půdorysu IBC kontejneru (1,16 x 0,96 m) lze jednoduše stanovit a posoudit výkyvy v akumulovaném množství vody v nádrži. Společně s výkyvy objemu lze stanovit i objem evapotranspirované vody v jednotlivých časových intervalech. Stanovení evapotranspirovaného objemu vody bude provedeno prostým vztažením objemu vypařené vody na půdorysnou plochu vypařovacího záhonu, která je 5,06 m<sup>2</sup>.

Naměřená data, která jsou v dalších částech zpracována, poslouží ke stanovení závislosti mezi potenciální a skutečnou evapotranspirací, a také k výběru vhodných metod pro stanovení potenciální evapotranspirace pro budoucí výpočty.

### 5.3 POLOPROVOZNÍ MODELY

Součástí práce jsou i tři projektové dokumentace jímek s vypařovacími záhony. Všechny tři dokumentace jsou v přílohách práce. Úkolem poloprovozních modelů je zpřesnění měření, a otestování reálné evapotranspirace vypařovacích záhonů v praxi. V době publikace této práce jsou dva z těchto modelů již v provozu. V obou případech se jedná o jímku s předřazeným vypařovacím záhonem, a anaerobním separátorem. Obě zařízení mají předmětně sloužit k vypařování odpadních vod z rekreačního objektu, a jejich recyklaci.

Třetí projektová dokumentace je reálnou dokumentací pro provedení stavby jímky s předřazenou filtrací pro administrativní objekt. Cílem navržené stavby, která by měla být realizována v první polovině roku 2024, je vypařování odpadních vod vzniklých provozem administrativního objektu. Přítok odpadních vod ze zdroje je stanoven na 3 600 l/den. Důležitou funkcí stavby je recyklace odpadních vod ke splachování toalet. Průtok recyklované vody je stanoven na 2 400 l/den. V vypaření veškerého objemu odpadních vod je tedy potřeba dosáhnout průměrné denní evapotranspirace 1 200 l/den.

### **Popis řešení první dokumentace**

Zařízení využívá stávající jímky, která byla přestavěna na septik. Dále je voda vedena do dalších dvou komor anaerobního separátoru vytvořených novou plastovou nádrží. Septikem a anaerobním separátorem vzniká mechanické předčištění o celkovém užitém objemu 6 m<sup>3</sup>. Kromě zachycení nerozpuštěných látek sedimentací a separací plovoucích nečistot zde vzhledem ke dlouhému zdržení odpadních vod dochází také k anaerobnímu rozkladu usazeného kalu. Voda je ze druhé komory anaerobního separátoru čerpána na povrch vypařovacího záhonu.

Vypařovací záhon je proveden tak, aby bylo možné vodu na odtoku z něj recyklovat. Filtrační souvrství, hydraulické a látkové zatížení plochy záhonu je navrženo tak, aby docházelo k biologickému čištění odpadních vod v jeho substrátu. Zároveň vzhledem k aerobnímu charakteru filtrační náplně dochází a nitrifikaci amonných kationtů. Kromě náplně záhonu budou vodou syceny také stěny, prostřednictvím samostatného zavlažovacího okruhu (kapkové závlahy), který je umístěn na povrchu stěn. Voda k závlaze stěn bude odebírána z akumulární jímky, do které bude vedena voda odtékající z vypařovacího záhonu.

Pro zajištění evapotranspirace byl vypařovací záhon osázen mokřadními rostlinami.

Akumulární jímka je řešena PP nádrží o objemu 3,6 m<sup>3</sup>. Voda z akumulární jímky je pak čerpadlem vedena ke splachování WC. Pokud dojde k naplnění akumulární jímky, je provozovatel povinen zajistit její vyvezení společně s kalem usazeným u dna anaerobního separátoru.

### **Popis řešení druhé dokumentace**

Odpadní vody jsou vedeny z rekreačního objektu do anaerobního separátoru, který jakožto mechanické předčištění zajistí odstranění nerozpuštěných látek. Kal usazený u dna nádrže je pak rozkládán anaerobními procesy. Hydraulické řešení separátoru také zajišťuje separaci emulzí. Separátor je řešen trojicí komor o celkovém objemu 6 m<sup>3</sup>. Třetí komora anaerobního separátoru je vybavena čerpadlem s plovákem, které vodu vede na povrch vypařovacího záhonu.

Vypařovací záhon je řešen obdobně jako u předchozí dokumentace. Voda ze separátoru je vedena na náplň záhonu. Stěny záhonu budou opět zavlažovány vodou z akumulární jímky prostřednictvím kapkové závlahy.

Akumulární jímka osazená na odtoku z vypařovacího záhonu je provedena z PP. Kromě cirkulace vody na vypařovací záhon zajišťuje dodávku vody ke splachování toalet v rekreačním objektu. Objem jímky je 6 m<sup>3</sup>.

### **Popis řešení třetí dokumentace**

Projektová dokumentace pojednává o návrhu jímky s trojicí vypařovacích záhonů. Zařízení je doplněno o anaerobní separátor a další objekty. Splašková odpadní voda bude přivedena gravitačním potrubím do anaerobního separátoru. Separátor je tvořen z prefabrikovaných železobetonových dílců, které budou na stavbě spojeny k vytvoření trojice komor anaerobního separátoru. Stavební objekt bude navíc propojen s navazující čerpací šachtou.

Objem vody v anaerobním separátoru, nazvaný také účinný objem separátoru, bude téměř 36 m<sup>3</sup>. První komora separátoru vytvoří účinný objem 21,1 m<sup>3</sup>. Druhá a třetí komora budou tvořit shodně účinný objem 7,4 m<sup>3</sup>. Všechny komory budou dosahovat většího objemu, než je nezbytně nutné pro zajištění správné funkce separátoru. Důvodem pro větší objem nádrží je hloubka jejich uložení, kdy je nad jejich stropem vytvořen násyp zeminy o tloušťce přibližně 4 m.

Čerpací šachta je tvořena totožným dílem jako druhá a třetí komora anaerobního separátoru. Šachta bude vybavena vřetenovými čerpadly se střídavým zapojováním. Čerpadla povedou vodu na povrch vypařovacích záhonů přes armaturní šachtu. Spínání čerpadel bude řízeno časovými spínači, které zajistí rovnoměrné dávkování vody na povrch vypařovacích záhonů během celého dne. Kdyby však došlo k vyprázdnění šachty, nedojde k sepnutí čerpadel, protože jsou navíc řízena plováky.

Voda je z čerpací šachty vedena do armaturní komory, která je umístěna na stropu akumulární jímky 2. Armaturní komora je provedena ze dvou prefabrikovaných železobetonových dílců spojených k sobě ve stavební jámě na stavbě. Přívod vody z čerpací šachty je zde rozdělen na trojici vypařovacích záhonů prostřednictvím uzavíracích ventilů, jejichž uzavírání je řízeno servopohony. Systém zajistí otevření vždy jen jednoho z trojice ventilů. K otevření jednoho z ventilů dojde chvíli před sepnutím čerpadla a k jeho uzavření chvíli po uzavření čerpadla. K sepnutí čerpadla v čerpací šachtě dojde každou hodinu, a to s ohledem na dobu vypočtenou dle skutečného přítoku vody do systému.

Voda je pak vedena na všech záhonech na prostřední z trojice distribučních trubních systémů .

Náplň vypařovacího záhonu je řešena stejně jako v předchozích projektech. Celková specifická plocha všech záhonů je 727 m<sup>2</sup>. Půdorysná plocha záhonů je 481 m<sup>2</sup>. Plocha stěn je 247 m<sup>2</sup>. Poměr mezi specifickou a půdorysnou plochou je 1,5 : 1. Každý vypařovací záhon má trojici samostatných distribučních trubních systémů. Systémy jsou navrženy tak, aby střed záhonu byl vždy zavlažován odpadní vodou z čerpací šachty, která bude obsahovat organické látky a nutrienty. Okolo středního systému budou umístěny z půdorysného pohledu dvě vrstvy potrubí. Tyto vrstvy budou tvořit uzavřené okruhy. Oba okruhy budou zásobovány vodou z akumulární jímky 2, u které se neočekává výskyt znečišťujících látek. Vnitřní z dvojice okruhů bude přivádět maximální množství vody, které ještě neovlivní biologické procesy probíhající v náplni záhonu pod potrubím z čerpací šachty. U vnějšího okruhu se předpokládá mnohem menší vliv na stupeň nasycení náplně záhonu pod potrubím z čerpací šachty, a tak bude záhon zavlažovat maximálním možným množstvím vody za účelem maximalizace evapotranspirace.

Odtok vody je veden ze všech vypařovacích záhonů do akumulární jímky 1, která vytváří zásobní objem vody ke splachování toalet. U dna nádrže je umístěn sací koš, který je propojen s domácí vodárnou umístěnou v technologické nádrži. Domácí vodárna slouží k dopravě vody na toalety v administrativním objektu. Za domácí vodárnou je umístěna UV lampa k desinfekci vody. Pro případ výpadku v systému je splachování pojištěno výrobkem pro doplňování pitné vody do systému. Výrobek je vybrán takový, který při doplňování zajistí ochranu přívodu pitné vody před kontaminací odpadní vodou pomocí přerušené hladiny.

Akumulární jímka 1 i technologická nádrž budou tvořeny z prefabrikovaných železobetonových dílců stejných rozměrů, které budou ve výkopové jámě spojeny k vytvoření dvou samostatných nádrží. Oba objekty budou navíc uloženy na jedné podkladní vrstvě.

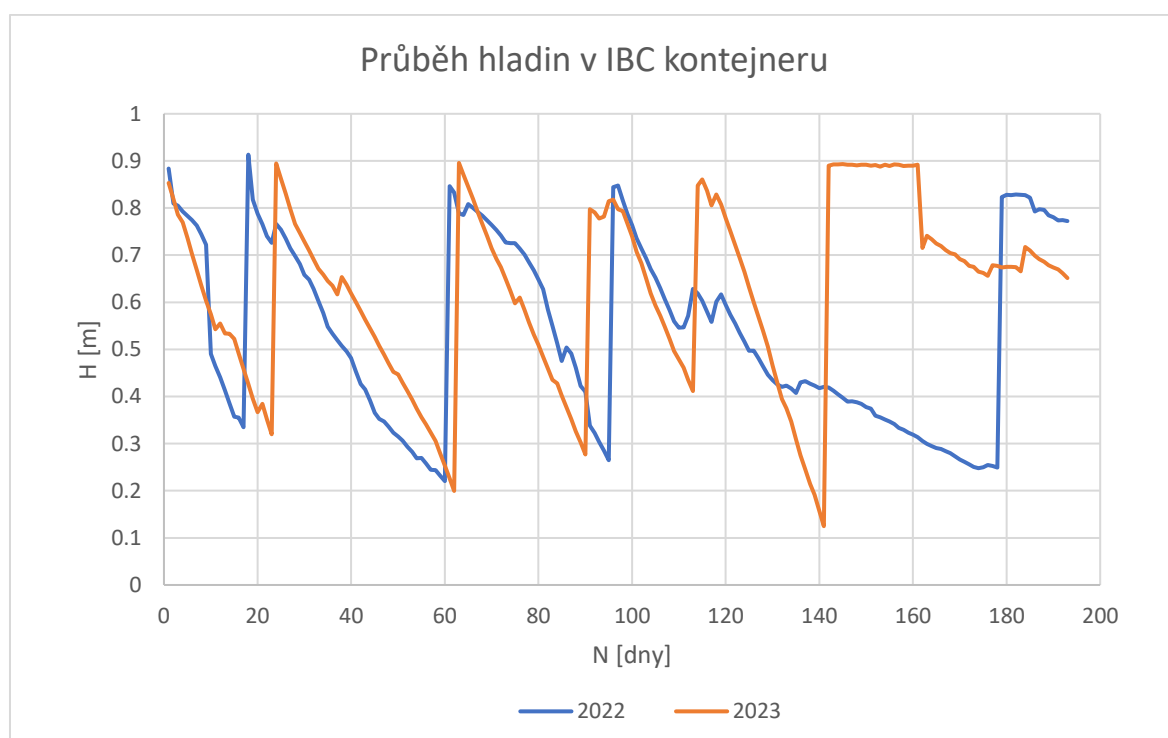
Výše popsaná akumulární jímka 1 je kromě sacího koše vybavena přepadem z gravitačního potrubí, který vodu vede do akumulární jímky 2. Ta je řešena jako velkoobjemová prefabrikovaná železobetonová jímka s akumulárním objemem 144,2 m<sup>3</sup>. Maximální hladina vody je však stanovena tak, aby vymezovala objem 117,3 m<sup>3</sup>. Zbylý objem je ponechán jako havarijný, kdy při překročení maximální hladiny je signalizována potřeba vyvezení jímky. Jímka bude vytvořena z dílců, které budou ve stavební jámě spojeny k vytvoření velkoobjemové jímky. Úkolem jímky je zachycení vody která se nevypaří v zimních měsících, nebo při srážkových událostech, aby byla vypařena později. U dna je umístěna dvojice vřetenových čerpadel, která je propojena s trojicí vypařovacích záhonů prostřednictvím armaturní komory. Výtlač z každého čerpadla je rozdělen na trojici odtoků, prostřednictvím uzavíracích ventilů ovládaných servopohony. Z armaturní šachty je tedy vedeno celkem 9 odtoků, 3 na každý záhon. Každý odtok je veden do jediného trubního systému na vypařovacích záhonech, které jsou popsány výše.

## 5.4 NAMĚŘENÁ DATA

Soubor dat zpracovaný v práci byl naměřen na druhém laboratorním modelu. Sestává ze dvou sezón, které jsou odděleny zimním obdobím. První sezóna byla měřena od 3. května 2022 do 13. prosince 2022. Druhá sezóna byla zaznamenána od 4. května 2023 do 13. listopadu 2023. Na základě výše zmíněných poznatků (Rostliny) byl v první sezóně laboratorní model udržován v provozu bez větších zásahů týkajících se rostlin. Porost záhonu byl pokosen pouze jednou, a to 22. července 2022. V druhé sezóně byly rostliny koseny vícekrát, aby bylo možné posoudit vliv údržby na množství vody převedené do atmosféry.

Před první sezónou byl laboratorní model provozován již od září roku 2021 (Škarpa, 2022), kdy byl povrch modelu osázen již mírně vzrostlými mokřadními rostlinami. Stěny modelu byly na počátku měření již obrostlé travinami v hojném počtu. U obou sezón byl model před uvedením do provozu zkontrolován, a byly odstraněny vzrostlé a uschlé traviny, aby nedošlo k negativnímu snížení evapotranspirace jejich výskytem.

Níže uvedený graf znázorňuje úroveň hladin vody v IBC kontejneru v každém dni měření. Pro sezónu 2022 (modrá barva) je řada zkrácena o konec měření, aby byly obě řady stejně dlouhé. Délka obou řad je pak 193 dnů.



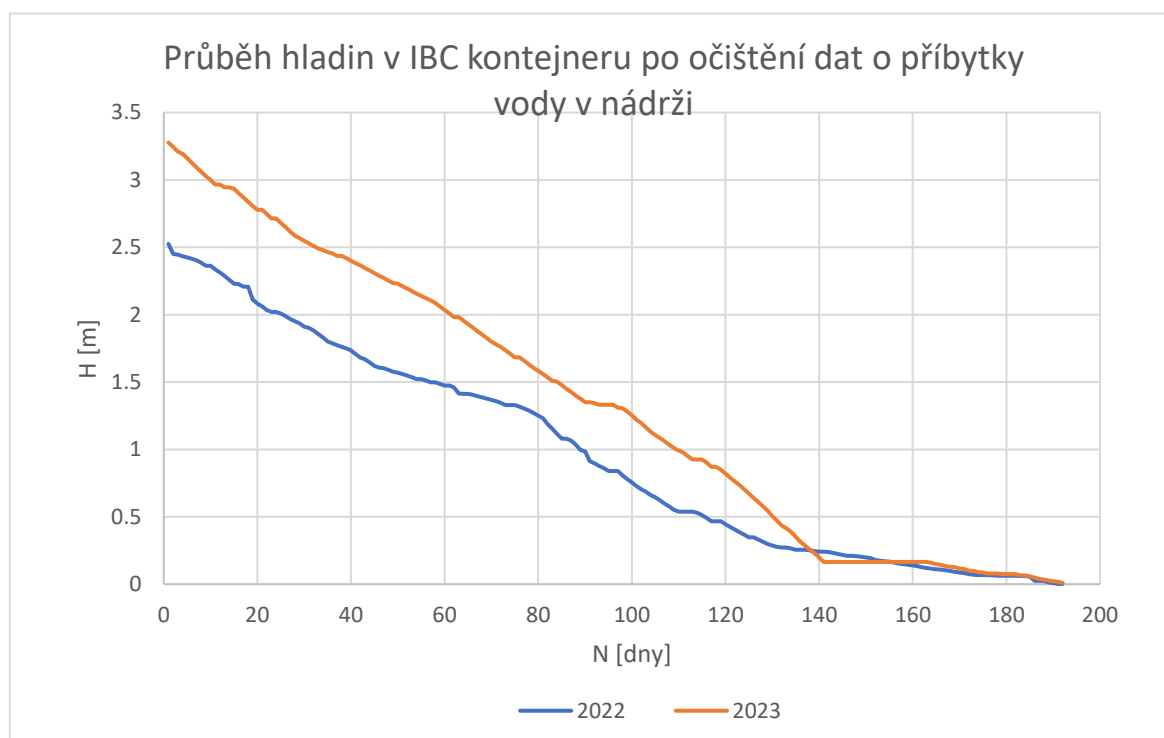
Obrázek 14 Průběh hladin v IBC kontejneru

U začátku první sezóny je patrný rapidní pokles hladiny v prvním cyklu. Tento pokles je dán chybou způsobenou při kosení travin na výzkumném polygonu UVHK, kdy byla přeseknuta hadice přivádějící vodu z IBC kontejneru na model vypařovacího záhonu. Bohužel nebylo v době přerušení hadice odstaveno čerpadlo, a tak došlo k rapidnímu úbytku vody, která vytékala na pozemek. Další chyba se vyskytla v roce 2023, která je vidět

téměř vodorovným průběhem křivky po 140tém dni měření. V této době bylo prováděno čištění potrubí na povrchu vypařovacího záhonu, pro které bylo odpojeno čerpadlo ze zdroje elektrické energie, a bohužel nebylo zapojeno zpět. Následný rapidní pokles hladiny je dán plněním vypařovacího záhonu po opětovném uvedení do provozu. Obě tyto chyby jsou zohledněny ve výpočtech vyřazením dotčených dnů z následujících výpočtů.

Hladinu grafu znázorňuje jak každé doplnění nádrže (skokové zvýšení hladiny), tak i úbytky vody v ní. Denní evapotranspirace se pak po zohlednění srážek vypočte jako úbytek hladiny od půlnoci předchozího dne, do půlnoci aktuálního dne.

Pakliže rozdíl hladin mezi jednotlivými úseky vychází kladný, vyjadřuje vypařenou hodnotu. Pokud je naopak záporný, vyjadřuje hodnotu příbytku vody v nádrži, a to buďto srážkami, anebo doplněním vody do systému. Po odstranění záporných hodnot (příbytků) dostaneme pouze pokles hladin způsobený evapotranspirací modelu vypařovacího záhonu. Tyto poklesy jsou pro oba roky znázorněny na následujícím grafu.



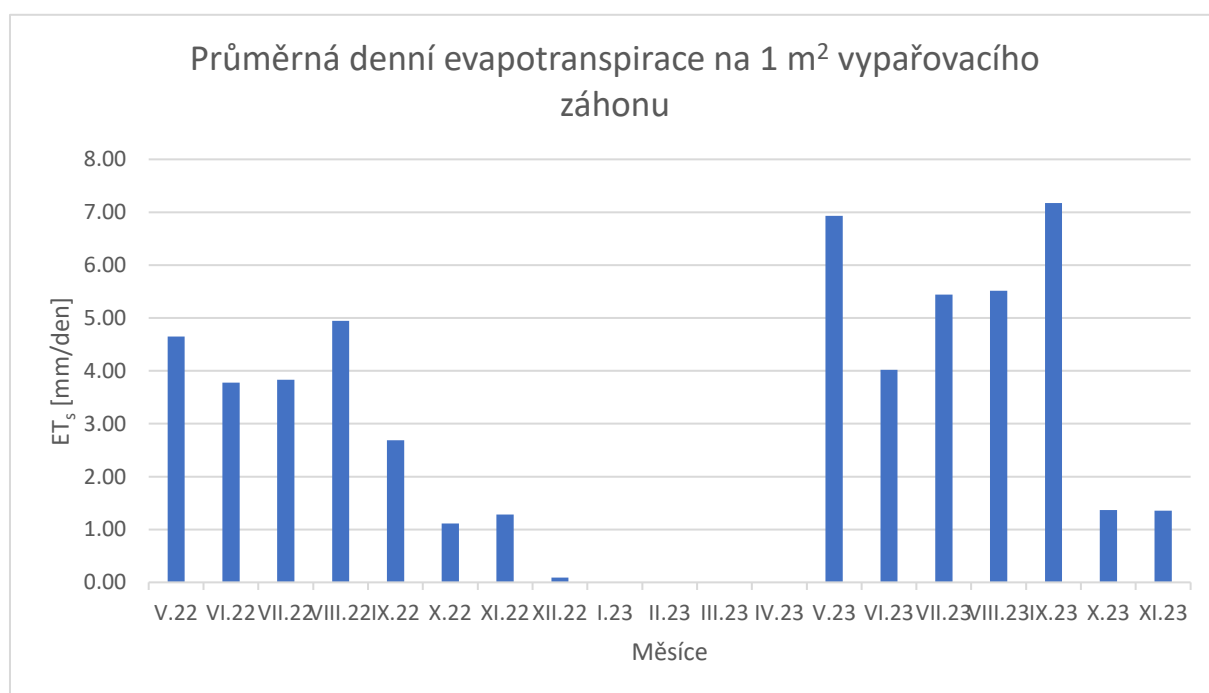
Obrázek 15 Průběh hladin v IBC kontejneru po očištění dat o příbytky vody v nádrži

Z grafu je zřejmé, že v roce 2023 se za stejný časový interval (192 dnů) vypařilo více vody. Dále je pro rok 2022 (modrá křivka) patrné postupně snižování strmosti křivky do 75. dne. Tento den proběhlo kosení vegetace, po kterém je křivka zřetelně strmější. V roce 2023 je křivka neustále téměř stejné strmosti. V tomto roce došlo k častějšímu kosení vegetace. Pokles strmosti tedy může být vyvolán stavem rostlin. V roce 2022 bylo ve sledovaném výseku měření vypařeno celkem  $2,27 \text{ m}^3$  vody, kdežto v roce 2023 bylo vypařeno  $2,94 \text{ m}^3$  vody. Roku 2023 bylo tedy vypařeno téměř 1,3 násobně více vody než v roce 2022. Kromě kosení travin však může být měření ovlivněno také meteorologickými vlivy.

## 6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Naměřená data byla zpracována pomocí výpočtového programu MS excel. Nejprve byla provedena filtrace dat, kdy byly z měření odstraněny dny s příbytky vody, ať už prostřednictvím srážek, nebo doplněním vody do nádrže. Následně byly vypočteny úhrny evapotranspirace pomocí zaznamenaného poklesu hladin během jednotlivých dnů. Pokles hladin od půlnoci do půlnoci vymezuje objem vody. Tento objem je následně vztažen na známou půdorysnou plochu vypařovacího záhonu. Plocha vypařovacího záhonu jakožto čtvercového objektu o délce strany 2,25 m je 5,06 m<sup>2</sup>.

Vypočtené denní úhrny evapotranspirace byly pak použity pro stanovení průměrných denních evapotranspirací jak týdenních, tak i měsíčních. Měsíční úhrny naměřené evapotranspirace znázorňuje následující graf.



Obrázek 16 Průměrná denní evapotranspirace jednotlivých měsíců

Už na první pohled je zřejmé, že v roce 2022 docházelo k evapotranspiraci v menších úhrnech oproti roku 2023. V obou letech je vidět anomálie v podobě vysoké průměrné denní evapotranspirace za měsíc květen. Pro letní měsíce roku 2022 se pak evapotranspirace pohybovala okolo hodnoty 4 mm/den. V roce 2023 se byla evapotranspirace naměřena v hodnotách přes 5 mm/den. Oproti roku 2022 je výrazně vyšší evapotranspirace zaznamenána za měsíc září. Tento fakt je způsoben jednak meteorologickými vlivy, kdy v roce 2023 bylo září teplejší než v roce 2022. Vyšší evapotranspirace za měsíc září roku 2023 je také způsobena odebráním několika dnů z datové sady v důsledku odpojení čerpadla, ke kterému došlo na konci měsíce. V říjnu a listopadu obou let se pak evapotranspirace pohybovala mírně nad hodnotou 1 mm/den.

## 6.1 VLIV PŘÍRODNÍCH JEVŮ NA EVAPOTRANSPIRACI

Evapotranspirace je ovlivněna okolními jevy, které působí na vypařovací záhon. Jedná se zejména o sluneční záření, vítr, teplotu vzduchu, či jeho vlhkost, a další jevy, které jsou uvedeny v kapitole 4.4 Účinek přírodních jevů. Vliv těchto jevů na evapotranspiraci je možné vyhodnotit prostřednictvím regresních modelů naměřené evapotranspirace a záznamů z meteorologické stanice UVHK. Dle měřených jevů na meteorologické stanici je možné posoudit ovlivnění evapotranspirace teplotou vzduchu, relativní vlhkostí vzduchu, a délkou slunečního svitu.

Pro všechny jevy byla provedena filtrace naměřených dat, a to odebráním dnů s příbytkem vody v nádrži, způsobeným buďto vlivem srážek, nebo doplňováním vody. Dále byly odstraněny výše zmíněné záznamy, ovlivněné přerušáním potrubí a vypnutím čerpadla. Následně byly pro denní úhrny evapotranspirace v jednotlivých dnech i v průměrných hodnotách v rámci týdnů provedeny regresní výpočty. Pro všechny vyhodnocované jevy byla provedena regrese lineární, exponenciální a mocninná. Po první regresi byla provedena druhá, která počítala pouze s výsekem dat ležících v intervalu stanoveném první regresní křivkou (rovnicí) a směrodatnou odchylkou přičtenou i odečtenou od této křivky. Směrodatná odchylka byla stanovena pro naměřené hodnoty evapotranspirace. Takto vytvořený interval se v práci dále popisuje jako filtrační interval, a je vždy v grafu první regrese vyobrazen barevným ohraničením, kdy oranžově je vyznačena horní hranice intervalu, a šedě jeho dolní hranice.

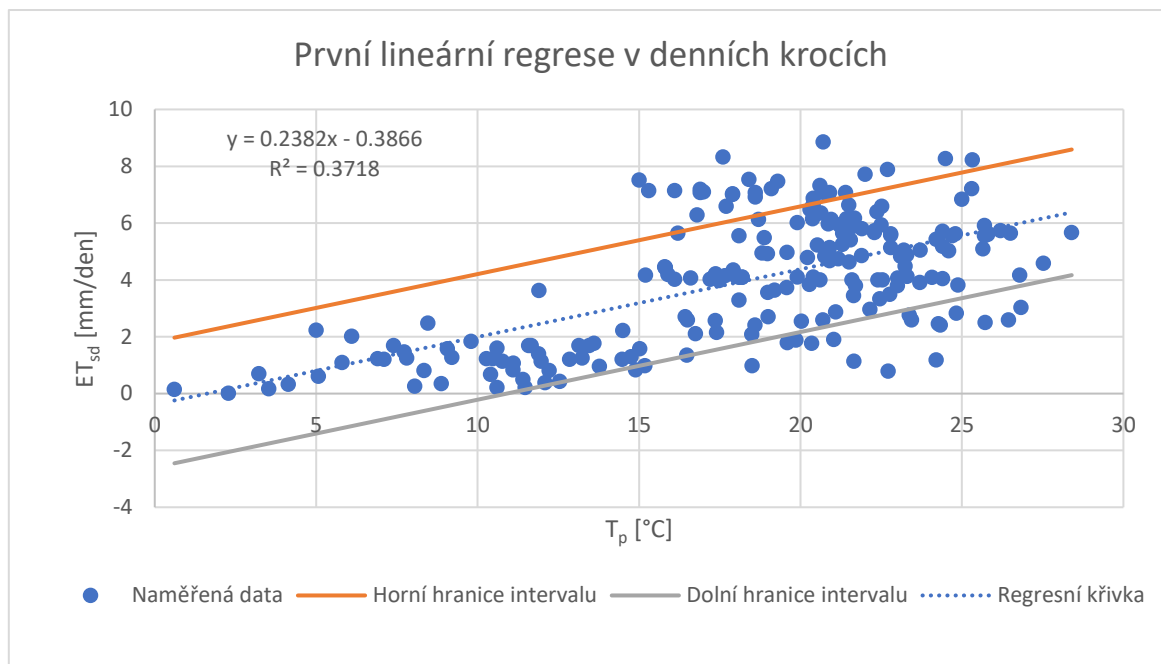
Kromě tohoto způsobu byl proveden také výpočet pro takzvaný konfidenční interval, známý také jako interval spolehlivosti. Výpočty s konfidenčním intervalem se ale u všech regresních modelů vyznačovaly malým rozpětím intervalu, které vedlo k zanedbání 70ti až 90ti % naměřených dat. Proto byly tyto výpočty vyhodnoceny jako nevhodné.

## 6.2 VYHODNOCENÍ VLIVU TEPLoty NA EVAPOTRANSPIRACI

Vztah mezi teplotou a evapotranspirací by dle předpokladů měl být definovatelný přímou úměrou. Lze tedy očekávat růst evapotranspirace v závislosti na růstu teploty, a naopak lze předpokládat pokles evapotranspirace při poklesu teploty vzduchu. Pro vyhodnocení závislosti denních evapotranspiračních úhrnů jsou použity průměrné denní teploty naměřené na meteorologické stanici UVHK.

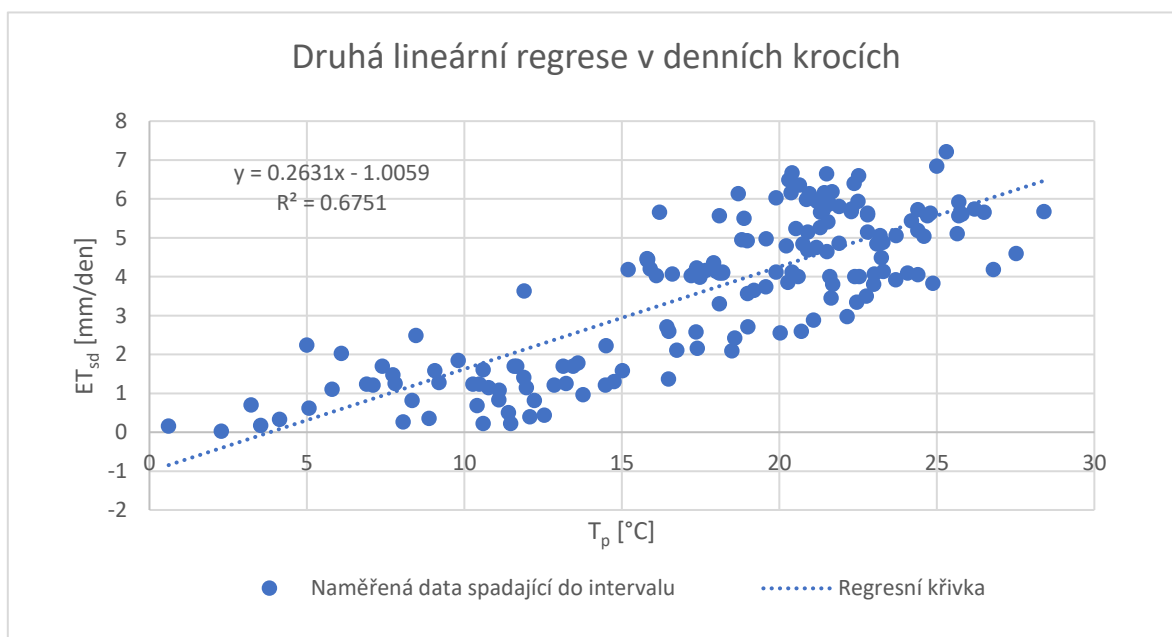
### Regrese v denních krocích

Regrese naměřené evapotranspirace s naměřenou průměrnou denní teplotou byla provedena výše popsaným postupem. U lineární regrese znázorněné na následující dvojici grafů bylo pro první regresi vyhodnoceno celkem 209 záznamů. Po vytvoření filtračního intervalu dle regresní rovnice a směrodatné odchylky o hodnotě  $\sigma = 2,21$  mm/den pracovala druhá regrese se 170ti záznamy. Bylo tedy zanedbáno 19 % dat oproti první regresi.



*Obrázek 17 První lineární regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích*

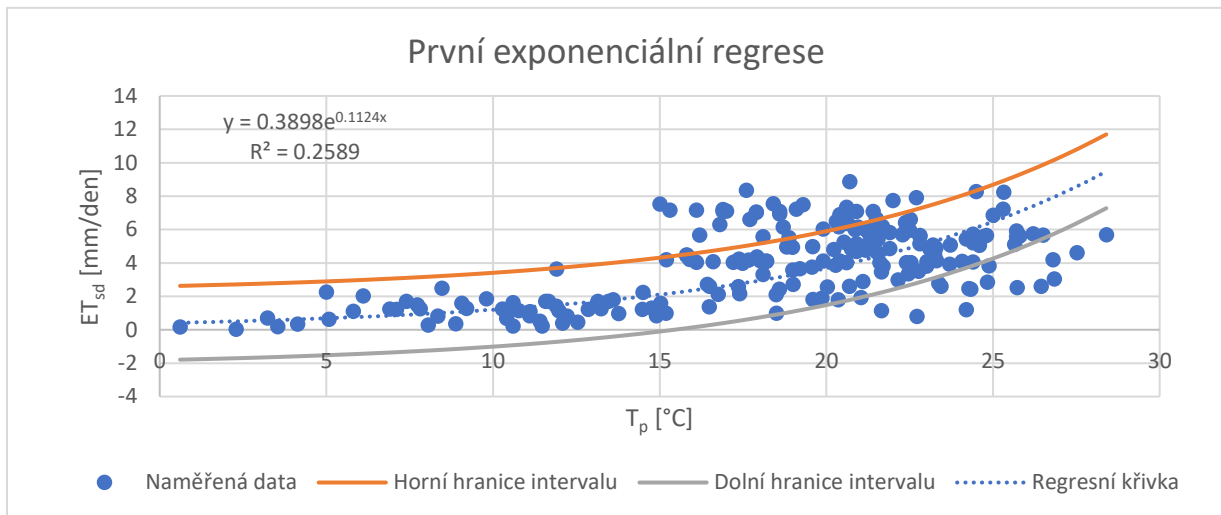
První lineární regrese vypočítala regresní rovnici ve tvaru  $ET_{sd} = 0,2382 * T_p - 0,3866$ , kde  $ET_{sd}$  představuje reálnou (naměřenou) evapotranspiraci v mm/den, a  $T_p$  představuje průměrnou denní teplotu ve °C. Tato rovnice byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,3718$ .



*Obrázek 18 Druhá lineární regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích*

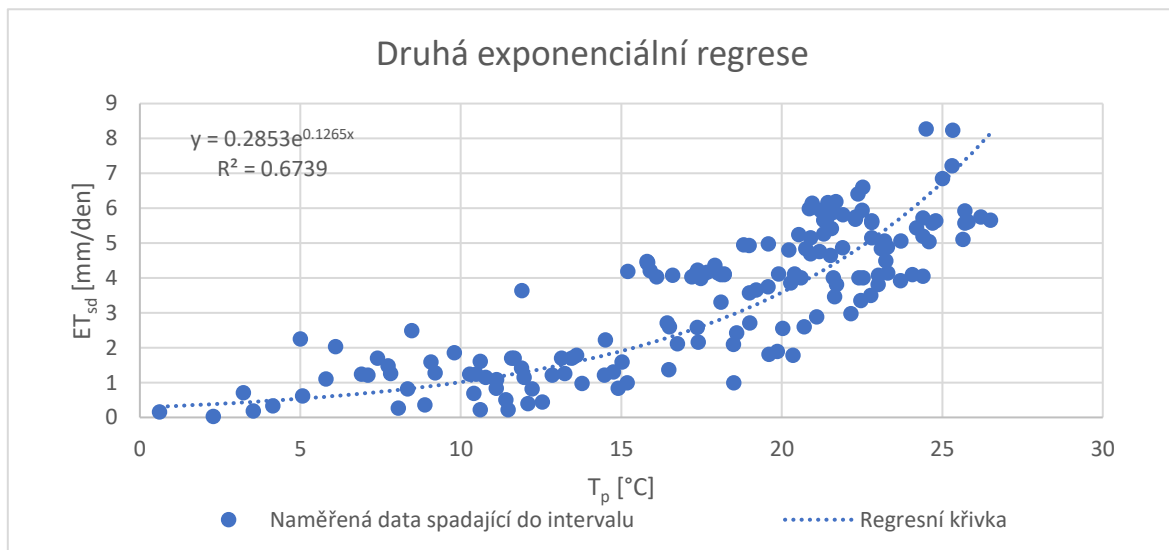
Druhá lineární regrese stanovila rovnici  $ET_{sd} = 0,2631 * T_p - 1,0059$ .  $ET_{sd}$  představuje reálnou evapotranspiraci v mm/den,  $T_p$  představuje průměrnou denní teplotu ve °C. Rovnice byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,6751$ . Druhou regresi lze tím pádem považovat za přesnější.

Exponenciální regrese byla provedena, stejně jako lineární, pro 209 vstupních dat. Po první regresi byl opět sestaven filtrační interval interval, ve kterém leželo celkem 159 dat. Filtrovaná data byla použita k provedení druhé exponenciální regrese. Druhá regrese tedy zanedbala 24 % vstupních dat.



Obrázek 19 První exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích

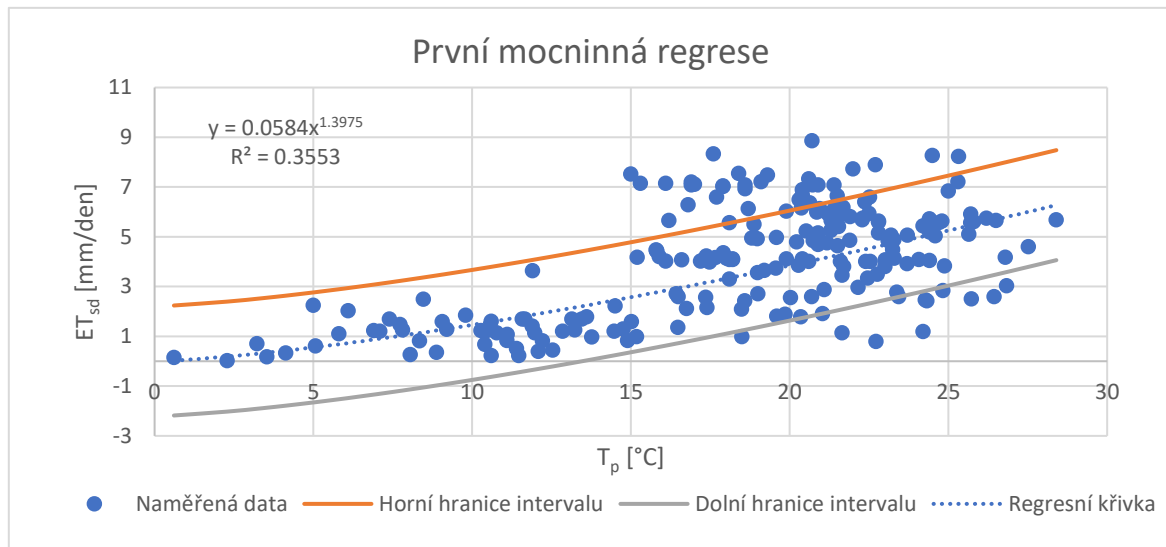
Výsledkem první exponenciální regrese byla rovnice ve tvaru  $ET_{sd} = 0,3898 * e^{0,1124 * T_p}$ .  $ET_{sd}$  představuje reálnou denní evapotranspiraci v mm/den,  $T_p$  představuje průměrnou denní teplotu vzduchu ve °C. Rovnice byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,2589$ .



Obrázek 20 Druhá exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích

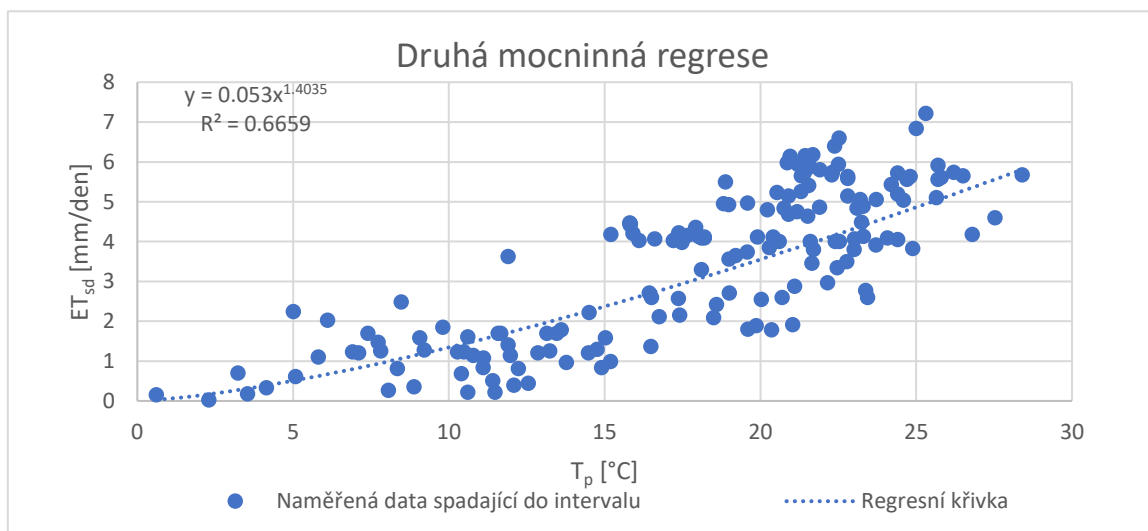
Druhá exponenciální regrese stanovila rovnici ve tvaru  $ET_{sd} = 0,2853 * e^{0,1265 * T_p}$ .  $ET_{sd}$  opět představuje reálnou denní evapotranspiraci v mm/den, a  $T_p$  průměrnou denní teplotu vzduchu ve °C. Rovnice byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,6739$ . Druhá exponenciální regrese tedy vedla stejně jako u lineární regrese k přesnějšímu výsledku.

Mocninná regrese byla provedena, stejně jako předchozí regrese, pro 209 vstupních dat. Po první regresi byl opět sestaven filtrační interval, ve kterém tentokrát leželo 164 záznamů. Pro filtrované záznamy byla provedena druhá mocninná regrese, která zanedbala 22 % vstupních dat.



Obrázek 21 První mocninná regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích

První mocninná regrese vedla k sestavení rovnice  $ET_{sd} = 0,0584 * T_p^{1,3975}$ .  $ET_{sd}$  opět představuje naměřenou denní evapotranspiraci v mm/den, a  $T_p$  průměrnou denní teplotu ve °C. Rovnice byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,3553$ .



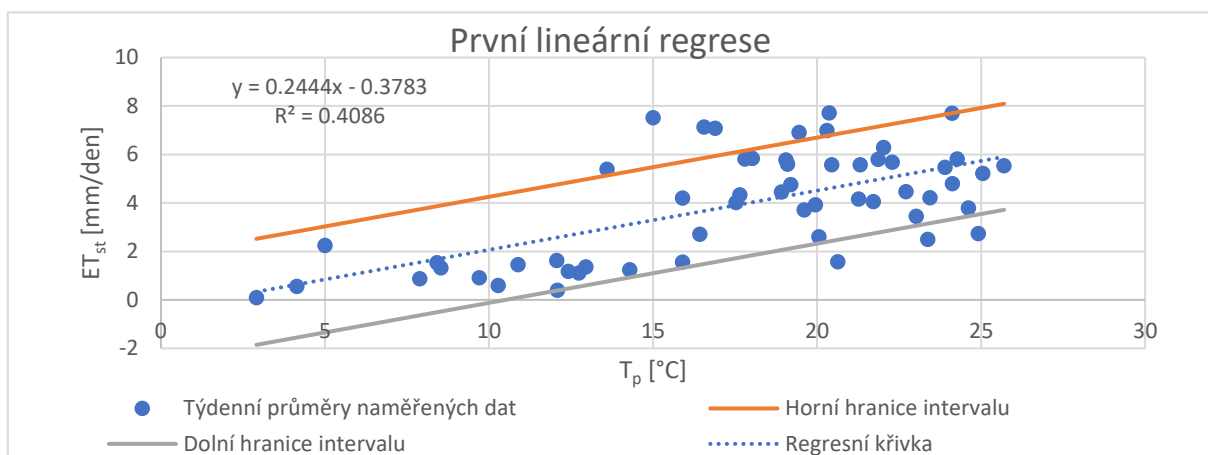
Obrázek 22 Druhá mocninná regrese teplot a evapotranspirace v denních krocích

Druhá mocninná regrese definovala rovnici  $ET_{sd} = 0,053 * T_p^{1,4035}$ .  $ET_{sd}$  a  $T_p$  opět zastupují stejné veličiny. Koeficient determinace byl vypočten na hodnotě  $R^2 = 0,6659$ . Pro druhou regresi tedy opět platí, že vedla k přesnějšímu výsledku.

## Regrese v týdenních průměrech

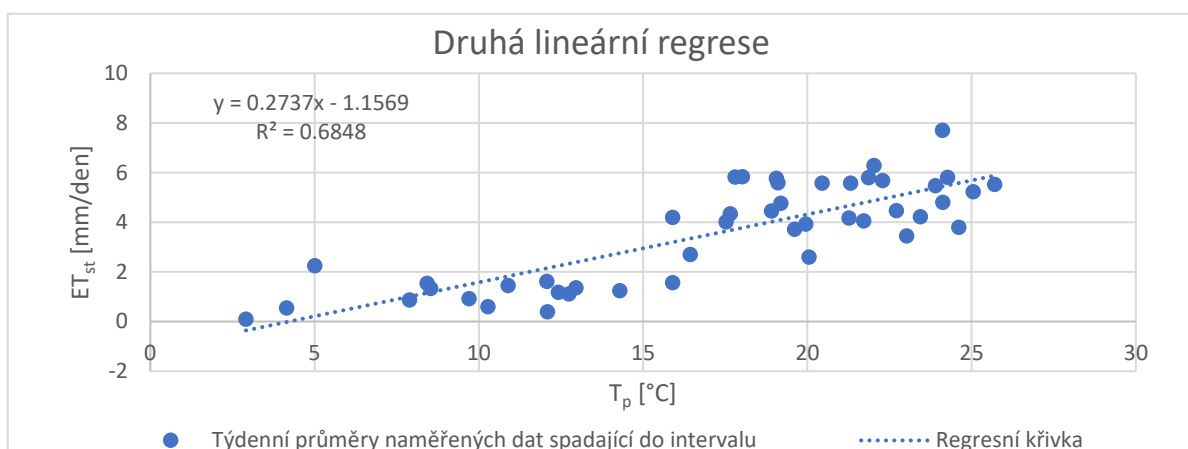
K získání přesnějších výsledků regresí byla vstupní data k provedení předchozích regresí zprůměrována do týdenních hodnot. Menší počet vstupních hodnot by teoreticky měl zajistit přesnější výsledky výpočtů, aniž by došlo k zanedbání většího množství vstupních dat. Regrese byla opět provedena ve dvou stupních, kdy první byla provedena vždy pro celý soubor vstupních dat, a druhá pouze pro data ležící v intervalu definovaném první regresní rovnicí a směrodatnou odchylkou  $\sigma = 2,19$  mm/den.

První lineární regrese byla provedena pro 56 vstupních dat. S ohledem na definovanou regresní rovnici a směrodatnou odchylku byl vytvořen filtrační interval, který byl použit k filtraci vstupních dat. Následně byl filtrovaný soubor dat použit pro druhou lineární regresi, která počítala se 47mi daty. Zanedbáno tedy bylo 16 % vstupních záznamů.



Obrázek 23 První lineární regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech

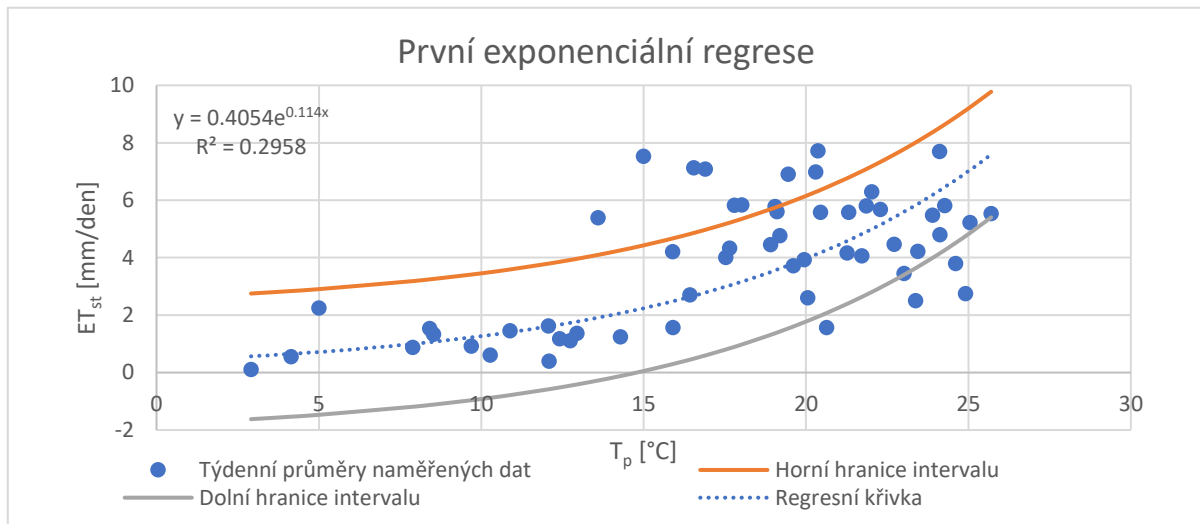
Výsledkem první lineární regrese byla rovnice  $ET_{st} = 0,2444 * T_p - 0,3783$ .  $ET_{st}$  zde představuje naměřenou průměrnou denní evapotranspiraci v jednotlivých týdnech,  $T_p$  pak průměrnou denní teplotu v daných týdnech. Koeficient determinace první regrese byl stanoven na  $R^2 = 0,4086$ .



Obrázek 24 Druhá lineární regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech

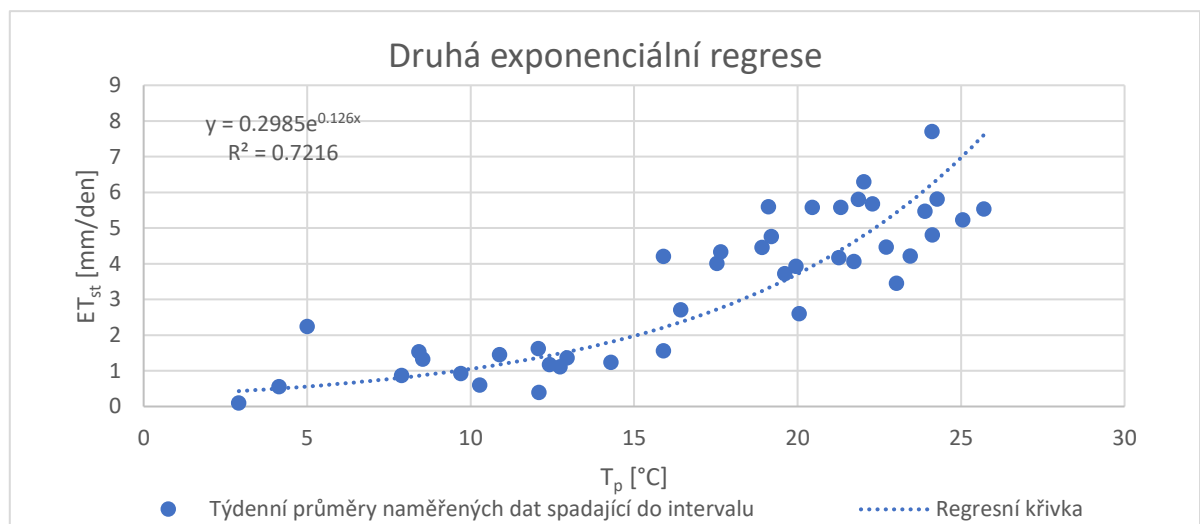
Druhá lineární regrese sestavila rovnici ve tvaru  $ET_{st} = 0,2737 T_p - 1,1569$ .  $ET_{st}$  a  $T_p$  zastupují stejné veličiny, jako při předchozí regresi. Koeficient determinace byl  $R^2 = 0,6848$ . Druhá regrese byla opět přesnější než první.

Pro exponenciální regresi bylo opět použito 56 vstupních záznamů. Po filtraci dat filtračním intervalem bylo pro druhou regresi použito 42 vstupů. Bylo tedy zanedbáno 25 % vstupních dat.



Obrázek 25 První exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech

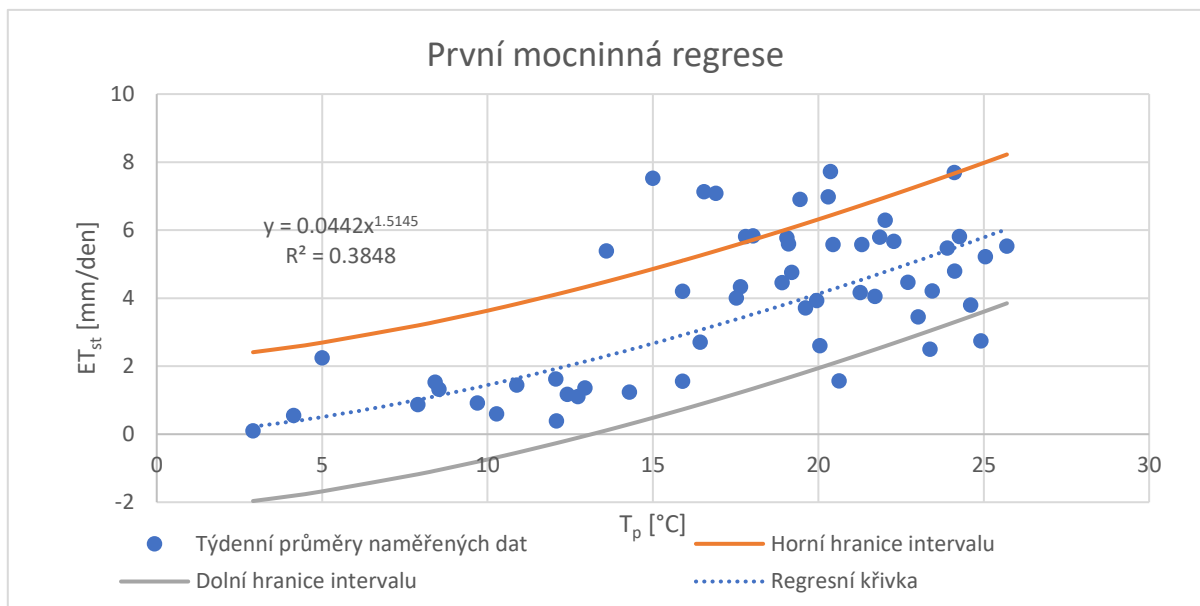
První exponenciální regrese sestavila rovnici ve tvaru  $ET_{st} = 0,4054 * e^{0,114 T_p}$ .  $ET_{st}$  opět představuje naměřenou průměrnou denní evapotranspiraci v jednotlivých týdnech v mm/den,  $T_p$  pak průměrnou denní teplotu v daných týdnech ve °C. Koeficient determinace výpočtu je  $R^2 = 0,2958$ .



Obrázek 26 Druhá exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech

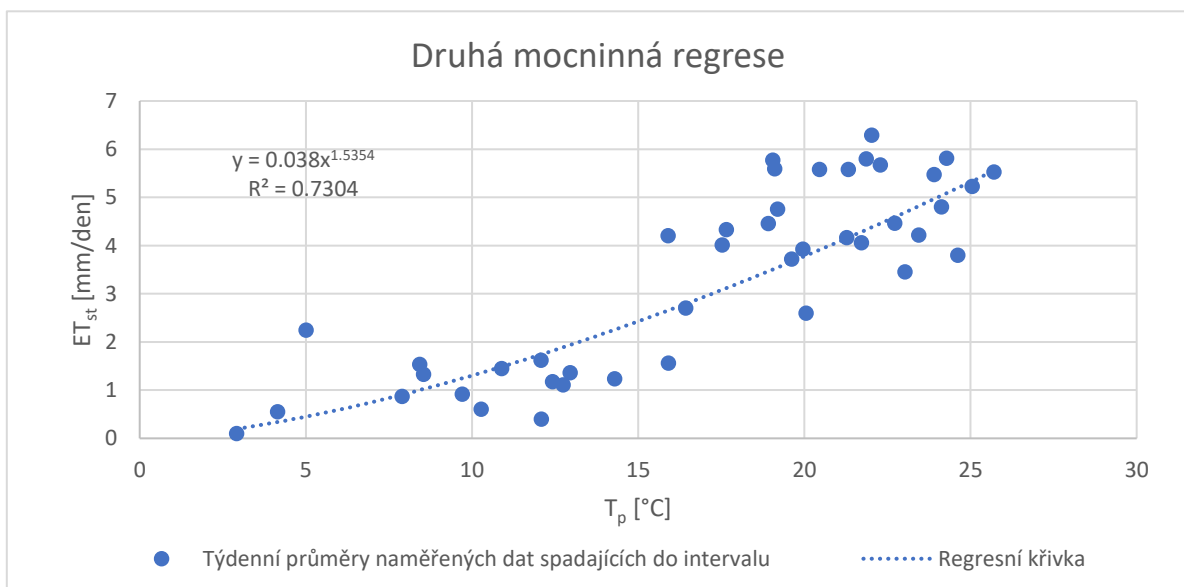
Druhá exponenciální regrese vedla k rovnici  $ET_{st} = 0,2985 * e^{0,126 T_p}$ .  $ET_{st}$  a  $T_p$  opět představují stejné proměnné. Regrese byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,7216$ . Jedná se tedy nejen o výrazně spolehlivější model oproti první exponenciální regresi.

Vstupními daty pro mocninnou regresi byla stejná sada 56ti záznamů, ze kterých bylo pro druhou regresi použito 44 dat. Zanedbáno bylo tedy 21 % vstupních dat. Pro výběr dat k druhé regresi byl opět použit sestavený filtrační interval.



Obrázek 27 První mocninná regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech

Výsledkem první regrese je rovnice  $ET_{st} = 0,0442 * T_p^{1,5145}$ .  $ET_{st}$  opět zastupuje naměřenou průměrnou denní evapotranspiraci v jednotlivých týdnech v mm/den,  $T_p$  pak průměrnou denní teplotu v daných týdnech ve °C. Koeficient determinace regresního modelu je  $R^2 = 0,3848$ .



Obrázek 28 Druhá mocninná regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech

Druhá mocninná regrese vedla k sestavení rovnice  $ET_{st} = 0,038 * T_p^{1,5354}$ .  $ET_{st}$  a  $T_p$  opět zastupují stejné proměnné. Koeficient determinace je pro tento výpočet stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,7304$ . Jedná se tedy opět o přesnější model oproti první regresi.

Vliv teploty na evapotranspiraci byl tedy posouzen celkem dvanácti regresními modely. Výpočty byly provedeny ve dvou stupních, kdy první regresní modely pracující se všemi vstupními daty vedly ke stanovení regresních rovnic s koeficientem determinace  $R^2$  v rozmezí hodnot 0,2589 (lineární regrese po denních krocích) do 0,4086 (lineární regrese v týdenních průměrech). Druhé regresní výpočty byly provedeny pro menší počet vstupních dat, který byl definován filtračním intervalem, jehož střední hodnota odpovídala regresní rovnici první regrese, a šířka byla stanovena směrodatnou odchylkou. Tyto modely byly stanoveny s koeficienty determinace v rozmezí 0,6659 (mocninná regrese v denních krocích) až 0,7304 (mocninná regrese v týdenních průměrech).

Nejllepších výsledků v použitých metod dosáhl model mocninné regrese se vstupními daty v týdenních průměrech. Závislost denního úhrnu evapotranspirace na teplotě je tímto modelem definována rovnicí  $ET_{st} = 0,038 * T_p^{1,5354}$ .

Při hodnocení výsledků regresí je třeba mít na paměti odlišné provozování laboratorního modelu mezi rokem 2022 a rokem 2023. V roce 2022 byla vegetace na vypařovacím záhonu totiž kosena pouze jednou, kdežto v roce 2023 dvakrát. Tato skutečnost v roce 2022 vedla ke snížení evapotranspiračních úhrnů. Pokud by oba v roce 2022 byl záhon provozován stejným způsobem jako v roce 2023, měly by regresní modely teoreticky dosahovat uspokojivějších výsledků.

### **6.3 VYHODNOCENÍ VLIVU SLUNEČNÍHO SVITU NA EVAPOTRANSPIRACI**

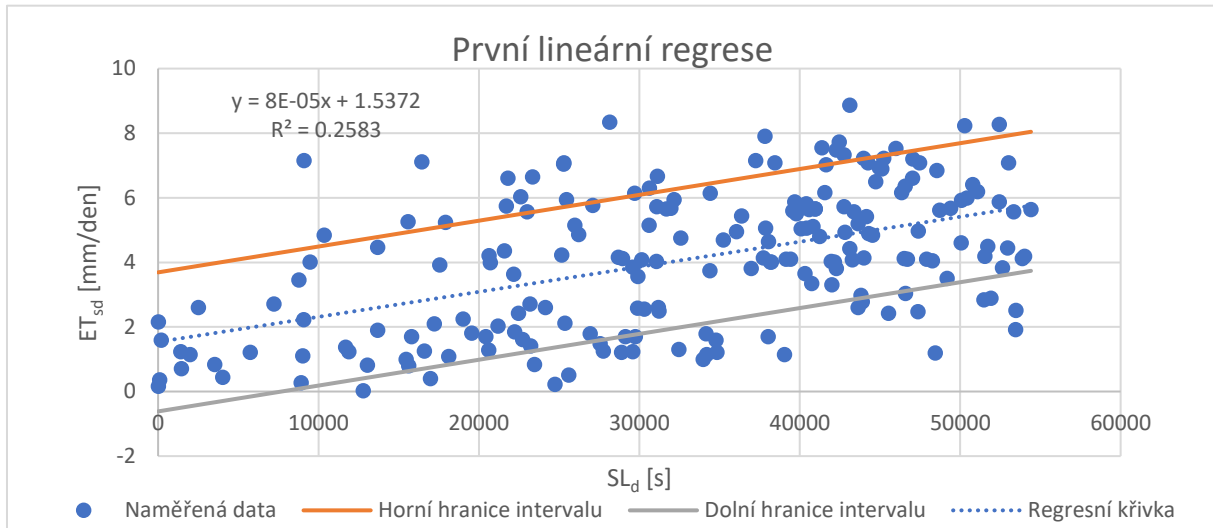
Délka slunečního svitu během dne by měla dle předpokladů přímo ovlivnit transpiraci rostlin. Pokud se během dne nevyskytuje žádná oblačnost, a povrch určený ke transpiraci není nijak zastíněn, dopadá sluneční svit přímo na listy rostlin. Rostlinné průduchy by měly tedy být otevřeny do maximální možné míry. Pakliže se však během dne vyskytuje mohutná oblačnost, mělo by být otevření rostlinných průduchů menší. Objem transpirované vody by tak měl být oproti slunečnému dni menší. Mezi délkou slunečního svitu a evapotranspirací by tedy měla být přímá úměra.

Pro vyhodnocení závislosti denních evapotranspiračních úhrnů jsou použity délky slunečního svitu naměřené na meteorologické stanici UVHK.

Posouzení závislosti mezi délkou slunečního svitu a evapotranspirací bylo opět provedeno prostřednictvím regrese. Výpočty proběhly totožným postupem jako u posouzení vlivu teploty. Je však potřeba zmínit ovlivnění naměřených dat umístěním laboratorního modelu na výzkumném pozemku, který je částečně zastíněn vzrostlými stromy, a také budovou Z Fakulty stavební VUT v Brně. Oproti tomu datová sada o délce slunečního svitu byla naměřena na meteorologické stanici, která není nijak zastíněna. Pokud by tedy byl přístroj umístěn na stejném místě jako laboratorní model, mohl by být očekáván kvalitnější výstup z regresních modelů.

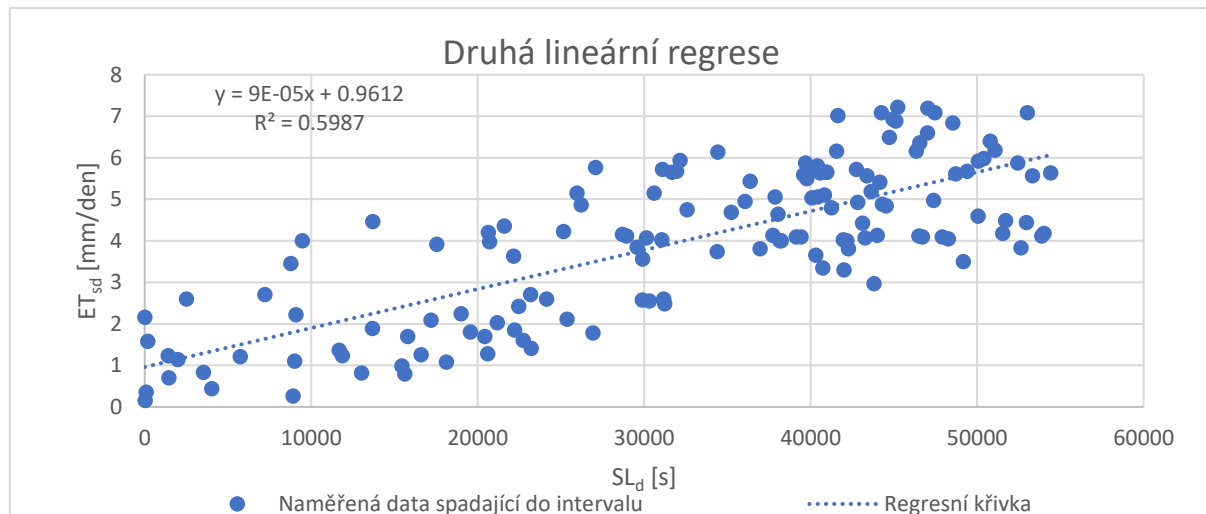
## Regrese v denních krocích

Posouzení regrese v denních krocích bylo provedeno pro 202 vstupních záznamů. Směrodatná odchylka vstupních dat byla stanovena na  $\sigma = 2,15$  mm/den. První regrese společně se směrodatnou odchylkou stanovila filtrační interval, do kterého spadalo 155 naměřených záznamů. Druhá lineární regrese tedy počítala se 77 % vstupních dat.



Obrázek 29 První lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích

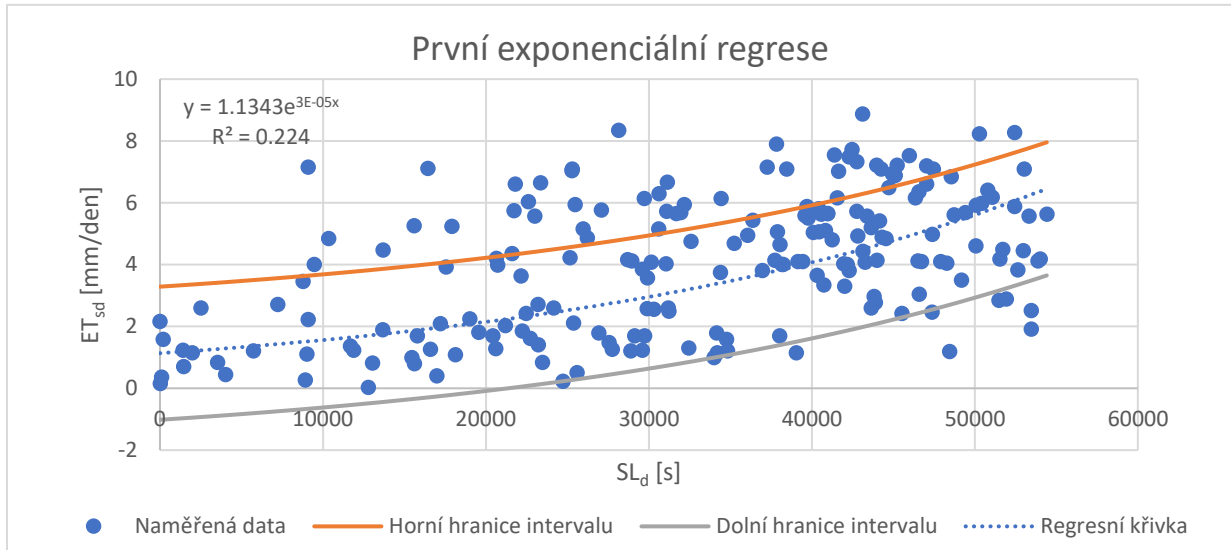
Závislost evapotranspirace na délce slunečního svitu byla první lineární regresí popsána prostřednictvím vzorce  $ET_{sd} = 0,00008 * SL_d + 1,5372$ . Vzorec, ve kterém  $ET_{sd}$  představuje denní evapotranspiraci v mm/den a  $SL_d$  zastupuje délku slunečního svitu během dne v s byl stanoven s koeficientem determinace  $R^2 = 0,2583$ .



Obrázek 30 Druhá lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích

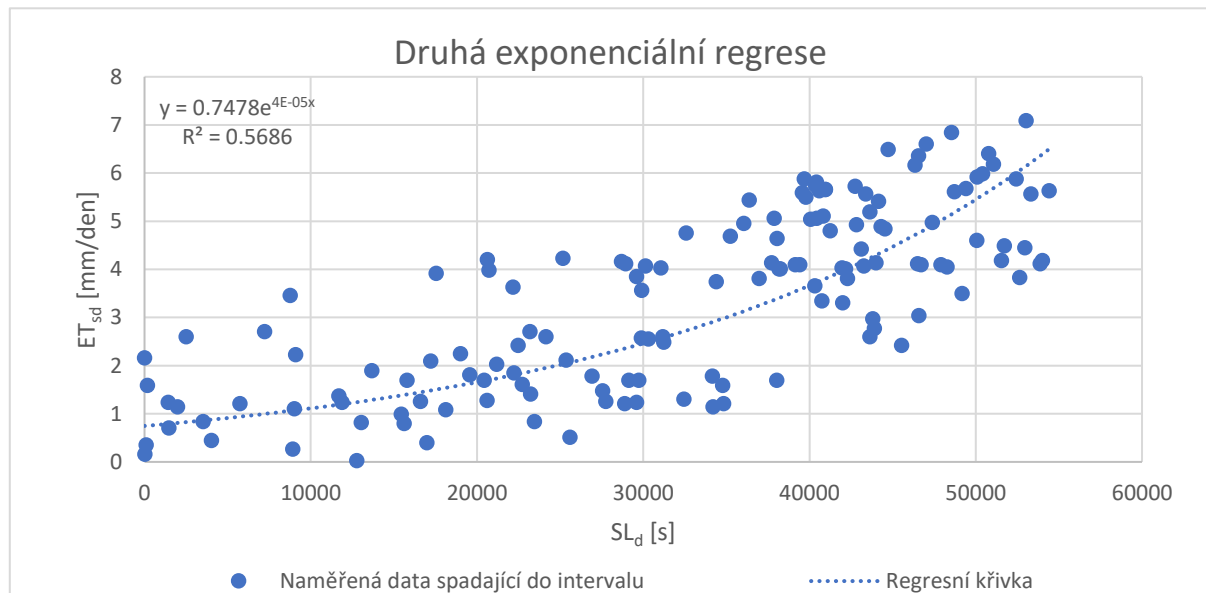
Druhá lineární regrese vedla k vytvoření vztahu  $ET_{sd} = 0,00009 * SL_d + 0,9612$ .  $ET_{sd}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u první lineární regrese. Vzorec byl stanoven s koeficientem determinace  $R^2 = 0,5987$ . Lineární regrese filtrovaných dat tedy vedla ke zvýšení přesnosti stanovené rovnice.

Exponenciální regrese provedená pro stejná vstupní data jako první lineární regrese. Součástí prvního stupně výpočtu bylo vytvoření filtračního intervalu, který obsahoval 144 záznamů (71 % původních dat). Pro tento soubor dat byla provedena druhá exponenciální regrese.



Obrázek 31 První exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích

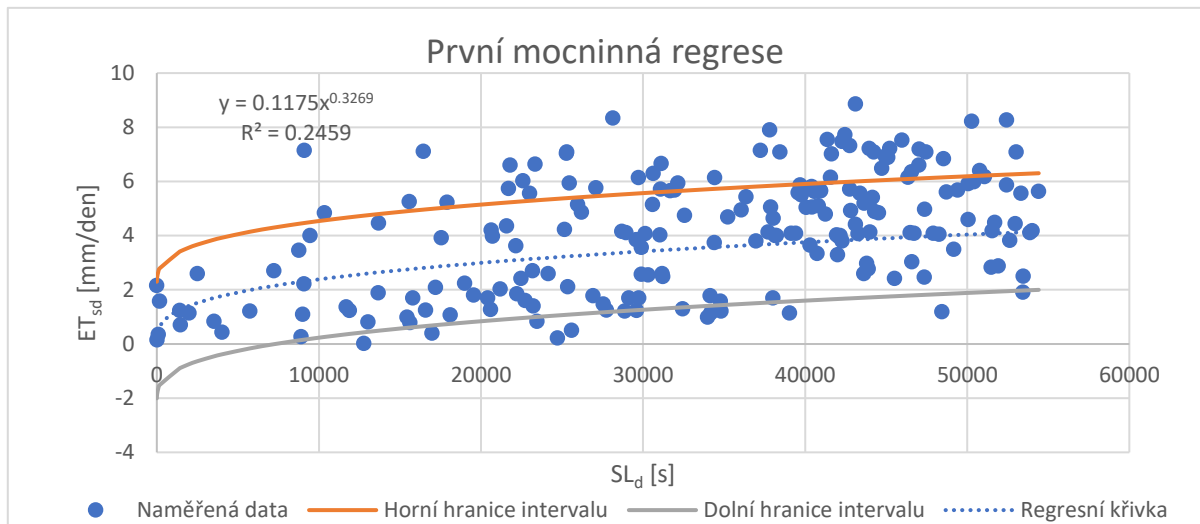
Výstupem z první exponenciální regrese je rovnice  $ET_{sd} = 1,1343 * e^{0,00003 SL_d}$ .  $ET_{sd}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace první exponenciální regrese byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,224$ .



Obrázek 32 Druhá exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích

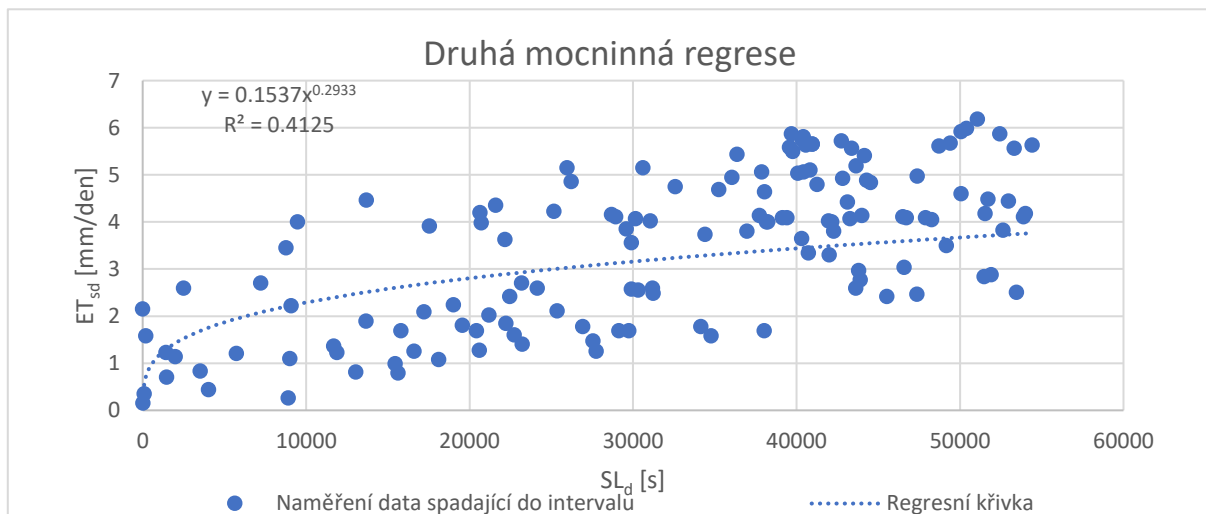
Exponenciální regresí filtrované sady naměřených dat bylo dosaženo rovnice  $ET_{sd} = 0,7478 * e^{0,00004 SL_d}$ .  $ET_{sd}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace první exponenciální regrese byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,5686$ . Ve srovnání s prvním regresním výpočtem se tedy jedná o lepší výsledek.

Mocninná regrese byla provedena zprvu opět na stejných vstupních datech, jako předchozí výpočty. Společně se směrodatnou odchylkou definovala filtrační interval. Druhá mocninná regrese byla provedena pro 149 záznamů. Počítala tedy s 74 % vstupních dat.



Obrázek 33 První mocninná regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích

První mocninná regrese stanovila rovnici  $ET_{sd} = 0,1175 * SL_d^{0,3269}$ .  $ET_{sd}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace první mocninné regrese byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,2459$ .



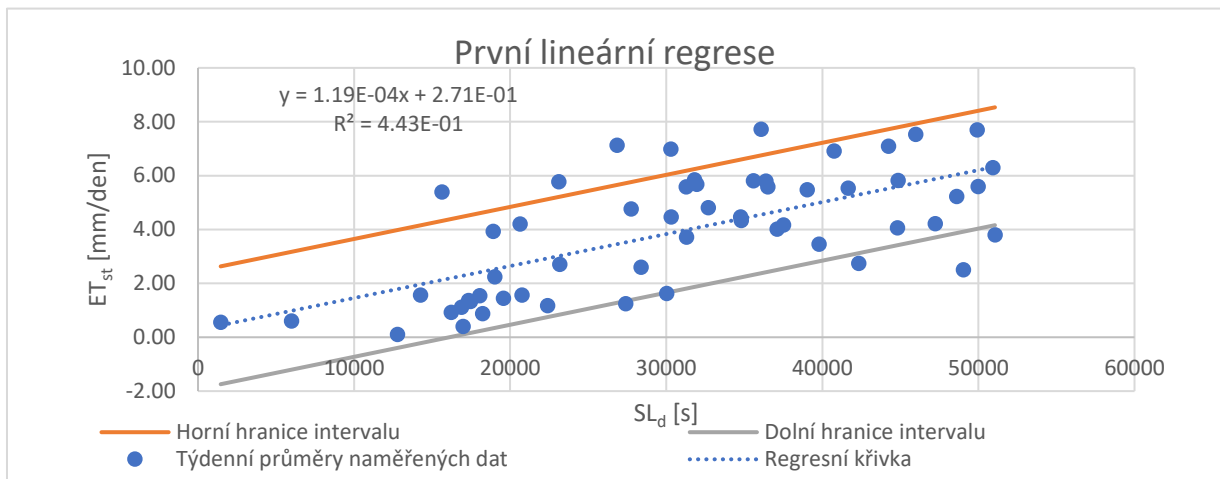
Obrázek 34 Druhá mocninná regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích

Mocninná regrese na filtrované sadě vstupních dat vedla k rovnici  $ET_{sd} = 0,1537 * SL_d^{0,2933}$ .  $ET_{sd}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace první mocninné regrese byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,4125$ . Mocninná regrese se tak ze všech tří způsobů výpočtů stala nejméně uspokojivou.

## Regrese v týdenních průměrech

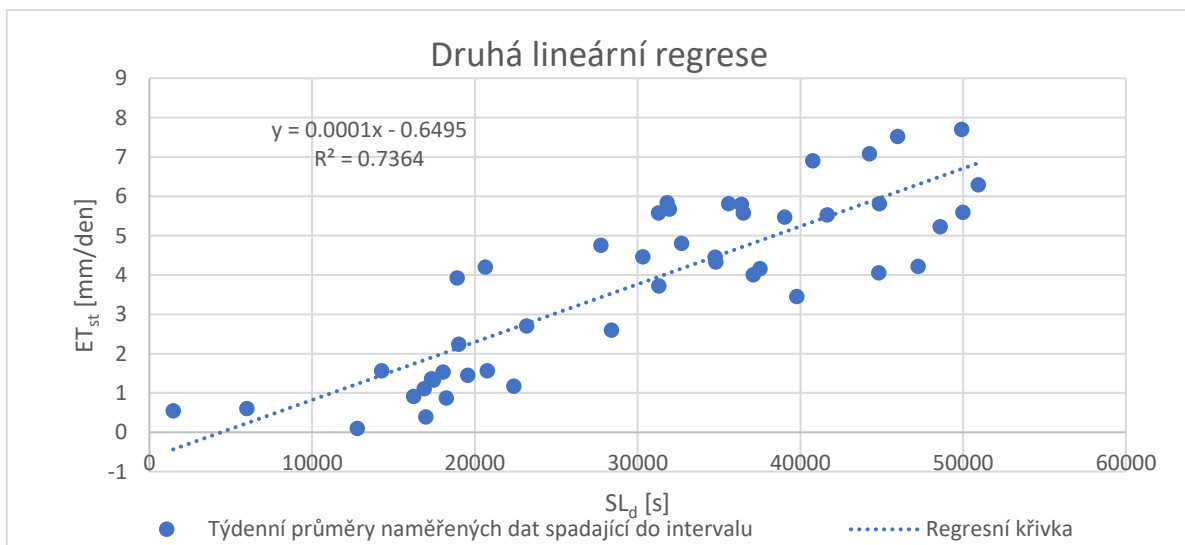
Stejně jako posouzení vlivu teploty vzduchu, bylo i posouzení vlivu délky slunečního svitu posouzeno nejen v denních krocích, ale také v týdenních průměrech naměřených dat. V týdenních průměrech bylo posuzováno 56 vstupních záznamů, se směrodatnou odchylkou  $\sigma = 2,15$  mm/den.

Lineární regrese pak vytvořila filtrační interval, ve kterém leželo 46 vstupních záznamů. V druhé regresi bylo tím pádem posuzováno 82 % vstupních dat.



Obrázek 35 První lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech

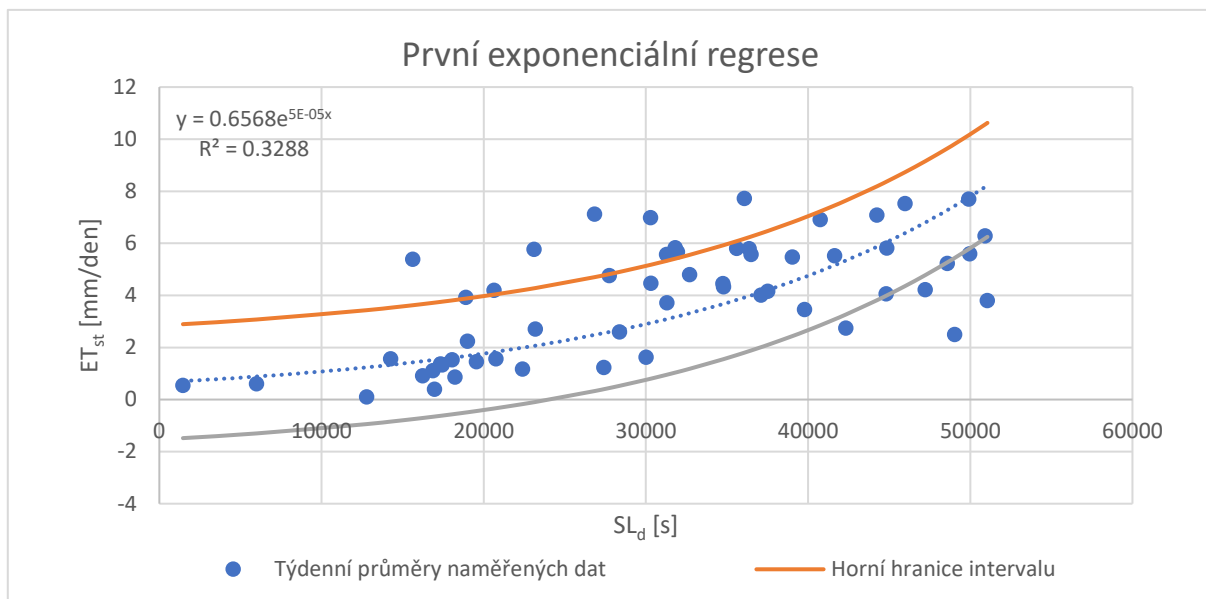
Výstupem z první lineární regrese byla rovnice  $ET_{st} = 0,0002 * SL_d + 0,2709$ .  $ET_{st}$  ve vzorci představuje denní evapotranspiraci v mm/den a  $SL_d$  zastupuje délku slunečního svitu během dne v s. Rovnice byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,4429$ .



Obrázek 36 Druhá lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech

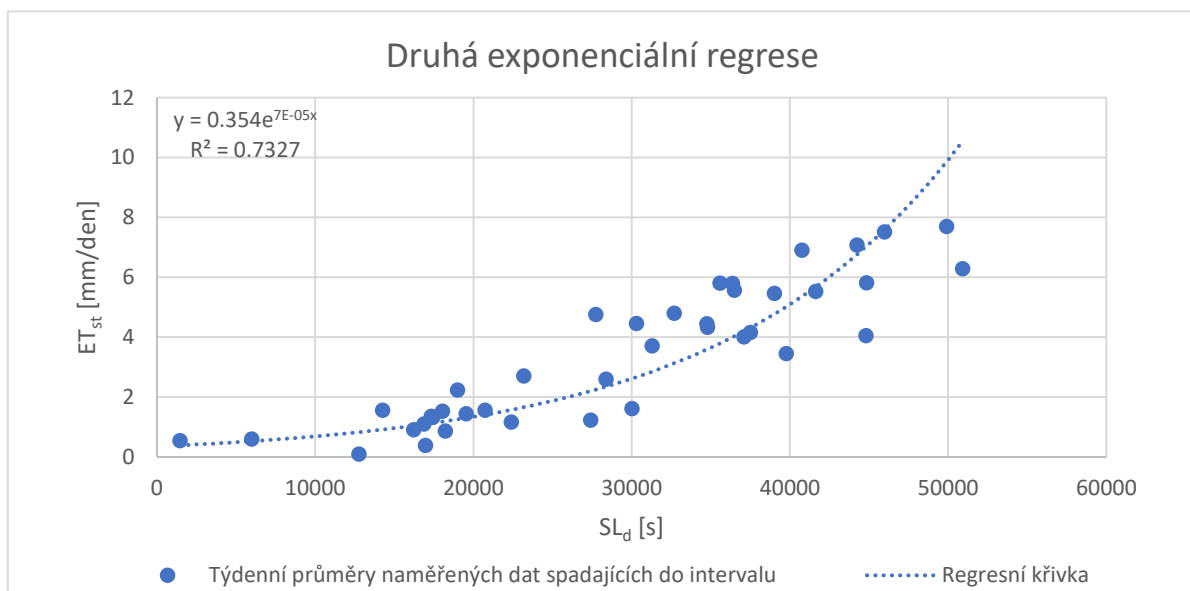
Filtrovaná vstupní data byla poté použita pro druhou lineární regresi, která sestavila rovnici  $ET_{st} = 0,0001 * SL_d - 0,6495$ .  $ET_{st}$  a  $SL_d$  zastupují stejné proměnné, jako u dřívějších výpočtů. Rovnice byla stanovena s koeficientem determinace  $R^2 = 0,7364$ . Jedná se tedy o mnohem uspokojivější výsledek v porovnání s předchozími výpočty.

Exponenciální regrese stejných vstupních dat vedla k sestavení filtračního intervalu, který vybral z původních 56 vstupů 40 záznamů pro druhou exponenciální regresi. Výsledek tedy počítal se 71 % vstupních dat.



Obrázek 37 První exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech

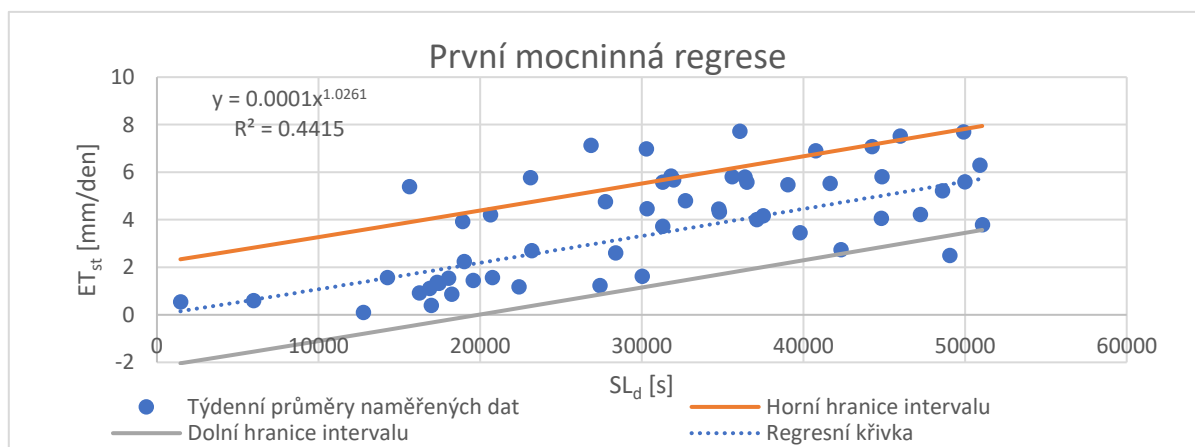
Výstupem první exponenciální regrese je rovnice  $ET_{st} = 0,6568 * e^{0,00005 * SL_d}$ .  $ET_{st}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,3288$ .



Obrázek 38 Druhá exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech

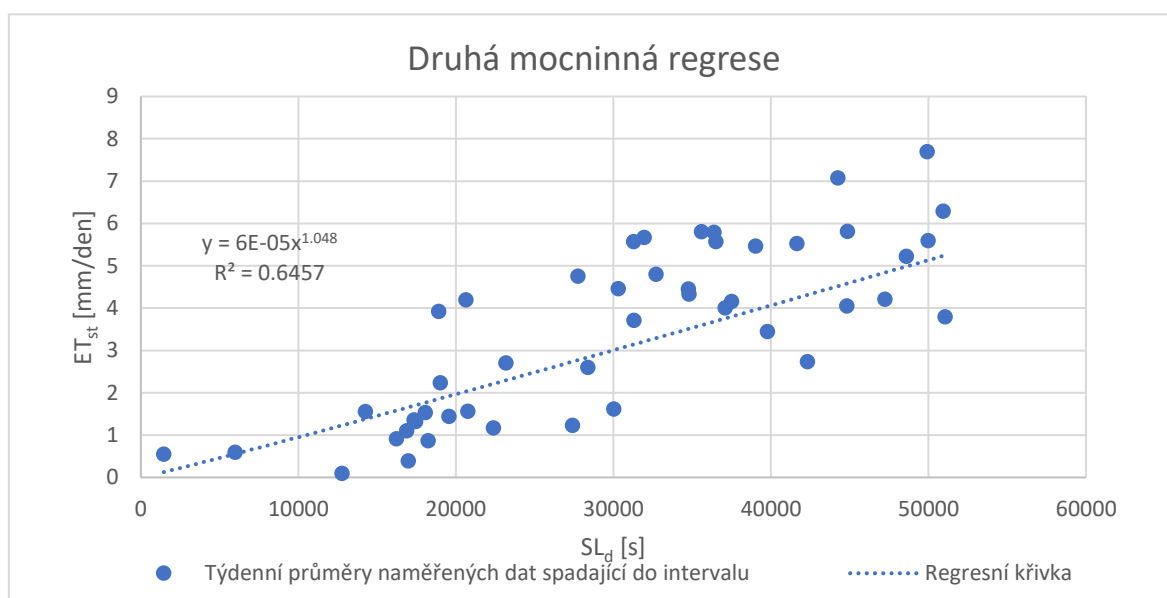
Druhá exponenciální regrese vedla k vytvoření rovnice  $ET_{st} = 0,354 * e^{0,00007 * SL_d}$ .  $ET_{st}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace druhé exponenciální regrese je  $R^2 = 0,7327$ .

Stejná vstupní sada dat byla použita i pro mocninnou regresi. První regrese byla opět použita k sestavení filtračního intervalu, do kterého tentokrát spadalo 47 vstupních dat (84 %). Druhá mocnná regrese tedy počítala s největším podílem naměřených dat.



Obrázek 39 První mocninná regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech

Výstupem první mocninné regrese je rovnice  $ET_{st} = 0,0001 * SL_d^{1,0261}$ .  $ET_{st}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,4415$ .



Obrázek 40 Druhá mocninná regrese délky slunečního svitu s evapotranspirací v týdenních průměrech

Druhá mocninná regrese stanovila rovnici  $ET_{st} = 0,00006 * SL_d^{1,048}$ .  $ET_{st}$  a  $SL_d$  zastupují totožné proměnné, jako u předchozích výpočtů. Koeficient determinace byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,6457$ . Oproti předchozí dvojici modelů je tedy koeficient determinace nižší, mocninný model však počítá s větším množstvím dat. Za povšimnutí stojí také exponent mocninné regrese, který je u prvního i druhého stupně regrese téměř roven 1. Výsledná regrese má tak téměř lineární podobu.

Ovlivnění evapotranspirace délkou slunečního svitu během dne bylo posouzeno celkem dvanácti modely. Stejně jako u ovlivnění teplotou, byly modely provedeny ve dvou stupních pro vstupní data v denních krocích, i v týdenních průměrech.

První stupně regresí kalkulující se všemi vstupními záznamy byly provedeny s koeficienty determinace od 0,224 (exponenciální regresní model s daty v denních krocích) do 0,4429 (lineární exponenciální model s daty v týdenních průměrech). Druhé stupně regrese zpracovaly vstupní data s koeficientem determinace od 0,4125 (mocninový regresní model s daty v denních krocích) do 0,7364 (lineární exponenciální model s daty v týdenních průměrech).

Nejlepších výsledků v použitých metod dosáhl model lineární regrese se vstupními daty v týdenních průměrech. Závislost denního úhrnu evapotranspirace na délce slunečního svitu je tímto modelem definována rovnicí  $ET_{st} = 0,0001 * SL_d - 0,6495$ .

Regresní modely by mohly dosáhnout lepších výsledků, pokud by byly odstraněny nejistoty. Je třeba mít na paměti odlišné provozování laboratorního modelu mezi rokem 2022 a rokem 2023. U hodnocení délkou slunečního svitu navíc není zohledňována intenzita zaznamenaného slunečního záření, která má na otevření rostlinných průduchů významný vliv. Pokud by byly tyto nejistoty odstraněny již na počátku měření, mohly by modely teoreticky dosáhnout mnohem lepších výsledků.

## 6.4 VYHODNOCENÍ VLIVU VLHKOSTI VZDUCHU NA EVAPOTRANSPIRACI

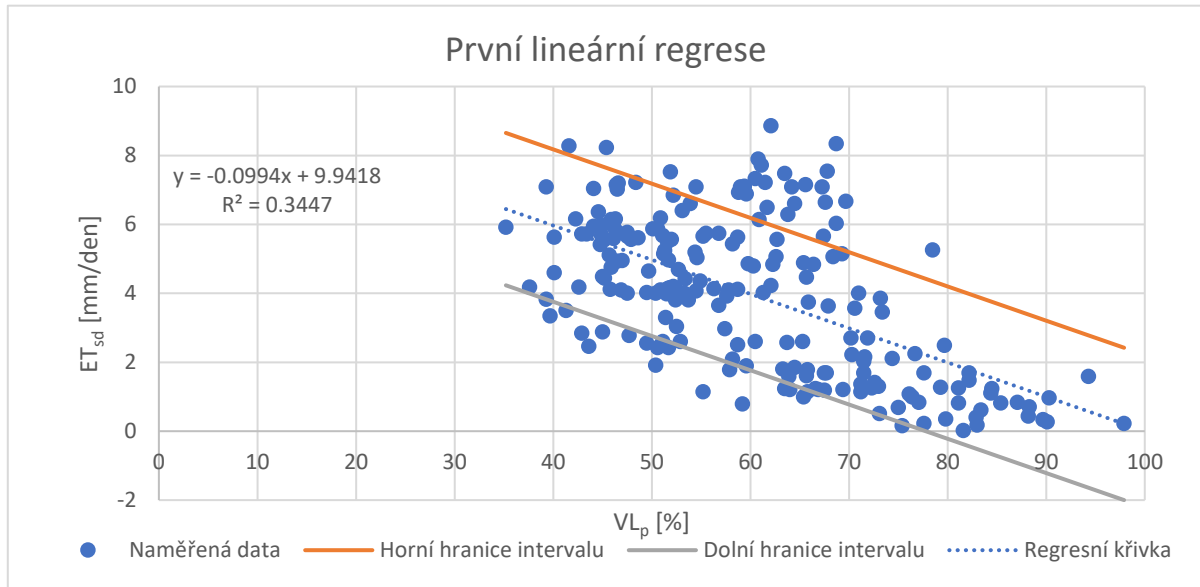
Vlhkost vzduchu, neboli nasycení vzduchu vodními parami, je možné vyjádřit jako relativní vlhkost vzduchu. Pokud je relativní vlhkost vzduchu 100 %, znamená to, že vzduch dosáhl maximálního možného nasycení vodní parou. Mezi relativní vlhkostí vzduchu a evapotranspirací by měla dle předpokladů být nepřímá úměra. Znamená to, že pokud je relativní vlhkost vzduchu nízká, měly by být úhrny evapotranspirace vysoké. Naopak, pokud je relativní vlhkost vzduchu vysoká, evapotranspirace by měla být nízká. Při 100 % relativní vlhkosti by pak teoreticky nemělo docházet k žádné evapotranspiraci.

Pro vyhodnocení závislosti denních evapotranspiračních úhrnů jsou použity hodnoty relativní vlhkosti vzduchu naměřené na meteorologické stanici UVHK.

Posouzení závislosti mezi relativní vlhkostí vzduchu a evapotranspirací bylo opět provedeno prostřednictvím regrese. Výpočty proběhly totožným postupem jako u předchozích posouzení. U předchozích dat se dalo očekávat ovlivnění měření odlišným umístěním laboratorního modelu a meteorologické stanice. U relativní vlhkosti vzduchu však lze předpokládat, že rozdíly mezi podmínkami naměřenými na meteorologické stanici a těmi, které byly skutečně přítomny v bezprostředním okolí modelu, by neměly být velké. Regresní modely by tak měly dosahovat větších hodnot koeficientu determinace.

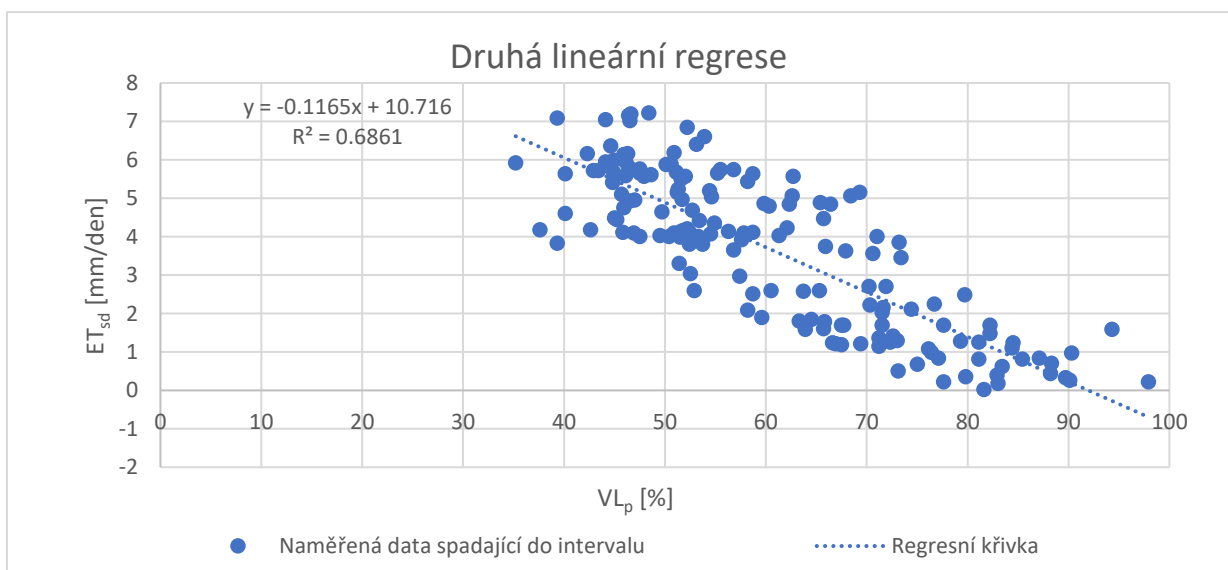
## Regrese v denních krocích

Pro všechny regresní modely v denních krocích byla použita jedna sada vstupních dat čítající 209 záznamů. U lineární regrese v denních krocích byla druhá regrese provedena pro 162 záznamů, které představují 78 % vstupních dat. Směrodatná odchylka pro vstupní data je  $\sigma = 2,21$  mm/den.



Obrázek 41 První lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu s evapotranspirací v denních krocích

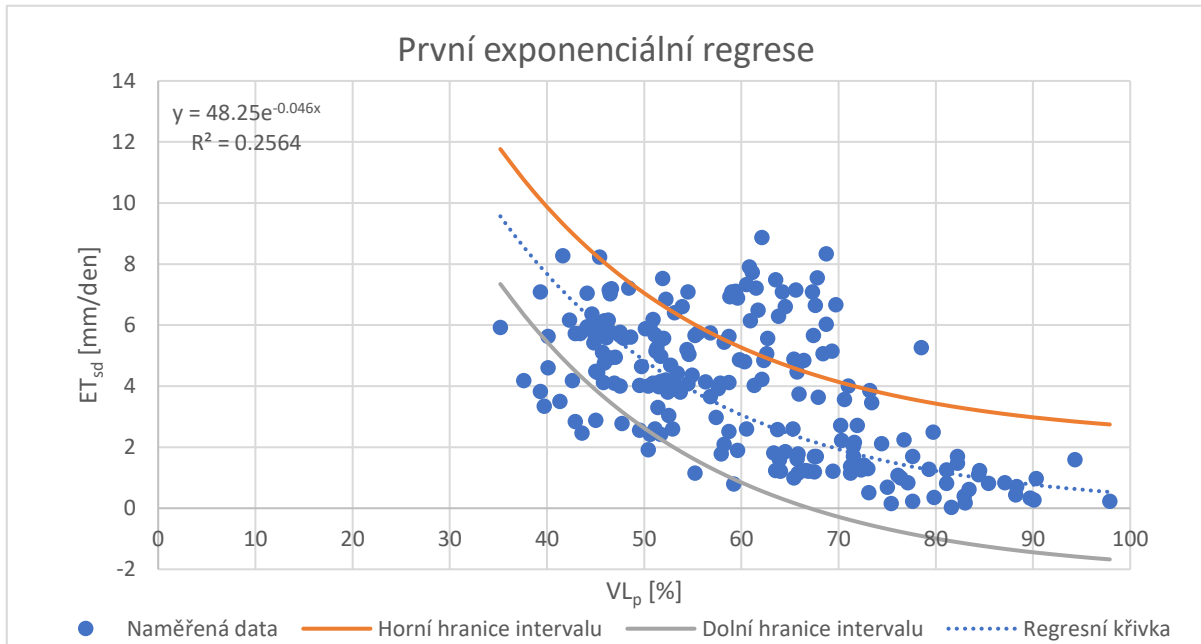
Lineární rovnice reprezentující první lineární regresní model byla sestavena ve tvaru  $ET_{sd} = -0,0994 * VL_p + 9,9418$ .  $ET_{sd}$  představuje naměřenou evapotranspiraci během dne,  $VL_p$  průměrnou denní relativní vlhkost. Koeficient determinace regresního modelu je  $R^2 = 0,3447$



Obrázek 42 Druhá lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu s evapotranspirací v denních krocích

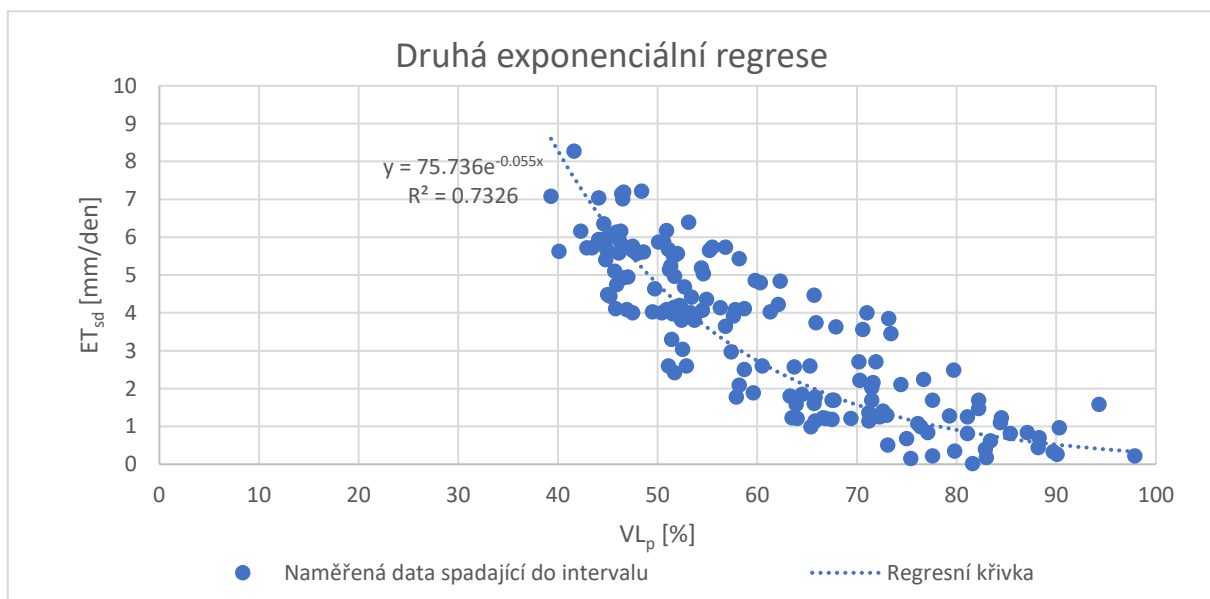
Výstupem druhé lineární regrese je rovnice  $ET_{sd} = -0,1165 * VL_p + 10,716$ .  $ET_{sd}$  a  $VL_p$  představují stejné proměnné jako výše. Koeficient determinace modelu má hodnotu  $R^2 = 0,6861$ . Model má tedy vyšší přesnost oproti první regresi, a to díky filtraci dat.

Exponenciální regrese byla provedena pro stejná vstupní data. Druhý regresní model pracoval s částí datové sady, spadající do stanoveného filtračního intervalu. Druhá regrese pak počítala se 157 záznamy, které představují 75 % původních dat.



Obrázek 43 První exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích

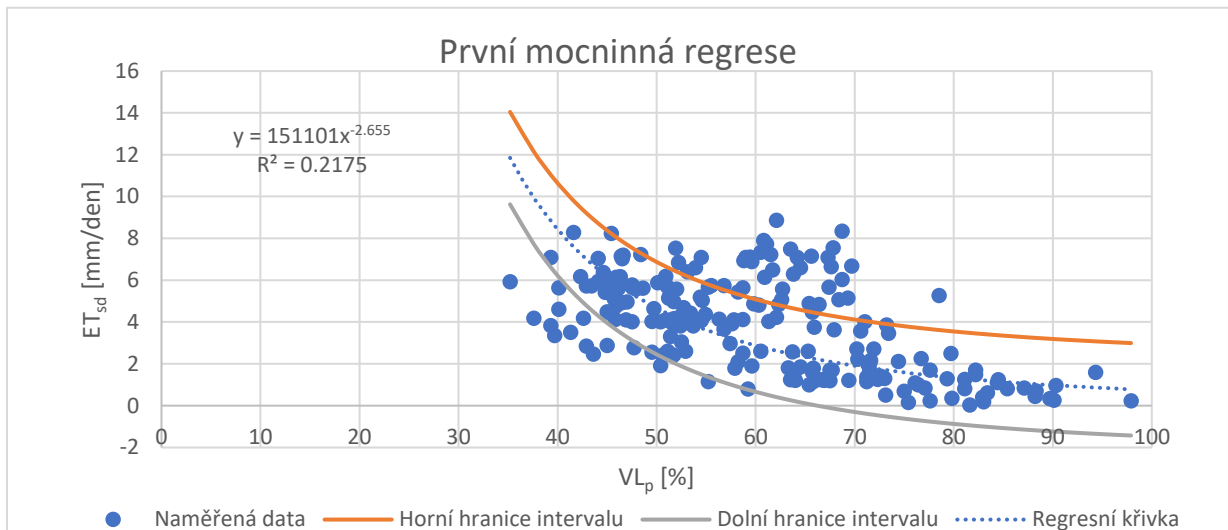
První stupeň regrese definoval regresní rovnici  $ET_{sd} = 48,25 * e^{-0,046 * VL_p}$ .  $ET_{sd}$  a  $VL_p$  představují stejné proměnné jako výše. Koeficient determinace exponenciálního modelu má hodnotu  $R^2 = 0,2564$ .



Obrázek 44 Druhá exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích

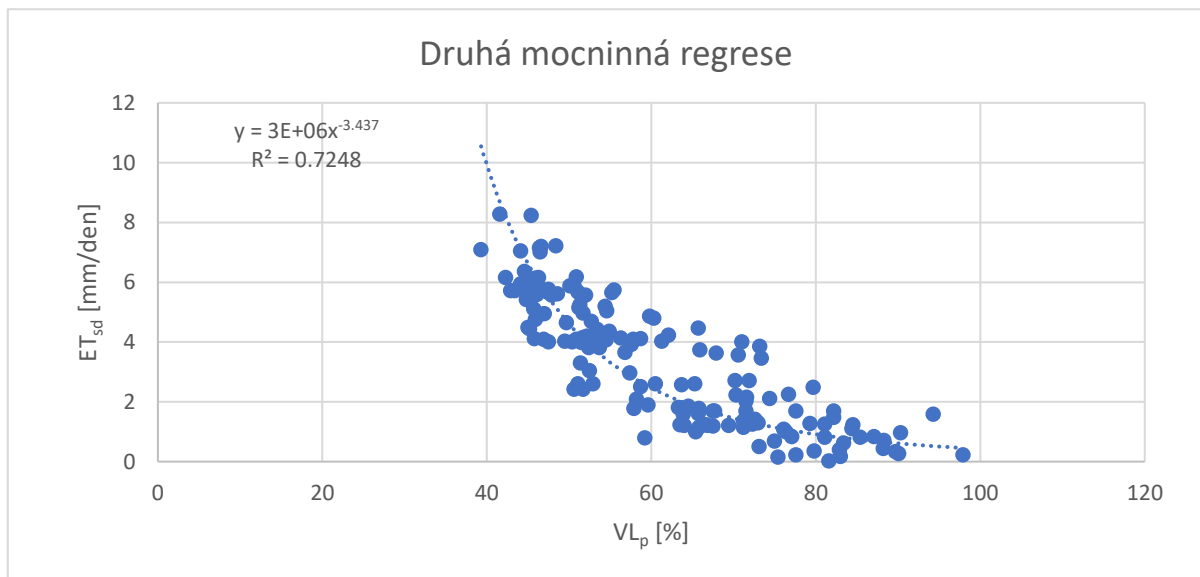
Druhá regresní exponenciální model pak definoval rovnici na tvar  $ET_{sd} = 75,736 * e^{-0,055 * VL_p}$ .  $ET_{sd}$  a  $VL_p$  opět představují stejné proměnné jako výše. Koeficient determinace exponenciálního modelu má hodnotu  $R^2 = 0,7326$ .

Mocnné regresní modely také pracovaly se stejnou sadou vstupních dat, která byla pro druhý stupeň regrese filtrována z 209ti na 155 záznamů. Druhá regrese tedy pracovala se 74 % vstupních dat, což je téměř totožné s exponenciálním modelem.



Obrázek 45 První mocinná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích

Výstupem z prvního regresního modelu je rovnice  $ET_{sd} = 151101 * VL_p^{-2,655}$ .  $ET_{sd}$  a  $VL_p$  opět představují stejné proměnné jako výše. Koeficient determinace regresního modelu je  $R^2 = 0,2175$ .

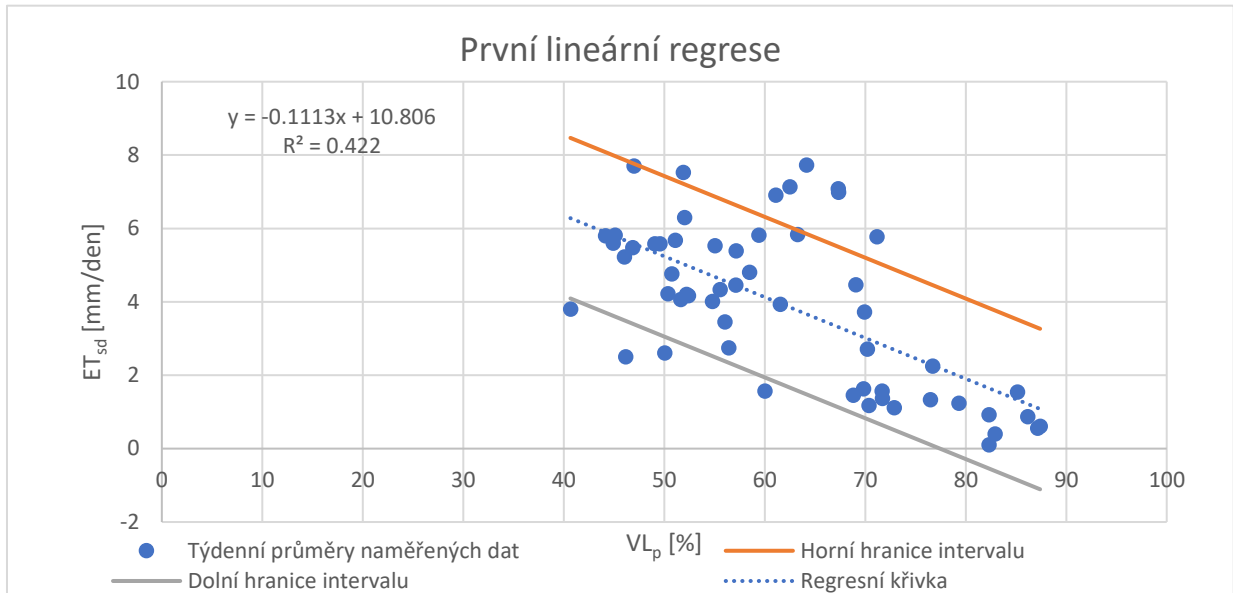


Obrázek 46 Druhá mocinná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích

Druhý regresní model vedl k rovnici ve tvaru  $ET_{sd} = 3\,188\,380 * VL_p^{-3,437}$ .  $ET_{sd}$  a  $VL_p$  opět představují stejné proměnné jako výše. Koeficient determinace regresního modelu je  $R^2 = 0,7248$ . Druhý stupeň regrese tak byl opět ve všech případech přesnější.

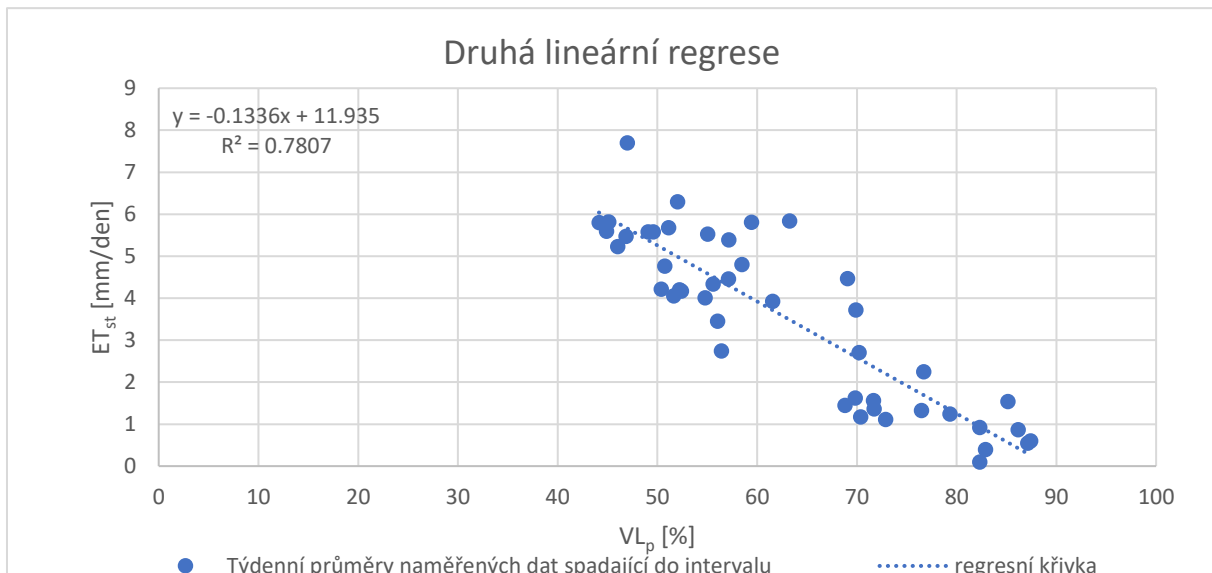
## Regrese v týdenních průměrech

Vstupní data naměřená na laboratorním modelu a meteorologické stanici byla posouzena opět nejen v denních krocích, ale také v týdenních průměrech. Při těchto výpočtech byly první regresní modely založeny na 56 vstupních záznamech, jejich směrodatná odchylka je  $\sigma = 2,19$  mm/den.



Obrázek 47 První lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech

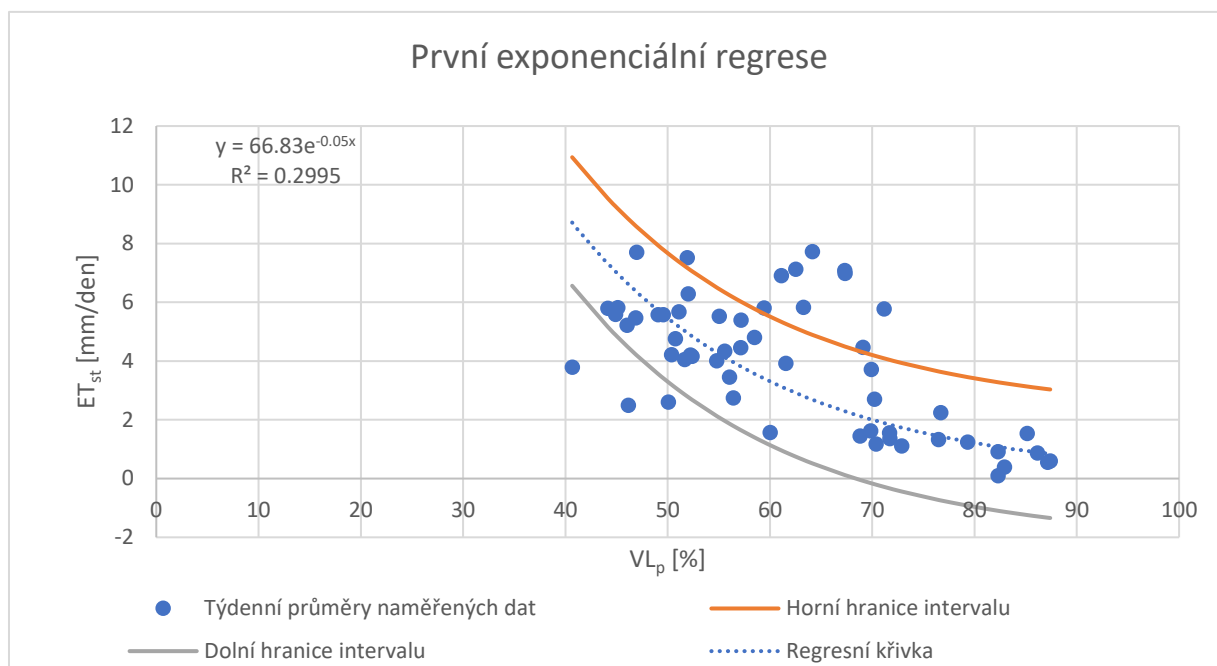
Lineární rovnice  $ET_{st} = -0,1113 * VL_p + 10,806$  je výstupem z prvního lineárního regresního modelu.  $ET_{st}$  představuje denní naměřenou evapotranspiraci,  $VL_p$  pak relativní vlhkost vzduchu. Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,422$ .



Obrázek 48 - Druhá lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech

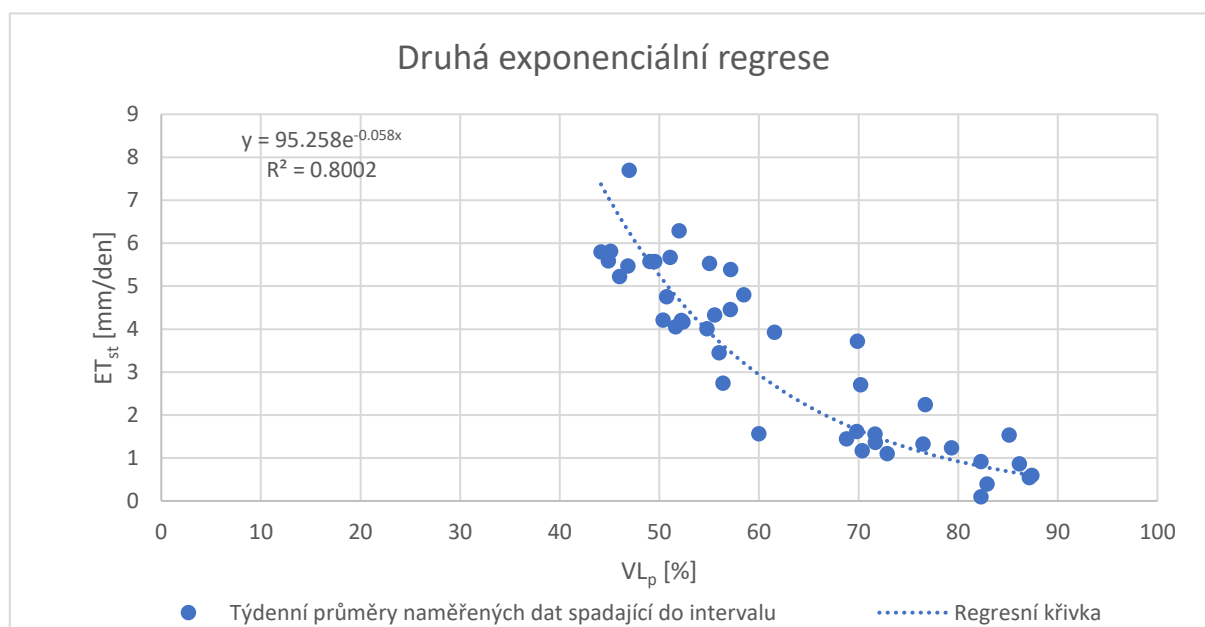
Druhý lineární model stanovil rovnici ve tvaru  $ET_{st} = -0,1336 * VL_p + 11,935$ .  $ET_{st}$  a  $VL_p$  představují totožné proměnné. Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,7807$ .

Exponenciální modely byly provedeny stejným postupem jako výše. Z 56 vstupních záznamů bylo filtračním intervalem vybráno 43, představující 77 % vstupních dat, které byly posouzeny ve druhé regresi.



Obrázek 49 První exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech

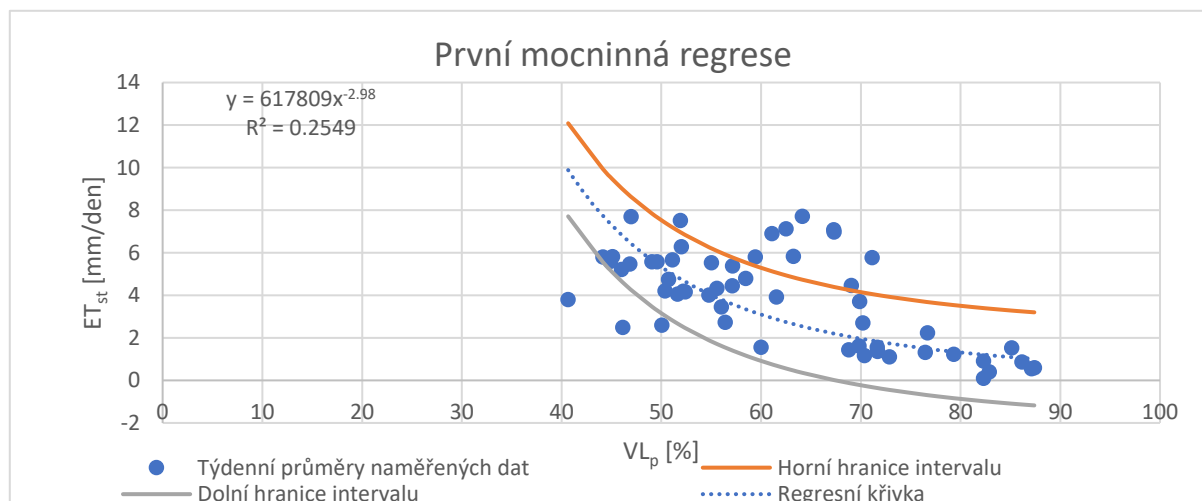
Výstupem první exponenciální regrese je rovnice  $ET_{st} = 66,83 * e^{-0,05 * VL_p}$ .  $ET_{st}$  a  $VL_p$  představují totožné proměnné. Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,2995$ .



Obrázek 50 Druhá exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech

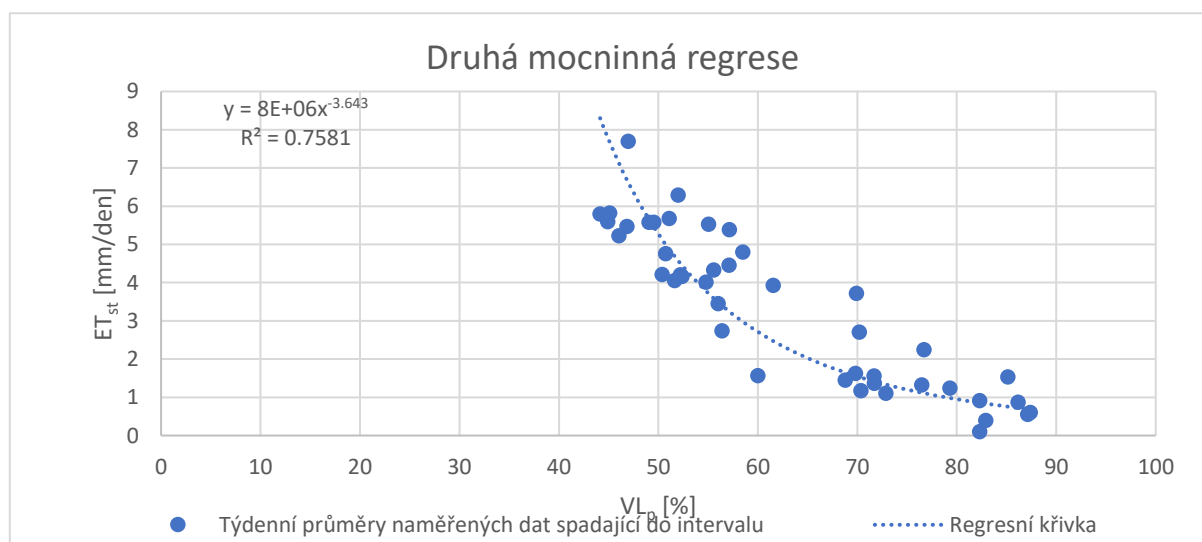
Druhý regresní model pracující s filtrovaným souborem dat stanovil exponenciální rovnici ve tvaru  $ET_{st} = 95,258 * e^{-0,058 * VL_p}$ .  $ET_{st}$  a  $VL_p$  představují totožné proměnné. Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,8002$ .

Mocnná regrese probíhala v tomto případě stejným postupem, jako všechny výše zmíněné. Vstupní data byla využita pro sestavení prvního regresního modelu, který společně se směrodatnou odchylkou definoval filtrační interval. Pro druhou regresi pak bylo použito 43 z původních 56ti záznamů, které spadají do filtračního intervalu. Druhý regresní model je tedy založen na 77 % původních dat.



Obrázek 51 První mocinná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech

Výstupem prvního modelu je rovnice ve tvaru  $ET_{st} = 617\,809 * VL_p^{-2.98}$ .  $ET_{st}$  a  $VL_p$  představují totožné proměnné. Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,2549$ .



Obrázek 52 Druhá mocinná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech

Druhý regresní model pak stanovil rovnici ve tvaru  $ET_{st} = 8\,155\,128 * VL_p^{-3.643}$ .  $ET_{st}$  a  $VL_p$  opět představují totožné proměnné. Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,7581$ .

Relativní vlhkost vzduchu, zastupující ovlivnění evapotranspirace vlhkostí vzduchu bylo posouzeno dvanácti regresními modely. Modely byly opět provedeny ve dvou stupních pro vstupní sadu dat v denních krocích, i v týdenních průměrech.

První stupně regresí byly provedeny pro veškerá vstupní data. Koeficienty determinace se pohybovaly v rozmezí od 0,2175 (mocninná regrese v denních krocích) do 0,422 (lineární regrese v týdenních průměrech). Druhé stupně regrese přinesly opět zvýšení hodnoty koeficientu determinace, konkrétně na hodnoty od 0,6861 (lineární regrese v denních krocích) do 0,8002 (exponenciální regrese v týdenních průměrech).

Nejlepšího výsledku bylo dosaženo za použití vstupní sady dat v týdenních průměrech a druhého stupně exponenciální regrese. Denní úhrn evapotranspirace je dle tohoto modelu možné předpovídat z relativní vlhkosti vzduchu s koeficientem determinace 0,8 s rovnicí  $ET_{st} = 95,258 * e^{-0,058 * VLp}$ .

Opět je vhodné zmínit nejistoty měření, jako například odlišné provozování laboratorního modelu v letech 2022 a 2023, které mají na přesnost výpočtů negativní vliv.

## 6.5 STANOVENÍ A POSOUZENÍ POTENCIÁLNÍ EVAPOTRANSPIRACE

Metody Hargreaves – Samani, Turc, a Thornthwaite, které byly využity k vypočtení potenciální evapotranspirace, jsou empirické. Všechny metody obsahují minimálně jeden empirický koeficient. Změnou hodnoty koeficientu (koeficientů) se logicky změní výstup z empirické rovnice. Pokud tedy část dat o naměřené evapotranspiraci vyčleníme jakožto referenční evapotranspiraci, můžeme výpočtem potenciální evapotranspirace pro totéž období dojít k vypočtení totožného úhrnu evapotranspirace v referenčním období.

Jakožto vstupní data pro stanovení potenciální evapotranspirace byly převzaty naměřené denní úhrny evapotranspirace. Filtrace naměřených dat vedla k odstranění úhrnů evapotranspirace v těch dnech, ve kterých se vyskytovaly srážky. Dále byly filtrace z datové sady odstraněny dny, ve kterých byla doplňována voda do IBC kontejneru. Odstraněny byly také dny ostatních nejistot (detailně popsány výše).

Referenční evapotranspirace byla vybrána pečlivě tak, aby obsahovala jak letní, tak i jarní a podzimní dny. Cílem takového výběru je kalibrace empirických rovnic na co největší variaci situací, které mohou nastat. Proto byly jako referenční dny vybrány následující intervaly:

Označení intervalu	První den intervalu	Poslední den intervalu
Int. 1	pondělí 9. květen 2022	neděle 22. květen 2022
Int. 2	pondělí 4. červenec 2022	neděle 17. červenec 2022
Int. 3	pondělí 5. září 2022	neděle 18. září 2022
Int. 4	pondělí 31. říjen 2022	neděle 13. listopad 2022
Int. 5	pondělí 22. květen 2023	pondělí 5. červen 2023
Int. 6	pondělí 7. srpen 2023	neděle 20. srpen 2023
Int. 7	pondělí 11. září 2023	neděle 24. září 2023
Int. 8	pondělí 30. říjen 2023	neděle 12. listopad 2023

Tabulka 1 Intervaly referenčních dnů

Metodika výpočtu potenciální evapotranspirace byla sestavena tak, aby byly její úhrny stanoveny pouze pro ty dny, pro které je definována evapotranspirace referenční. Ve dnech, pro které není referenční (neboli naměřená) evapotranspirace stanovena, není tím pádem stanovena ani evapotranspirace potenciální. Ve všech intervalech se tím pádem vyskytly dny, pro které nebyla potenciální evapotranspirace stanovena. Pro interval 8 dokonce nebyla stanovena ani v jednom dni.

Kalibrace empirických koeficientů pro všechny rovnice byla provedena prostřednictvím funkce řešitel v programu MS Excel. Funkce byla nastavena tak, aby se změnou hodnot koeficientů dosáhlo shodné referenční a potenciální evapotranspirace v součtu všech výše zmíněných intervalů.

Kalibrace všech tří metod vedla k naprosto shodné potenciální a referenční evapotranspirace v součtu všech intervalů. Metoda Hargreaves – Samani, reprezentovaná následující rovnicí obsahuje celkem tři empirické koeficienty. Pro koeficient A bylo

dosaženo hodnoty 0,001 972. Koeficient B má pak hodnotu 18,130 310, a koeficient C má hodnotu 0, 476 027. Rovnice je podrobně popsána v kapitole Metoda Hargreaves

$$E_{p1,i} = A * (T_{prům} + B) * (T_{max} - T_{min})^C * R_{a,i}$$

Metoda Turc, jejíž rovnice je uvedena pod odstavcem, obsahuje dva empirické koeficienty. Jejich hodnoty byly výše popsaným postupem stanoveny na A = 0, 035 616, a B = 219, 131 600. Samotná rovnice je podrobně pospaná v kapitole Metoda Turc.

$$E_{p2,i} = A * \left( \frac{T_{prům}}{T_{prům} + 15} \right) * (R_{s,i} + B)$$

Metodu Thornthwaite je možné kalibrovat úpravou jediného empirického koeficientu. Ten je v rovnici uveden jako exponent  $a_u$ . Hodnota koeficientu byla vypočtena výše uvedeným postupem na  $a_u = 1,743 405$ . Podrobný popis samotné rovnice je uveden v kapitole Metoda Thornthwaite.

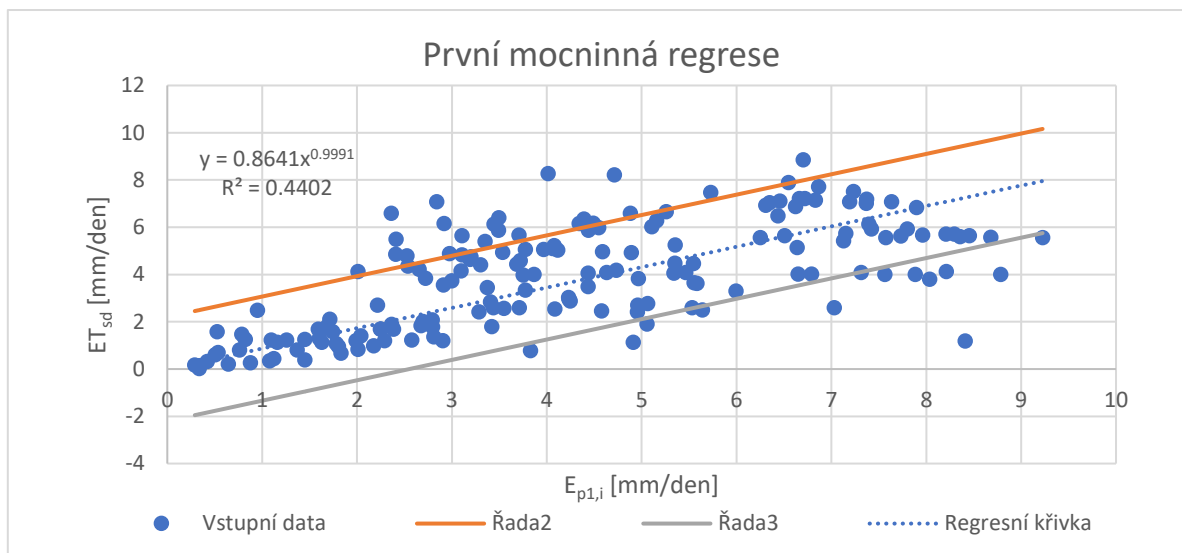
$$E_{p3,i} = 16 * \left( 10 * \frac{T_{prům}}{I_u} \right)^{a_u} * C$$

Pro vypočtenou potenciální evapotranspiraci byly poté provedeny dvoustupňové regresní výpočty. První regresní model byl využit k sestavení filtračního intervalu, který byl poté použit k filtraci vypočtených dat a k provedení druhé regrese. Tento postup byl proveden k regresi potenciální a referenční evapotranspirace v denních krocích, i v týdenních průměrech.

Uvedené regresní modely nejsou pro všechny výpočtové postupy totožné. Typy modelů byly vybrány pro každou metodu zvlášť. U metody Hargreaves – Samani byla vybrána mocninná regrese. Pro metodu Turc byla vzhledem k datům vyobrazeným v grafu vybrána exponenciální regrese, a pro metodu Thornthwaite byla vybrána regrese lineární.

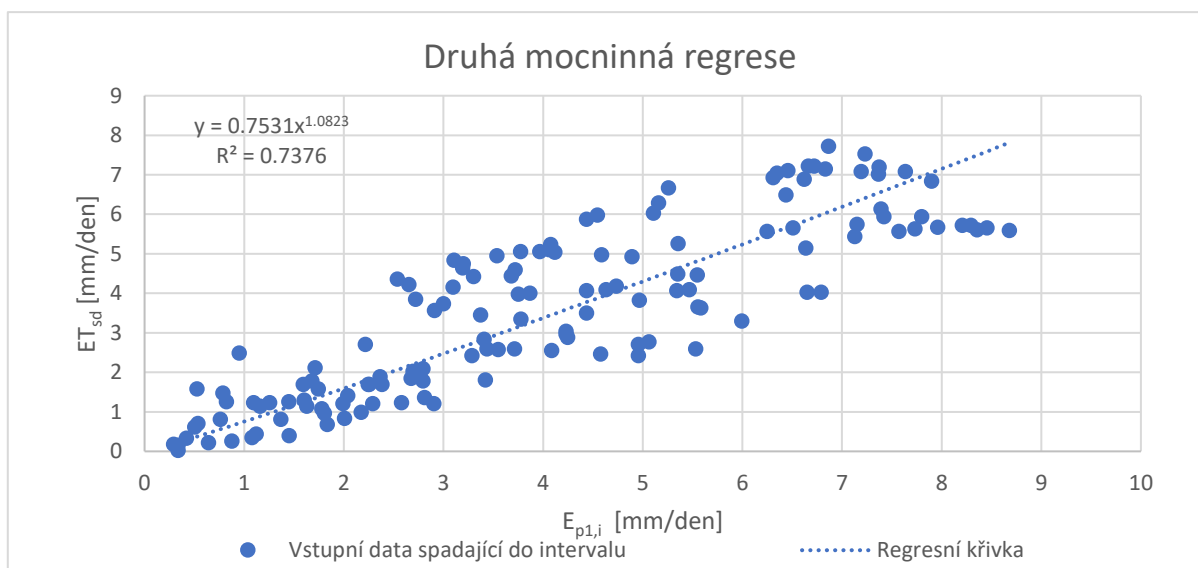
## Regrese metody Hargreaves – Samani

Mocninný regresní model pracuje v denních krocích z počátku se sadou vstupních dat čítající 173 záznamů. Směrodatná odchylka, která je společně s regresní rovnicí použita ke konstrukci filtračního intervalu, má hodnotu  $\sigma = 2,20$  mm/den. Po filtraci vstupních dat pak pracuje druhá mocninná regrese v denních krocích se 137 záznamy, které představují 79 % původních dat.



Obrázek 53 První mocinná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v denních krocích

Výstupem první mocinné regrese je rovnice ve tvaru  $ET_{sd} = 0,8641 * E_{p1,i}^{0,9991}$ .  $ET_{sd}$  zde představuje denní úhrny referenční evapotranspirace.  $E_{p1,i}$  pak zastupuje denní úhrny potenciální evapotranspirace. Regresní model byl stanoven s koeficientem determinace  $R^2 = 0,4402$ .

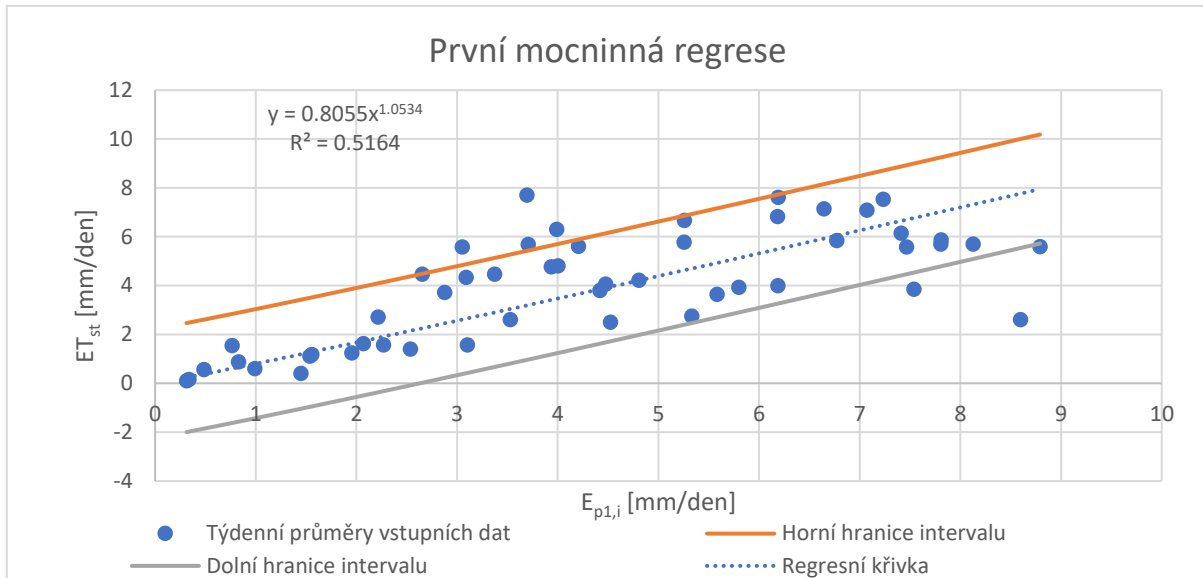


Obrázek 54 Druhá mocinná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v denních krocích

Pro druhou mocinnou regresi model sestavil rovnici ve tvaru  $ET_{sd} = 0,7531 * E_{p1,i}^{1,0823}$ . Model byl sestaven s koeficientem determinace  $R^2 = 0,7376$ . Za povšimnutí stojí téměř lineární průběh regresní křivky, který je potvrzen v samotné mocinné regresní rovnici exponentem b, jehož hodnota se pohybuje v blízkosti hodnoty 1.

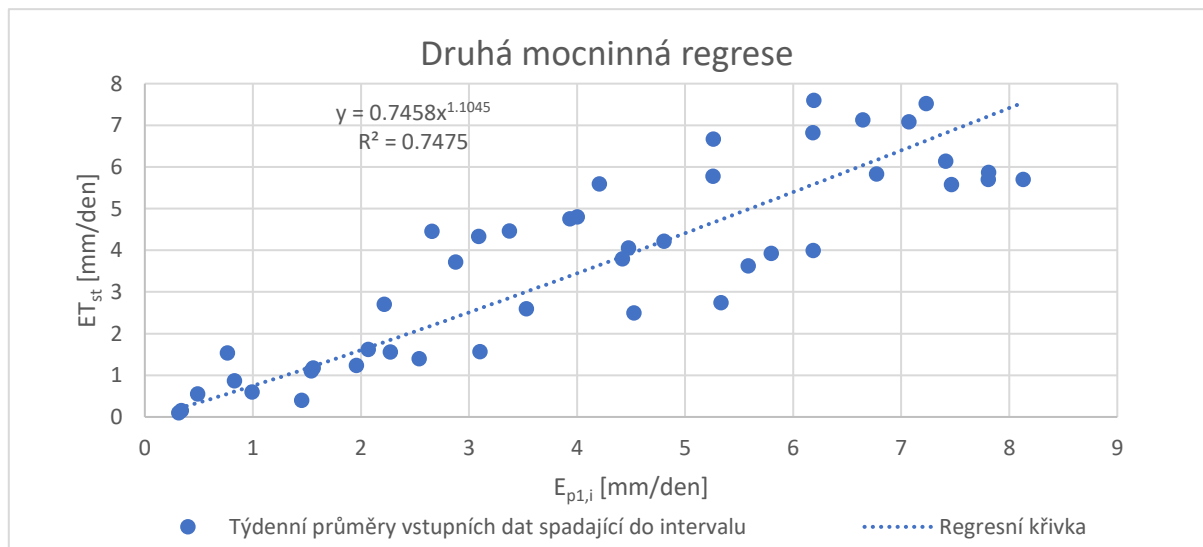
Pro výpočet regrese v týdenních průměrech byla vstupní sada dat z předchozí regrese (samozřejmě před filtrací) zprůměrována v patřičných týdnech. Získaná data obsahovala 51 vstupních záznamů, z nichž po filtraci bylo v druhé regresi použito jen 44 záznamů,

představujících 86 % naměřených dat. Směrodatná odchylka pro sestavení filtračního intervalu má hodnotu  $\sigma = 2,23$  mm/den.



Obrázek 55 První mocinná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech

Výsledkem první mocinné regrese pak byla rovnice  $ET_{st} = 0,8055 * E_{p1,i}^{1,0534}$ . Koeficient determinace regresního modelu byl stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,5164$ .

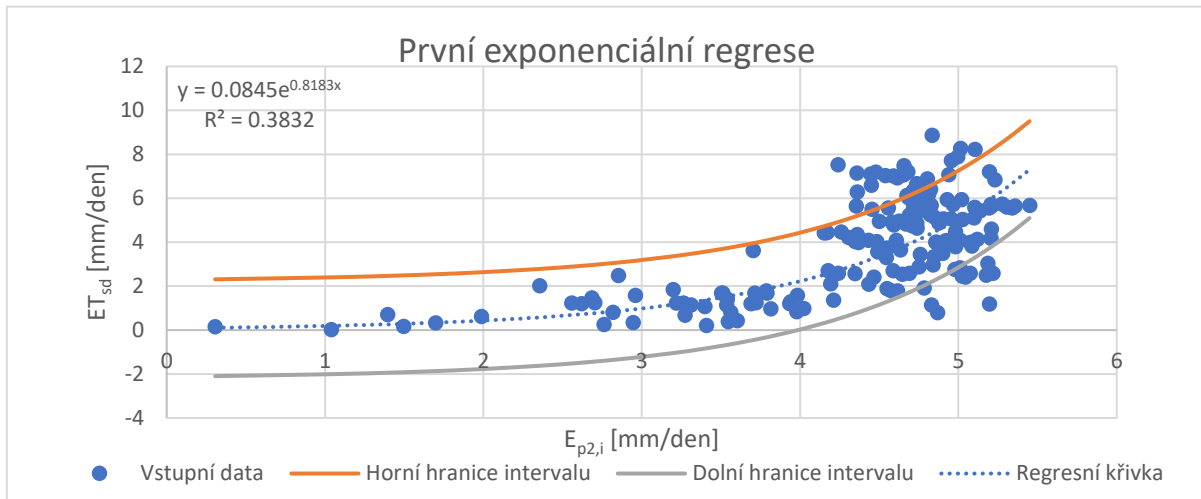


Obrázek 56 Druhá mocinná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech

Výstupem druhého regresního modelu byla pak rovnice ve tvaru  $ET_{st} = 0,7458 * E_{p1,i}^{1,1045}$ . Koeficient determinace regresního modelu je  $R^2 = 0,7475$ , což je téměř srovnatelné s druhou mocinnou regresí v denních krocích. Je však potřeba poukázat na fakt, že při druhé regresi v denních krocích bylo zanedbáno 21 % vstupních dat, které nespádaly do filtračního intervalu. U výpočtu v týdenních průměrech do intervalu nespádalo pouze 14 % vstupních záznamů, a model i tak stanovil regresní rovnici s nepatrně vyšší hodnotou koeficientu determinace. Proto ho lze považovat za vhodnější.

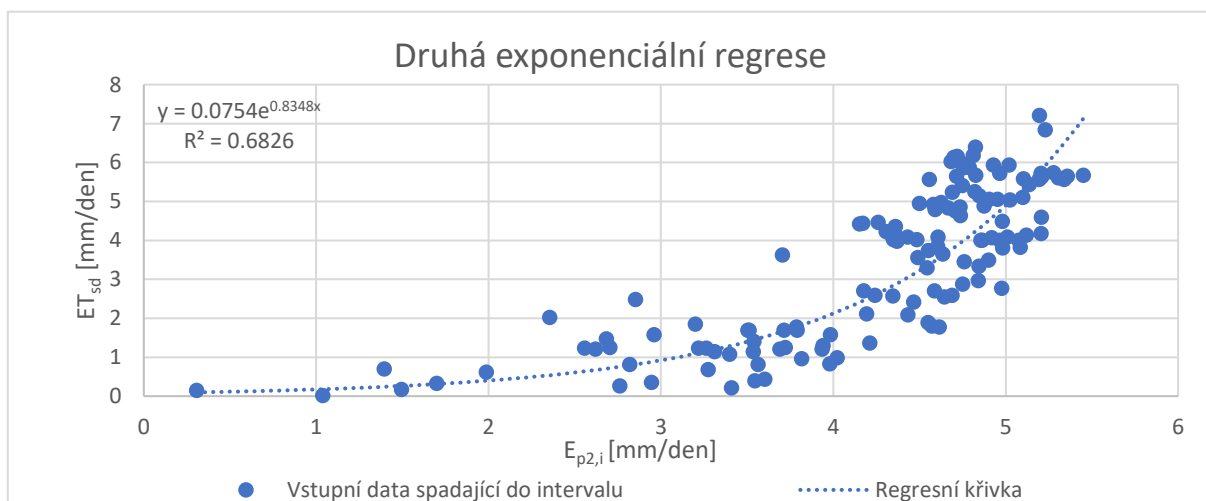
## Regrese metody Turc

Výše zmíněný exponenciální model, který byl použit pro regresi referenční a potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc, počítal v denních krocích z počátku se 173 záznamy. Po filtraci vstupních dat filtračním intervalem však bylo v regresi v denních krocích dále počítáno se 134 záznamy, které představují 77 % vstupních dat. Směrodatná odchylka vstupních dat je  $\sigma = 2,20$  mm/den.



Obrázek 57 První exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v denních krocích

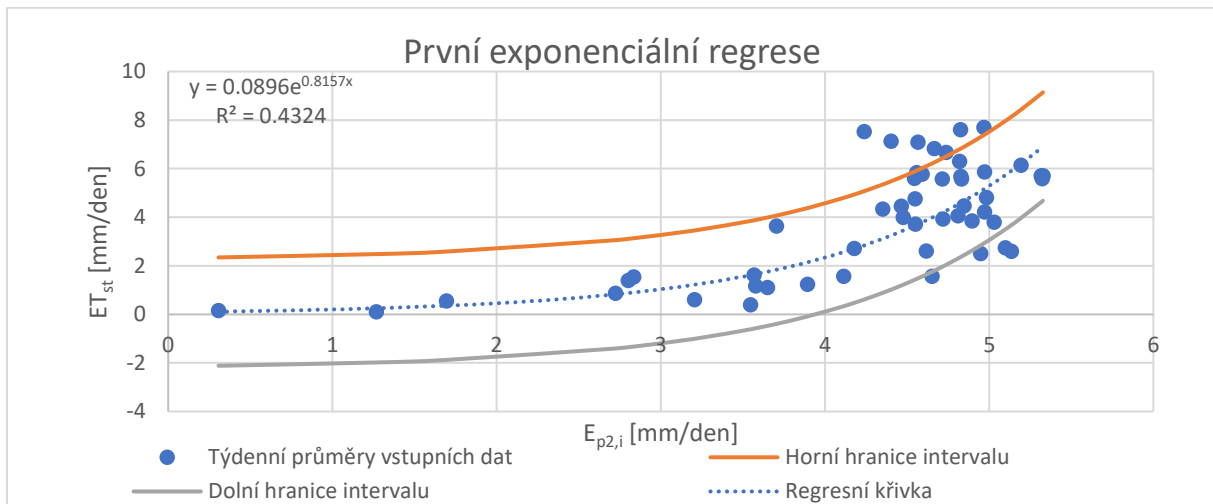
Výstupem z prvního regresního modelu je rovnice  $ET_{sd} = 0,0845 * e^{0,8183 * E_{p2,i}}$ . ET<sub>sd</sub> zde zastupuje referenční úhrny evapotranspirace v denních krocích. E<sub>p2,i</sub> zastupuje potenciální evapotranspiraci vypočtenou metodou Turc. Koeficient determinace výpočtu je  $R^2 = 0,3832$ .



Obrázek 58 Druhá exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v denních krocích

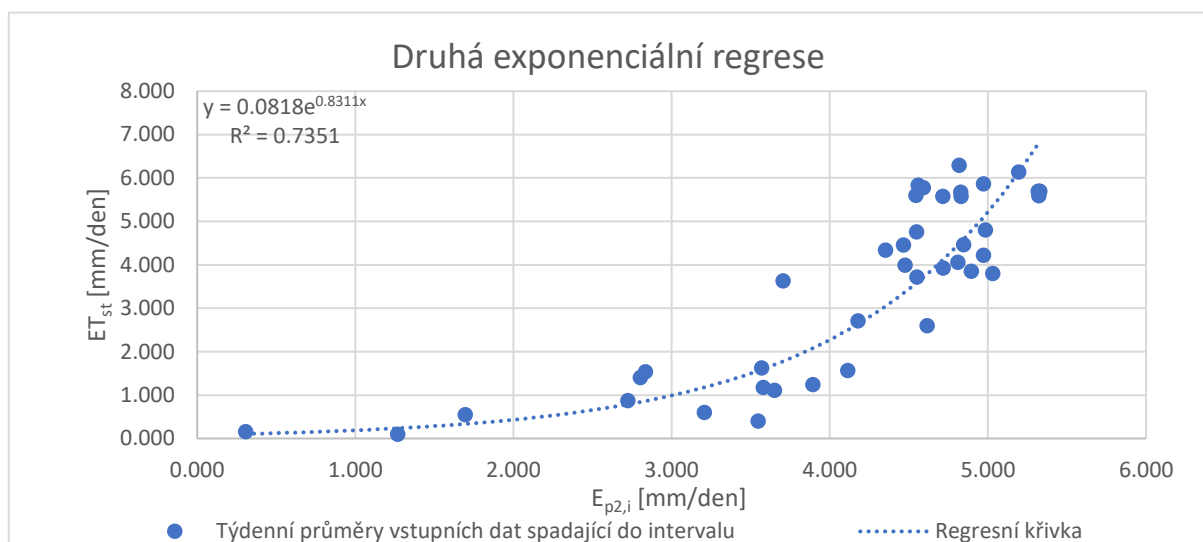
Výsledkem druhé exponenciální regrese je rovnice ve tvaru  $ET_{sd} = 0,0845 * e^{0,8183 * E_{p2,i}}$ . Koeficient determinace je stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,6826$ . Regresní model tak nedosáhl podobné hodnoty koeficientu determinace, jako u metody Hargreaves – Samani.

Výpočet v týdenních průměrech proběhl analogicky s výpočtem v denních krocích. Vstupní data byla převedena do týdenních průměrů, čímž vznikla datová sada čítající 51 záznamů. Po filtraci dat filtračním intervalem definovaným první regresní rovnicí a směrodatnou odchylkou  $\sigma = 2,23$  mm/den byla provedena druhá regrese, která počítala se 40 záznamy spadajícími do filtračního intervalu. Po filtraci se tak dále počítalo se 78 % původních dat.



Obrázek 59 První exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech

Výstupem z prvního regresního modelu je rovnice ve tvaru  $ET_{st} = 0,0896 * e^{0,8157 * Ep_{2,i}}$ . Koeficient determinace je stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,4324$ .

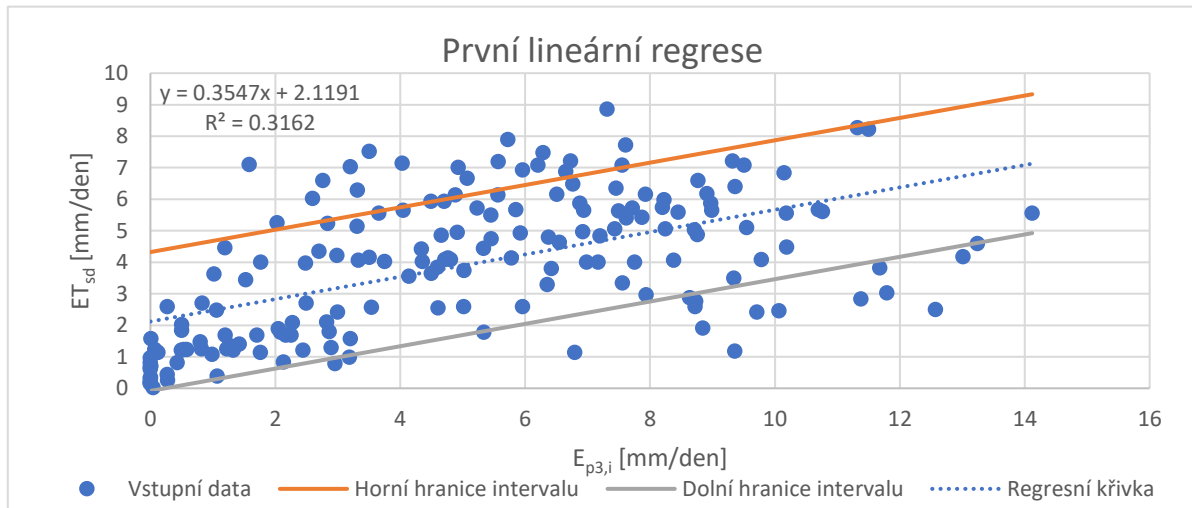


Obrázek 60 První exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech

Výsledkem druhého regresního modelu je pak rovnice ve tvaru  $ET_{st} = 0,0818 * e^{0,8311 * Ep_{2,i}}$ . Koeficient determinace je stanoven na hodnotu  $R^2 = 0,7351$ . Výpočet v týdenních průměrech tak dosáhl mnohem větší hodnoty koeficientu korelace, než regresní model v denních krocích. V obou výpočtech byl použit přibližně stejný podíl původních dat. Výpočet v týdenních krocích tak byl v tomto případě vhodnějším postupem.

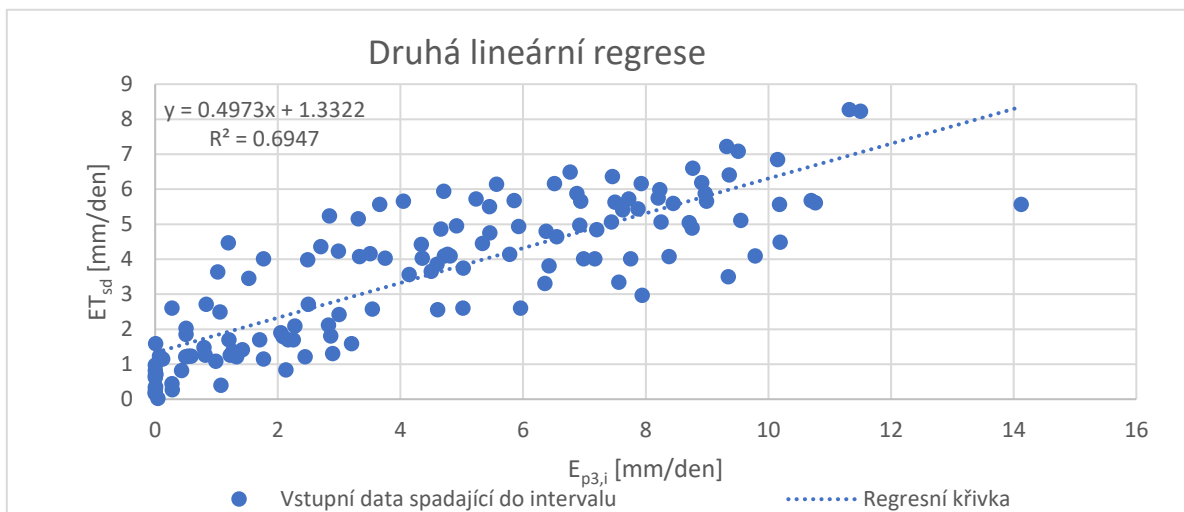
## Regrese metody Thornthwaite

Posledním posouzením této práce je regrese referenční a potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite. Pro regresi v denních krocích byl sestaven soubor vstupních dat, který opět čítal 173 záznamů. Směrodatná odchylka těchto dat je  $\sigma = 2,20$  mm/den. Po filtraci vstupních dat filtračním intervalem bylo v druhé regresi posuzováno 134 záznamů, které tvoří 77 % vstupních dat.



Obrázek 61 První lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v denních krocích

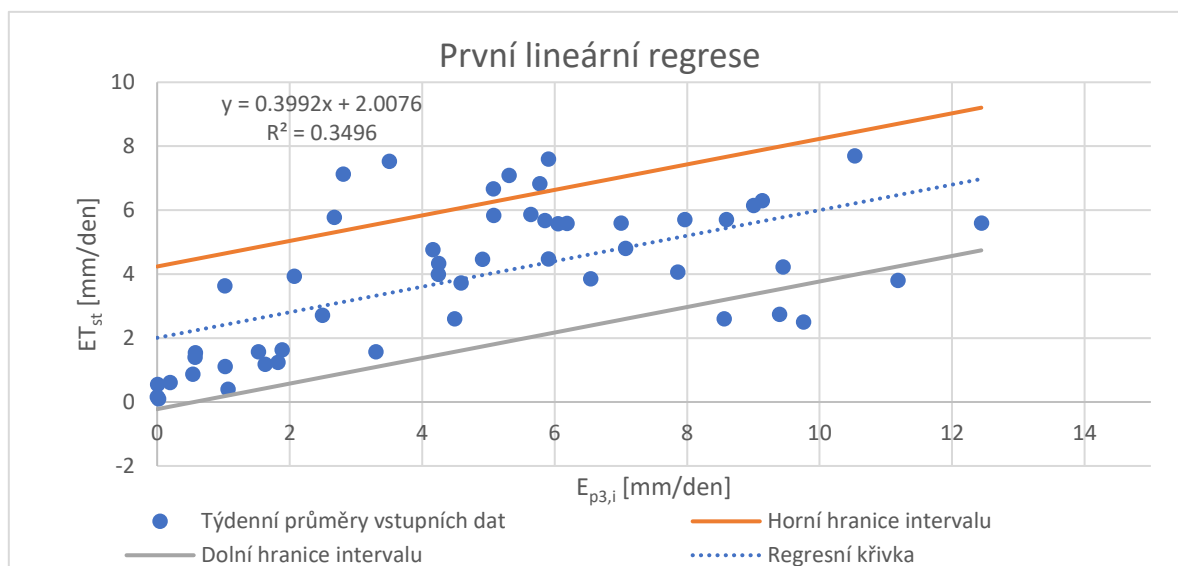
Výstupem první lineární regrese je rovnice  $ET_{sd} = 0,3547 * E_{p3,i} + 2,1191$ , kde  $ET_{sd}$  zastupuje denní referenční evapotranspiraci a  $E_{p3,i}$  představuje potenciální evapotranspirace dne vypočtenou metodou Thornthwaite. Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,3162$



Obrázek 62 Druhá lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v denních krocích

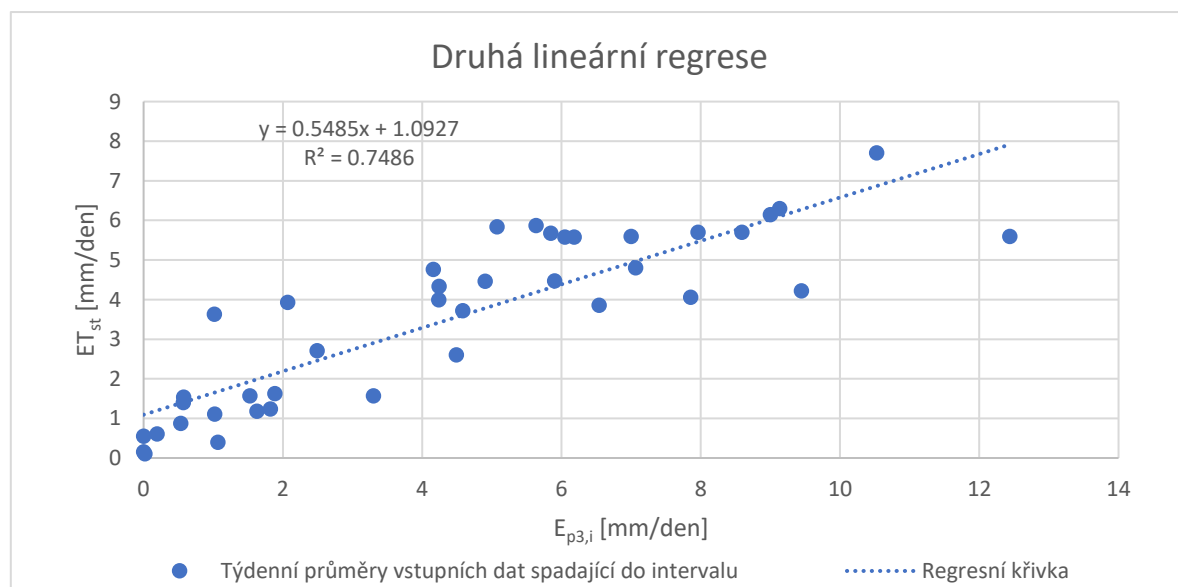
Výsledkem druhé lineární regrese v denních krocích je rovnice ve tvaru  $ET_{sd} = 0,4973 * E_{p3,i} + 1,3322$ . Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,6947$ .

Dalším výpočtem bylo opět regresní posouzení dat v týdenních průměrech. Za tímto účelem bylo v prvním regresním modelu posouzeno 51 vstupů. Směrodatná odchylka byla stanovena na hodnotě  $\sigma = 2,23$  mm/den. Druhá regrese posuzovala 40 záznamů (78 % vstupních dat).



Obrázek 63 První lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech

Výstupem z první lineární regrese je rovnice  $ET_{st} = 0,3992 * E_{p3,i} + 2,0076$ . Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,6947$ .



Obrázek 64 Druhá lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech

Výsledkem druhé lineární regrese pak je rovnice  $ET_{st} = 0,5485 * E_{p3,i} + 1,0927$ . Koeficient determinace modelu je  $R^2 = 0,7486$ . U metody Thornthwaite se jedná zároveň o nejlepší výsledek.

Posouzení potenciální a referenční evapotranspirace bylo provedeno zejména proto, aby bylo v budoucnu možné využívat výpočty potenciální evapotranspirace k dimenzování plochy vypařovacích záhonů určených k evapotranspiraci odpadních vod. Z toho důvodu je potřeba kalkulovat množství vypařené vody co možná nejpřesněji. Při regresi vybraných tří metod s naměřenou evapotranspirací bylo u metody Hargreaves – Samani dosaženo koeficientu determinace  $R^2 = 0,7475$ . Pro metodu Thornthwaite byla tato hodnota dokonce mírně překonána, a to na  $R^2 = 0,7486$ . Moc pozadu nakonec nezůstala ani metoda Turc, u které bylo dosaženo koeficientu determinace  $R^2 = 0,7351$ .

Průběh regresních funkcí je u metody Hargreaves – Samani téměř lineární. Metoda Thornthwaite byla vyhodnocena lineárními modely. Z hlediska grafického vyobrazení však nelze totéž říct o metodě Turc, která byla vyhodnocena exponenciálními modely, s výrazným nadhodnocením evapotranspirace v oblasti nízkých realizovaných hodnot.. Proto se pro případné výpočty k navrhování vypařovacích záhonů jeví vhodnější použití metod Hargreaves – Samani, nebo Thornthwaite.

Pokud bychom chtěli tyto metody využít ke stanovení skutečné evapotranspirace, pak by u mělo být teoreticky dostačující vypočtenou potenciální evapotranspiraci přepočítat patřičnou regresní rovnicí.

Stále je ale potřeba pamatovat, že ani jeden z regresních modelů nedosáhl hodnoty koeficientu determinace vyšší než 0,75. Proto bude do budoucna potřeba provést další měření, která by měla být započtena do stejných výpočtových modelů, případně by mohly být použity i jiné metody vyhodnocení naměřených dat. Lze však očekávat, že s rostoucí datovou sadou se budou zpřesňovat i regresní modely.

## 7 ZÁVĚR

Práce podrobně představuje inovativní metodu bezodtokové likvidace odpadních vod. Vyvíjené a v poloprovozních podmínkách ověřené je nové technologické uspořádání, cílené na zvýšenou evapotranspiraci odpadních vod prostřednictvím vypařovacího záhonu. Oproti klasickým jímkám na vyvážení odpadních vod se jedná o poměrně zajímavou alternativu z pohledu ekologického i finančního. I když představuje popsané řešení po investiční stránce náročnější variantu, lze hovořit o finanční návratnosti v rámci provozních nákladů. Rychlá finanční návratnost je při optimálních možnostech zajištěna recyklací odpadních vod ke splachování WC, tedy snížením spotřebované pitné vody, přičemž producent odpadní vody ušetří přibližně 30 % pitné vody. Dalším důvodem k rychlejší návratnosti zvýšené investice je samotná evapotranspirace, tedy snižování množství vyprodukované odpadní vody. Poklesem množství vody v systému se totiž snižuje potřeba vyvážet vodu z jímky. Navíc jsou tyto bezodtokové řešení šetrnější k životnímu prostředí, zlepšují mikroklima v okolí, jsou zdrojem vody pro drobný hmyz, stávají se vyhledávaným cílem včel a motýlů, vytváří biologicky rozmanitý ostrov v často téměř suché krajině.

Práce nabízí podrobný pohled na legislativní prostředí, související s bezodtokovou likvidací odpadních vod. Dle zjištěných informací, které jsou podloženy i praktickými závěry (reakcemi a závěry orgánů životního prostředí v uvedených příkladech), se nejedná o vodní dílo. Navíc není potřeba ke stavbě takového řešení žádat ani o povolení k nakládání s vodami, pouze je potřeba při provozování dokladovat vyvážení přebývajících odpadních vody společně s obsahem usazovací nádrže.

Dále je v práci nastíněn teoretický pohled na evapotranspiraci a mechanismus transpirace rostlin. Samotná transpirace je představena od odběru vody z půdy kořenovým systémem rostlin, po samotné převedení této vody do atmosféry rostlinnými průduchy. Teoretická část poukazuje také na provázanost transpirace s fotosyntézou. Dle poznatků rešerše je zřejmé, že evapotranspirace závisí zejména na nasycení půdního profilu vodou, slunečním zářením, rychlostí větru, teplotou vzduchu, a jeho vlhkostí. Transpirace je pak ovlivněna i typem rostlin, které ji realizují.

Součástí práce je také popis trojice metod k výpočtu potenciální evapotranspirace. Tyto metody byly vybrány pro svou jednoduchost, a možnost jednoduché kalibrace. Jedná se o metody Thornthwaite, Turc, a Hargreaves – Samani.

Měření evapotranspirace z vypařovacích záhonů, které bylo v práci zpracováno, bylo realizováno na výzkumném polygonu UVHK. Laboratorní model byl sestaven a provozován už před obdobím zpracovávaným v práci. Díky tomu bylo možné vyhodnotit evapotranspiraci za dvě celé sezóny. Ve výpočtové části byla nejprve zjištěna indikace vlivu stáří rostlin na transpiraci, a to díky odlišnému provozování vypařovacího záhonu v obou sezónách. Zatímco v první sezóně byla vegetace kosena pouze sporadicky, v druhé bylo

kosení prováděno pravidelně. Výsledkem byla 1,3 násobně větší evapotranspirace v roce 2023 oproti roku 2022. Je však třeba mít na paměti i ovlivnění jinými vlivy, nežli pouhým kosením vegetace. Proto nelze tento rozdíl pokládat za jednoznačnou závislost vlivu kosení vegetace na transpiraci, ale nadále by bylo vhodné se v dalších vegetačních sezónách věnovat i četnosti kosení vegetace, spojenou se zahuštěním travního povrchu.

Posouzení vlivu meteorologických veličin na úhrn evapotranspirace v závislosti bylo provedeno pro teplotu vzduchu, denní délku slunečního svitu, a relativní vlhkost vzduchu. Data použitá k těmto výpočtům byla naměřená na meteorologické stanici Ústavu vodního hospodářství krajiny. Za vyzdvižení stojí zmínění relativně kvalitního výsledku u vlivu teploty na výpar - mocinná regrese teploty s evapotranspirací v týdenních průměrech dosáhla koeficientu determinace 0,7304. Posuzování vlivu délky slunečního svitu mělo nejlepší výsledky u lineární regrese v týdenních průměrech. Uvedenou metodou bylo dosaženo koeficientu determinace 0,7364. Podobného výsledku bylo dosaženo exponenciální regresí. V případě posouzení vlivu vlhkosti vzduchu bylo dosaženo největší hodnoty koeficientu determinace u exponenciální regrese v týdenních průměrech, a sice 0,8002.

Hodnoty denní evapotranspirace lze na základě výpočtů nejlépe předpovídat dle relativní vlhkosti vzduchu. Je však potřeba dodat, že i teplota vzduchu, a délka slunečního svitu ovlivňují evapotranspiraci předvídatelným způsobem.

Regresní výpočty byly provedeny i k posouzení závislosti mezi potenciální a skutečnou evapotranspirací. Model posuzující metodu Hargreaves – Samani byl sice mocinný, ale měl téměř lineární průběh. U této metody bylo dosaženo koeficientu determinace 0,7475 u regrese v týdenních průměrech. Téměř stejná hodnota koeficientu determinace byla dosažena při regresi v denních krocích. Je však potřeba poukázat na vyšší podíl zanedbaných (vyřazených) dat ve druhém regresním modelu.

Model k posouzení metody Turc byl exponenciální. Metoda Turc totiž v oblasti nízkých hodnot naměřené evapotranspirace dosahovala vysokých hodnot potenciální evapotranspirace. Koeficient korelace dosáhl nejvyšší hodnoty u regrese v týdenních průměrech, konkrétně hodnoty 0,7351. Metoda Thornthwaite bylo posuzována lineárními regresními modely. Největší hodnota koeficientu determinace byla stanovena opět v týdenních průměrech, a to 0,7486.

Hodnoty skutečné evapotranspirace jsou tedy předvídatelné trojicí vybraných metod s relativně podobnou spolehlivostí. Je však potřeba přihlídnout k předpokladu lineární závislosti mezi potenciální a skutečnou evapotranspirací (kap. 3 Bezodtoková likvidace odpadních vod). Na základě předpokladu linearity se za vhodné dají považovat pouze metody Hargreaves – Samani a Thornthwaite.

Důležitou součástí práce je i trojice projektových dokumentací poloprovozních modelů. Dokumentace jsou podrobně představeny samostatných v přílohách práce. Jejich

zhotovení bylo provedeno na základě dodaných podkladů spin-off VUT v Brně, ConWe s.r.o. Dva projekty jsou v termínu před odevzdáním diplomové práce již zhotovené a připravené k provozu. Všechny tyto stavby jsou založeny na technologické lince představené v této práci. Jedná se o vícestupňovou předúpravu prostřednictvím anaerobního separátoru, doplněnou vypařovacím záhonem, přičemž součástí ve všech případech je i akumulční jímka, osazovaná za účelem možnosti návratu vody jako užitkové zpět do oběhu. Všechny projekty, resp. realizované stavby, budou využity v navazujících letech coby poloprovozní modely a budou využity k dalšímu měření, jehož cílem bude vyhodnocení a optimalizace návrhových parametrů pro bezodtoková zařízení k likvidaci odpadních vod. Současně budou vyhodnocené i reálné provozní náklady, popsána provozní úskalí a doporučení.

## 8 SEZNAM PŘÍLOH

### 8.1 PŘÍLOHA Č.1

- A Průvodní zpráva**
- B Souhrnná technická zpráva**
- C Situační výkresy**
  - C.01 Situační výkres širších vztahů
  - C.02 Katastrální situační výkres
  - C.03 Koordinační situační výkres
- D Dokumentace objektů a technických a technologických zařízení**
  - D.1 Dokumentace stavebního nebo inženýrského objektu**
    - D.1.1 Architektonicko – stavební řešení**
      - D.01 Technická zpráva
      - D.02 Vzorový příčný řez gravitační kanalizací
      - D.03 Vzorový příčný řez tlakovou kanalizací
      - D.04 Podélný profil
      - D.05 Stávající septik – půdorys/řez
      - D.06 Anaerobní separátor – půdorys/řez
      - D.07 Vypařovací záhon – půdorys
      - D.08 Vypařovací záhon – vzorový podélný řez
      - D.09 Vypařovací záhon – vzorový příčný řez
      - D.10 Akumulační jímka – půdorys/řez

## 8.2 PŘÍLOHA Č.2

**A Průvodní zpráva**

**B Souhrnná technická zpráva**

**C Situační výkresy**

C.01 Situační výkres širších vztahů

C.02 Katastrální situační výkres

C.03 Koordinační situační výkres

**D Dokumentace objektů a technických a technologických zařízení**

**D.1 Dokumentace stavebního nebo inženýrského objektu**

**D.1.1 Architektonicko – stavební řešení**

D.01 Technická zpráva

D.02 Vzorový příčný řez gravitační kanalizací

D.03 Vzorový příčný řez tlakovou kanalizací

D.04 Podélný profil

D.05 Anaerobní separátor – půdorys/řez

D.06 Vypařovací záhon – půdorys

D.07 Vypařovací záhon – vzorový podélný řez

D.08 Vypařovací záhon – vzorový příčný řez

D.09 Akumulační jímka – půdorys/řez

## 8.3 PŘÍLOHA Č.3

### D Dokumentace objektů a technických a technologických zařízení

#### D.1 Dokumentace stavebního nebo inženýrského objektu

##### D.1.1 Architektonicko – stavební řešení

- D.1.16.01 Technická zpráva
- D.1.16.02 Situační výkres stavebního objektu
- D.1.16.03 Vzorový příčný řez uložením gravitačního potrubí
- D.1.16.04 Vzorový příčný řez uložením tlakového potrubí
- D.1.16.05 Podélný profil
- D.1.16.06 Anaerobní separátor a čerpací šachta – půdorys/řezy
- D.1.16.07 Vypařovací záhon D – půdorys
- D.1.16.08 Vypařovací záhon D – drenáž
- D.1.16.09 Vypařovací záhon E – půdorys
- D.1.16.10 Vypařovací záhon E – drenáž
- D.1.16.11 Vypařovací záhon K – půdorys
- D.1.16.12 Vypařovací záhon K – drenáž
- D.1.16.13 Vypařovací záhon – vzorový řez
- D.1.16.14 Akumulační jímka 1 – půdorys/řezy
- D.1.16.15 Akumulační jímka 2 – půdorys/řezy
- D.1.16.16 Technologická nádrž – půdorys/řezy
- D.1.16.17 Vzorové technologické schéma
- D.1.16.18 Výpis tlakového potrubí
- D.1.16.19 Výkres výkopových prací

## 9 BIBLIOGRAFIE

A Multi-Phased Journey. In: *Earth observatory* [online]. Nasa [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water/page2.php>

AKURAJU, Venkata, Dongryeol RYU, Biju GEORGE, Youngryel RYU a Kithsiri DASSANAYAKE, 2017. Seasonal and inter-annual variability of soil moisture stress function in dryland wheat field, Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. **2017**(232), 489-499 [cit. 2023-11-26]. ISSN 0168-1923. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.007)

AMATYA, Devendra, Charles HARRISON a Carl TRETTIN. *Comparison of Potential Evapotranspiration (PET) using Three Methods for a Grass Reference and a Natural Forest in Coastal Plain of South Carolina* [online]. **2014** [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/268628705.pdf>

ANDEREGG, William, Tamir KLEIN, Megan BARTLETT, Lawren SACK, Adam PELLEGRINI, Brendan CHOAT a Steven JANSEN, 2016. Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. **2016**(113) [cit. 2023-05-20]. ISSN 5024– 5029. Dostupné z: [doi:10.1073/pnas.1525678113](https://doi.org/10.1073/pnas.1525678113)

BACHAND, P.A.M., S. BACHAND, J. FLECK, F. ANDERSON a L. WINDHAM-MYERS, 2014. Differentiating transpiration from evaporation in seasonal agricultural wetlands and the link to advective fluxes in the root zone. *Science direct* [online]. **2014**(484) [cit. 2023-03-16]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969713013077>

BAILEY, Regina, 2023. What Is the Function of Plant Stomata?. *ThoughtCo* [online]. **2023** [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/plant-stomata-function-4126012>

BALDOCCHI, Dennis a Josep PENUELAS, 2018. The physics and ecology of mining carbon dioxide from the atmosphere by ecosystems. *Global Change Biology* [online]. **2018**(25), 1191-1197 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1111/gcb.14559](https://doi.org/10.1111/gcb.14559)

BEDNÁŘ, Martin a Daniel MARTON, 2022. Porovnání metod výpočtu potenciální evapotranspirace. In: *Juniorstav 2022: 24. Odborná konference doktorského studia*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, s. 393 - 398. ISBN 978-80-86433-76-9.

BLANEY, Harry F. Evaporation from Water Surfaces in Mountain Areas of Western United States. *International Association of Scientific Hydrology* [online]. **2009**(51), 27-37 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1080/02626666009493161](https://doi.org/10.1080/02626666009493161)

BLANKEN, Peter, Wayne ROUSE, Alistar CULF et al., 2000. Eddy covariance measurements of evaporation from Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada. *Water Resources*

*Research* [online]. **2000**(36), 1069-1077 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1029/1999WR900338>

BOAT BEDINE, Marie, Beatrice IACOMI, Severin TCHAMENI, Modeste SAMEZA a Fabrice FEKAM, 2022. Harnessing the phosphate-solubilizing ability of *Trichoderma* strains to improve plant growth, phosphorus uptake and photosynthetic pigment contents in common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* [online]. **2022**(45) [cit. 2023-07-30]. ISSN 1878-8181. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102510>.

BOIS, Paul, Daniel CHILDERS, Milena WALASZEK a Adrien WANKO, 2021. Plant transpiration in constructed treatment wetland: Effects on water budget and management consequences. *Journal of Environmental Management* [online]. **2021**(295) [cit. 2023-03-12]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721011944>

BOLTON, Naomi, 2018. Why Does Humidity & Wind Speed Affect Evaporation?. In: *Sciencing* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://sciencing.com/do-currents-affect-weather-climate-7735765.html>

BUTLER, J., G. KLUITENBERG, D. WHITTEMORE, S. LOHEIDE, W. JIN, M. BILLINGER a X. ZHAN, 2007. A field investigation of phreatophyte-induced fluctuations in the water table. *Water Resources* [online]. **2007** [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1029/2005WR004627>

CÁNDIDO-MIRELES, Mayra, Regina HERNÁNDEZ-GAMA a Salas JOAQUÍN, 2023. Detecting vineyard plants stress in situ using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. **2023**(210) [cit. 2023-05-20]. ISSN 0168-1699. Dostupné z: doi:[doi:doi.org/10.1016/j.compag.2023.107837](https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107837)

CONDON, L.E., A.L. ATCHLEY a R.M. MAXWELL, 2020. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States. *Nature Communications* [online]. **2020**(11) [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-020-14688-0>

CONDON, Laura a Reed MAXWELL, 2019. Simulating the sensitivity of evapotranspiration and streamflow to large-scale groundwater depletion. *Science Advances* [online]. **2019**(56) [cit. 2023-11-26]. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:DOI: 10.1126/sciadv.aav4574

COOPER, P.J.M., P.J. GREGORY, D. TULLY a H.C. HARRIS, 1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of west Asia and North Africa. *Experimental Agriculture* [online]. **1987**(232), 113-158 [cit. 2023-07-07]. ISSN 00144797. Dostupné z: doi:10.1017/S001447970001694X

CRAMER, M.D., HJ. HAWKINS a G.A. VERBOOM, 2009. The importance of nutritional regulation of plant water flux. *Oecologia* [online]. **2009**(161), 15-24 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1007/s00442-009-1364-3

CUNHA, Fernando, Anunciene DUARTE, Gilberto SEDIYAMA a Paulo CECON, 2018. Calibration methods for the Hargreaves-Samani equation. *Ciência e Agrotecnologia*. **42**(1), 104-114. ISSN 1981-1829. Dostupné z: doi:10.1590/1413-70542018421017517

ČESKÁ REPUBLIKA, 2001. Zákon č. 254/2001 Sb.: Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: *2001* [Online]. ročník 2001, 98/2001, číslo 254 [cit. 27.11.2023]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254>

DIRMEYER, Paul a Kaye BRUBAKER, 2007. Characterization of the Global Hydrologic Cycle from a Back-Trajectory Analysis of Atmospheric Water Vapor. *Journal of Hydrometeorology* [online]. **2007**, 20-37 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1175/JHM557.1>

DIXON, M. a J. GRACE, 1984. Effect of Wind on the Transpiration of Young Trees. *Annals of Botany* [online]. **1984**(53), 811-819 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086751>

DOSS, Paul, 1993. The nature of a dynamic water table in a system of non-tidal, freshwater coastal wetlands. *Journal of Hydrology* [online]. **1993**(141), 107-126 [cit. 2023-03-26]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90046-C](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90046-C).

DRIEVER, Steven, Leon MOSSINK, Diego NUÑEZ OCAÑA a Elias KAISER, 2023. A simple system for phenotyping of plant transpiration and stomatal conductance response to drought. *Plant Science* [online]. **2023**(329) [cit. 2023-05-19]. ISSN 0168-9452. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111626>

DUQUE, Ana, André DE ALMEIDA, Anabela DA SILVA, Jorge DA SILVA, Ana FARINHA, Dulce SANTOS, Pedro FEVEREIRO a Susana DE SOUSA ARAÚJO, 2013. Abiotic Stress Responses in Plants: Unraveling the Complexity of Genes and Networks to Survive. In: *Abiotic Stress - Plant Responses and Applications in Agriculture* [online]. 2013. [cit. 2023-05-20]. ISBN 978-953-51-1024-8. ISBN: 978-953-51-1024-8. Dostupné z: doi:10.5772/52779

DZITIKI, S., K. SCHACHTSCHNEIDER, V. NAIKEN, M. GUSH, G. MOSES a D. LE MAITRE, 2013. Water relations and the effects of clearing invasive Prosopis trees on groundwater in an arid environment in the Northern Cape, South Africa. *Journal of Arid Environments* [online]. **2013**(90) [cit. 2023-03-26]. ISSN 0140-1963. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.015>.

EAGLESSON, Peter S., 1982. Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems: 1. Theory and hypothesis. *Water Resources Research* [online]. **1982**(182), 325-340 [cit. 2023-05-20]. ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/WR018i002p00325

Evaporation and the Water Cycle, 2019. In: *United States Geological Survey* [online]. Reston: United States Geological Survey [cit. 2023-03-14]. Dostupné z:

<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/evaporation-and-water-cycle>

Evapotranspiration and the Water Cycle: What is evapotranspiration?, 2018. In: *United States Geological Survey: Science for a changing world* [online]. Reston: United States Geological Survey [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/evapotranspiration-and-water-cycle>

FENG, Wenpo, Chenxi FENG, Binbin WANG, Aihua JING, Guangda LI, Xichao XIA a Gaofeng LIANG, 2020. An amorphous calcium phosphate for drug delivery: ATP provides a phosphorus source and microwave-assisted hydrothermal synthesis. *Materials Today Communications* [online]. **2020**(25) [cit. 2023-07-30]. ISSN 2352-4928. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101455](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101455).

FILGUEIRAS, Roberto, Thomé ALMEIDA, Everardo MANTOVANI, Santos DIAS, Elpídio FERNANDES-FILHO, Fernando DA CUNHA a Luan PERONI VENANCIO, 2020. Soil water content and actual evapotranspiration predictions using regression algorithms and remote sensing data. *Agricultural Water Management* [online]. **2020**(241) [cit. 2023-11-26]. ISSN 0378-3774. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106346](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106346)

GASTAL, F. a G. BÉLANGER, 1993. *The Effects of Nitrogen Fertilization and the Growing Season on Photosynthesis of Field-grown Tall Fescue (Festuca arundinacea Schreb.) Canopies* [online]. **1993**(725), 401-408 [cit. 2023-07-07]. ISSN 0305-7364. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1125](https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1125).

GERVAIS, M., M. MKHABELA, P. BULLOCK, R. RADDATZ a G. FINLAY, 2011. Comparison of standard and actual crop evapotranspiration estimates derived from different evapotranspiration methods on the Canadian Prairies. *Hydrological Processes* [online]. **2011**(2610), 1467-1477 [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1002/hyp.8279](https://doi.org/10.1002/hyp.8279)

GILLER, K., F. AMIJEE, S. BRODRICK a O. EDJE. Environmental constraints to nodulation and nitrogen fixation of *Phaseolus vulgaris* L. in Tanzania. II. Response to N and P fertilizers and inoculation with *Rhizobium*. *African Crop Science Journal* [online]. **1998**(62), 171-178 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: [doi:10.4314/acsj.v6i2.27813](https://doi.org/10.4314/acsj.v6i2.27813)

GLANVILLE, Katharine, F. SHELDON, D. BUTLER a S. CAPON, 2023. Effects and significance of groundwater for vegetation: A systematic review. *Science of The Total Environment* [online]. 875 [cit. 2023-03-12]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723011932>

GLENN, Edward, Christopher NEALE, Doug HUNSAKER a Pamela NAGLER, 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes* [online].

2011(2526), 4050-4062 [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1002/hyp.8392

GOKOOL, S., E. RIDDELL, A. SWEMMER, J. NIPPERT, R. RAUBENHEIMER a K. CHETTY, 2018. Estimating groundwater contribution to transpiration using satellite-derived evapotranspiration estimates coupled with stable isotope analysis. *Journal of Arid Environments* [online]. 2018(152), 45-54 [cit. 2023-03-26]. ISSN 0140-1963. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.02.002.

GONG, Chengcheng, Wenke WANG, Zaiyong ZHANG, Hao WANG, Jie LUO a Philip BRUNNER, 2020. Comparison of field methods for estimating evaporation from bare soil using lysimeters in a semi-arid area. *Journal of Hydrology* [online]. 2020(590) [cit. 2023-12-06]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125334

GONZALEZ-DUGO, Victoria, Jean-Louis DURAND a Francois GASTAL, 2010. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy for Sustainable Development* [online]. Springer Verlag, 2010(30), 529-544 [cit. 2023-07-07]. ISSN 1773-0155. Dostupné z: doi:10.1051/agro/2009059

GU, Chunjie, Qihong TANG, Gaofeng ZHU et al., 2021. Discrepant responses between evapotranspiration- and transpiration-based ecosystem water use efficiency to interannual precipitation fluctuations. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2021(303) [cit. 2023-05-19]. ISSN 0168-1923. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108385

HERBST, Mathias a Ludger KAPPEN, 1999. The ratio of transpiration versus evaporation in a reed belt as influenced by weather conditions. *Aquatic Botany*. Aquatic Botany, 1999(63), 113-125. ISSN 0304-3770.

HOU, Shugou, Olivier RODRIGUES, Zunyong LIU, Libo SHAN a Ping HE, 2023. Small holes, big impact: Stomata in plant-pathogen-climate epic trifecta. *Molecular Plant* [online]. 2023 [cit. 2023-12-31]. ISSN 1674-2052. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.11.011.

HSIAO, Jih-Ting, Yen-Chou KUAN a Fuu SHEU, 2023. Cold shock treatment delays broccoli flower bud yellowing by repressing the gene expression of glycine-rich RNA-binding protein 2, a senescence-associated protein involved in the regulation of stomata opening. *Postharvest Biology and Technology* [online]. 2023(201) [cit. 2023-05-20]. ISSN 0925-5214. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112367

HSIAO, T.C., E. ACEVEDO, E. FERERES a D.W. HENDERSON, 1976. Stress metabolism - water stress, growth and osmotic adjustment. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B: Biological sciences* [online]. 1976(273), 479-500 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0026

HUNGRIA, Mariangela a Milton VARGAS, 2000. Environmental factors affecting N<sub>2</sub> fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research* [online]. **2000**(652-3), 151-164 [cit. 2023-07-07]. ISSN 0378-4290. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00084-2).

CHEN, Pei-Yuan, 2022. Effects of meteorological variables and substrate moisture on evapotranspiration and thermal performance of a green roof in a subtropical climate. *Ecological Engineering* [online]. **2022**(180) [cit. 2023-03-26]. ISSN 0925-8574. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106663>.

CHOAT, B., S. JANSEN a T. BRODRIPP, 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* [online]. **2012**(491), 752-755 [cit. 2023-05-20]. ISSN 1476-4687. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1038/nature11688>

JANDORA, Jan, Vlastimil STARA a Miloš STARÝ, 2020. *Hydraulika a hydrologie*. Brno. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

JIANG, Fuxiao, Xianhong XIE, Yibing WANG et al., 2022. Vegetation greening intensified transpiration but constrained soil evaporation on the Loess Plateau. *Journal of Hydrology* [online]. **2022**(614) [cit. 2023-03-26]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128514>.

JUNG, Martin, Markus REICHSTEIN, Philippe CIAIS et al., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* [online]. **2010**(467), 951-954 [cit. 2023-11-26]. ISSN 1476-4687. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1038/nature09396>

KELLY, Gilor, Adi YAARAN, Atara GAL et al., 2023. Guard cell activity of PIF4 and HY5 control transpiration. *Plant Science* [online]. **2023**(328) [cit. 2023-04-08]. ISSN 0168-9452. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111583>

KEYS, P., L. WANG-ERLANDSSON a L. GORDON, 2016. Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLoS ONE* [online]. **2016**(1130151993) [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151993>

KLEIN, Tamir, 2014. The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviours. *Functional Ecology* [online]. **2014**(286), 1313-1320 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/1365-2435.12289>

KOVOFINIŠ A.S. Vakuové odpařování. In: KOVOFINIŠ A.S. *AQUADEST vakuové odparky* [online]. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: <https://aquadest.cz/vakuove-odparovani>

KRIŠKA, Michal, 2014. Domovní vegetační ČOV. *TZB info* [online]. Brno, **2014** [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/11260-domovni-vegetacni-cov>

KRIŠKA, Michal a Miroslava NĚMCOVÁ. Kořenové čistírny: Rekapitulace a budoucnost v České republice. *Vodní hospodářství* [online]. Brno [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <http://vodnihospodarstvi.cz/korenove-cistirny/>

KUKAL, Meetpal a Suat IRMAK, 2022. Nocturnal transpiration in field crops: Implications for temporal aggregation and diurnal weighing of vapor pressure deficit. *Agricultural Water Management* [online]. **2022**(266) [cit. 2023-05-20]. ISSN 0378-3774. Dostupné z: [doi:doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107578](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107578)

KUNRATH, Taise, Gilles LEMAIRE, Edmar TEIXEIRA, Hamish BROWN, Ignacio CIAMPITTI a Victor SADRAS, 2020. Allometric relationships between nitrogen uptake and transpiration to untangle interactions between nitrogen supply and drought in maize and sorghum. *European Journal of Agronomy* [online]. **2020**(120), 126-145 [cit. 2023-07-07]. ISSN 1161-0301. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126145](https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126145).

LAMONTAGNE, Sébastien, Peter COOK, Anthony O'GRADY a Derek EAMUS, 2005. Groundwater use by vegetation in a tropical savanna riparian zone (Daly River, Australia). *Journal of Hydrology* [online]. **2005**(310), 280-293 [cit. 2023-03-26]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.009](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.009).

LECOEUR, Jérémie a Lydie GUILIONI, 1998. Rate of leaf production in response to soil water deficits in field pea. *Field Crops Research* [online]. **1998**(573), 319-328 [cit. 2023-05-20]. ISSN 0378-4290. Dostupné z: [doi:doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00076-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00076-8)

LIEBHARD, Gunter, Andreas KLIK, Reinhard NEUGSCHWANDTNER a Reinhard NOLZ, 2022. Effects of tillage systems on soil water distribution, crop development, and evaporation and transpiration rates of soybean. *Agricultural Water Management* [online]. **2022**(269) [cit. 2023-05-19]. ISSN 0378-3774. Dostupné z: [doi:doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107719](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107719)

LIFENG, Zhang, Daniel SCHLAEPFER, Chen ZHIGUANG, Zhao LIANG, Li QI, Gu SONG a William LAUENROTH, 2021. Precipitation and evapotranspiration partitioning on the Three-River Source Region: A comparison between water balance and energy balance models. *Journal of Hydrology: Regional Studies* [online]. **2021**(38) [cit. 2023-04-05]. ISSN 2214-5818. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100936](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100936)

LIU, Bing, Huade GUAN, Wenzhi ZAO, Yuting YANG a Shoubo LI, 2017. *Groundwater facilitated water-use efficiency along a gradient of groundwater depth in arid northwestern China* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.003](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.003).

LIU, Zhaofei, 2022. Estimating land evapotranspiration from potential evapotranspiration constrained by soil water at daily scale: Science of The Total Environment. *Science direct* [online]. Science direct, **2022**(834) [cit. 2023-03-12]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722024202>

LIU, Zhaofei, 2023. Accuracy of methods for simulating daily water surface evaporation evaluated by the eddy covariance measurement at boreal flux sites. *Journal of Hydrology* [online]. **2023**(616) [cit. 2023-04-07]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128776>

LI, Waxin, Harrie-Jan HENDRICKS FRANSSEN, Philip BRUNNER, Zhi LI, Zhoufeng WANG, Yike WANG a Wenke WANG, 2022. The role of soil texture on diurnal and seasonal cycles of potential evaporation over saturated bare soils – Lysimeter studies. *Journal of Hydrology* [online]. **2022**(613) [cit. 2023-12-06]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128194>

LI, Xianyue, Peiling YANG, Haibin SHI, Shumei REN, Yunkai LI, Pingfeng LI a Caiyuan WANG, 2013. The effect of transpiration uncertainty on root zone soil water by Bayesian analysis. *Mathematical and Computer Modelling* [online]. **2013**(583-4), 691-700 [cit. 2023-05-20]. ISSN 0895-7177. Dostupné z: doi:[doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.030](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.030)

MACIEJEWSKI, Kevin, Mathieu GAUTIER, Boram KIM, Philippe MICHEL a Rémy GOURDON, 2022. Effect of trickling filter on carbon and nitrogen removal in vertical flow treatment wetlands: A full-scale investigation, *Journal of Environmental Management*. *Science direct*. Science direct, **2022**, 8. ISSN 0301-4797.

MALÁ, Jitka. *Chemie a technologie vody: Modul M03 - Čištění odpadních vod a zpracování kalů*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

MARTIN-STPAUL, Nicolas, Sylvain DELZON a Hervé COCHARD, 2017. Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. *Ecology Letters* [online]. **2017**(2011), 1437-1447 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/ele.12851>

MAYSONNAVE, Jean, Nicolas DELPIERRE, Christophe FRANCOIS et al., 2022. Contribution of deep soil layers to the transpiration of a temperate deciduous forest: Implications for the modelling of productivity. *Science of The Total Environment* [online]. **2022**(8382) [cit. 2023-05-20]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:[doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155981](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155981)

MCAUSLAND, Lorna, Silvere VIALET-CHABRAND, Philip DAVEY, Neil BAKER, Oliver BRENDEL a Tracy LAWSON, 2016. Effects of kinetics of light-induced stomatal responses on photosynthesis and water-use efficiency. *New Phytologist* [online]. **2016** [cit. 2023-04-08]. ISSN 1209-1220. Dostupné z: doi:[10.1111/nph.14000](https://doi.org/10.1111/nph.14000)

MELLOR, R., F. SALISBURY a K. RASCHKE, 1964. *Leaf temperatures in controlled environments* [online]. 56-72 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/BF01895390>

MERILO, E., I. JÕESAAR, M. BROSCHÉ a H. KOLLIST, 2014. To open or to close: species-specific stomatal responses to simultaneously applied opposing environmental factors. *New Phytologist* [online]. **2014**(202), 499-508 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/nph.12667>

MIRALLES, D., T. HOLMES, R. DE JEU, J. GASH, A. MEESTERS a A. DOLMAN, 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* [online]. **2011**(15), 453-469 [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>, 2011

MONTEITH, J. L., 1965. Evaporation and environment. *Symp Soc Exp Biol.* [online]. **1965**(19), 205-234 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/5321565/>

MOSA, K.A., A. ISMAIL a M. HELMY, 2017. Introduction to Plant Stresses. *Plant Stress Tolerance: SpringerBriefs in Systems Biology.* Springer, Cham. [online]. **2017**, 1-19 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-59379-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59379-1_1)

NAGASE, Ayako a Nigel DUNNETT, 2011. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning* [online]. **2011**(1032), 230-236 [cit. 2023-07-03]. ISSN 0169-2046. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.012>.

NDAKIDEMI, P. a J. SEMOKA. Soil Fertility Survey in Western Usambara Mountains, Northern Tanzania1 1Project supported by the Norwegian Agency for Development Cooperation (NORAD), Tanzania. *Pedosphere* [online]. **2006**, 237-244 [cit. 2023-07-30]. ISSN 1002-0160. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60049-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60049-0).

NIGATU, Zemedu, Dongming FAN, Wei YOU, Assefa MELESSE, Lun PU, Xinchun YANG, Xiangyu WAN a Zhongshan JIANG, 2022. Crop production response to soil moisture and groundwater depletion in the Nile Basin based on multi-source data. *Science of The Total Environment* [online]. **2022**(825) [cit. 2023-05-20]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:[doi:doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154007](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154007)

NILSON, Sarah a Sarah ASSMANN, 2007. The Control of Transpiration. Insights from Arabidopsis. *Plant Physiology* [online]. **2007**(143), 19-27 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: doi:[10.1104/pp.106.093161](https://doi.org/10.1104/pp.106.093161)

O'CARRIGAN, Andrew, Mohammad BABLA, Feifei WANG, Xiaohui LIU, Michelle MAK, Richard THOMAS, Bill BELLOTTI a Zhong-Hua CHEN, 2014. Analysis of gas exchange, stomatal behaviour and micronutrients uncovers dynamic response and adaptation of tomato plants to monochromatic light treatments. *Plant Physiology and Biochemistry* [online]. **2014**(82), 105-115 [cit. 2023-04-08]. ISSN 0981-9428. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.05.012>

OKI, T. a S. KANAE. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* **313** [online]. **2006**, 1068-1072 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1126/science.1128845>

OTTOSEN, Carl-Otto, Leiv MORTENSEN a Hans GISLERØD, 2002. Effect of relative air humidity on gas exchange, stomatal conductance and nutrient uptake in miniature potted roses. *Gartenbauwissenschaft* [online]. **2002**(67) [cit. 2023-05-20]. ISSN 0016-478X.

- Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/286862407\\_Effect\\_of\\_relative\\_air\\_humidity\\_on\\_gas\\_exchange\\_stomatal\\_conductance\\_and\\_nutrient\\_uptake\\_in\\_miniature\\_potted\\_roses](https://www.researchgate.net/publication/286862407_Effect_of_relative_air_humidity_on_gas_exchange_stomatal_conductance_and_nutrient_uptake_in_miniature_potted_roses)
- PATEL, Kumar, Poonam KUMAR JATAV, Rohit JAIN, Swati GUPTA, SL KOTHARI a Sumita KACHHWAHA, 2021. Humidity induced opening of stomata leads to enhanced uptake of copper nanoparticles in *Triticum aestivum* L. *Materials Today: Proceedings* [online]. **2021**(435), 3191-3196 [cit. 2023-05-19]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.712
- PENG, Liqing, Zhenzhong WEI, Anping CHEN, Eric WOOD a Justin SHEFFIELD, 2019. Determinants of the ratio of actual to potential evapotranspiration. *Global Change Biology* [online]. **2019**(254), 1326-1343 [cit. 2024-01-12]. ISSN 1354-1013. Dostupné z: doi:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.14577>
- PETRUZZELLO, Melissa, 2023. Transpiration: Botany. In: *Britannica* [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/transpiration>
- PUJIWATI, Istirochan, Bambang GURITNO, Nurul AINI a Setyaqan SAKTI, 2018. Examining Use of Sonic Bloom Technology on the Stomata Opening of Drought-Stressed Soybean. *Biosciences Biotechnology Research Asia* [online]. **2018**(15), 861-869 [cit. 2023-12-06]. ISSN 2456-2602. Dostupné z: doi:10.13005/bbra/2695
- PUJIWATI, Istirorach, 2014. The Pattern of Stomatal Opening through the Exposure of High-Frequency Sound Wave with the Different Duration and Age of Soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agricultural Science* [online]. **2014**(21), 69-77 [cit. 2023-12-06]. ISSN 2291-448X. Dostupné z: doi:10.12735/as.v2i1p69
- RAY, J.D. a T.R. SINCLAIR, 1998. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. *Journal of Experimental Botany* [online]. **1998**(49325), 1381-1386 [cit. 2023-05-20]. ISSN 00220957. Dostupné z: doi:10.1093/jxb/49.325.1381
- REICHLER, Thomas, ed., 2009. Changes in the Atmospheric Circulation as Indicator of Climate Change. In: LETCHER, Trevor. *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth* [online]. Nizozemsko: Elsevier BV, s. 145 - 164 [cit. 2023-03-26]. ISBN 978-0-444-53301-2. Dostupné z:  
[https://www.inscc.utah.edu/~reichler/publications/papers/Reichler\\_09\\_Widening.pdf](https://www.inscc.utah.edu/~reichler/publications/papers/Reichler_09_Widening.pdf)
- RITCHIE, Joe T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* [online]. **1972**(5), 1204-1213 [cit. 2023-07-07]. ISSN 0043-1397. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>
- ROBERTSON, M.J. a S. FUKAI, 1994. Comparison of water extraction models for grain sorghum under continuous soil drying. *Field Crops Research* [online]. **1994**(362), 145-160

[cit. 2023-05-20]. ISSN 0378-4290. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/0378-4290(94)90063-9

ROSENBERRY, Donald, Thomas WINTER, Donald BUSO a Gene LIKENS, 2007. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology* [online]. **2007**(340), 149-166 [cit. 2023-04-07]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.018

ROTH, Holly a Peter BLANKEN, 2023. Controls and rates of evaporation from a water supply reservoir in the Colorado Front Range. *Journal of Hydrology* [online]. **2023**(617) [cit. 2023-04-07]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129139

SATCHITHANANTHAM, Sanjayan, Henry WILSON a Aaron GLENN, 2017. Contrasting patterns of groundwater evapotranspiration in grass and tree dominated riparian zones of a temperate agricultural catchment. *Journal of Hydrology* [online]. **2017**(549), 654-666 [cit. 2023-03-26]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.016.

SENAY, Gabriel, Stefanie KAGONE a Naga VELPURI, 2020. Operational Global Actual Evapotranspiration: Development, Evaluation, and Dissemination. *Sensors* [online]. **2020**(207) [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.3390/s20071915

SEYED, Hamid, Solgi SHAHIN a Reza ALI, 2019. Quinoa: A super or pseudo-super crop? Evidences from evapotranspiration, root growth, crop coefficients, and water productivity in a hot and semi-arid area under three planting densities. *Agricultural Water Management* [online]. **2019**(225) [cit. 2023-05-19]. ISSN 0378-3774. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105784

SCHYMANSKI, Stanislaus a D. OR, 2015. Wind effects on leaf transpiration challenge the concept of "potential evaporation". *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* [online]. **2015**, 99-107 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: doi:10.5194/piahs-371-99-2015

SINCLAIR, Thomas, Luther HAMMOND a J. HARRISON, 1998. Extractable Soil Water and Transpiration Rate of Soybean on Sandy Soils. *Agronomy Journal* [online]. **1998**(903), 363-368 [cit. 2023-05-20]. ISSN 1435-0645. Dostupné z: doi:doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000030008x

SINCLAIR, Thomas a Russell MUCHOW, Donald L. SPARKS, ed., 1999. Radiation Use Efficiency. *Advances in Agronomy: Academic Press* [online]. **1999**(65), 215-265 [cit. 2023-07-07]. ISSN 0065-2113. ISBN: 9780120007653. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60914-1.

SINCLAIR, Thomas a Whomas RUFTY, 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security* [online]. **2012**(12),

94-98 [cit. 2023-07-07]. ISSN 2211-9124. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.07.001>

STOY, P., T. EL-MADANY, J. FISCHER et al., 2019. Eviews and syntheses: Turning the challenges of partitioning ecosystem evaporation and transpiration into opportunities. *Biogeosciences* [online]. **2019**(16) [cit. 2023-05-19]. ISSN 3747-3775. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.5194/bg-16-3747-2019>, 2019

SUN, Xiangmin, Bradford WILCOX a Chris ZOU, 2019. Evapotranspiration partitioning in dryland ecosystems: A global meta-analysis of in situ studies. *Journal of Hydrology* [online]. **2019**(576), 123-136 [cit. 2023-03-26]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.022>.

ŠKARPA, Pavel, 2022. *Technologie bezodtokových čistíren pro malé producenty odpadních vod*. Brno, 87 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Doc. Ing. Michal Kriška, Ph.D.

TANNER, D. a R. MCCALL, 1983. The source of a problem with rapid-scanning fourier transform spectroscopy. In: *Eighth International Conference on Infrared and Millimeter Waves* [online]. Miami Beach, Florida, USA, s. 1-1 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: doi:[10.1109/IRMM.1983.9126512](https://doi.org/10.1109/IRMM.1983.9126512)

THOMPSON, R.B., M. GUALLARDO, L.C. VYLDEZ a M.D. FERNANDÉZ, 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agricultural Water Management* [online]. **2007**(881-3), 147-158 [cit. 2023-05-20]. ISSN 0378-3774. Dostupné z: doi:[10.1016/j.agwat.2006.10.007](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.007)

THORNTHWAITE, C. W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* [online]. **1948**(1), 55-94 [cit. 2023-10-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2307/210739>

TUINENBURG, O., R. HUTJES a P. KABAT, 2012. The fate of evaporated water from the Ganges basin. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere: Climate and Dynamics* [online]. **2012**(117) [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1029/2011JD016221>

TUINENBURG, O., J. THEEUWEN a A. STAAL, 2020. High-resolution global atmospheric moisture connections from evaporation to precipitation. *Earth Syst. Sci.* [online]. **2020**(12) [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.5194/essd-12-3177-2020>

ÚNMZ, 2017. ČSN 75 6402 - Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel. Květen 2017.

VAN BEEK, L., Yoshihide WADA a Marc BIERKENS, 2011. Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability. *Water Resources Research* [online]. **2011**(477) [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1029/2010WR009791>

VANSTONE, Emma, 2022. INVESTIGATING THE EFFECT OF INCREASING TEMPERATURES ON TRANSPIRATION. *Science-sparks* [online]. 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.science-sparks.com/investigating-the-effect-of-increasing-temperatures-on-transpiration/>

VERMA, Sandhya, Shabab NIZAM a Praveen VERMA, Sandhya VERMA, ed., 2013. Biotic and Abiotic Stress Signaling in Plants. In: SARWAT, Maryam, Altaf AHMAD a MZ ABDIN1. *Stress Signaling in Plants: Genomics and Proteomics Perspective*. 1. Springer. ISBN 978-1-4614-6372-6.

VYBÍRALOVÁ, Pavla. *Hydrobiologie a ekotoxikologie: Modul CC01*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

WANG, Binbin, Yaoming MA, Weiqiang MA a Zhongbo SU, 2017. Physical controls on half-hourly, daily, and monthly turbulent flux and energy budget over a high-altitude small lake on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2017(122), 2289-2303 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1002/2016JD026109](https://doi.org/10.1002/2016JD026109)

WANG-ERLANDSSON, L., I. FETZER, P. KEYS, R. VAN DER ENT, H. SAVENIJE a L. GORDON. Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* [online]. 2018(22) [cit. 2023-04-05]. ISSN 4311-4328. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.5194/hess-22-4311-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-4311-2018)

WANG, Fang-Fang, Hong-Li LIAN, Chun-Ying KANG a Hong-Quan YANG, 2010. Phytochrome B Is Involved in Mediating Red Light-Induced Stomatal Opening in *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant* [online]. 2010(3), 246-259 [cit. 2023-04-08]. ISSN 1674-2052. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1093/mp/ssp097](https://doi.org/10.1093/mp/ssp097)

WANG, Ruizhao, Wanzhong YOU, Tingwu YAN, Jian FENG a Huidong ZHANG, 2021. Nitrogen deposition linked to increased transpiration in Korean larch (*Larix olgensis*) depended on precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* [online]. 2021(123) [cit. 2023-05-19]. ISSN 1474-7065. Dostupné z: [doi:doi.org/10.1016/j.pce.2021.103020](https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103020)

WANG, Shaolei, Siming LI, Baochao HOU et al., 2023. Characterization and comparison of phospholipid fatty acids and molecular species in different animal milk. *Journal of Food Composition and Analysis* [online]. 2023(121) [cit. 2023-07-30]. ISSN 0889-1575. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105420](https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105420).

WANG, Yin, Yizhou WANG, Yanhong TANG a Xin-Guang ZHU, 2022. Stomata conductance as a goalkeeper for increased photosynthetic efficiency. *Current Opinion in Plant Biology* [online]. 2022(70) [cit. 2023-05-20]. ISSN 1369-5266. Dostupné z: [doi:doi.org/10.1016/j.pbi.2022.102310](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2022.102310)

WELLER, Nicholas, Daniel CHILDERS, Laura TURNBULL a Robert UPHAM, 2016. Aridland constructed treatment wetlands I: Macrophyte productivity, community composition, and

nitrogen uptake. *Ecological Engineering* [online]. **2016**(97), 649-657 [cit. 2023-03-26]. ISSN 0925-8574. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.044>.

WIELAND, Fricke, 2019. Night-Time Transpiration – Favouring Growth?. *Trends in Plant Science* [online]. **2019**(24), 311-317 [cit. 2023-05-19]. ISSN 1360-1385. Dostupné z: doi:[doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.007](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.007)

WU, Yuanzhi, Mingbin HUANG a Jacques HALLICHAND, 2011. Transpirational response to water availability for winter wheat as affected by soil textures. *Agricultural Water Management* [online]. **2011**(984), 569-576 [cit. 2023-05-20]. ISSN 0378-3774. Dostupné z: doi:[doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.015](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.015)

YANG, Juan, Chunlian LI, Dexin KONG, Fangyan GUO a Hongbin WEI, 2020. Light-Mediated Signaling and Metabolic Changes Coordinate Stomatal Opening and Closure. *Frontiers in Plant Science* [online]. **2020**(11) [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601478>

ZHENZHEN, Zhang, Tao SICHEN, Zhou BENZHI, Zhang XIAOYAN a Zhao ZHEN, 2021. Plant stomatal conductance determined transpiration and photosynthesis both contribute to the enhanced negative air ion (NAI). *Ecological Indicators* [online]. **2021** [cit. 2023-05-19]. ISSN 1470-160X. Dostupné z: doi:[doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108114](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108114)

ZHU, Shihua, Xia FANG, Liangzhong CAO, Xin HANG, Xiaoping XIE, Liangxiao SUN a Yachun LI, 2023. Multivariate drives and their interactive effects on the ratio of transpiration to evapotranspiration over Central Asia ecosystems. *Ecological Modelling* [online]. **2023**(478) [cit. 2023-03-26]. ISSN 0304-3800. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110294>.

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma bezodtokové likvidace odpadních vod s akumulací upravených odpadních vod, kde: I - Anaerobní separátor, II - Vertikální filtr s vegetací, III - Akumulační jímka, IV – Přítok odpadních vod ze zdroje, V – Cirkulace upravených odpadních vod, VI – Recyklace odpadních vod ke splachování toalet, VII – podzemní vedení NN .....	24
Obrázek 2 Schéma vakuového odpařování (KOVOFINIŠ a.s.) .....	25
Obrázek 3 Evapotranspirace (Evapotranspiration and the Water Cycle, 2018).....	26
Obrázek 4 Rostlinné průduchy (Hou, 2023).....	28
Obrázek 5 Schéma experimentálního modelu 1.....	38
Obrázek 6 Nosná konstrukce laboratorního modelu (6. května 2022) .....	39
Obrázek 7 Nádrž s čerpadlem (vlevo 11., vpravo 12. července 2022) .....	40
Obrázek 8 Trojice paralelních systémů k měření evapotranspirace (29. června 2022) ....	41
Obrázek 9 Pytel zavěšený ve finální poloze (14. září 2022) .....	42
Obrázek 10 Přepážka z pozinkovaného plechu pro oddělení oleje od pytle (14. srpna 2023) .....	43
Obrázek 11 Schéma laboratorního modelu 2, IBC – IBC kontejner zastupující anaerobní separátor a akumulaci jímku, VZ – model vypařovacího záhonu .....	44
Obrázek 12 Model vypařovacího záhonu na výzkumném polygonu UVHK - vlevo před pokosením traviny (2. srpna 2023), vpravo po pokosení traviny (16. června 2023).....	44
Obrázek 13 Kapková závlaha vypařovacího záhonu .....	45
Obrázek 14 Průběh hladin v IBC kontejneru .....	49
Obrázek 15 Průběh hladin v IBC kontejneru po očištění dat o příbytky vody v nádrži.....	50
Obrázek 16 Průměrná denní evapotranspirace jednotlivých měsíců .....	51
Obrázek 17 První lineární regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích.....	53
Obrázek 18 Druhá lineární regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích.....	53
Obrázek 19 První exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích.	54
Obrázek 20 Druhá exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích .....	54
Obrázek 21 První mocinná regrese teploty a evapotranspirace v denních krocích.....	55
Obrázek 22 Druhá mocinná regrese teplot a evapotranspirace v denních krocích .....	55
Obrázek 23 První lineární regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech ..	56
Obrázek 24 Druhá lineární regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech	56

Obrázek 25 První exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	57
Obrázek 26 Druhá exponenciální regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	57
Obrázek 27 První mocninná regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech .....	58
Obrázek 28 Druhá mocninná regrese teploty a evapotranspirace v týdenních průměrech .....	58
Obrázek 29 První lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích.....	60
Obrázek 30 Druhá lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích.....	60
Obrázek 31 První exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích .....	61
Obrázek 32 Druhá exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích .....	61
Obrázek 33 První mocninná regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích.....	62
Obrázek 34 Druhá mocninná regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v denních krocích.....	62
Obrázek 35 První lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech .....	63
Obrázek 36 Druhá lineární regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	63
Obrázek 37 První exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech .....	64
Obrázek 38 Druhá exponenciální regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech .....	64
Obrázek 39 První mocninná regrese délky slunečního svitu a evapotranspirace v týdenních průměrech .....	65
Obrázek 40 Druhá mocninná regrese délky slunečního svitu s evapotranspirací v týdenních průměrech .....	65
Obrázek 41 První lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu s evapotranspirací v denních krocích.....	67

Obrázek 42 Druhá lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu s evapotranspirací v denních krocích.....	67
Obrázek 43 První exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích.....	68
Obrázek 44 Druhá exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích.....	68
Obrázek 45 První mocninná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích.....	69
Obrázek 46 Druhá mocninná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v denních krocích.....	69
Obrázek 47 První lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	70
Obrázek 48 - Druhá lineární regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	70
Obrázek 49 První exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	71
Obrázek 50 Druhá exponenciální regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	71
Obrázek 51 První mocninná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	72
Obrázek 52 Druhá mocninná regrese relativní vlhkosti vzduchu a evapotranspirace v týdenních průměrech.....	72
Obrázek 53 První mocninná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v denních krocích.....	76
Obrázek 54 Druhá mocninná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v denních krocích.....	76
Obrázek 55 První mocninná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech.....	77
Obrázek 56 Druhá mocninná regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Hargreaves - Samani s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech.....	77
Obrázek 57 První exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v denních krocích.....	78
Obrázek 58 Druhá exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v denních krocích.....	78

Obrázek 59 První exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech .....	79
Obrázek 60 První exponenciální regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Turc s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech .....	79
Obrázek 61 První lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v denních krocích .....	80
Obrázek 62 Druhá lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v denních krocích .....	80
Obrázek 63 První lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech .....	81
Obrázek 64 Druhá lineární regrese potenciální evapotranspirace stanovené metodou Thornthwaite s naměřenou evapotranspirací v týdenních průměrech .....	81

## 11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Intervaly referenčních dnů .....	74
--	----

## 12 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

VUT	Vysoké učení technické
UVHK	Ústav vodního hospodářství krajiny
EHS	Evropské hospodářské společenství
ES	Evropské společenství
č.	číslo
Sb.	sbírky
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
NN	nízké napětí
PP	polypropylen
HT	high temperature (vysoká teplota)
PVC	polyvinylchlorid
DREN	drenážní
DN	jmenovitá světlost
UV	ultrafialové
IBC	intermediate bulk container (kontejner pro volné ložené zboží)
VZ	vypařovací záhon
WC	water closet (vodní/splachovací toaleta)
H	výška
N	pořadové číslo dne
ET <sub>s</sub>	skutečná (naměřená) evapotranspirace
$\sigma$	směrodatná odchylka
ET <sub>sd</sub>	skutečná (naměřená) denní evapotranspirace stanovená z denních kroků
T <sub>p</sub>	průměrná denní teplota
R <sup>2</sup>	koeficient determinace
ET <sub>st</sub>	skutečná (naměřená) denní evapotranspirace stanovená z týdenních průměrů
SL <sub>d</sub>	délka slunečního svitu během dne
VL <sub>p</sub>	průměrná denní relativní vlhkost vzduchu
E <sub>p1,i</sub>	potenciální evapotranspirace stanovená metodou Hargreaves – Samani

$E_{p2,i}$  potenciální evapotranspirace stanovená metodou Turc  
 $E_{p3,i}$  potenciální evapotranspirace stanovená metodou Thornthwaite  
Spin-off subjekt, oddělený od mateřského subjektu s vlastní právní subjektivitou  
ConWe, s.r.o. Constructed Wetlands, společnost s ručením omezeným